Министерство образования и науки Российской Федерации

ВЕСТНИК ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Строительство и архитектура

Выпуск 31(50)

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

Часть 2. Строительные науки

Part 2. Constraction sciences

2013

Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroiteľnogo universiteta
Seriya: Stroiteľstvo i arhitektura

(Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering
Series: Civil Engineering and Architecture)

Выходит 4 раза в год

Основан в 1999 г.

Волгоград ВолгГАСУ

С о д е р ж а н и е

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Батдалов М. М.*, *Батдалов Б. М. Принцип создания установки динамических воздействий на модели зданий и сооружений 10

Батдалов М. М., Батдалов Б. М. Экспериментальное исследование способа снижения амплитуды горизонтальных колебаний зданий и сооружений при сейсмических воздействиях 16

Ведяков И. И., Одесский П. Д. Защита от коррозии стальных строительных конструкций цинкованием 20

Емельянов С. Г., Крыгина А. М. К вопросу оценки повреждаемости несущих железобетонных конструкций гидротехнических сооружений 24

Енджиевский Л. В., Тарасов А. В. Конструктивные решения несущих элементов и узлов рамы каркаса здания из стальных тонкостенных профилей 29

Карпенко С. Н., Чепизубов И. Г. Влияние деформативности бетона на оценку прочности муфтовых соединений арматуры в железобетонных конструкциях 35

Киселёв И. Я. Влияние зависимости теплопроводности строительных материалов от температуры на сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий 42

Клюева Н. В., Емельянов С. Г., Колчунов Вл. И. Концептуально-методологические подходы к оценке живучести железобетонных конструкций с учетом физических моделей сопротивления 46

Соколов Б. С.*, *Лизунова Н. С. Анализ результатов экспериментальных исследований сдвиговой податливости штепсельных стыков железобетонных колонн 52

Соколов Б. С., Поздеев В. М., Трошков Е. О. Технико-экономическое обоснование целесообразности использования нового решения узла сопряжения колонн с надколонной плитой в сборных железобетонных безбалочных перекрытиях 58

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Абрамов В. В., Батищев В. В., Ракунов Ю. П. О кинетических закономерностях контактного взаимодействия материалов при деформационном и термодеформационном воздействии 62
Абрамов В. В., Батищев В. В., Ракунов Ю. П. О механо-физико-химических явлениях на границе раздела твердых тел при термодеформационном воздействии 71
Акулова М. В., Исакулов Б. Р. Механохимическая активация и детоксикация промышленных отходов для получения вяжущих легких бетонов 75
Алоян Р. М., Акулова М. В., Ветренко Т. Г., Попов А. В. Влияние структурно-технологических факторов на формирование радиационных свойств строительных материалов гидратационного твердения 81
Баталин Б. С., Красновских М. П. Об утилизации сульфатно-кальциевых шламов переработкой в строительные изделия 87
Бондарев Б. А., Бондарев А. Б., Сапрыкин Р. Ю., Мелешкин М. Ф. Методика расчета конструкций из полимерных композиционных материалов, армированных стеклопластиковой арматурой, на выносливость 91
Бондарев Б. А., Черноусов Р. Н., Бондарев А. Б., Мелешкин М. Ф. Малоцикловая усталость полимерных композиционных материалов (ПКМ) 96
Вавренюк С. В., Ефименко Ю. В. Особенности карбонизации цементных систем в присутствии органических добавок 101
Данилов А. М., Круглова А. Н. Радиационно-защитные композиты на эпоксидном вяжущем: модификация, моделирование, оптимизация структуры и свойств 105
Жерновский И. В., Строкова В. В. К проблеме фазово-размерной гетерогенности минерального сырья как фактора структурообразования строительных материалов 112
Крылов Б. А., Кириченко В. А. Изготовление трехслойных панелей наружных стен для различных зданий с высокими теплоизоляционными свойствами при малых затратах энергоресурсов 119
Леонович С. Н., Полейко Н. Л., Темников Ю. Н., Журавский С. В. Физико-механические свойства бетона с применением системы проникающего действия «Кальматрон» 124
Магдеев У. Х., Пухаренко Ю. В., Морозов В. И., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И. Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры 132
Макридин Н. И., Тараканов О. В., Максимова И. Н., Суров И. А. Фазовый состав и механические свойства модифицированной структуры цементного камня многолетнего твердения 136
Парфенов С. Г., Моргунов М. В. К вопросу влияния степени агрессивности среды на коррозию железобетона 144
Рахимов Р. З., Халиуллин М. И., Гайфуллин А. Р. Композиционное гипсовое вяжущее с добавками извести и керамзитовой пыли 149
Селяев В. П., Низина Т. А., Балбалин А. В. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов 156
Соколова Ю. А., Готлиб Е. М., Соколова А. Г. Полиуретановые композиционные материалы, пластифицированные ЭДОС 164
Соколова Ю. А., Жарин Д. Е., Гумеров А. Ф. Многослойные полимерные композиционные материалы с повышенными виброзвукопоглощающими свойствами в строительстве 168
Строкова В. В., Дмитриева Т. В. Микроструктурные особенности грунтобетонов в присутствии стабилизатора 174
Строкова В. В., Нелюбова В. В., Бондаренко А. И., Кобзев Е. В. Реотехнологические свойства суспензий механоактивированных кварцевых компонентов и композиционных вяжущих на их основе 179
Тотурбиев Б. Д., Тотурбиев А. Б. Карбидкремниевый жаростойкий бетон на полисиликатнатриевом композиционном вяжущем 186
Тухарели В. Д., Акчурин Т. К. Улучшение качества цементных композиций при использовании модифицирующих добавок на основе техногенного органического сырья 193
Федосов С. В., Акулова М. В., Слизнева Т. Е. Особенности структурообразования в мелкозернистом бетоне на механоактивированном водном растворе силиката натрия 199
Черкасов В. Д., Бузулуков В. И., Емельянов А. И., Черкасов Д. В. О химическом модифицировании диатомита и возможности его дальнейшего использования в качестве активной минеральной добавки в цементы 207
Чернышов Е. М., Коротких Д. Н. Феноменология локализованных зон активной диссипации энергии при деформировании и разрушении современных бетонов 212
Ярцев В. П., Воронков А. Г. О влиянии температуры на величину энергии активации полимерных материалов при разрушении и деформировании 223

ОСНОВАНИЯ, ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Бахолдин Б. В., Труфанова Е. В. Обобщение результатов экспериментальных исследований и предложения по расчету свай на горизонтальные нагрузки с учетом их гибкости 227
Богомолов А. Н., Ермаков О. В., Иванов А. С., Богомолова О. А., Прокопенко А. В., Ушаков А. Н. Два подхода к определению сил оползневого давления 233
Богомолов А. Н., Иванов А. С., Богомолова О. А., Прокопенко А. В. Сравнение результатов расчета величины активного давления на ограждение котлована, вызванного собственным весом грунта и равномерно распределенной по его поверхности полосовой нагрузкой 240
Богомолов А. Н., Калиновский С. А., Богомолова О. А., Прокопенко А. В. Коэффициент бокового давления грунта как одна из величин, определяющих несущую способность однородного основания ленточного фундамамента 251
Кашеварова Г. Г., Хусаинов И. И., Маковецкий О. А. Опыт применения струйной цементации для устройства подземных частей комплексов 258
Мангушев Р. А. Буронабивные сваи «Фундекс»: достоинства и недостатки 264
Пономарев А. Б., Захаров А. В. Анализ строительства на техногенных грунтах в г. Перми 272
Рябухин А. К., Маций С. И., Безуглова Е. В. Исследование диапазона допустимых горизонтальных перемещений буронабивных свай противооползневых сооружений 279
Саурин А. Н., Корпач А. И. О некоторых проблемах применения в строительном производстве нетиповых видов искусственных оснований 284
Швецов Г. И., Лебзак В. Н. Влияние осмотического давления на процесс синерезиса 289

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Андреев В. И., Матвеева А. В., Барменкова Е. В. Расчет двухслойной балки на упругом основании с переменным коэффициентом постели 294
Бакиров Р. О. Развитие теоретических и экспериментальных методов динамического расчета и оптимального проектирования железобетонных конструкций подземных сооружений 299
Гордон В. А., Кравцова Э. А. Перераспределение нормальных напряжений по высоте сечения балки при разноуровневом расслоении 303
Гусев Б. В., Файвусович А. С. Математическая модель процессов атмосферной коррозии бетонов с учетом фазовых переходов 308
Зверяев Е. М., Макаров Г. И. Модель оребренной оболочки 326
Зылев В. Б., Алферов И. В. Динамические опорные реакции в мостовой ферме при движении подвижной нагрузки 333
Игнатьев В. А., Игнатьев А. В. Решение плоской задачи теории упругости по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода 337
Карпенко Н. И., Ерышев В. А., Латышева Е. В., Бондаренко А. С. Деформации железобетонного элемента с учетом усадочных деформаций 344
Карпенко Н. И., Карпенко С. Н., Ухатский М. Л. К определению прочности бетона при трехосном растяжении и смешанных напряженных состояниях сжатие — растяжение 358
Карпенко С. Н., Петров А. Н. Модель деформирования железобетона в приращениях и ее приложение к расчету балок-стенок 362
Клованич С. Ф. Вариант теории течения связных грунтов 368
Магдеев У. Х., Морозов В. И., Пухаренко Ю. В., Юй Хуэй. Исследование напряженно-деформированного состояния толстостенного корпуса ядерного реактора из тяжелого армоцемента с использованием численных методов 378
Мигаль Р. Е., Бондаренко В. М. Исследование влияния коррозионных повреждений на сопротивление деформированию железобетона 383
Мурашкин Г. В., Панфилов Д. А., Мурашкин В. Г. Исследование влияния расстояния между трещинами на прогибы изгибаемых железобетонных элементов при кратковременном загружении 388
Петров В. В., Кривошеин И. В. Расчет неоднородных пологих оболочек с двумя видами нелинейности 392
Соколов Б. С., Фатхуллин Л. Р. Исследование напряженно-деформированного состояния кладок из высокопустотных вибропрессованных бетонных блоков 399
Трещев А. А., Делягин М. Ю. Влияние разносопротивляемости, связанности и геометрической нелинейности на НДС сферической оболочки 407
Трещев А. А., Шерешевский М. Б. Исследование НДС прямоугольной в плане оболочки положительной гауссовой кривизны из ортотропных материалов с учетом свойств разносопротивляемости 414
Федоров В. С., Граминовский Н. А. Термосиловое деформирование бетона под нагрузкой 422

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

Бочаров Ю. П., Петрович М. Л., Баранов А. С. Целесообразность создания интермодальных транспортных систем 425
Бочаров Ю. П., Петрович М. Л., Баранов А. С. Ранжирование транспортно-пересадочных узлов городской интермодальной транспортной системы 430
Комов В. М., Кадушкин В. А. Программное моделирование дорожных одежд сельскохозяйственного назначения, армированных синтетическими решетками 437
Котлов В. Г., Салихов М. Г., Веюков Е. В., Железнова Т. В., Вайнштейн Е. В. О применении в щебеночно-мастичных асфальтобетонах для покрытий улиц асфальтогранулятов холодного фрезерования 441
Лютенко А. О., Лебедев М. С., Строкова В. В. Анализ отходов горной добычи как потенциального источника сырья для производства дорожно-строительных материалов 445
Стрельников А. И. Агломерационное транспортное изучение Подмосковья 450
Тер-Восканян О. Ш. Автопарковочные структуры в городе: от прошлого к настоящему 453

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

Аверьянов В. К., Толмачев В. Н., Тютюнников А. И., Михайлов А. Г., Журавский М. А., Мележик А. А. Энергоснабжение малых населенных пунктов. Направления устойчивого развития 459
Гагарин В. Г., Козлов В. В. О нормировании теплозащиты и требованиях расхода энергии на отопление и вентиляцию в проекте актуализированной редакции СНиП «Тепловая защита зданий» 468
Езерский В. А., Монастырев П. В., Клычников Р. Ю. Имитационная модель оптимизации параметров термомодернизации жилых зданий в масштабе города 475
Еремкин А. И., Зиганшин М. Г., Беляева Г. И., Гимранов И. Р. Разработка и инновационный менеджмент очистных технологий систем газоснабжения 485
Земцов В. А., Гагарина Е. В. Методические принципы обеспечения нормированного регламента по естественному освещению на примере общеобразовательных школ 492
Мензелинцева Н. В., ***Азаров В. Н.***, ***Карапузова Н. Ю.***, ***Фомина Е. О.***, ***Гладков Е. В.*** Особенности аспирации технологического оборудования предприятий по производству цемента 499

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

Аббасов П. А., Петрашень А. С. Расчет ливневых стоков во время тайфунов на примере города Владивостока и Приморского края 503
Губанов Л. Н., Бояркин Д. В. Особенности обезвреживания осадков сточных вод малых населенных пунктов 508
Кофф Г. Л. Методика оценки риска цунами на городских территориях (на примере городов и населенных пунктов Дальневосточного федерального округа РФ) 512
Павлинова И. И., Крупский А. С. Совершенствование очистки сточных вод от избыточных соединений фосфора с использованием биотехнологических приемов 519

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Вавилов А. В. Реализация перспективных технологий строительства путем применения эффективной техники 524
Головнев С. Г. Зимнее бетонирование: этапы становления и развития 529
Суэтина Т. А., ***Наназашвили И. Х.***, ***Плешивцев А. А.*** Организация строительства экологичных быстровозводимых зданий 535

ИННОВАЦИИ В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Галустов К. З. Современные проблемы энергетики и пути их решения (посвящается памяти армянского ученого Д. Б. Давидяна) 540
Табунщиков Ю. А., ***Миллер Ю. В.*** Принципы определения годового энергопотребления на климатизацию зданий 549

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И АРХИТЕКТУРЕ

Белов В. В., Образцов И. В. Оптимизация структуры мелкозернистого карбонатного бетона с применением компьютерного моделирования 555

Белов В. В., Петропавловская В. Б., Полеонова Ю. Ю., Образцов И. В. Получение высокопрочных безобжиговых гипсовых материалов на основе техногенных отходов с применением математического и компьютерного моделирования состава сырьевой смеси 563
Доценко А. И., Соколов А. А. Принципы управления температурой асфальтобетонной смеси при строительстве автомобильных дорог 571
Санжапов Б. Х., Садовникова Н. П. Поддержка принятия решений при планировании развития городских территорий на основе экосистемного подхода 577

НАШИ АВТОРЫ 585

Contents

CONSTRUCTION DESIGNS, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS

Batdalov M. M., Batdalov B. M. Principle of creation of dynamic loading system in buildings and constructions 10

Batdalov M. M., Batdalov B. M. Pilot research of the method to reduce the amplitude of horizontal vibration of buildings and constructions under seismic load 16

Vedyakov I. I., Odesskiy P. D. Corrosion protection of steel building constructions by zincing 20

Emelyanov S. G., Krygina A. M. Evaluation of damageability of main load-bearing structures of hydrotechnical buildings 24

Endzhievskiy L. V., Tarasov A. V. Constructive decision on load-currying and frame units of a building with steel slender section 29

Karpenko S. N., Chepizubov I. G. Influence of concrete strain capacity on the assessment of strength of steel muff joints in reinforced concrete constructions 35

Kiselyov I. Ya. Influence of temperature dependence of heat conduction of construction materials on resistance to heat transmission of building envelope 42

Klyueva N. V., Emelyanov S. G., Kolchunov Vl. I. Conceptual and methodological approaches to assessment of liveness of reinforced concrete constructions taking into account physical model of resistance 46

Sokolov B. S., Lizunova N. S. Analysis of the results of experimental researches of shearing flexibility of plug joint of reinforced columns 52

Sokolov B. S., Pozdeev V. M., Troshkov E. O. Feasibility study of practicality of using new column and slab connection in prefabricated reinforced concrete frameworks 58

BUILDING MATERIALS AND ARTICLES

Abramov V. V., Batishchev V. V., Rakunov Yu. P. Dynamic mechanisms of contact interaction of materials under straining and thermal straining impact 62

Abramov V. V., Batishchev V. V., Rakunov Yu. P. Mechanical, physical and chemical phenomenon on the border of separation of solid bodies under thermal straining impact 71

Akulova M. V., Isakulov B. R. Mechanochemical activation and detoxication of industrial wastes for production of binders of lightweight concrete 75

Aloyan R. M., Akulova M. V., Vetrenko T. G., Popov A. V. Influence of structural and technological factors on formation of radiative properties of construction materials of aquatic maturing 81

Batalin B. S., Krasnovskikh M. P. Calcic sulphate sludge disposal by recycling into construction units 87

Bondarev B. A., Bondarev A. B., Saprykin R. Yu., Meleshkin M. F. Methodology of fatigue calculation of constructions made of polymeric composite material with glass-reinforced plastic bar 91

Bondarev B. A., Chernousov R. N., Bondarev A. B., Meleshkin M. F. Low-cycle fatigue of polymeric composite materials (PCM) 96

Vavrenyuk S. V., Efimenko Yu. V. Peculiarities of carbonation of cement systems with organic additives 101

Danilov A. M., Kruglova A. N. Radiation-protective epoxy binder composites: modification, modeling, structure and properties optimization 105

Zhernovskiy I. V., Strokova V. V. Problem of phase-dimentional heterogeneity of mineral raw materials as the factor of construction materials structuring 112

Krylov B. A., Kirichenko V. A. Manufacturing of triple-layer panels of outer walls for different buildings with high heat-insulation properties and low energy consumption 119

Leonovich S. N., Poleyko N. L., Temnikov Yu. N., Zhuravskiy S. V. Physico-mathematical properties of concrete with application of “Kalmatron” system 124

Magdeev U. Kh., Pukharenko Yu. V., Morozov V. I., Panteleev D. A., Zhavoronkov M. I. Investigation of properties of steel fiber concrete based on amorphus metal fiber 132

Makridin N. I., Tarakanov O. V., Maksimova I. N., Surov I. A. Phase composition and mechanical properties of modified structure of concrete stone of long-term solidifying 136

Parfenov S. G., Morgunov M. V. Influence of corrosive power level on reinforced concrete corrosion 144

Rakhimov R. Z., Khaliullin M. I., Gayfullin A. R. Composite gypsum binders with lime additives and haydite dust 149

Selyaev V. P., Nizina T. A., Balbalin A. V. Multifunctional modifiers of concrete composites based on mineral additives and polycarboxylate plasticizers 156

Sokolova Yu. A., Gotlib E. M., Sokolova A. G. Polyurethane composite materials, plasticise EDOS 164

Sokolova Yu. A., Zharin D. E., Gumerov A. F. Multilayer polymeric composite construction materials with high vibro-acoustic properties 168

Strokova V. V., Dmitrieva T. V. Microstructural peculiarities of soil-concrete in the presence of stabilizer 174

Strokova V. V., Nelyubova V. V., Bondarenko A. I., Kobzev E. V. Rheological and technological properties of suspensions of mechanically active quartz components and composite binds on their basis 179
Toturbiev B. D., Toturbiev A. B. Silicic-carbide refractory concrete based on sodium polysilicate composite binder 186
Tukhareli V. D., Akruchin T. K. Quality improvement of cement composites using modified additives based on technogenic organic raw material 193
Fedosov S. V., Akulova M. V., Slizneva T. E. Peculiarities of structuring in fine grain concrete on mechanically active aqua solution of sodium silicate 199
Cherkasov V. D., Buzulukov V. I., Emelyanov A. I., Cherkasov D. V. Chemical modification of diatomite and possibility of its further use as active mineral additive to concrete 207
Chernyshov E. M., Korotkikh D. N. Phenomenal localized areas of active energy dissipation in modern concrete strain and cracking 212
Yartsev V. P., Voronkov A. G. Influence of temperature on the range of energy of polymeric material activation under desctruction and strain 223

BASEMENTS, FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES

Bakholdin B. V., Trufanova E. V. Summery of the results of experimantal research and suggestions on calculation of laterally loaded piles taking into account their flexibility 227
Bogomolov A. N., Ermakov O. V., Ivanov A. S., Bogomolova O. A., Prokopenko A. V., Ushakov A. N. Two approaches to determine landslide pressure strenght 233
Bogomolov A. N., Ivanov A. S., Bogomolova O. A., Prokopenko A. V. The comparison of the results of calculation of active pressure on pit fence caused by the own soil weight and strip load equally spread on its surface 240
Bogomolov A. N., Kalinovskiy S. A., Bogomolova O. A., Prokopenko A. V. Coefficient of lateral earth pressure as one of values that determine bearing capacity of entire base of strip foundation 251
Kashevarova G. G., Khusainov I. I., Makovetskiy O. A. The experience of using jet grouting for arrangement of sunstructures 258
Mangushev R. A. "Fundex" bored piles: advantages and disadvantages 264
Ponomarev A. B., Zakharov A. V. Analysis of construction on industrial soil in Perm 272
Ryabukhin A. K., Matsiy S. I., Bezuglova E. V. Investigation of range of allowable horizontal displacement of bored piles of landslide stability constructions 279
Saurin A. N., Korpach A. I. Some problems connected with the use of non-typical artificial beds in construction 284
Shvetsov G. I., Lebzak V. N. Influence of osmotic pressure on weep process 289

STRUCTURAL MECHANICS

Andreev V. I., Matveeva A. V., Barmenkova E. V. Calculation of double-layer beam on elastic foundation with variable coefficient of soil reaction 294
Bakirov R. O. Development of theoretical and experimental methods of dynamic calculation and optimum design of ferroconcrete constructions of subterranean facilities 299
Gordon V. A., Kravtsova E. A. Rearrangement of normal stress on beam depth at split-level segregation 303
Gusev B. V., Fayvusovich A. S. Mathematical model of concrete atmospheric corrosion processes taking into account phase transfer 308
Zveryaev E. M., Makarov G. I. Model of web reinforced shell 326
Zylev V. B., Alferov I. V. Dynamic bearing reaction in bridge beam under movement of rolling load 333
Ignatev V. A., Ignatev A. V. Plane problem solution of elasticity theory by the finite element method in the form of classical mixed method 337
Karpenko N. I., Eryshev V. A., Latysheva E. V., Bondarenko A. S. Deformation of reinforced concrete element taking into account shrinkage deformations 344
Karpenko N. I., Karpenko S. N., Ukhatskiy M. L. Determination of concrete strength under triaxial tension and combined stressed state shrinkage — stretching 358
Karpenko S. N., Petrov A. N. The model of reinforcet concrete creep in additions and its application to the calculation of deep beam 362
Klovanich S. F. Vertion of the theory of binder soil flow 368
Magdeev U. Kh., Morozov V. I., Pukharenko Yu. V., Yuy Khuey. Research of stressed and strained state of thick-wall body of nuclear reactor from heavy ferrocement using numerical methods 378
Migal R. E., Bondarenko V. M. Investigation of influence of corrosive affections on reinforced concrete resistance to deformation 383
Murashkin G. V., Panfilov D. A., Murashkin V. G. Investigation of influence of the gap between cracks on deflexion of bending reinforced concrete elements at short-term dipping 388
Petrov V. V., Krivoshein I. V. Assessment of nonhomogeneous shallow shell with two types of nonlinearity 392

Sokolov B. S., Fatkhullin L. R. Research of stress and strain state of concrete high hollow vibro-pressed masonry 399
Treshchev A. A., Delyagin M. Yu. Influence of different resistance, connectedness and geometric nonlinearity on the stress-atrain state of spherical shell 407
Treshchev A. A., Shereshevskiy M. B. Investigation of strain-stress state of rectangular in plan shell with positive gauss curvature made of orthotropic material taking into account different resistant properties 414
Fedorov V. S., Graminovskiy N. A. Thermal power strain of concrete under load 422

DESIGN, CONSTRUCTION AND MAINTENANCE OF HIGHWAYS, SUBWAYS, AERODROMES, BRIDGES AND TRAFFIC TUNNELS

Bocharov Yu. P., Petrovich M. L., Baranov A. S. Rationality of intermodal transport systems development 425
Bocharov Yu. P., Petrovich M. L., Baranov A. S. Ranging of intermodal hubs of city intermodal transport system 430
Komov V. M., Kadushkin V. A. Software modeling of road surfacing reinforced by synthetic grills used in agricultural 437
Kotlov V. G., Salikhov M. G., Veyukov E. V., Zheleznova T. V., Vainshtein E. V. Use of chip-mastic asphalt concrete for finishing of street granular asphalt of colf trimming 441
Lyutenko A. O., Lebedev M. S., Strokova V. V. Analysis of mining wastes as potential source of raw material for road construction 445
Strelnikov A. I. Agglomerative transport research of Moscow agglomeration 450
Ter-Voskanyan O. Sh. Car parking structures in a city: from the past to the present 453

HEAT SUPPLY, VENTILATION, AIR CONDITIONING, GAS SUPPLY AND ILLUMINATION

Averyanov V. K., Tolmachev V. N., Tyutyunnikov A. I., Mikhaylov A. G., Zhuravskiy M. A., Melezhik A. A. Power supply of small communities. Ways of stable development 459
Gagarin V. G., Kozlov V. V. Standartization of thermal protection and requirements to enegry consumption and ventilation in the project of actual revision of SNiP “Thermal protection of buildings” 468
Ezerskiy V. A., Monastyrev P. V., Klychnikov R. Yu. Simulation model of optimization of thermal modernization parameters of residential building in cities 475
Eremkin A. I., Ziganshin M. G., Belyaeva G. I., Gimranov I. R. Development and innovative management of cleaning technology of gas supply systems 485
Zemtsov V. A., Gagarina E. V. Methodic principles of providing normalize regulations on natural lighting by the example of comprehensive schools 492
Menzelintseva N. V., Azarov V. N., Karapuzova N. Yu., Fomina E. O., Gladkov E. V. Peculiarities of aspiration of production equipment at enterprises manufacturing cement 499

WATER SUPPLY, SEWERAGE, CONSTRUCTIONS FOR WATER RESOURCES PROTECTION

Abbasov P. A., Petrashen A. S. Assessment of rain run-offs during typhoon by the example of Vladivostok and Primorsky kray 503
Gubanov L. N., Boyarkin D. V. Peculiarities of neutralization sewage sludge in small settlements 508
Koff G. L. Evaluation method of tsunami risk on urban territories (by the example of the cities and settlements in Far East federal district of the Russian Federation) 512
Pavlinova I. I., Krupskiy A. S. Upgrading of sewage treatment from odd phosphorus compound using biotechnological method 519

TECHNOLOGY AND CONTROL IN CONSTRUCTION

Vavilov A. V. Realization of perspective construction technologies using effective equipment 524
Golovnev S. G. Winter concreting: stages of development 529
Suetina T. A., Nanazashvili I. Kh., Pleshivtsev A. A. Organization of construction of high-quick-mounted buildings 535

INNOVATIONS IN CONSTRUCTION PRODUCTION, THE INTENSIFICATION, ENERGY SAVING AND ENERGY EFFICIENCY

Galustov K. Z. Power industry problems and their solutions (devoted to Armenian scientist D. B. Davidyan) 540
Tabunshchikov Yu. A., Miller Yu. V. Principles of determination of annual power consumption for climatization of a building 549

INFORMATION TECHNOLOGY IN CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Belov V. V., Obraztsov I. V. Optimization of fine carbonade concrete structure using computer modeling 555
Belov V. V., Petropavlovskaya V. B., Poleonova Yu. Yu., Obraztsov I. V. Creation of high-tenacity nonfired gypsum material based on technogenic wastes using mathematical and computer modeling of raw mixture composition 563
Dotsenko A. I., Sokolov A. A. Principles of management of road concrete mix temperature at road construction 571
Sanzhapov B. Kh., Sadovnikova N. P. Decision suppoprt system at planning the development of city territories on the basis of ecosystem approach 577

OUR AUTHORS 585

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

УДК.699.841

М. М. Батдалов, Б. М. Батдалов

ПРИНЦИП СОЗДАНИЯ УСТАНОВКИ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА МОДЕЛИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Анализ работы существующих установок для испытания на динамические воздействия моделей различных типов зданий и сооружений позволяет сделать вывод, что на сегодняшний день имеются установки, позволяющие проводить испытания моделей только на отдельные виды воздействий. Учитывая, что воздействие высокоскоростных тел сопровождается еще и воздействием взрывчатых веществ, модели подвергаются уже комплексному воздействию, в том числе и типа сейсмических. Авторами предлагается установка, позволяющая проводить испытания моделей именно на комплексные воздействия.

К л ю ч е в ы е с л о в а: взрывчатые вещества, высокоскоростное тело, снаряд с начинкой, модели зданий и сооружений, установка.

The analysis of operation of existing systems to test dynamic loading on models of different buildings and constructions allows make a conclusion that at present there are systems allowing test models only for certain types of influences. Taking into account the fact that the influence of high-speed bodies is accompanied also by influence of explosive substances, the models are subjected to complex influence, including seismic one. The authors offer system that allows test models for complex influences.

K e y w o r d s: explosive substances, high-speed body, shell with stuffing, model of buildings and constructions, system.

Динамические нагрузки на модели обычно создаются следующими способами: за счет воздействия снаряда-пули (боеприпаса стрелкового оружия). При этом снаряд оказывает на модель проникающее или пробивающее действие (типа действия осколка мин при терактах) за счет взрыва взрывчатого вещества (аммонита, гексогена или др.), создающего взрывную ударную волну, перемещающуюся в цилиндре, устанавливаемом перед моделью. Существует достаточно большое количество способов и установок по созданию ударных и взрывных воздействий на модели [1—15].

Основной целью проведения испытаний моделей на скоростные динамические воздействия являются:

выявление характера разрушений материала конструкции; самой конструкции (модели); в целом модели при динамическом воздействии на нее нагрузок типа террористического акта взрывом ВВ и действием осколочного фугасного характера;

разработка новых типов конструкций, работающих в условиях скоростного воздействия динамических нагрузок (типа скоростного воздействия взрывной ударной волны и скоростного удара снаряда или осколков на сооружение);

разработка новых типов узлов крепления элементов сооружений для восприятия указанных выше нагрузок и сейсмических воздействий;

разработка основ инженерных методов расчетов конструкций и сооружений на скоростные динамические воздействия.

Авторами предлагается установка, главным элементом которой является съемная дверь, в одном случае на нее крепится стрелковое оружие (духовое или охотничье оружие, автомат Калашникова, пистолет Макарова), а в другом случае с внутренней стороны двери монтируется цилиндр с закрытым куполом с одной стороны и открытым с другой стороны. В цилиндре закрепляется ВВ. В обоих случаях съемная дверь прикрепляется к корпусу шестью болтами М10 на пружинах.

Дверь устанавливается на катки. Внутри установки монтируются рамы, на которые закрепляются (защемляются) или устанавливаются свободно на катках испытуемые модели. Защемляя опытные образцы на раму разными способами, моделируем расчетные схемы работы конструкций в виде моделей (пустотелый куб со стенками и покрытием, объемная рама с различными узлами соединения элементов друг с другом и др.). Эти модели в основном испытываются на воздействие взрывной ударной волны. Возможна установка ВВ и взрыв его внутри модели. В этом случае взрыв моделируется как взрыв в закрытом помещении. Рамы, на которые закрепляются или устанавливаются модели, могут перемещаться на катках.

Для моделирования поведения зданий и сооружений и разработки новых способов восприятия воздействий типа сейсмических предусматривается устройство энергопоглощающих элементов. Это позволяет определить величину части энергии, которая будет затрачена не только на разрушение модели, но и на ее сдвиг. Рассчитав массу рамы и массу фрагмента и измерив величину перемещения, можно определить энергию, затраченную на это. Изменяя величину заряда или меняя расстояние между ВВ и моделью можно добиваться или полного разрушения модели, или полного поглощения энергии за счет перемещения ее на соответствующее расстояние. В установке возможно монтирование подвижной рамы с фрагментами еще и на другую подвижную (на катках) раму. Кроме измерения величин перемещений испытуемых фрагментов в установке предусмотрены возможности измерения скорости входа боеприпаса в испытуемую среду и выхода ее из данной среды, что позволяет разрабатывать эффективные энергоемкие материалы для защитных конструкций.

Для обеспечения безопасности при проведении испытаний фрагментов на действие взрывной ударной волны за счет взрыва ВВ в установке предусматривается использование вместо ВВ высококачественного пороха. Для усиления создаваемой при взрыве ударной волны возможен и вариант крепления конусообразной насадки на дуло ствола ружья. Для измерения ряда параметров (скорости движения снаряда, величины перемещения как отдельных моделей, так и всей системы, фотографирования характера разрушения моделей) при испытаниях в установке намечены окошки. При взрыве возможно перемещение взрывной камеры за счет отражения и разрежения после прохода ударной волны.

Необходимо отметить, что наибольшие затруднения связаны с измерением скорости движения снаряда.

На рис. 1—4 приведены соответствующие чертежи установки. Ниже в таблице приведена экспликация деталей установки. Полагаем, что представленная экспериментальная установка вполне отвечает сегодняшним требованиям и экономически выпускать и реализовывать ее целесообразно, в том числе и за рубеж.

Авторами для аргументации важности исследований по совершенствованию существующих методов расчета конструкций зданий и сооружений на действие скоростных динамических нагрузок (действие снарядов с начинкой ВВ) прилагается ряд фотографий из города Грозного (рис. 5—8), где здания и сооружения разрушены такого характера воздействием.

В результате анализа характера разрушений установлено, что эта проблема не решена и требует глубоких исследований и проработки работы конструкций при таких сложных воздействиях.

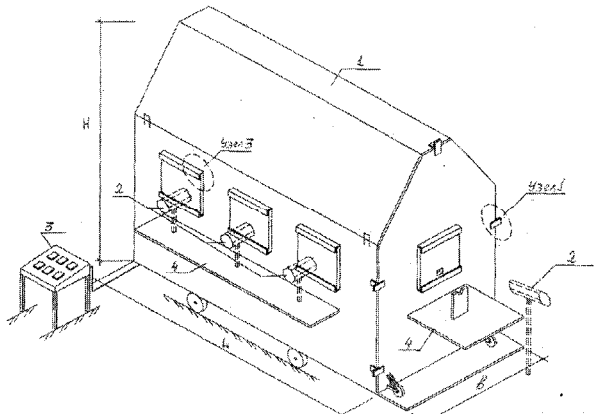


Рис. 1. Общий внешний вид установки с измерительным комплексом: *1* — корпус установки (*L*=250 см, *b*=150 см, *H*=220 см); *2* — кинокамеры; *3* — приборный отсек; *4* — столики для установки оборудования

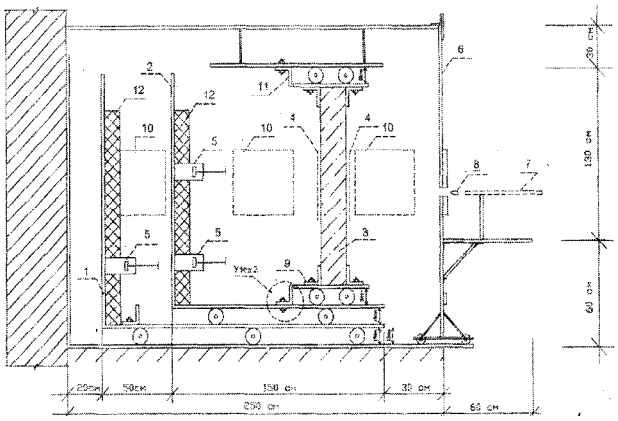


Рис. 2. Продольный разрез установки: *1* — подвижная рама; *2* — внутренняя подвижная рама; *3* — испытуемый образец; *4* — фотодатчики для регистрации времени; *5* — электромагнитные датчики перемещений; *6* — передвижная дверь; *7* — стрелковое оружие; *8* — снаряд; *9* — крепежные устройства для закрепления экспериментального образца; *10* — окна для телекамер; *11* — ограничитель перемещений образца; *12* — ловитель (стекловата *l*=10 см)

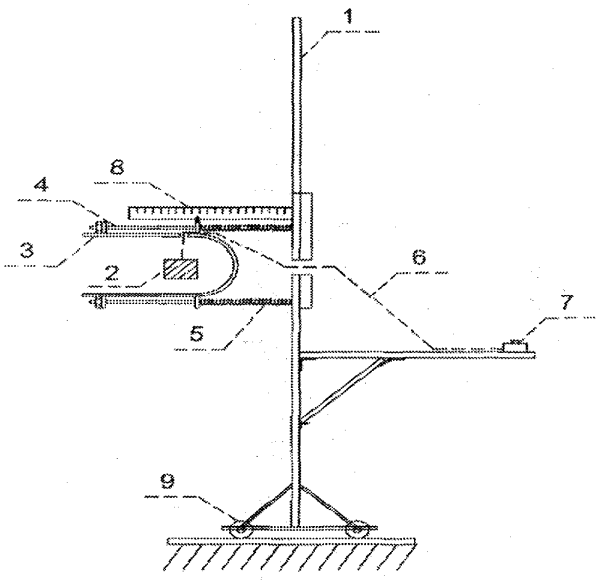


Рис. 3. Переставная дверь с взрывной камерой: *1* — стенка двери; *2* — заряд вес, 25...50 г; *3* — цилиндр; *4* — штыри для крепления цилиндра к двери; *5* — пружины; *6* — электрошнур для заряда; *7* — кнопка взрыва; *8* — измеритель перемещения цилиндра; *9* — катки

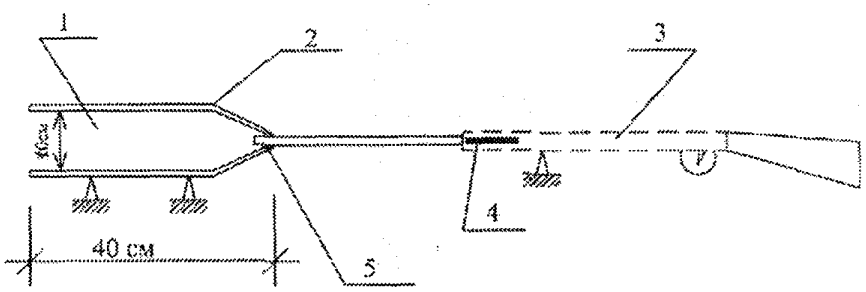


Рис. 4. Устройство по созданию взрывной ударной волны пороховым зарядом: *1* — камера для создания взрывной ударной волны; *2* — цилиндр, где формируется ударная волна; *3* — охотничье ружье калибра 22 с укороченным стволом; *4* — пороховой заряд; *5* — резиновые прокладки

Рис. 5. Характер разрушения конструкций многоэтажного здания при действии высокоскоростных тел с начинкой

Рис. 6. Характер разрушения четырехэтажного углового здания при действии высокоскоростных тел с начинкой

Рис. 7. Характер разрушения железобетонных конструкций здания при воздействии ударных и взрывных волн

Рис. 8. Характер разрушения железобетонных конструкций при воздействии ударных, взрывных волн

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Взрывобезопасность и огнестойкость в строительстве / под ред. Н. А. Стрельчука. М. : СИ, 1970. 127 с.

2. *Майборода В. П., Кравчук А. С., Холин Н. Н.* Скоростное деформирование конструкционных материалов. М. : Машиностроение, 1986. 264 с.

3. Руководство к лабораторным занятиям по физике / под ред. Л. Л. Гольдина. М. : Наука, 1964. 597 с.

4. Лабораторный практикум по физике / под ред. А. С. Ахматова. М. : Высш. шк., 1980. 360 с.

5. Высокоскоростные ударные явления / пер. с англ. под ред. В. Н. Николаевского. М. : Мир, 1973. 534 с.

6. *Grozier W. D., Hume W.* Appl. Phys., 28, 892 (1957).
7. *Chapman R. L.* Symp Hypervelocity Impact, 7th, Tampa, Florida, Now. 1964.
8. *Baer P. G.*, Symp. Hypervelocity Impact, 4th, Eglin AFB, Florida, Apr., 1960.
9. *Mocre E. T.*, Symp. Hypervelocity Technigues, 4th, Tullahema, Tenessee. Nov. 1965.
10. *Светлов Б. Я., Яременко Н. Е.* Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. М. : Недра, 1966. 232 с.
11. Инженерные методы исследования ударных процессов / Г. С. Батуев, Ю. В. Голубков, А. К. Ефремов, А. А. Федосов. М. : Машиностроение, 1977. 240 с.
12. *Майборода В. П., Кравчук А. С., Холин Н. Н.* Скоростное деформирование конструкционных материалов. М. : Машиностроение, 1986. 264 с.
13. *Афонин В. Г., Гейман Л. М., Комир В. М.* Взрывные работы в строительстве. Киев : Будивельник, 1971. 176 с.
14. *Кутузов Б. Н.* Взрывное и механическое разрушение горных пород. М. : Недра, 1973. 312 с.
15. *Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И.* Промышленные взрывчатые вещества. М. : Недра, 1982. 328 с.

1. Vzryvobezopasnost' i ognestoykost' v stroitel'stve / pod red. N. A. Strel'chuka. M. : SI, 1970. 127 s.
2. *Mayboroda V. P., Kravchuk A. S., Kholin N. N.* Skorostnoe deformirovanie konstruktsionnykh materialov. M. : Mashinostroenie, 1986. 264 s.
3. Rukovodstvo k laboratornym zanyatiyam po fizike / pod red. L. L. Gol'dina. M. : Nauka, 1964. 597 s.
4. Laboratornyy praktikum po fizike / pod red. A. S. Akhmatova. M. : Vyssh. shk., 1980. 360 s.
5. Vysokoskorostnye udarnye yavleniya / per. s angl. pod red. V. N. Nikolaevskogo. M. : Mir, 1973. 534 s.
6. *Grozier W. D., Hume W.* Appl. Phys., 28, 892 (1957).
7. *Chapman R. L.* Symp Hypervelocity Impact, 7th, Tampa, Florida, Now. 1964.
8. *Baer P. G., Symp.* Hypervelocity Impact, 4th, Eglin AFB, Florida, Apr., 1960.
9. *Mocre E. T., Symp.* Hypervelocity Technigues, 4th, Tullahema, Tenessee. Nov. 1965.
10. *Svetlov B. Ya., Yaremenko N. E.* Teoriya i svoystva promyshlennykh vzryvchatykh veshchestv. M. : Nedra, 1966. 232 s.
11. Inzhenernye metody issledovaniya udarnykh protsessov / G. S. Batuev, Yu. V. Golubkov, A. K. Efremov, A. A. Fedosov. M. : Mashinostroenie, 1977. 240 s.
12. *Mayboroda V. P., Kravchuk A. S., Kholin N. N.* Skorostnoe deformirovanie konstruktsionnykh materialov. M. : Mashinostroenie, 1986. 264 s.
13. *Afonin V. G., Geyman L. M., Komir V. M.* Vzryvnye raboty v stroitel'stve. Kiev : Budivel'nik, 1971. 176 s.
14. *Kutuzov B. N.* Vzryvnoe i mekhanicheskoe razrushenie gornykh porod. M. : Nedra, 1973. 312 s.
15. *Dubnov L. V., Bakharevich N. S., Romanov A. I.* Promyshlennye vzryvchatye veshchestva. M. : Nedra, 1982. 328 s.

© Батдалов М. М., Батдалов Б. М., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Батдалов М. М., Батдалов Б. М. Принцип создания установки динамических воздействий на модели зданий и сооружений // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 10—15.

УДК 699.841

М. М. Батдалов, Б. М. Батдалов

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБА СНИЖЕНИЯ АМПЛИТУДЫ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ СЕЙСМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Предлагается способ снижения амплитуды горизонтальных сейсмических колебаний путем устройства вокруг сейсмоизолируемого объекта вертикальных преград. Целесообразность использования предлагаемого способа сейсмозащиты нашла подтверждение в результатах экспериментального исследования авторами макета системы сейсмозащиты гаситель — здание.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сейсмическое воздействие, сейсмические колебания, сейсмические волны, сейсмозащита, сейсмоизоляция, гаситель колебаний, амплитуда горизонтальных колебаний.

The authors suggest the method to reduce the amplitude of horizontal seismic vibration with the help of the device around the earthquake isolating object of vertical obstructions. The expediency of use of the proposed method was confirmed by the results of a pilot study of the layout of seismic quencher — building.

K e y w o r d s: seismic impact, seismic vibrations, seismic plane waves, earthquake protection, seismic isolation, quencher, horizontal vibration amplitude.

Глубокий и всесторонний анализ исследований, посвященных изучению воздействия сейсмических волн на здания и сооружения, проведенных учеными и специалистами ряда стран, обеспечил в последние годы существенный прогресс в решении проблем сейсмоизоляции объектов, персонала и оборудования, подготовил предложения по развитию ее нормативной базы. Особое место среди этих исследований занимают работы, посвященные разработке эффективных систем и средств сейсмоизоляции зданий и сооружений различного назначения, в том числе особо опасных и наиболее ответственных [1—6].

Однако, несмотря на то, что анализ полученных данных подтверждает возможность сохранить строительные конструкции сейсмоизолированных зданий и обеспечить требуемую функциональную устойчивость важных объектов в условиях обширных разрушений, предлагаемые способы пока что сложны и дороги. Важным является вопрос сохранения живучести зданий и сооружений, строящихся в прибрежных зонах морей, океанов, а также на их территории. Эти проблемы не решены.

Известно, что горизонтальные колебания, вызываемые в зданиях и сооружениях поверхностными сейсмическими волнами, наиболее разрушительны. Авторы предлагают способ снижения амплитуды этих колебаний путем возведения вокруг зданий и сооружений определенных вертикальных преград в виде стен, колец или отдельных дискретных элементов, располагаемых ниже глубины заложения фундаментов. По мнению авторов, горизонтальные сейсмические волны, подходя к преградам, будут частично отражаться или изменять направление, не подвергая здание или сооружение значительным колебаниям.

Для проверки данной гипотезы был собран макет системы снижения горизонтальных колебаний и проведен эксперимент (рис. 1). Так как воспроизвести горизонтальные колебания системы в классическом варианте с учетом характеристик грунтовых условий достаточно сложно, для создания чувстви-

тельной системы по отношению к колебаниям эксперимент проводился в емкости с водой. Горизонтальные колебания создавались за счет разрыва тонкостенного шара, заполненного воздухом. При определенном давлении происходит разрыв шара и возникают волны. Шар, заполняемый воздухом, может устанавливаться на разных уровнях емкости с водой.

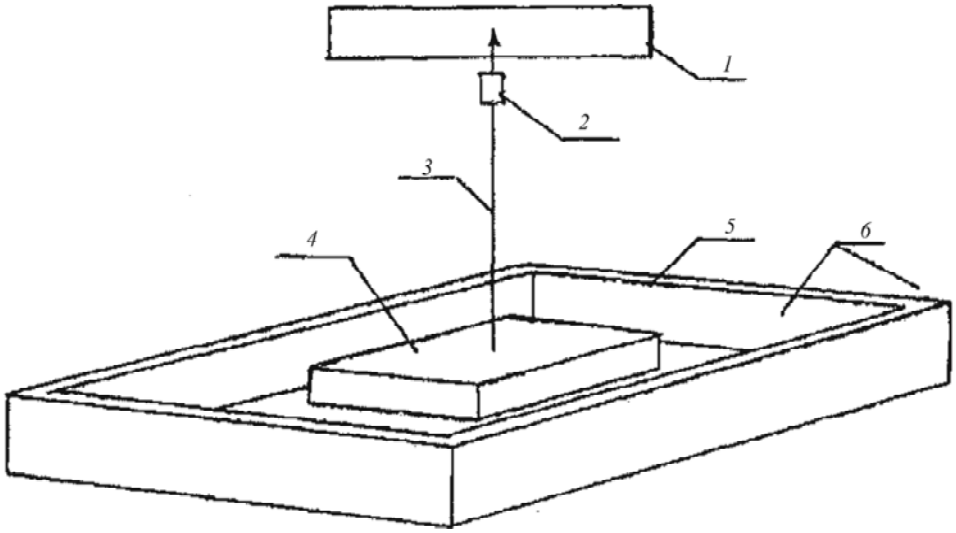


Рис. 1. Макет системы гашения горизонтальных колебаний: *1* — неподвижная шкала; *2* — масса; *3* — остов здания; *4* — фундамент; *5* — гаситель; *6* — вода

Макет системы гаситель — здание состоял из следующих элементов (рис. 2):

1) преграда-«гаситель», выполненная из дерева в виде прямоугольного пустотелого параллелепипеда с размерами, см: длина 31,5, ширина 31,5, высота 5 и толщина стенок 0,9;

2) фундамент, выполненный также из дерева, с размерами, см: длина 10,5, ширина 10,5, высота 2,5 и толщина стенок 0,9;

3) вертикальный упругий стержень, закрепленный на фундаменте и моделирующий остов здания высотой 43 см, с грузом и стрелкой на верхнем конце.

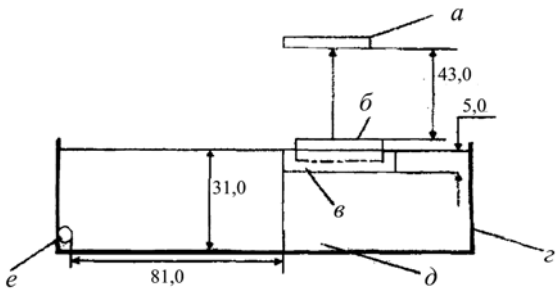


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: *а* — шкала, фиксирующая величины колебании; *б* — макет фундамента здания, *в* — макет гасителя; *г* — емкость; *д* — вода; *е* — устройство для создания колебаний

Вся система устанавливалась в большую емкость с водой. Высота «гасителя» в два раза больше макета фундамента здания. «Гаситель» находился в неподвижном состоянии ниже уровня макета фундамента здания. Расстояние от «гасителя» до фундамента равно ширине фундамента с каждой стороны.

Для регистрации горизонтальных колебаний предусмотрена неподвижная шкала, по отношению к которой определяется перемещение вертикального стержня. Колебания создавались устройством, установленным на глубине 31 см. Расстояние между макетами и устройством для возбуждения волн равно 81 см (см. рис. 2).

Основные результаты эксперимента:

1. При наличии «гасителя» начальное возмущение в воде вызвали первичные колебания среды (низкочастотные), которые привели к колебаниям макета остова здания по показаниям шкалы с максимальной амплитудой 1,5 см.

2. При отсутствии «гасителя» амплитуда колебаний составила 2,5 см, т. е. увеличились на 1 см.

3. После возбуждения колебаний внутри системы гаситель — здание возникли вторичные волны (высокочастотные), которые колебали шкалу с меньшей амплитудой. На рис. 3 изображен график затухания колебаний маятника, построенный по данным испытаний.

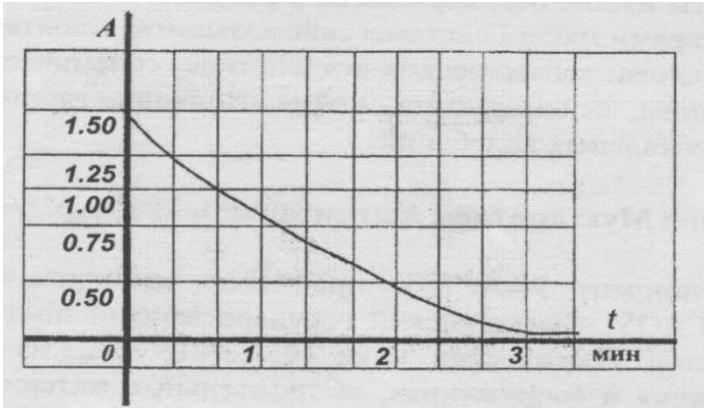


Рис. 3. График затухания колебаний маятника: *t* — время; *A* — величина отклонения маятника от нуля

Заключение. Несмотря на кажущуюся простоту и наглядность эксперимента, подтвердившего мнение авторов о возможности предлагаемой системы снижения амплитуды горизонтальных колебаний, его результаты требуют дальнейших, более глубоких проработок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Поляков В. С., Килимник Л. Ш., Черкашин А. В.* Современные методы сейсмозащиты здания. М. : СИ, 1988. 319 с.

2. *Ставнищер Л. Р.* Влияние местных грунтовых условий на расчетную сейсмичность строительной площадки // Сейсмостойкое стр-во. Безопасность сооружений. 1998. № 1. С. 5—7.

3. *Айзенберг Я. М.* Простейшая сейсмоизоляция. Колонны нижних этажей как элемент сейсмоизоляции здания // Сейсмостойкое стр-во. Безопасность сооружений. 2004. № 1. С. 28—32.

4. *Кузнецова И. О., Уздин А. М.* Современные проблемы сейсмостойкости мостов (по материалам 12-й европейской конф., Лондон, сентябрь, 2002) // Сейсмостойкое стр-во. Безопасность сооружений. 2003. № 4. С. 63—68.

5. *Солдатова Л. Л., Жумуков С. Ж.* Динамическая реакция жесткой модели здания больницы с сейсмоизолирующими опорами // Сейсмостойкое стр-во. Безопасность сооружений. 2006. № 1. С. 28—31.

6. *Абдуразаков М. Г., Забитов И. А., Батдалов М. М.* Способ гашения вертикальных колебаний полотна автомобильных дорог при сейсмических воздействиях // Молодежь и науч.-техн. прогресс в дорожной отрасли Юга России : материалы II студенческой науч.-техн. конф. 14—16 мая 2008 г. Волгоград. 103 с.

1. *Polyakov B. C., Kilimnik L. Sh., Cherkashin A. V.* Sovremennye metody seysmozashchity zdaniya. M. : SI, 1988. 319 s.

2. *Stavnishcher L. R.* Vliyanie mestnykh gruntovykh usloviy na raschetnuyu seysmichnost' stroitel'noy ploshchadki // Seysmostoykoe str-vo. Bezopasnost' sooruzheniy. 1998. № 1. S. 5—7.

3. *Ayzenberg Ya. M.* Prosteyshaya seysmoizolyatsiya. Kolonny nizhnikh etazhey kak element seysmoizolyatsii zdaniya // Seysmostoykoe str-vo. Bezopasnost' sooruzheniy. 2004. № 1. S. 28—32.

4. *Kuznetsova I. O., Uzdin A. M.* Sovremennye problemy seysmostoykosti mostov (po materialam 12-y evropeyskoy konf., London, sentyabr', 2002) // Seysmostoykoe str-vo. Bezopas-nost' sooruzheniy. 2003. № 4. S. 63—68.

5. *Soldatova L. L., Zhumukov S. Zh.* Dinamicheskaya reaktsiya zhestkoy modeli zdaniya bol'nitsy s seysmoizoliruyushchimi oporami // Seysmostoykoe str-vo. Bezopasnost' sooruzheniy. 2006. № 1. S. 28—31.

6. *Abdurazakov M. G., Zabitov I. A., Batdalov M. M.* Sposob gasheniya vertikal'nykh kolebaniy polotna avtomobil'nykh dorog pri seysmicheskikh vozdeystviyakh // Molodezh' i nauch.-tekhn. progress v dorozhnoy otrasli Yuga Rossii : materialy II studencheskoy nauch.-tekhn. konf. 14—16 maya 2008 g. Volgograd. 103 s.

© Батдалов М. М., Батдалов Б. М., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Батдалов М. М., Батдалов Б. М. Экспериментальное исследование способа снижения амплитуды горизонтальных колебаний зданий и сооружений при сейсмических воздействиях // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 16—19.

УДК 669.585.5:669.018.29

И. И. Ведяков, П. Д. Одесский

ЗАЩИТА ОТ КОРРОЗИИ СТАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЦИНКОВАНИЕМ

Рассмотрены способы цинкования проката и конструкций по различным схемам, показана эффективность этого процесса как защиты металла от атмосферной коррозии. В настоящее время экономически наиболее целесообразные методы цинкования связаны с погружением изделий в ванны расплавленного цинка. Проведение цинкования на ЗМК требует высокой культуры производства.

К л ю ч е в ы е с л о в а: прокат, стальные конструкции, цинкование, горячее цинкование, гальванический процесс, диффузионное цинкование, замедление нарушения по водородному механизму.

The authors study methods of zincing rolled products and constructions according to different schemes, and they also prove the effectiveness of this process as metal protection against atmospheric corrosion. At present economically more rational are methods of zincing based on dipping the element into melted zinc bath. Zincing at steel production plants requires developed industrial standards.

K e y w o r d s: rolled products, steel consructions, zincing, hot zincing, galvanic process, diffusive zincing, moderation of deformation at hydrogen mechanism.

Цинкование является традиционным методом защиты стальных конструкций от коррозии и, по-видимому, в настоящее время наиболее эффективным.

Собственно, цинк относится, если судить по его положению в нормальном ряду напряжений, к неблагородным металлам. Его нормальный электродный потенциал равен минус 0,76V (железо более благородный металл — его потенциал равен минус 0,44V). Однако в атмосферных условиях цинк обладает удовлетворительной стойкостью, поскольку покрывается слоем продуктов коррозии (смесь окиси цинка, углекислого цинка и гидрата окиси цинка). Этот слой не исключительно плотный, но в определенной степени защищает лежащий под ним металл. Наименее стоек цинк в атмосфере индустриальных центров вследствие присутствия в ней сернистых газов, образующих с цинком легко растворимые продукты коррозии.

Поскольку электродный потенциал цинка в атмосферных условиях ниже, чем у железа, цинковые покрытия являются анодными, т. е. цинк защищает сталь электрохимически: при наличии пор или оголенных мест происходит разрушение цинка, а стальная основа не корродирует; цинк, единственный из применяемых металлических покрытий, является «жертвенным» металлом. На цинкование расходуется около 40 % мировой добычи цинка.

Цинк наносится на стальные изделия различными способами: горячим цинкованием, набрызгиванием (газотермическим), диффузионным, а также гальваническим (электролитическим) способами.

В строительстве широко применяется холоднокатаный оцинкованный лист (в настоящее время иногда с дополнительным полимерным покрытием). В этом случае оцинковка реализуется на металлургических заводах. Непосредственно на заводах металлоконструкций проводится оцинковка готовых изделий и деталей к ним.

Основной метод оцинковки на металлургических заводах — наименее энергозатратное горячее цинкование погружением изделий в ванну с расплавленным Zn при 450…470 °С. На современных линиях протяженностью более 100 м собственно цинкование объединено с операциями подготовки (электрохимическая очистка от ржавчины и масел, промывка, сушка, отжиг, дрессировка; после горячего цинкования сдувка лишнего цинка, принудительное охлаждение, правка, сушка, смотка, промасливание и др.). Цинк образует на железном изделии покрытие, состоящее из трех слоев. Наружный слой представляет собой почти чистый цинк, затем следует слой интерметаллического соединения FeZn и внутренний слой, представляющий соединение $FeZn_3$.

Погружение следует проводить в возможно короткие сроки с последующим охлаждением, так как в противном случае цинк обогащается железом, что понижает коррозионную стойкость покрытия и приводит к росту хрупких интерметаллических соединений. Разработаны специальные методы борьбы с формированием хрупких слоев, в том числе небольшими добавками алюминия.

Металлургическая промышленность поставляет в адрес строителей сталь тонколистовую оцинкованную с непрерывных линий по ГОСТ 14918—80 трех классов толщины покрытия: П (повышенный) с 40 до 60 мкм, 1 — от 18 до 40 мкм, 2 — от 10 до 18 мкм. Оцинкованная сталь изготавливается шириной от 710 до 1800 мм, толщиной от 0,5 до 2,5 мм включительно.

Из таких сталей в массовых количествах изготавливается профилированный настил, различные профили и т. п. Из подобных профилей собираются эффективные бескаркасные здания с большим пролетом и т. п.

Ванны для горячего цинкования имеются также на заводах, изготавливающих строительные металлические конструкции, в частности в Белгороде (Завод «Энергомаш»), в Туле (Завод легких металлических конструкций). Здесь оцинковываются целиком такие конструкции, как, например, полуфермы из труб квадратного сечения, но также и мелкие изделия, например крепеж. Диффузионное цинкование реализуется при нагреве цинкуемых изделий в цинковом порошке при 300…500 °С. В таких условиях и обычно при отсутствии кислорода происходит диффузия порошкообразного цинка в поверхность изделия. Слой получается неровным, но хорошо пристает к поверхности изделия. Способ эффективно применяется для обработки небольших изделий с неровной поверхностью. В строительной промышленности это изделия с резьбой, например болты высокой прочности. Обычно процесс проводится во вращающихся барабанах, толщина покрытия здесь небольшая — 15…30 мкм, иногда до 60 мкм.

Покрытия газотермическим напылением формируются при набрызгивании расплавленного цинка на поверхность изделия. Впервые способ был предложен в 1910 г. Шоопом и иногда называется шоопированием. В настоящее время этот процесс называют газотермическим напылением.

Процесс обычно ведется переносными, ручными приборами. Разбрызгиваемый металл подается в виде проволоки.

При выходе из прибора проволока расплавляется в пламени, например, кислородно-водородном. Расплавленный металл распыляется в среде воздуха и набрызгивается на поверхность изделия.

Поверхность перед подобным процессом должна проходить дробеструйную обработку, так как набрызгиваемый слой пристает только благодаря механическому взаимодействию частиц, с высокой скоростью попадающих на поверхность изделия. Диффузионные процессы здесь не имеют место, так как частицы попадают на поверхность в остывшем состоянии.

Покрытия, полученные подобным образом, состоят из чешуек металла, наложенных одна на другую и расплющенных потоком воздуха. Покрытия получаются достаточно равномерными и плотными и могут иметь большую толщину. Этот метод имеет технические преимущества в случае цинкования больших готовых конструкций или дополнительных покрытий (сварные швы), а также при ремонте покрытий.

Одним из традиционных методов нанесения цинкового покрытия является гальванический (электролитический). Такие покрытия формируются путем нанесения металлических осадков при электролизе раствора соответствующих солей, покрываемое изделие помещается на катоде. Цинкование проходит в ваннах с кислыми или щелочными электролитами, наиболее часто употребляются электролиты с сульфатами.

Слой металла, получившийся при этом методе, наиболее равномерен, чист и при надлежащем ведении процесса беспористый, толщина покрытия небольшая, ~ 10 мкм.

Процесс имеет свои недостатки: он наиболее энергоемок, необходимо иметь отдельный цех и квалифицированный обслуживающий персонал. В настоящее время работают лишь отдельные линии для специальных целей. В металлургической промышленности такая линия работает на заводе в г. Лысьва на Урале.

Необходимая толщина цинковых покрытий металлических конструкций регламентируется СНиП 2.03.11—85, она зависит от степени влажности атмосферы, агрессивности газов и их концентрации в условиях эксплуатации. В зависимости от соотношения и сочетания этих факторов степень агрессивности воздействия среды подразделяется на неагрессивную, слабоагрессивную, среднеагрессивную и сильноагрессивную. При покрытиях несущих металлических конструкций рекомендуется применять следующие толщины:

Степень агрессивности среды	Толщина покрытия, мкм	
	Горячее цинкование	Газотермическое цинкование
Слабоагрессивная	60...100	120...180
Среднеагрессивная	60...100	120...180
Сильноагрессивная	>100*	200...250

* термодиффузионное цинкование.

Обязательное цинкование предусматривается в следующих случаях: для защиты конструкций с болтовыми соединениями, из незамкнутого профиля со стыковой сваркой и угловыми швами, а также крепежных изделий, монтажных стыковых швов, некоторых конструкций в грунтах.

В последнее время металлургической промышленностью в целях экономии цинка стали поставляться холоднокатаные стали с комбинированным

покрытием — цинковое покрытие толщиной 18...25 мкм с внешним окрашиванием специальным полимерным покрытием толщиной 45...60 мкм. Такой металл начал применяться в конструкциях фасадных систем зданий: в слабоагрессивных средах срок эксплуатации этих систем ... 50 лет, в среднеагрессивных ... 30 лет.

В нашей практике наблюдались замедленные хрупкие разрушения по водородному механизму стальных конструкций после горячего цинкования [1]. При эксплуатации разрушались фермы из крупных холодногнутых сварных квадратных труб 180×180 мм с толщиной стенок 8 мм из стали 09Г2С-12. Трещины распространялись от сварных швов, а также от сильно деформированных угловых зон профилей. В рассматриваемом случае водород, выделившийся при травлении поверхностей в процессе их подготовки и оцинковки, явился движущей силой замедленного разрушения по водородному механизму. Сходным по характеру явилось разрушение горизонтальной траверсы на опоре ЛЭП непосредственно после монтажа конструкции. Здесь разрушился по отверстиям поясной оцинкованный уголок 100×100×8 мм из термически упрочненной стали 14Г2. Замедленное хрупкое разрушение при эксплуатации изделий с цинковым покрытием наблюдалось за рубежом [2, 3]. Поэтому горячее цинкование конструкций на ЗМК требует высокой культуры производства.

В заключение следует отметить, что традиционный метод оцинковки как основы защиты от коррозии стальных строительных конструкций является актуальным и в настоящее время из-за уникальной природы цинка. Сегодня рассматриваемые процессы совершенствуются, прежде всего в направлении снижения толщины цинкового покрытия за счет сочетания с различными эффективными красками, грунтами, полимерами и т. п., а также путем создания специализированных линий по нанесению защитных покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Одесский П. Д.* Малоуглеродистые стали для металлических конструкций. М. : Интермет Инжиниринг, 1999. 224 с.

2. Damage process of high purity tungsten coatings by hudrogen beam heat loads / S. Tamura, K. Tokunaga, N. Yoshida, M. Taniguchi, K. Ezato, K. Sato, S. Suzuki // Journal of Nuclear Materials. 2005. № 337—339. P. 1043—1047.

3. *Hillier E. M. K., Robinson M. J.* Hydroyen embrittlement of high strength steel electroplated with Zinc — Cobald alloys // Corrosion Science. 2004. V. 46. P. 715—727.

1. *Odesskiy P. D.* Malouglerodistye stali dlya metallicheskikh konstruktsiy. M. : Intermet Inzhiniring, 1999. 224 s.

2. Damage process of high purity tungsten coatings by hudrogen beam heat loads / S. Tamura, K. Tokunaga, N. Yoshida, M. Taniguchi, K. Ezato, K. Sato, S. Suzuki // Journal of Nuclear Materials. 2005. № 337—339. P. 1043—1047.

3. *Hillier E. M. K., Robinson M. J.* Hydroyen embrittlement of high strength steel electroplated with Zinc — Cobald alloys // Corrosion Science. 2004. V. 46. P. 715—727.

© Ведяков И. И., Одесский П. Д., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Ведяков И. И., Одесский П. Д. Защита от коррозии стальных строительных конструкций цинкованием // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 20—23.

УДК 624.072.2

С. Г. Емельянов, А. М. Крыгина

К ВОПРОСУ ОЦЕНКИ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ НЕСУЩИХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Выполнен анализ повреждаемости основных несущих конструкций гидротехнических сооружений предприятий энергетики. Выявлены характерные дефекты и повреждения конструкций, определяющие причины деструктивных процессов в элементах зданий и сооружений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: колонны, плиты, железобетонные конструкции, металлические конструкции, повреждаемость, дефекты, коррозия, выщелачивание.

This article gives the analysis of damageability to the main load-bearing structures of hydrotechnical buildings. The characteristic defects and damage of structures, which determine main causes of destructive processes in the elements of buildings and constructions are identified.

K e y w o r d s: columns, slabs, reinforced concrete constructions, metal structures, damageability, defects, corrosion, leaching.

Гидротехнические сооружения относятся к зданиям высокого уровня ответственности, возникновение аварийных ситуаций на которых влечет значительный экономический, экологический, социальный ущерб. Кроме того, эти здания имеют ряд конструктивно-технологических особенностей:

компоновка конструктивной схемы здания с использованием конструкций, выполненных из различных материалов (бетон, металл);

наличие бетонов различных составов в монолитных и сборных конструкциях;

наличие значительного числа сопряжений элементов, стыков, швов;

активное воздействие внешних агрессивных факторов;

наличие значительного числа отклонений от проектных решений в процессе строительства и эксплуатации;

длительность этапа возведения здания, обусловливающая смену температурно-влажностных режимов строительства.

Поэтому проблема обеспечения эксплуатационной надежности и конструктивной безопасности основных несущих конструкций указанного класса зданий, большинство из которых построены во второй половине XX в., в условиях исчерпания сроков их эксплуатации представляется актуальной.

Наличие сложных деструктивных процессов в различных строительных конструкциях от силовых и средовых воздействий, негативное влияние скрытых дефектов изготовления и монтажа на долговечность и надежность элементов делают обследования строительных конструкций основой для надежного прогнозирования эксплуатационной надежности этих объектов.

Российский и зарубежный опыт позволяют говорить о том, что причина аварий, как правило, неблагоприятное сочетание нескольких факторов различной этиологии, разнозначимых по степени их влияния на эксплуатационную надежность здания. В зданиях со сроком эксплуатации более 30 лет именно повреждения от сочетания означенных факторов способны спровоцировать аварийную ситуацию. Для обеспечения многофакторного анализа технического состояния зданий необходим учет:

предыстории эксплуатации, обусловливающей интенсивность накопления повреждений конструкциями;

актуализации соответствия зданий и сооружений современным требованиям и нормативным документам;

состояния тела подводной и наземной частей сооружения, визуально фиксируемых дефектов и нарушений, наличия и интенсивности деформаций грунтового основания.

Водозаборные сооружения (ВЗС) входят в комплекс гидротехнических сооружений атомных станций и являются частью системы охлаждения ее основного оборудования. Конструктивно надземная часть корпуса водозаборных сооружений КуАЭС решена по каркасной схеме. Каркас металлический или смешанный (железобетонные колонны и плиты покрытия по металлическим фермам). Длина основного пролета 18,21 м, шаг колонн — 6 м. Покрытия зданий — железобетонные ребристые плиты либо облегченное металлическое теплое по прогонам.

При проектировании обследуемых зданий и сооружений вопросы обеспечения расчетной долговечности, как правило, декларировались, не имея количественного выражения. Безусловно принималось, что соблюдение требований норм при проектировании обеспечивает надежность и безопасность отдельных конструктивных элементов и сооружения в целом в течение расчетного срока эксплуатации здания. До настоящего времени нормативное обоснование надежности строительных объектов выполняется полувероятностным методом в детерминированном виде. Итогом такого подхода оказалась «непредвиденная» потеря работоспособности отдельных узлов и элементов конструкций на 15...20 лет ранее назначенного проектом срока эксплуатации.

На основе проведенных исследований можно сделать вывод, что определяющими причинами ограничения работоспособности технического состояния несущих металлических конструкций зданий ВЗС гидротехнических сооружений АЭС являются дефекты изготовления, а также эксплуатационные повреждения (рис. 1, 2). Причиной повреждаемости железобетонных конструкций в большинстве выявленных случаев можно назвать нарушения условий эксплуатации.

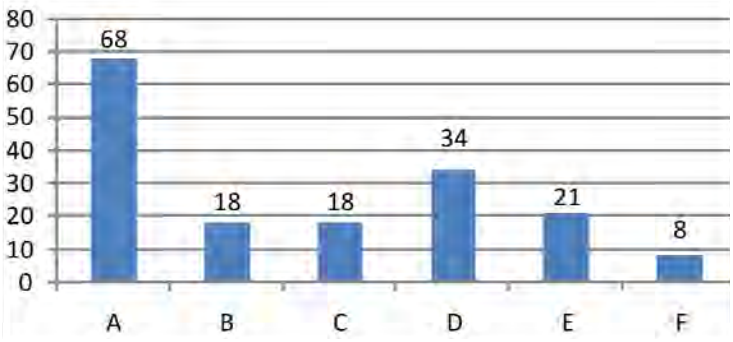


Рис. 1. Распределение дефектов и повреждений железобетонных колонн и плит покрытия: A — коррозия арматуры поперечных ребер плит, разрушение бетона защитного слоя ребер; B — разрушение защитного слоя бетона в полках плит, поверхностная коррозия, разрушение антикоррозионного покрытия; C — разрушение бетона защитного слоя продольных ребер, коррозия продольной арматуры ребер; D — сколы защитного слоя бетона с оголением и коррозией арматуры; E — коррозия продольной арматуры колонн; F — замачивание бетона

Основные причины образования дефектов в колоннах — коррозия продольной рабочей арматуры (19 % от общего числа повреждений в рассматриваемой группе элементов), коррозия поперечной конструктивной арматуры с разрушением бетона защитного слоя (77 %) (см. рис. 1).

Отметим, что степень повреждений плит сильная, требует усиления или замены конструкций. Характер повреждений связан, в основном, с коррозией продольной рабочей арматуры поперечных ребер плит и разрушением бетона ребер (68 %), коррозией продольной рабочей арматуры продольных ребер плит, разрушением бетона защитного слоя ребер (8 %), замачиванием полок плит, коррозией арматуры полок плит с нарушением защитного слоя бетона (18 %) (см. рис. 2).

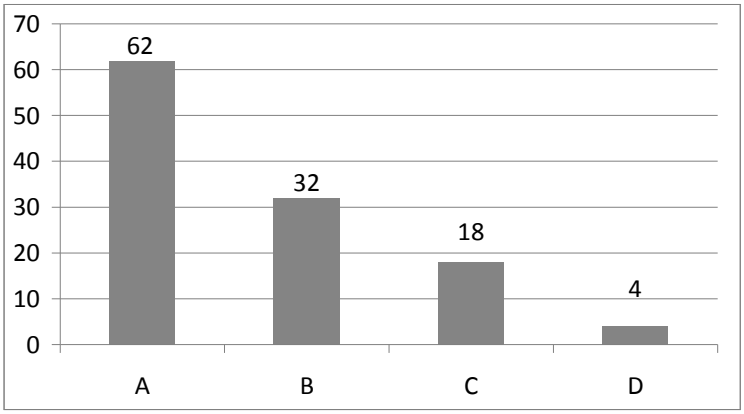


Рис. 2. Диаграмма характерных дефектов и повреждений металлических стропильных ферм: A — дефекты сварных соединений; B — поверхностная коррозия, разрушение антикоррозионного покрытия; C — погибы по элементам ферм; D — внеузловое опирание конструкций покрытия на верхний пояс стропильной фермы

При этом в обследуемых зданиях число зафиксированных элементов железобетонных колонн, находящихся в ограниченно работоспособном состоянии, не превысило за время эксплуатации 15 % (рис. 3).

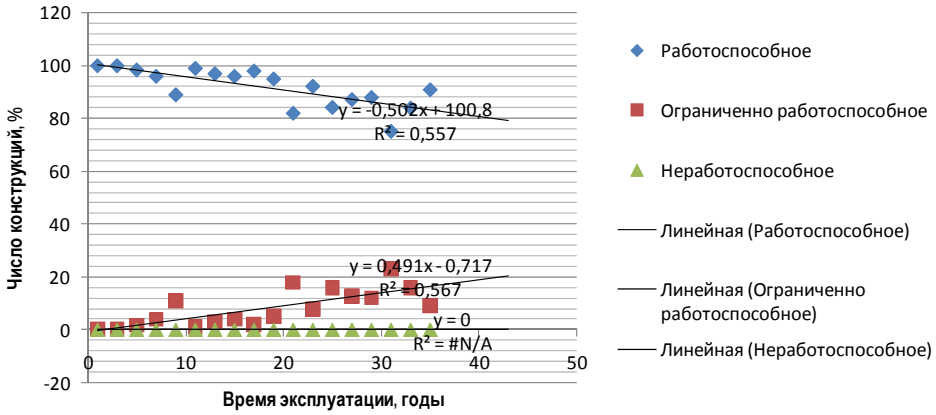


Рис. 3. Анализ технического состояния колонн

Повреждения подводной части здания из монолитного железобетона связаны с фильтрационным выщелачиванием бетона в зоне дефектных деформационных швов между блоками бетонирования, а также через трещины в монолитном бетоне, разрушением бетона наружного периметра подводной части в зоне переменного уровня воды с оголением и коррозией арматуры. Повышенное трещинообразование в массивной подводной части гидротехнических сооружений обусловлено неоднородностью прочностных свойств поверхностных и глубинных слоев бетона вследствие различных температурно-влажностных условий в теле конструкции еще на стадии твердения бетона. Наружные слои конструкции в зоне контакта с водой и атмосферой подвержены повышенному агрессивному воздействию знакопеременных температур, влажности, инсоляции и др., что также обусловливает их интенсивное старение.

Число выявленных при обследовании поврежденных железобетонных плит покрытия, находящихся в ограниченно работоспособном состоянии, в различные периоды (с учетом реконструкции и замены элементов) достигало 28 %, в неработоспособном состоянии 1,5 % (рис. 4).

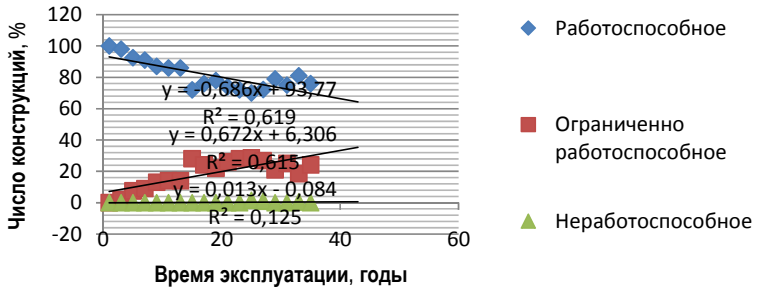


Рис. 4. Анализ технического состояния железобетонных плит покрытия

Стоит отметить, что если выявленные при обследовании зданий ВЗС повреждения металлических конструкций связаны преимущественно с ошибками изготовления и монтажа этих конструкций (особенно в части исполнения сварных соединений) (см. рис. 4), то для железобетонных конструкций практически все указанные повреждения возникли вследствие эксплуатационных нарушений (см. рис. 3). В их числе следует отметить, в первую очередь, протечки атмосферной влаги из-за нарушений кровельного ковра, послужившие причиной преждевременного износа железобетонных конструкций покрытия вследствие коррозии бетона и арматуры плит покрытия.

Учет накопления эксплуатационных повреждений в конструкциях и прогнозирование роста повреждаемости несущих конструкций позволит снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций в несущих конструкциях зданий и тем самым способствовать повышению их эксплуатационной надежности.

В результате обобщения материалов обследования надземной зданий водозаборных сооружений установлено, что значительная часть конструкций эксплуатируется с повреждениями, наиболее распространенными и опасными из которых для железобетонных конструкций являются разрушение бетона с оголением и коррозией арматуры, замачивание, фильтрационное выщелачивание и коррозия бетона, коррозия продольной арматуры колонн.

При этом основными причинами проявления указанных дефектов являются:
нарушение эксплуатационных условий;
повышенная влажность (в том числе из-за протечек атмосферных осадков);
конструктивно-технологические особенности массивной подводной железобетонной части ГТС.

© Емельянов С. Г., Крыгина А. М., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Емельянов С. Г., Крыгина А. М. К вопросу оценки повреждаемости несущих железобетонных конструкций гидротехнических сооружений // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 24—28.

УДК 624.014

Л. В. Енджиевский, А. В. Тарасов

КОНСТРУКТИВНЫЕ РЕШЕНИЯ НЕСУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ И УЗЛОВ РАМЫ КАРКАСА ЗДАНИЯ ИЗ СТАЛЬНЫХ ТОНКОСТЕННЫХ ПРОФИЛЕЙ

Выполнен анализ конструктивных вариантов образования несущих элементов, а также узлов сопряжения рамы каркаса здания пролетом 12…18 м из тонкостенных оцинкованных профилей. Представлены результаты экспериментальных и численных исследований вариантов рамы с фрикционными болтовыми соединениями несущих элементов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: узловые соединения, тонкостенные профили, элементы бикоробчатого сечения.

Analyzed are constructive variants of formation of load-carrying units, as well as frame units in a building with 12…18 m bays with slender zinc-coated section. Provided are the results of experimental and numerical investigations of variants of frames with friction bolted joint between load-currying elements.

K e y w o r d s: hub joints, slender section, elements of bi-box section.

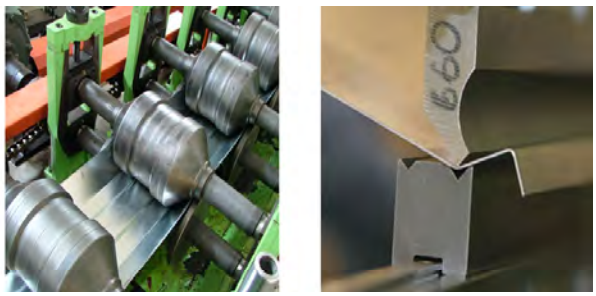
В строительстве внедряется технология применения легких стальных тонкостенных оцинкованных профилей (ЛСТК), направленная на снижение металлоемкости, повышение доступности изготовления и транспортировки в труднодоступные районы. Область применения ЛСТК — несущие и ограждающие конструкции объектов промышленного и гражданского назначения.

Наиболее используемая конструктивная схема зданий из ЛСТК — каркасная. Поперечные рамы каркаса здания, образованные из стоек, двускатных сплошностенчатых или решетчатых (ферменных) ригелей и опорных устройств в виде анкеров, упоров или затяжек, устанавливают с шагом 3…6 м.

Изготовление элементов ЛСТК в промышленных масштабах выполняется двумя способами:

холодный прокат оцинкованного листа с рулона через валики (рис. 1, *а*);

последовательный холодный гиб листа в продольном направлении образуемого профиля (рис. 1, *б*).

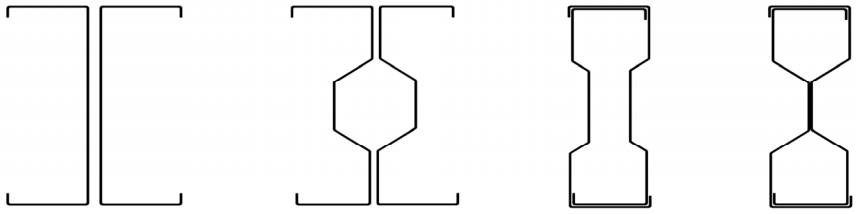


а *б*

Рис. 1. Технологии изготовления тонкостенного профиля: *а* — холодный прокат; *б* — последовательный гиб

В отличие от холодного проката тонкостенных профилей, технология изготовления путем последовательного гиба оцинкованного листа более универсальна. Она не требует предварительных трудоемких настроек производственной линии и не зависит от наличия прокатных шаблонов. При этом номенклатура холодногнутых элементов шире, чем холоднокатаных. Однако данная технология имеет и недостатки по сравнению с прокатной — длина изготавливаемых элементов ограничена размерами станка для гибки и составляет в среднем 3 м. Данное ограничение можно преодолеть сращиванием отдельных отправочных элементов.

В практике наиболее распространенными несущими элементами являются двутавры из С-образных профилей (рис. 2, *а*). Реже используют ∑-профили. Так, например, в работе [1] несущие элементы фермы решены в виде составных двутавров из двух ∑-образных прокатных профилей (рис. 2, *б*). Известны исследования, в которых применялись в качестве силовых элементов конструкции одиночные С-образные профили [2].



а *б* *в* *г*

Рис. 2. Варианты составного поперечного сечения несущих элементов: *а* — составной двутавр из С-образных профилей; *б* — составной двутавр из ∑-образных профилей; *в* — составное коробчатое сечение из двух ∑-образных профилей; *г* — разработанный авторами бикоробчатый тип сечения

Критическим фактором для сжатых или сжато-изгибаемых ∑- и С-образных профилей (рис. 2, *а*, *б*) является местная потеря устойчивости полок. Полки двутавра, имеющие закрепление только по одной грани (стенке балки) в большей степени подвержены местной потере устойчивости в процессе эксплуатации (рис. 3), а также деформациям при транспортировке и монтаже, по сравнению с коробчатым сечением, образованным из тех же профилей (рис. 2, *в*).

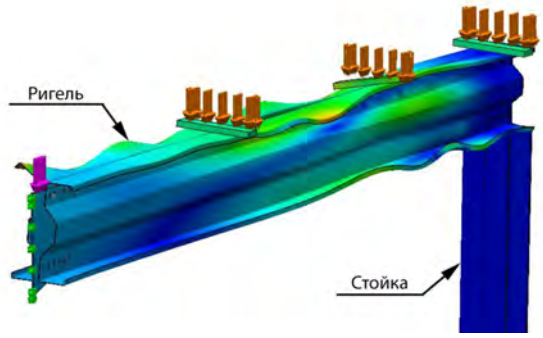


Рис. 3. Фрагмент рамы каркаса здания пролетом 12 м. Потеря устойчивости полок двутаврового ригеля в составе двускатной рамы каркаса здания

В данных исследованиях авторами разработан новый тип несущих элементов, имеющих замкнутое бикоробчатое сечение (рис. 2, *г*). Такое решение можно охарактеризовать как промежуточный вариант между двутавровым и коробчатым сечением, сочетающий в себе их преимущества.

В продольном направлении профилей полки имеют отгибы, через которые закрепляются к стенке противоположного профиля сечения при помощи метизов. Таким образом, по отношению к двутавровым сечениям (рис. 2, *а*, *б*) преимуществом выбранного сечения является бóльшая несущая способность по условию потери устойчивости полок. Кроме того, отсутствие свободных свесов тонкостенного профиля, а также удвоенная толщина верхней части бикоробчатого сечения обеспечивает большую устойчивость к местному смятию несущих элементов от сосредоточенных нагрузок, например в узлах крепления прогонов.

В сравнении с коробчатым сечением (рис. 2, *в*), преимущество бикоробчатого заключается в объединении стенок профилей, что позволяет развивать сечение по высоте, обеспечивая при этом условие устойчивости стенки. Кроме того, форма элементов, образующих составное сечение, позволяет использовать один типоразмер профилей и не требует обязательного их скрепления между собой.

Формообразование бикоробчатого несущего элемента производится следующим образом. Профили содержат две полки с перпендикулярными отгибами, направленными навстречу друг к другу, при этом полки выполнены разной ширины, с разницей, равной двойной толщине профиля. Для образования бикоробчатого сечения профили повернуты друг к другу внутренними поверхностями таким образом, что большие полки профилей охватывают снаружи сопрягаемые с ними меньшие полки. Уступы в средней части стенки профилей выполнены такой глубины, что в составе бикоробчатого сечения совмещены (рис. 2, *г*) и могут быть скреплены при помощи любых известных метизов (например, вытяжными заклепками или самосверлящими винтами).

Формообразование длинноразмерного элемента производится путем сращивания коротких. Здесь возможно два варианта: фланцевые соединения с использованием специально разработанной вставки с фланцем и нахлесточное соединение профилей с предварительным их взаимным смещением (рис. 4). Во втором варианте в ригеле отсутствуют сквозные стыки, в каждом соединении по длине один из профилей цельный. В области соединения стыкуемые элементы прикреплены вытяжными заклепками к полкам и стенке цельного профиля.

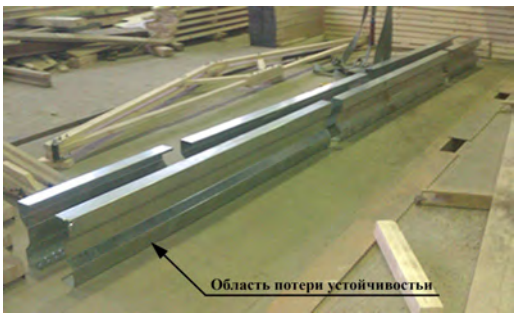
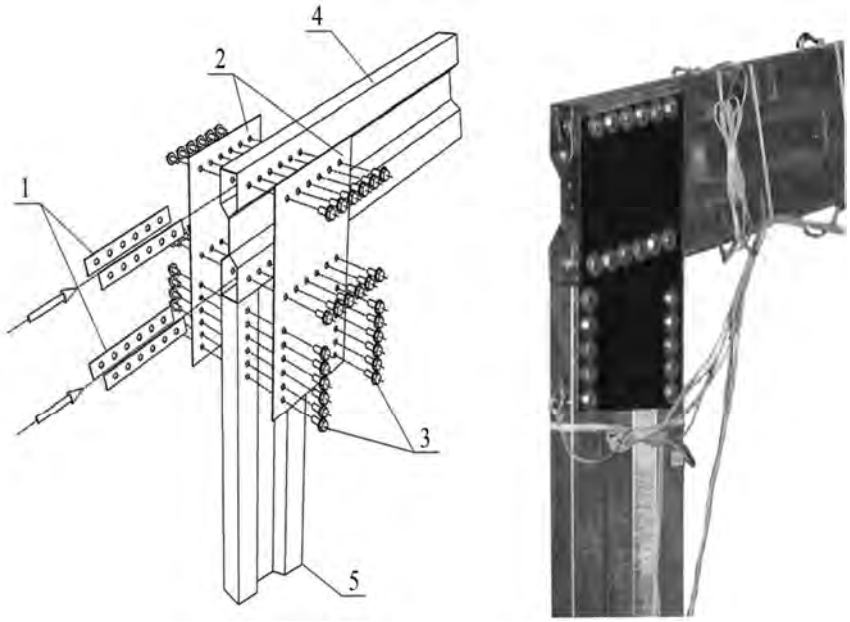


Рис. 4. Ригель пролетом 6 м в разобранном виде. Принципиальная компоновка элементов в составе ригеля

Принятый новый тип конструктивного решения обусловливает необходимость проведения экспериментально-теоретических исследований. Экспериментальные исследования выполнены для поперечной рамы каркаса здания пролетом 12 м.

Проверка на местную устойчивость элементов выполнена по методике, предложенной в [3]. Коньковый и карнизные узлы выполнены жесткими с применением фрикционных болтовых соединений, что позволяет уменьшить изгибающий момент пролетной части ригелей. В отличие от податливых или шарнирных узлов, такое решение позволяет отказаться от использования затяжки, которая значительно уменьшает полезный объем здания, не уменьшая при этом шаг поперечных рам каркаса здания. Кроме того, применение фрикционных соединений обусловлено значительными трудностями в обеспечении выполнения условия по смятию металла тонколистовых элементов, как того требуют срезные соединения.

Отдавая предпочтение фрикционным болтовым соединениям несущих элементов перед срезными, авторы предварительно выполнили экспериментально-теоретические исследования [4, 5] таких соединений с применением дополнительных накладок под шайбы, повышающих их сдвигоустойчивые характеристики.



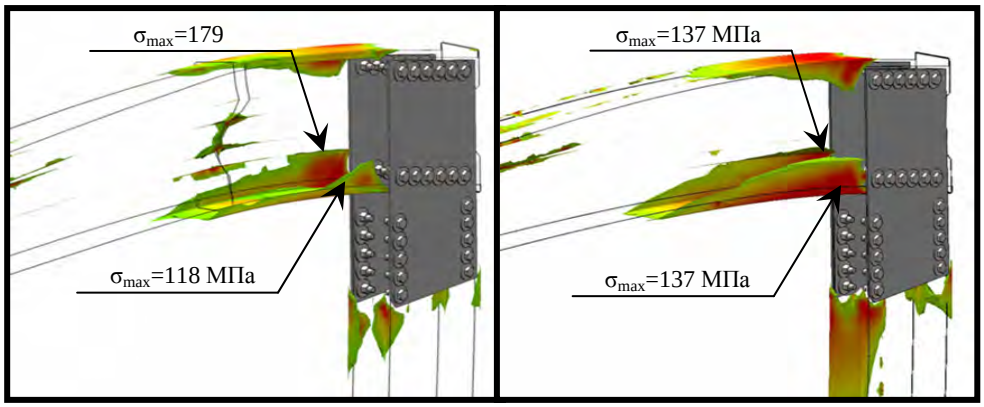
а *б*

Рис. 5. Карнизный узел рамы: *а* — схема сборки узла; *б* — узел экспериментальной рамы в сборе: *1* — накладки под шайбы; *2* — соединительные фасонки; *3* — болты; *4* — ригель; *5* — стойка

Соединение несущих элементов (рис. 5) выполнено через металлические фасонки толщиной 4 мм, которые крепятся к каждой стенке профиля рядами болтов. Дополнительная накладка под шайбы болтов расположена с внутренней стороны профиля по всей длине каждого ряда болтового соединения. Сопряжения элементов в коньковом и опорных узлах выполнены по тому же

принципу. При ограниченном доступе к болтовому соединению, обусловленном замкнутым типом сечения элементов, возможно применение сборных закладных вставок [5]. Вставки, содержащие весь необходимый набор метизов, располагаются внутри профиля до сборки узлового соединения (рис. 5, *а*) и в значительной степени облегчают монтаж конструкции.

Недостатком наращиваемого ригеля является то, что расположение стыков по длине влияет на несущую способность ригелей не только из условия прочности ослабленных сечений. Стыки также предопределяют неравномерное распределение напряжений в узлах рамы, что приводит к преждевременной потере устойчивости только одной, перегруженной стенки бикоробчатого ригеля. Это подтверждают экспериментальные и численные исследования (рис. 6). При этом полученные по результатам экспериментальных исследований данные о фактических значениях напряжений, а также результаты численных исследований подтверждают возможность применения методики [3] для расчета тонкостенных холодногнутых элементов на местную устойчивость стенки и полок.



а *б*

Рис. 6. Карнизный узел исследуемой рамной конструкции: *а* — узел сопряжения стойки с наращиваемым по длине ригелем; *б* — узел сопряжения стойки с ригелем, не имеющим стыков по длине

По результатам испытаний было установлено, что несущая способность рамы каркаса здания пролетом 12 м составила 7560 кг, что соответствует 210 кг/м^2 для здания с шагом поперечных рам 3 м. В численных исследованиях выявлено, что при использовании цельных по длине ригелей несущая способность разработанной конструкции увеличивается до 316 кг/м^2.

Для сравнения выполнен расчет рамных конструкций пролетом 9 и 18 м без стыков ригелей по длине, шаг рам равен 3 м. При этом толщина используемых профилей для образования бикоробчатого ригеля варьировалась от 1,5 до 3 мм.

Расчетом определено, что несущая способность рамы пролетом 9 м составляет 390 кг/м^2, а максимальный прогиб равен 23 мм. При этом значении нагрузки в узлах сопряжения ригелей со стойками наблюдались напряжения, близкие к предельному значению, определенному по [3]. Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к перераспределению напряжений в сжатую полку ригеля и исчерпанию несущей способности вследствие потери устойчивости стенок и полки при нагрузке 420 кг/м^2.

Следует отметить, что при нагружении вплоть до потери устойчивости сжатой части стенок ригеля напряжения в полках не превышали 60 % от предельно

допустимого значения. Этому способствует специфика формообразования несущих элементов, которая предусматривает нахлест друг на друга полок обоих профилей, из которых образуется бикоробчатый ригель.

Расчет рамы пролетом 18 м показал, что для нормальной эксплуатации отапливаемых зданий пролетом 18 м в IV снеговом районе необходимо увеличение толщины профилей до 3 мм. При этом несущая способность конструкции составляет 326 кг/м^2, а максимальный прогиб равен 62 мм.

Таким образом, предложенные решения позволяют эффективно применять технологию ЛСТК для строительства промышленных и гражданских объектов, расположенных в I—IV снеговых районах. При этом для строительства в труднодоступных районах может применяться технология наращивания элементов по длине. В этом случае длина отправочных элементов не превышает 3 м. Такая технология не приводит к значительному увеличению трудо- и материалозатрат, значительно облегчая транспортировку конструкций на место монтажа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Семенов А. П.* Ферма из холодногнутых профилей повышенной жесткости с болтовыми соединениями : автореф. дис… канд. техн. наук. Воронеж, 2009.

2. *Коротких А. В.*, *Крылов И. И.*, *Гербер А. А.* Особенности работы фермы с перекрестной решеткой из тонкостенных оцинкованных профилей // Изв. вузов. Строительство. № 10. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2011.

3. *Енджиевский Л. В.*, *Тарасов А. В.* О совершенствовании строительных конструкций с применением холодногнутых профилей из тонколистовой оцинкованной стали в элементах каркаса здания // Сб. трудов III Всероссийской науч.-техн. конф., посвященной 80-летию НГАСУ (Сибстрин). Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2010. С. 79—86.

4. *Енджиевский Л. В.*, *Тарасов А. В.* Экспериментальные и численные исследования болтовых соединений стальных пластин при разных соотношениях их толщин // Изв. вузов. Строительство. № 7. Новосибирск : НГАСУ (Сибстрин), 2011.

5. Пат. 2423582 Рос. Федерации, МПК E04B 1/58. Узел соединения трубчатых профилей / Л. В. Енджиевский, А. В. Тарасов, И. В. Тарасов ; заявл. 25.03.10 ; опубл. 10.07.11, Бюл. № 19. 10 с.

1. *Semenov A. P.* Ferma iz kholodnognutykh profiley povyshennoy zhestkosti s boltovymi soedineniyami : avtoref. dis… kand. tekhn. nauk. Voronezh, 2009.

2. *Korotkikh A. V.*, *Krylov I. I.*, *Gerber A. A.* Osobennosti raboty fermy s perekrestnoy reshetkoy iz tonkostennykh otsinkovannykh profiley // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. № 10. Novosibirsk : NGASU (Sibstrin), 2011.

3. *Endzhievskiy L. V.*, *Tarasov A. V.* O sovershenstvovanii stroitel'nykh konstruktsiy s primeneniem kholodnognutykh profiley iz tonkolistovoy otsinkovannoy stali v elementakh karkasa zdaniya // Sb. trudov III Vserossiyskoy nauch.-tekhn. konf., posvyashchennoy 80-letiyu NGASU (Sibstrin). Novosibirsk : NGASU (Sibstrin), 2010. S. 79—86.

4. *Endzhievskiy L. V.*, *Tarasov A. V.* Eksperimental'nye i chislennye issledovaniya boltovykh soedineniy stal'nykh plastin pri raznykh sootnosheniyakh ikh tolshchin // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. № 7. Novosibirsk : NGASU (Sibstrin), 2011.

5. Pat. 2423582 Ros. Federatsii, MPK E04V 1/58. Uzel soedineniya trubchatykh profiley / L. V. Endzhievskiy, A. V. Tarasov, I. V. Tarasov ; zayavl. 25.03.10 ; opubl. 10.07.11, Byul. № 19. 10 s.

© Енджиевский Л. В., Тарасов А. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Енджиевский Л. В., Тарасов А. В. Конструктивные решения несущих элементов и узлов рамы каркаса здания из стальных тонкостенных профилей // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки . С. 29—34.

УДК 621. 882.56:691.328.4

С. Н. Карпенко, И. Г. Чепизубов

ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАТИВНОСТИ БЕТОНА НА ОЦЕНКУ ПРОЧНОСТИ МУФТОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ АРМАТУРЫ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

Разработана методика оценки снижения прочности муфтовых соединений арматуры на основе сопоставления трех видов диаграмм: 1) диаграммы деформирования цельного арматурного стержня; 2) диаграммы деформирования стыкового соединения при помощи муфт; 3) диаграммы деформирования бетона ε_0 — σ_0.

К л ю ч е в ы е с л о в а : диаграммная методика, муфтовое соединение арматуры, относительные деформации бетона в вершине диаграммы сжатия бетона ε_{b0}, напряжения бетона в вершине σ_{b0}, коэффициент γ_{sm}, напряжения $\sigma_{b(0,85)}$ и деформации бетона $\varepsilon_{b(0,85)}$ на нисходящей ветви диаграммы.

The authors develop the methodology of assessment of strength reduction of steel muff joints on the basis of correlation of three diagrams: 1) the diagram of monolithic reinforced bar straining; 2) the diagram of straining of butt joints with the help of muff; 3) the diagram of concrete straining ε_0 — σ_0.

K e y w o r d s: diagram methodology, steel muff joint, relative concrete straining on the top of the diagram of concrete shrinkage ε_{b0}, concrete stress on the top σ_{b0}, coefficient γ_{sm}, stress $\sigma_{b(0,85)}$ and concrete straining $\varepsilon_{b(0,85)}$ on the falling brunch of the diagram.

В современном проектировании для армирования монолитных железобетонных конструкций взамен традиционных соединений арматурных стержней внахлест используются специальные муфтовые соединения арматуры (резьбовые и обжимные). Значительное распространение такие соединения нашли при строительстве зданий ММДЦ «Москва-Сити».

Основной недостаток таких соединений заключается в их повышенной деформативности по сравнению с деформациями цельных арматурных стержней, что сказывается на их прочности, особенно при стыковке сжатой арматуры. При этом снижение прочности в значительной степени зависит еще и от конструктивных особенностей муфтовых соединений различных производителей и качества изготовления муфтовых соединений в условиях строительной площадки. Как показали многочисленные экспериментальные исследования, проведенные в НИИСФ РААСН, прочность стыковых соединений может снижаться на 5…25 % и более.

Для учета указанных факторов в НИИСФ РААСН была разработана методика оценки снижения прочности на основе сопоставления трех видов диаграмм: 1) диаграммы деформирования цельного арматурного стержня; 2) диаграммы деформирования стыкового соединения при помощи муфт; 3) диаграммы деформирования бетона ε_0 — σ_0.

Полностью диаграммы деформирования бетона используются в диаграммном методе оценки деформаций, прочности и трещиностойкости. Основной величиной в сопоставительном анализе прочности на сжатие выступает величина ε_{b0} — относительные деформации бетона в вершине диаграм-

мы сжатия бетона, которым соответствуют напряжения бетона в вершине σ_{b0}. По этим значениям определяется значение нормативной прочности бетона R_{bn}. Согласно СНиП 52-01—2003 «Бетонные и железобетонные конструкции», величина ε_{b0} не зависит от класса бетона и принимается равной $\varepsilon_{b0} = 2 \cdot 10^{-3}$. Учитывая условие совместности деформаций арматуры и бетона, полагается, что и сжатая арматура может использоваться до ее деформаций $\varepsilon_s \approx 2 \cdot 10^{-3}$. При этом деформациям $\varepsilon_s \approx 2 \cdot 10^{-3}$ соответствуют напряжения в арматуре σ_{sc}, по которым определяется расчетное сопротивление сжатия R_{sc}. Сопоставляя диаграммы деформирования арматуры и муфтового соединения (рис. 1—4), можно заметить, что деформациям $\varepsilon_{bo} = 2 \cdot 10^{-3}$ соответствуют пониженные значения напряжений муфтового соединения по сравнению с напряжениями цельного арматурного стержня. По отношению этих напряжений и определяется пониженный коэффициент γ_{sm} прочности муфтовых соединений на сжатие.

Представленные в [1] исследования показывают, что величина ε_{bo} не является постоянной, а зависит от прочности бетона (класса бетона). Кроме этого, разрушение бетона может происходить при напряжениях и деформациях бетона на нисходящей ветви диаграммы. Исследователи полагают, что в расчетах переход на нисходящую ветвь можно использовать до напряжений $\sigma_b \approx \sigma_{b(0,85)} = 0,85\sigma_{b0}$. Деформации бетона на нисходящей ветви, соответствующие напряжениям $0,85\sigma_{b0}$, обозначаются $\varepsilon_{b(0,85)}$.

Рассмотрим, к каким резервам может приводить учет реальных переменных значений ε_{b0} и $\varepsilon_{b(0,85)}$ для различных классов бетона.

Деформации ε_{b0} и $\varepsilon_{b(0,85)}$, вычисленные по рекомендациям [1] для разных классов бетона, приведены в табл. 1, 2, рис. 1—4, где $R_{\text{ср}}$ — средняя прочность испытанных муфтовых соединений; S — стандартное отклонение; V — коэффициент вариации; σ_{sc} — напряжение в арматуре; γ_{sm} — коэффициент прочности муфтовых соединений.

Проведенные испытания муфтовых соединений и анализ полученных данных показали, что деформациям $\varepsilon_{bo} = 2 \cdot 10^{-3}$ соответствуют пониженные значения напряжений муфтового соединения (кроме обжимных муфт) по сравнению с напряжениями цельного арматурного стержня. При расчетах следует использовать пониженный коэффициент γ_{sm}.

Однако, если учитывать зависимость значений ε_{b0} от класса бетона, то для повышенных классов бетона влияние понижающего коэффициента может быть уменьшено. При допустимых значениях деформаций бетона на нисходящей ветви понижающей коэффициент стремится к единице. Однако возможность учета этого фактора требует экспериментального исследования. Кроме этого в областях стыковых соединений должно предусматриваться повышенное поперечное армирование, которое также должно назначаться на основе специальных экспериментальных исследований.

Таблица 1

Производитель муфт	Класс бетона В	25	30	40	50	60	70	80	90	100
	$e_{b0}\cdot10^{-5}$	200,00	201,40	208,40	214,00	222,00	227,40	235,90	242,30	249,30
LENTON ∅36	R_{cp}	334,76	337,10332	348,81992	358,1932	371,5836	380,62212	394,84942	405,56174	417,27834
	S	21,8109758	21,96365266	22,7270368	23,337744	24,210183	24,7990795	25,726046	26,4239972	27,1873814
	V	0,06515407	0,065154068	0,06515407	0,0651541	0,0651541	0,06515407	0,06515407	0,06515407	0,06515407
	σ_{sc}	299	301	312	320	332	340	353	362	373
	γ_{sm}	0,75	0,75	0,78	0,80	0,83	0,85	0,88	0,91	0,93
СПРУТ ∅32	R_{cp}	518,53	522,15971	540,30826	554,8271	575,5683	589,56861	611,606135	628,199095	646,347645
	S	35,1012076	35,34691609	36,5754584	37,558292	38,96234	39,9100731	41,4018744	42,5251131	43,7536553
	V	0,06769369	0,067693687	0,06769369	0,0676937	0,0676937	0,06769369	0,06769369	0,06769369	0,06769369
	σ_{sc}	461	464	480	493	512	524	544	558	575
	γ_{sm}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CONCON ∅28	R_{cp}	349,728	352,176096	364,416576	374,20896	388,19808	397,640736	412,504176	423,695472	435,935952
	S	53,3758721	53,74950318	55,6176587	57,112183	59,247218	60,6883666	62,9568411	64,664869	66,5330245
	V	0,1526211	0,1526211	0,1526211	0,1526211	0,1526211	0,1526211	0,1526211	0,1526211	0,1526211
	σ_{sc}	262	264	273	281	291	298	309	318	327
	γ_{sm}	0,66	0,66	0,68	0,70	0,73	0,75	0,77	0,79	0,82
CABR ∅32	R_{cp}	383,4975	386,1819825	399,604395	410,34233	425,68223	436,036658	452,335301	464,607221	478,029634
	S	39,3276456	39,6029391	40,9794067	42,080581	43,653687	44,715533	46,386958	47,6454426	49,0219102
	V	0,10254994	0,10254994	0,10254994	0,1025499	0,1025499	0,10254994	0,10254994	0,10254994	0,10254994
	σ_{sc}	319	321	332	341	354	363	376	386	398
	γ_{sm}	0,80	0,80	0,83	0,85	0,89	0,91	0,94	0,97	0,99

Таблица 2

Производитель муфт	Класс бетона В	25	30	40	50	60	70	80	90	100
	$e_{b(0,85)}10^{-5}$	360,30	356,45	355,80	352,30	352,30	347,60	346,40	340,50	333,40
LENTON ∅36	$R_{ср}$	539,201884	537,162022	536,815457	534,93839	534,93839	532,388201	531,731563	528,469648	524,46852
	S	11,7865325	11,96344279	11,9993536	12,222338	12,222338	12,5986436	12,7084334	13,3256722	14,2280876
	V	0,02185922	0,022271572	0,02235285	0,0228481	0,0228481	0,02366439	0,02390009	0,02521559	0,02712858
	σ_{sc}	520	518	517	515	515	512	511	507	501
	γ_{sm}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
СПРУТ ∅32	$R_{ср}$	568,265229	566,446507	566,137513	564,46393	564,46393	562,190213	561,604761	558,696468	555,129099
	S	18,0686742	17,93441379	17,9116972	17,78914	17,78914	17,6239561	17,5816749	17,373201	17,1211392
	V	0,0317962	0,031661266	0,03163842	0,0315151	0,0315151	0,03134874	0,03130614	0,03109596	0,03084173
	σ_{sc}	539	537	537	535	535	533	533	530	527
	γ_{sm}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CONCON ∅28	$R_{ср}$	513,757004	511,9633465	511,658611	510,0081	510,0081	507,765708	507,188324	504,320109	500,801902
	S	27,0718594	27,099769	27,1054636	27,141103	27,141103	27,2024504	27,2206472	27,3255165	27,4867381
	V	0,0526939	0,052933026	0,05297568	0,053217	0,053217	0,05357284	0,0536697	0,05418288	0,05488545
	σ_{sc}	469	468	467	465	465	463	463	460	456
	γ_{sm}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
CABR ∅32	$R_{ср}$	547,267773	545,1250198	544,760974	542,78922	542,78922	540,110405	539,420647	535,994199	531,791252
	S	18,3654543	18,71723958	18,777303	19,104057	19,104057	19,5517089	19,667636	20,2473138	20,9664104
	V	0,03355844	0,034335682	0,03446888	0,0351961	0,0351961	0,03619947	0,03646067	0,03777525	0,03942602
	σ_{sc}	517	514	514	511	511	508	507	503	497
	γ_{sm}	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

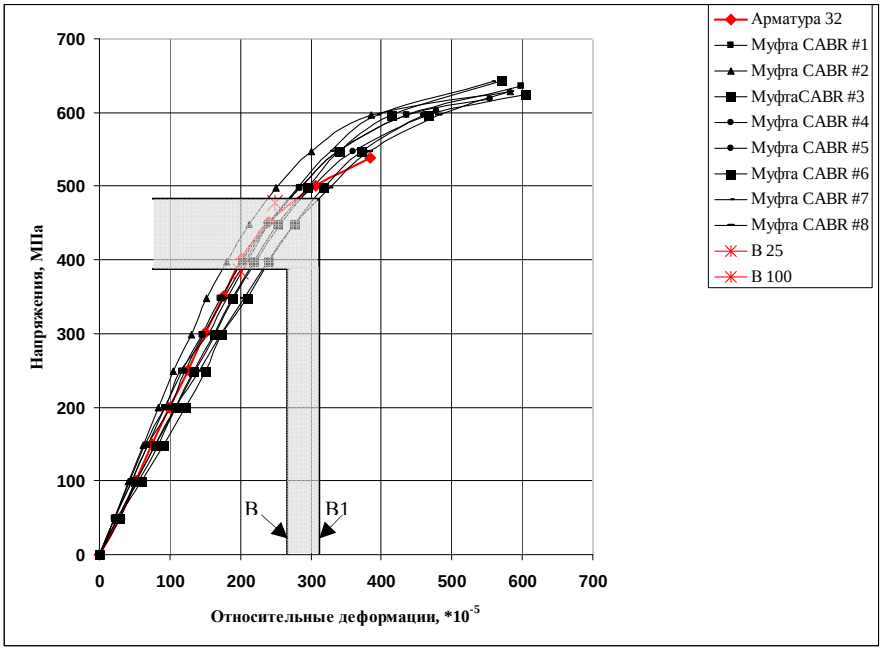


Рис. 1. Диаграммы деформирования муфт «CABR» и арматурного стержня ∅ 32 мм
при растяжении

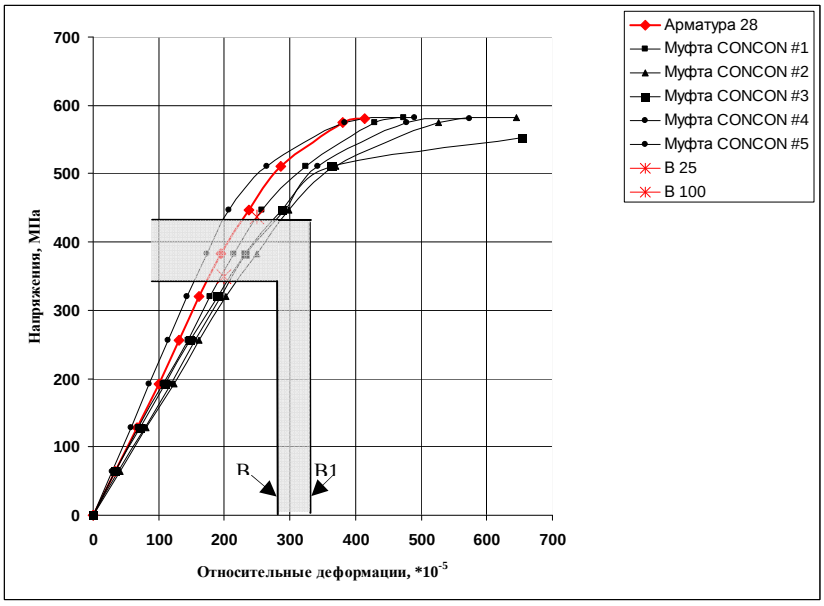


Рис. 2. Диаграммы деформирования муфт «CONCON» и арматурного стержня ∅ 28 мм при растяжении

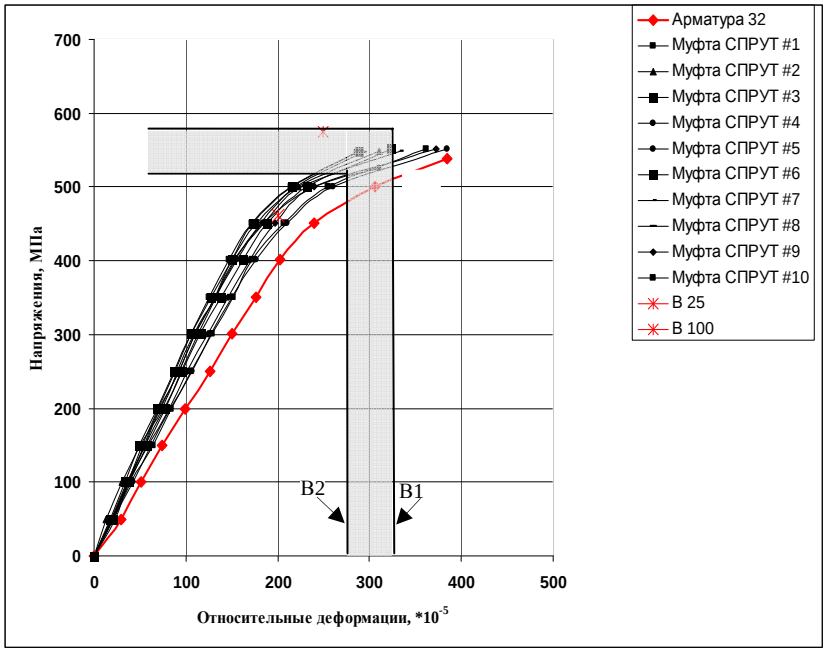


Рис. 3. Диаграммы деформирования муфт «СПРУТ» и арматурного стержня ∅ 32 мм
при растяжении

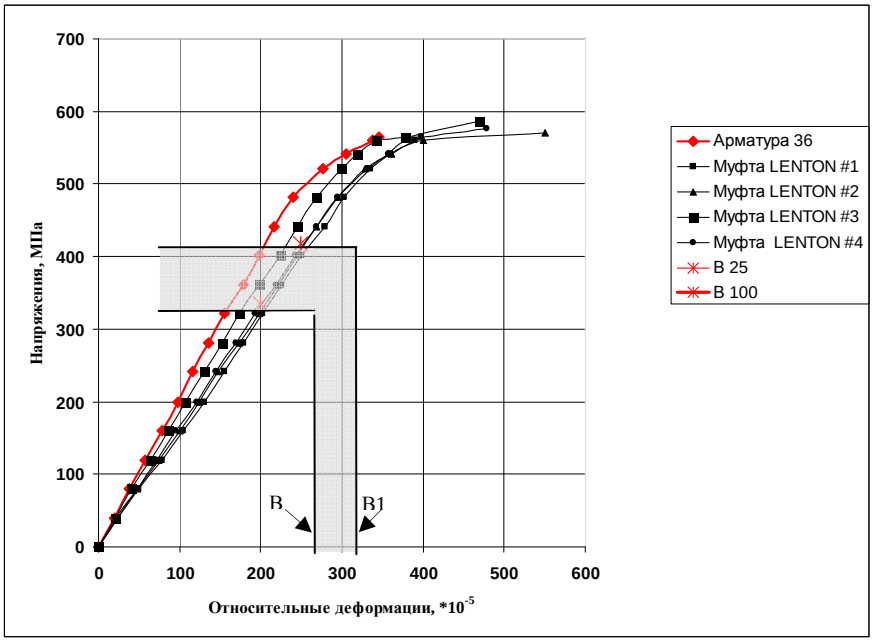


Рис. 4. Диаграммы деформирования муфт «LENTON» и арматурного стержня ∅ 36 мм при растяжении

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Карпенко Н. И., Радайкин О. В.* К совершенствованию диаграмм деформирования бетона для определения момента трещинообразования и разрушающего момента в изгибаемых железобетонных элементах // Известия. Строительство. Транспорт. Орел, 2012. № 1.

1. *Karpenko N. I., Radaykin O. V.* K sovershenstvovaniyu diagramm deformirovaniya betona dlya op-redeleniya momenta treshchinoobrazovaniya i razrushayushchego momenta v izgibaemykh zhelezobetonnykh elementakh // Izvestiya. Stroitel'stvo. Transport. Orel, 2012. № 1.

© Карпенко С. Н., Чепизубов И. Г., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Карпенко С. Н., Чепизубов И. Г. Влияние деформативности бетона на прочности муфтовых соединений арматуры в железобетонных конструкциях // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 35—41.

УДК 628.87:697

И. Я. Киселёв

ВЛИЯНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ТЕПЛОПЕРЕДАЧЕ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ

Исследовано влияние зависимости теплопроводности строительных материалов от температуры на сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: строительные материалы, ограждающие конструкции зданий, температура, теплопроводность, сопротивление теплопередаче.

Analyzed is the temperature dependence of heat conduction of construction materials on resistance to heat transmission of building envelope.

K e y w o r d s: construction materials, building envelope, temperature, heat conduction, resistance to heat transmission.

Одномерное стационарное температурное поле плоской однослойной наружной ограждающей конструкции, изготовленной из материала, теплопроводность которого линейно зависит от температуры, описывается уравнением:

$$q = \lambda_{25}\{1 + f_{\Theta}[T(x) - 298{,}15]\}\frac{dT(x)}{d(x)}, \quad (1)$$

где q — плотность теплового потока через конструкцию, Вт/м^2 ; λ_{25} — теплопроводность материала при температуре +25 °С, Вт/(м·К); f_{Θ} — температурный коэффициент теплопроводности, К$^{-1}$; T — температура, К; x — координата, м.

Решение этого уравнения:

$$\lambda_{25} f_{\Theta} T^2 + 2\lambda_{25}(1 - 298{,}15 f_{\Theta})T + 2(qx - C) = 0 \text{ или} \quad (2)$$

$$T = \frac{-\lambda_{25}(1 - 298{,}15 f_{\Theta}) + \sqrt{\lambda_{25}{}^2(1 - 298{,}15 f_{\Theta})^2 + 2\lambda_{25} f_{\Theta}(C - qx)}}{\lambda_{25} f_{\Theta}}, \quad (3)$$

где C — константа интегрирования, Вт/м.

Значения плотности теплового потока q и константы интегрирования C определяют путем решения системы двух уравнений, полученных подстановкой в формулу (2) значений $T = T_{in} - q/\alpha_{in}$ при x=0 и $T = T_{ex} + q/\alpha_{ex}$ при $x = d$:

$$\begin{cases} \lambda_{25} f_{\Theta}\left(T_{in} - q/\alpha_{in}\right)^2 + 2\lambda_{25}\left(1 - 298{,}15 f_{\Theta}\right)\left(T_{in} - q/\alpha_{in}\right) - 2C = 0, & (4) \\ \lambda_{25} f_{\Theta}\left(T_{ex} + q/\alpha_{ex}\right)^2 + 2\lambda_{25}\left(1 - 298{,}15 f_{\Theta}\right)\left(T_{ex} + q/\alpha_{ex}\right) + \\ +2\left(qd - C\right) = 0, & (5) \end{cases}$$

где T_{in}, T_{ex} — температура внутреннего и наружного воздуха, К; α_{in} α_{ex} — коэффициент теплообмена на наружной и внутренней поверхностях конструкции в зимних условиях, Вт/(м^2·К); d — толщина конструкции, м.

Путем несложных преобразований получим уравнения второй и первой степени относительно плотности теплового потока q и константы C:

$$\left(\frac{1}{\alpha_{in}^2}-\frac{1}{\alpha_{ex}^2}\right)q^2-2\left[\left(\frac{T_{in}}{\alpha_{in}}+\frac{T_{ex}}{\alpha_{ex}}\right)+\frac{1-298{,}15\,f_\theta}{f_\theta}\left(\frac{1}{\alpha_{in}}+\frac{1}{\alpha_{ex}}\right)+\frac{d}{\lambda_{25}f_\theta}\right]q+ \\ +T_{in}^2-T_{ex}^2+2\frac{1-298{,}15\,f_\theta}{f_\theta}\left(T_{in}-T_{ex}\right)=0, \tag{6}$$

$$C=\frac{\lambda_{25}f_\theta\left(T_{in}-q\alpha_{in}^{-1}\right)^2+2\lambda_{25}\left(1-298{,}15\,f_\theta\right)\left(T_{in}-q\alpha_{in}^{-1}\right)}{2}. \tag{7}$$

Соотношения (8), (9) и (10), полученные ранее [1, 2], также необходимы при проведении расчетов температурных полей и приведенного сопротивления теплопередаче стеновых панелей.

Теплопроводность волокнистых эффективных теплоизоляционных материалов равна [1, 2]:

$$\lambda\left(\gamma_o,\gamma_g,\gamma_s,D_1,\Theta,\nabla\left(\Theta+273{,}15\right),\alpha_g,\eta_g\,f\Theta\mathrm{g}\ ,f_{\Theta s},\lambda_{g25},\lambda_{s25},c_p,p,d\right)= \\ =\lambda_{cdg}+\lambda_{cds}+\lambda_r+\lambda_{cv}=\frac{\frac{\pi\gamma_s}{4\gamma_o}D_1}{\frac{\pi\gamma_s}{4\gamma_o}D_1+\frac{RT}{\pi\sqrt{2}\cdot d^2pN_A}}\lambda_{g25}\left[1+f_{\Theta g}\left(\Theta-25\right)\right]+ \\ +K_B\lambda_{S25}\left[1+f_{\Theta S}\left(\Theta-25\right)\right]\frac{\gamma_o}{\gamma_s}+K_C\sigma_rD_1\left(\Theta+273{,}15\right)^3\frac{\gamma_s}{\gamma_o}+ \\ +1{,}91\cdot10^{-4}\frac{\pi^4\alpha_g[\gamma_g\left(\Theta+273{,}15\right)]^2g\cdot\nabla\left(\Theta+273{,}15\right)\cdot c_p\left(\Theta+273{,}15\right)\cdot D_1^4\gamma_s^4}{[\eta_g\left(\Theta+273{,}15\right)]\gamma_o^4}. \tag{8}$$

Теплопроводность ячеистых эффективных теплоизоляционных материалов равна [1, 2]:

$$\lambda\left(\gamma_o,\gamma_g,\gamma_s,D_2,\Theta,\nabla\left(\Theta+273{,}15\right),\alpha_g,\eta_g\,f_{\Theta S},f_{\Theta S},\lambda_{g25},\lambda_{S25},c_p,p,d\right)= \\ =\lambda_{cdg}+\lambda_{cds}+\lambda_{cdg}+\lambda_{cv}=\frac{D_2}{D_2+\frac{RT}{\pi\sqrt{2}\cdot d^2pN_A}}\lambda_{g25}\left[1+f_{\Theta g}\left(\Theta-25\right)\right]+ \\ +K_B\lambda_{S25}\left[1+f_{\Theta S}\left(\Theta-25\right)\right]\frac{\gamma_o}{\gamma_s}+K_C\sigma_r\left[\left(1-\gamma_o\gamma_s^{-1}\right)^{-\frac{1}{3}}-1\right]D_2\left(\Theta+273{,}15\right)^3\frac{\gamma_s}{\gamma_o}+ \\ +0{,}0488\frac{\alpha_g\left[\gamma_g\left(\Theta+273{,}15\right)\right]^2g\cdot\nabla\left(\Theta+273{,}15\right)\cdot c_p\left(\Theta+273{,}15\right)\cdot D_2^4}{\eta_g\left(\Theta+273{,}15\right)}. \tag{9}$$

Температурный коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов равен [1, 2]:

$$f_\Theta\left(\gamma_o,\gamma_s,\lambda_{g25},\lambda_{S25},f_{\Theta g},f_{\Theta S},D^*,\Theta\right)=$$

$$= \frac{\lambda_{g25} f_{\Theta g} + K_B \lambda_{S25} f_{\Theta S} \frac{\gamma_o}{\gamma_S} + 3K_C D^* \sigma_r (\Theta + 273{,}15)^2 \frac{\gamma_S}{\gamma_o}}{\lambda_{g25}\left[1 + f_{\Theta g}(\Theta - 25)\right] + K_B \lambda_{S25}\left[1 + f_{\Theta S}(\Theta - 25)\right]\frac{\gamma_o}{\gamma_S} + K_C D^* \sigma_r (\Theta + 273{,}15)^3 \frac{\gamma_S}{\gamma_o}}, \quad (10)$$

где λ — теплопроводность волокнистого или ячеистого материала, Вт/(м·К); λ_{cdg} — кондукционная составляющая теплопроводности газа в порах, Вт/(м·К); λ_{cds} — кондукционная составляющая теплопроводности материала, значение которой определяется теплопроводностью его матрицы, Вт/(м·К); λ_r — радиационная составляющая теплопроводности материала, Вт/(м·К); λ_{cv} — конвекционная составляющая теплопроводности газа, Вт/(м·К); γ_o, γ_s и γ_g — плотность материала, плотность матрицы материала и плотность газа в порах, кг/м^3; $f_{\Theta g}$ и $f_{\Theta S}$ — температурный коэффициент теплопроводности газа в порах и матрицы, 1/°С; D_1 и D_2 — диаметр волокон и пор, м; Θ — температура,°С; $\nabla(\Theta + 273{,}15)$ — градиент температуры, К/м; λ_{g25} и λ_{S25} — теплопроводность газа и матрицы при температуре +25°С, Вт/(м·К); p — давление газа, Па; d — диаметр молекулы газа, м; c_p — удельная теплоемкость газа при постоянном давлении, Дж/(кг·К); α_g— температурный коэффициент объемного расширения газа, К$^{-1}$; η_g — вязкость газа, Па·с; K_B и K_C — безразмерные эмпирические константы; g — ускорение свободного падения (9,807 м/с^2); R = 8,314·10^3 Дж/(кмоль·К) — универсальная газовая постоянная; N_A = 6,023·10^{26} кмоль$^{-1}$ — число Авогадро; σ_r = 5,670·10^{-8} Вт/(м^2·К^4) — постоянная Стефана — Больцмана; для волокнистых материалов $D^* = D_1$; для ячеистых $D^* = [\left(1 - \gamma_o \gamma_s^{-1}\right)^{-\frac{1}{3}} - 1]D_2$.

Ниже даны примеры применения соотношений (3)—(10) при расчете температурных полей и приведенного сопротивления теплопередаче стеновых сандвич-панелей со стальными обшивками (коэффициент теплотехнической однородности 0,75), предназначенных для общественных зданий г. Кемерово. В качестве утеплителя в этих панелях применены следующие изделия:

минераловатные плиты ROS 60 финской фирмы «PAROC» (плотность γ_o = 140 кг/м^3, теплопроводность при температуре +25°С λ_{25} = 0,037 Вт/(м·К), расчетное значение теплопроводности при отсутствии увлажнения в процессе эксплуатации заимствовано из технического свидетельства и равно 0,040 Вт/(м·К));

пенополиуретан австрийской фирмы «PLAUM PU GmbH» (плотность γ_o = 45 кг/м^3, теплопроводность при температуре +25°С λ_{25} = 0,036 Вт/(м·К), расчетное значение теплопроводности при отсутствии увлажнения в процессе эксплуатации заимствовано из технического свидетельства и равно 0,040 Вт/(м·К)).

Согласно СНиП 23-02—2003 [3] и СП 23-101—2004 [4] для общественных зданий г. Кемерово: расчетная температура внутреннего воздуха T_{in}= 293,15 К (+ 20 °С); расчетная относительная влажность внутреннего воздуха φ_{in} =55 %; расчетная зимняя температура наружного воздуха равна температуре наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,92 T_{ex} = 234,15 К (–39 °С); градусосутки отопительного периода D_d = 6540 °С·сут; требуемое значение приведенного сопротивления теплопередаче этих панелей R_{req} = 3,16 м^2·°С/Вт.

Следовательно, толщина слоя утеплителя из минераловатных плит ROS 60 должна быть равна d = 0,17 м, а толщина слоя утеплителя из пенополиуретана фирмы «PLAUM PU GmbH» должна быть равна d = 0,17 м.

Расчеты температурных полей этих панелей, выполненные с применением уравнений (3) и (6) — (10), т. е. с учетом зависимости теплопроводности утеплителей от температуры, показывают:

приведенное сопротивление теплопередаче панели с утеплителем из минераловатных плит равно R_o = 3,98 м^2·°С/Вт, следовательно, оно на 20 % больше, чем значение этого показателя, вычисленное по СП 23-101—2004 [4], т. е. без учета зависимости теплопроводности минераловатных плит от температуры;

приведенное сопротивление теплопередаче панели с утеплителем из пенополиуретана равно R_o = 4,40 м^2·°С/Вт, следовательно, оно на 33 % больше, чем значение этого показателя, вычисленное по СП 23-101—2004 [4], т. е. без учета зависимости теплопроводности пенополиуретана от температуры.

Приведенное сопротивление теплопередаче панели с утеплителем из пенополиуретана R_o = 4,40 м^2·°С/Вт больше, чем приведенное сопротивление теплопередаче панели с утеплителем из минераловатных плит R_o = 3,98 м^2·°С/Вт вследствие того, что температурный коэффициент теплопроводности пенополиуретана по f_Θ = 0,0050 1/°С больше, чем температурный коэффициент теплопроводности минераловатных плит ROS 60 f_Θ = 0,00311/°С.

Из анализа результатов проведенных расчетов следует, что учет зависимости теплопроводности строительных материалов от температуры при расчете процессов теплопереноса через наружные ограждающие конструкции зданий обеспечивает:

повышение точности расчета теплозащитных свойств ограждающих конструкций и зданий в целом;

уменьшение расхода строительных материалов при возведении зданий без нарушения требований к теплотехническим показателям наружных ограждающих конструкций, что, в свою очередь, направлено на решение проблемы энерго- и ресурсосбережения в строительстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Киселев И. Я.* Теплопроводность эффективных теплоизоляционных строительных материалов и изделий //Academia. Архитектура и строительство. 2004. № 4. С. 36—41.

2. *Киселев И. Я.* Теплоперенос через волокнистые и ячеистые эффективные материалы // Материалы научной конференции «Строительная физика в XXI веке». М., 2006. С. 58—64.

3. СНиП 23-02—2003. Тепловая защита зданий. М., 2004. 27 с.

4. СП 23-101—2004. Проектирование тепловой защиты зданий. М., 2005. 96 с.

1. *Kiselev I. Ya.* Teploprovodnost' effektivnykh teploizolyatsionnykh stroitel'nykh materialov i izdeliy //Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2004. № 4. S. 36—41.

2. *Kiselev I. Ya.* Teploperenos cherez voloknistye i yacheistye effektivnye materialy // Materialy nauchnoy konferentsii «Stroitel'naya fizika v XXI veke». M., 2006. S. 58—64.

3. SNiP 23-02—2003. Teplovaya zashchita zdaniy. M., 2004. 27 s.

4. SP 23-101—2004. Proektirovanie teplovoy zashchity zdaniy. M., 2005. 96 s.

© Киселёв И. Я., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Киселёв И. Я. Влияние зависимости теплопроводности строительных материалов от температуры на сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций зданий // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 42—45.

УДК 624.042

Н. В. Клюева, С. Г. Емельянов, Вл. И. Колчунов

КОНЦЕПТУАЛЬНО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЖИВУЧЕСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ*

Рассмотрены современные концептуальные подходы к развитию методов расчета конструктивной безопасности сооружений и совершенствованию нормативной базы по проектированию зданий и сооружений при проектных и запроектных воздействиях, в том числе с учетом возможного лавинообразного обрушения от внезапного выключения отдельных конструктивных элементов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: прогрессирующее обрушение, конструктивная безопасность, живучесть, аварии, запроектная нагрузка.

Modern conceptual approaches to the development of methods of assessment of constructive safety of buildings and improvement of regulatory system for building design at design and over-design impacts taking into account possible avalanche-like crush caused by a sudden cessation of separate constructive element are considered.

K e y w o r d s: progressive failure, structural safety, liveness, accidents, over-design load.

В связи с принятием Федерального закона РФ № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», с учетом технического состояния основных фондов страны проблема конструктивной безопасности зданий и сооружений приобретает все большую актуальность. Понимание этой проблемы сегодня выходит за рамки традиционного представления о конструктивной безопасности как об обеспечении выполнения требований предельных состояний первой и второй групп и требует отдельного анализа. Одним из его аспектов является задача установления связи между новыми видами современных вызовов (запроектными воздействиями), принимаемыми конструктивными решениями несущих систем и их безопасностью. В условиях отсутствия глубоких научных обоснований и опыта проектирования зданий и сооружений с учетом возможных внезапных запроектных воздействий техногенного природного и даже террористического характера решение этой сложной проблемы носит фрагментарный характер с последующими обобщениями по мере накопления новых результатов о силовом и средовом сопротивлении зданий и сооружений при запроектных воздействиях.

Анализ предлагаемых в исследованиях последних двух десятилетий концептуальных подходов к созданию методов расчета и совершенствованию нормативной базы по проектированию зданий и сооружений с учетом возможного лавинообразного обрушения от запроектных воздействий позволяет отметить следующее. Во-первых, при использовании метода расчета по предельным состояниям не просматривается решение вопросов, связанных с опреде-

* Работа выполнена при финансовой поддержке федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы в рамках реализации мероприятий 1.5 по теме «Развитие теории живучести конструктивных систем зданий и сооружений на основе физических моделей сопротивления железобетона при статико-динамическом нагружении».

лением и, тем более, нормированием параметров запроектных воздействий, поскольку заранее невозможно определить ни зону, ни характер и величину такого воздействия. Во-вторых, как правило, такие воздействия носят сложный многопараметрический характер, и традиционные подходы теории предельных состояний оказываются малоэффективными. Методы расчета на такие воздействия существенно усложняются, поскольку требуется выполнять динамические расчеты конструктивных систем минимум с двойной нелинейностью в условиях неопределенности воздействия.

Второе направление возможного решения подобных задач, базировавшееся на существовавшем ранее подходе защиты от техногенных аварий типа «взрыв», строилось на концепции исключения потенциальной опасности аварийного воздействия за счет применения превентивных или организационных мероприятий [1]. Существующий в нормативных документах способ защиты взрывоопасных производств путем устройства легкосбрасываемых конструкций или установки защитных барьеров эффективен лишь тогда, когда четко обозначены места хранения взрывчатых материалов или взрывоопасные зоны производств. Не анализируя детали такой защиты, отметим в целом недостаточную эффективность такого подхода в современной теории конструктивной безопасности и живучести сооружений, поскольку место расположения источника опасности при запроектных воздействиях техногенного и, тем более, террористического характера, как правило, остается неизвестным.

Следующим обсуждаемым в литературе [2, 3] научным направлением в обеспечении конструктивной безопасности является резервирование прочности конструктивных ключевых элементов, расположенных в зонах возможных аварийных воздействий, или создание резервных путей передачи усилий от аварийных воздействий. При этом ключевые элементы или параллельные пути передачи данных выявляются статическим анализом работы системы, а интенсивность возможного аварийного воздействия подлежит нормированию. Несложно видеть, что в условиях неопределенности источника воздействия, его интенсивности и места расположения этот способ защиты может оказаться не всегда эффективным.

В отечественной и мировой практике проектирования конструктивных систем широкое применение получило направление, связанное с максимальным учетом их пространственной работы [4]. Объединением отдельных конструктивных элементов в пространственно работающую многократно статически неопределимую систему добиваются перераспределения внутренних усилий и, как предполагалось, компенсации выключения при аварии несущего элемента или целой зоны. Отрицательной особенностью этого варианта является то, что он срабатывает только при относительно небольшом объеме повреждений и лишь определенной топологии конструктивной системы. В отдельных случаях может возникать эффект, обратный ожидаемому, — лавинообразное прогрессирующее обрушение конструктивной пространственной системы.

В последние годы в связи с все более широким обсуждением проблемы прогрессирующего обрушения в научной литературе обозначено еще одно направление решения задач живучести конструктивных систем. В исследованиях [5, 6] было показано, что при разрушении конструктивных систем опас-

ным становится не только мгновенное выключение из работы какого-то элемента (узла, сечения), но и влияние возникающего при этом динамического эффекта такого выключения на другие оставшиеся неразрушенными элементы. В работе [7] выполнен аналитический анализ и приведены конкретные расчетные зависимости для оценки динамических эффектов в стержневых системах из хрупких материалов типа железобетона. На примере изгибаемого железобетонного стержня установлено, что при мгновенном образовании в бетоне стержня трещины от внешней нагрузки в нем происходит перераспределение усилий, и напряжения в растянутой арматуре мгновенно увеличиваются. Причем это увеличение значительно больше того усилия, которое возникло бы в арматуре при перераспределении общего усилия в рассматриваемом железобетонном стержне от выключения из работы бетона, если бы это перераспределение происходило медленно.

В развитие такого анализа в монографии [8] на основе энергетического подхода дана количественная оценка приращений динамических напряжений в элементах стержневых систем из физических нелинейных хрупких материалов. Подчеркивая исключительную важность решения таких задач, В. М. Бондаренко, Е. А. Ларионов [9] обозначили это направление как одно из важнейших в исследованиях по строительной механике и теории сооружений конструктивно нелинейных систем с внезапно выключающимися элементами. Ими и другими исследователями обращено внимание на необходимость пересмотра коэффициентов запаса для конструкционных материалов и конструктивных систем.

Важнейшей составляющей в решении проблемы конструктивной безопасности зданий и сооружений является учет их эксплуатационного износа и повреждений [10]. Эволюционные накопления повреждений (например, коррозионный износ) в конечном итоге может также привести к внезапному хрупкому разрушению отдельных связей или элементов и последующему локальному или лавинообразному обрушению конструктивной системы. Анализ силового сопротивления нагруженных и одновременно коррозионно повреждаемых рамно-стержневых конструктивных систем при внезапных структурных изменениях в них от накопления коррозионных повреждений приведен в работе [11]. Показано, что эволюционные накопления коррозионных повреждений в связях рамно-стержневой системы ведут к внезапному разрушению стойки вследствие потери устойчивости от изменения ее свободной длины.

Для критериальной оценки живучести физически и конструктивно нелинейных систем из железобетона (под живучестью здесь понимается сопротивляемость системы разрушению после внезапного выключения из работы одного из нагруженных ее элементов) предложен обобщенный параметр живучести [12]. Этим параметром определяются уровни внешней нагрузки, в пределах которых происходит полное или локальное разрушение конструктивной системы после внезапного выключения в ней одного из наиболее нагруженных или наиболее слабых элементов.

При этом следует сделать акцент на необходимость углубленного анализа критерия исчерпания предельных состояний первой и второй группы, даже оставаясь в рамках традиционного метода предельных состояний. В первую очередь это касается приопорных зон сопротивления железобетонных конст-

рукций, образующих несущий остов зданий и сооружений. Тщательный анализ сопротивления приопорных зон железобетонных конструкций [13] показывает, что здесь возможна реализация следующих случаев разрушения:

разрушение бетона над опасной косой трещиной из веера 1, примыкающего к сосредоточенной силе;

разрушение от развития опасной косой трещины из веера 2, примыкающей к опорам;

разрушение потери сцепления между бетоном и рабочей продольной арматурой в приопорной зоне, на участке заанкеривания.

Аналогичные случаи могут быть рассмотрены и для оценки второй группы предельных состояний применительно к ширине раскрытия наклонных трещин. Такие трещины могут иметь максимальную ширину раскрытия как применительно к вееру 1, так и применительно к вееру 2, как вдоль оси поперечной арматуры, так и вдоль оси продольной арматуры. Весьма важным обстоятельством при этом является проблема выбора наиболее опасной трещины и обозначенных вееров.

Анализируя результаты приведенных и других исследований, а также состояние современной нормативной базы по вопросам конструктивной безопасности зданий и сооружений, можно отметить следующее. Для создания основ конструктивной безопасности необходимы широкомасштабные экспериментальные исследования конкретных типов конструктивных систем и накопление качественных закономерностей и новых статистических данных об уязвимости таких систем при различных аварийных ситуациях. Эти данные позволят сформулировать принципы обеспечения живучести сооружений и разработать адаптационные механизмы для локализации разрушений при внезапных авариях.

Совершенно очевидно, что запроектировать и построить сооружение, не допускающее разрушений вообще, невозможно из-за известной изменчивости свойств материалов, неопределенности постоянно меняющихся воздействий и других условий. Поэтому защита зданий от запроектных воздействий при чрезвычайных ситуациях в будущем будет строиться, по-видимому, и на вероятностной основе с использованием понятия приемлемого риска. В то же время даже приведенный анализ современных концептуально методологических подходов к оценке конструктивной безопасности показывает, что метод предельных состояний может обеспечить необходимую преемственность и методическое единство с существующей сегодня нормативной базой и в кратчайшие сроки позволит создать основы теории живучести строительных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Расторгуев Б. С.* Обеспечение живучести зданий при особых динамических воздействиях // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003. № 4.

2. Рекомендации по защите жилых каркасных зданий при чрезвычайных ситуациях / Правительство Москвы, Москомархитектура. М., 2002.

3. *Алмазов В. О.* Сопротивление прогрессирующему разрушению в многоэтажных каркасах рамного типа // Высотные и большепролетные здания. Технологии инженерной безопасности и надежности (семинар). М. : МГСУ, 2004.

4. *Пятикрестовский К. П.* Особенности применения критериев прочности материалов при расчете тонкостенных пространственных конструкций // Особенности проектирования и расчета пространственных конструкций на прочность, устойчивость и прогрессирующее разрушение. М. : Пространственные конструкции, 2009. С. 66—68.

5. *Гениев Г. А., Клюева Н. В.* Экспериментально-теоретические исследования неразрезных балок при аварийном выключении из работы отдельных элементов // Известия ВУЗов. Строительство, 2000. С. 24—26.

6. *Колчунов В. И., Клюева Н. В., Скобелева Е. А.* К расчету живучести внезапно повреждаемых железобетонных рам с элементами составного сечения // Academia. Архитектура и строительство. 2006. № 3. С. 23—26.

7. *Гениев Г. А.* Метод определения динамических пределов прочности бетона // Бетон и железобетон. 1998. № 1. С. 18—19.

8. Прочность и деформативность железобетонных конструкций при запроектных воздействиях / Г. А. Гениев, В. И. Колчунов, Н. И. Клюева, А. И. Никулин, К. П. Пятикрестовский. М. : АСВ, 2004. 216 с.

9. *Бондаренко В. М., Ларионов Е. А.* Оценка динамических напряжений и моментов в конструктивных элементах сооружений // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2006. № 2. С. 93—98.

10. *Бондаренко В. М.* Коррозионные повреждения как причина лавинного разрушения железобетонных конструкций // Строительная механика и расчет сооружений. 2009. № 5. С. 13—17.

11. *Клюева Н. В., Прасолов Н. О., Колчунов В. И.* Влияние коррозионных повреждений элементов на живучесть железобетонных рамно-стержневых систем // Успехи строительной механики и теории сооружений. 2010. С. 117—122.

12. *Андросова Н. Б., Клюева Н. В., Колчунов В. И.* Некоторые предложения к нормированию параметров живучести сооружений // Вестник отделения архитектуры и строительных наук. Москва — Орел — Курск : РААСН, «Госуниверситет-УНПК», ГОУ ВПО ЮЗГУ. Вып. 15. 2011. С. 17—25.

13. К определению деформаций растянутого бетона для расчета трещиностойкости железобетонных конструкций по наклонным трещинам / Х. З. Баширов, Вл. И. Колчунов, И. А. Яковенко, Н. В. Усенко, А. А. Дородных // Строительство и реконструкция. 2012. № 6. С. 3—8.

1. *Rastorguev B. S.* Obespechenie zhivuchesti zdaniy pri osobykh dinamicheskikh vozdeystviyakh // Seysmostoykoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzheniy. 2003. № 4.

2. Rekomendatsii po zashchite zhilykh karkasnykh zdaniy pri chrezvychaynykh situatsiyakh / Pravitel'stvo Moskvy, Moskomarkhitektura. M., 2002.

3. *Almazov V. O.* Soprotivlenie progressiruyushchemu razrusheniyu v mnogoetazhnykh karkasakh ramnogo tipa // Vysotnye i bol'sheproletnye zdaniya. Tekhnologii inzhenernoy bezopasnosti i nadezhnosti (seminar). M. : MGSU, 2004.

4. *Pyatikrestovskiy K. P.* Osobennosti primeneniya kriteriev prochnosti materialov pri raschete tonkostennykh prostranstvennykh konstruktsiy // Osobennosti proektirovaniya i rascheta prostranstvennykh konstruktsiy na prochnost', ustoychivost' i progressiruyushchee razrushenie. M. : Prostranstvennye konstruktsii, 2009. S. 66—68.

5. *Geniev G. A., Klyueva N. V.* Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya nerazreznykh balok pri avariynom vyklyuchenii iz raboty otdel'nykh elementov // Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo, 2000. S. 24—26.

6. *Kolchunov V. I., Klyueva N. V., Skobeleva E. A.* K raschetu zhivuchesti vnezapno povrezhdaemykh zhelezobetonnykh ram s elementami sostavnogo secheniya // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2006. № 3. S. 23—26.

7. *Geniev G. A.* Metod opredeleniya dinamicheskikh predelov prochnosti betona // Beton i zhelezobeton. 1998. № 1. S. 18—19.

8. Prochnost' i deformativnost' zhelezobetonnykh konstruktsiy pri zaproektnykh vozdeystviyakh / G. A. Geniev, V. I. Kolchunov, N. I. Klyueva, A. I. Nikulin, K. P. Pyatikrestovskiy. M. : ASV, 2004. 216 s.

9. *Bondarenko V. M., Larionov E. A.* Otsenka dinamicheskikh napryazheniy i momentov v konstruktivnykh elementakh sooruzheniy // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2006. № 2. S. 93—98.

10. *Bondarenko V. M.* Korrozionnye povrezhdeniya kak prichina lavinnogo razrusheniya zhelezobetonnykh konstruktsiy // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2009. № 5. S. 13—17.

11. *Klyueva N. V., Prasolov N. O., Kolchunov V. I.* Vliyanie korrozionnykh povrezhdeniy elementov na zhivuchest' zhelezobetonnykh ramno-sterzhnevykh sistem // Uspekhi stroitel'noy mekhaniki i teorii sooruzheniy. 2010. S. 117—122.

12. *Androsova N. B., Klyueva N. V., Kolchunov V. I.* Nekotorye predlozheniya k normirovaniyu parametrov zhivuchesti sooruzheniy // Vestnik otdeleniya arkhitektury i stroitel'nykh nauk. Moskva — Orel — Kursk : RAASN, «Gosuniversitet-UNPK», GOU VPO YuZGU. Vyp. 15. 2011. S. 17—25.

13. K opredeleniyu deformatsiy rastyanutogo betona dlya rascheta treshchinostoykosti zhelezobetonnykh konstruktsiy po naklonnym treshchinam / Kh. Z. Bashirov, Vl. I. Kolchunov, I. A. Yakovenko, N. V. Usenko, A. A. Dorodnykh // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. 2012. № 6. S. 3—8.

© Клюева Н. В., Емельянов С. Г., Колчунов Вл. И., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Клюева Н. В., Емельянов С. Г., Колчунов Вл. И. Концептуально-методологические подходы к оценке живучести железобетонных конструкций с учетом физических моделей сопротивления // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 46—51.

УДК 624.012

Б. С. Соколов, Н. С. Лизунова

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ СДВИГОВОЙ ПОДАТЛИВОСТИ ШТЕПСЕЛЬНЫХ СТЫКОВ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОЛОНН

Представлены данные о сдвиговой податливости стыков проектных решений, усиленных стальной обоймой с обычными и преднапряженными хомутами, углеволокном и с новыми решениями, отмеченными патентами на полезную модель.

К л ю ч е в ы е с л о в а: экспериментальные исследования, штепсельные стыки железобетонных колонн, новые решения, сдвиговая податливость, усиление, диаграммы деформирования.

The authors provide the data on shearing flexibility of joints of project solutions strengthened by steel casing with standard and stressed collars, carbon fiber and new solutions marked with patents for useful model.

K e y w o r d s: experimental research, plug joints of reinforced columns, new solutions, shearing flexibility, strengthening, deformation diagram.

При расчете несущих систем зданий и сооружений необходимо учитывать податливость стыков элементов, так как она существенно влияет на перераспределения усилий между ними. Теоретические подходы к оценке податливости требуют подтверждения опытными результатами. Поэтому экспериментальные исследования, направленные на изучение работы стыков, являются актуальными, имеют научную и практическую значимость.

Основной целью выполненных опытов ставилось получение диаграмм деформирования при сдвиге стыков с различными конструктивными решениями для разработки методики расчета сдвиговой податливости по деформационной модели.

Испытания штепсельных железобетонных колонн проектного решения [1] показали низкую прочность и высокую податливость при действии сдвигающих усилий из-за необоснованного выбора диаметра стержней сеток косвенного армирования в торцах колонн, недостаточной прочности сварных соединений между стержнями, шага сеток. Это привело к необходимости проведения исследований в двух направлениях:

поиску эффективных способов усиления существующих стыков на завершенных объектах строительства;

разработке новых решений штепсельных стыков железобетонных колонн.

Пробные физические эксперименты [2, 3], компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния стыков с варьированием большого числа факторов [4] позволили выявить наиболее значимые из них, раскрыть механизм сопротивления стыков сдвигу и с учетом полученных результатов выбрать для проведения исследований два варианта усиления проектных решений:

с применением обоймы из стальных уголков и обычных и предварительно напряженных хомутов из круглой арматуры (рис. 1, *а*);

с использованием композиционного материала — углеволоконного холста (рис. 1, *б*).

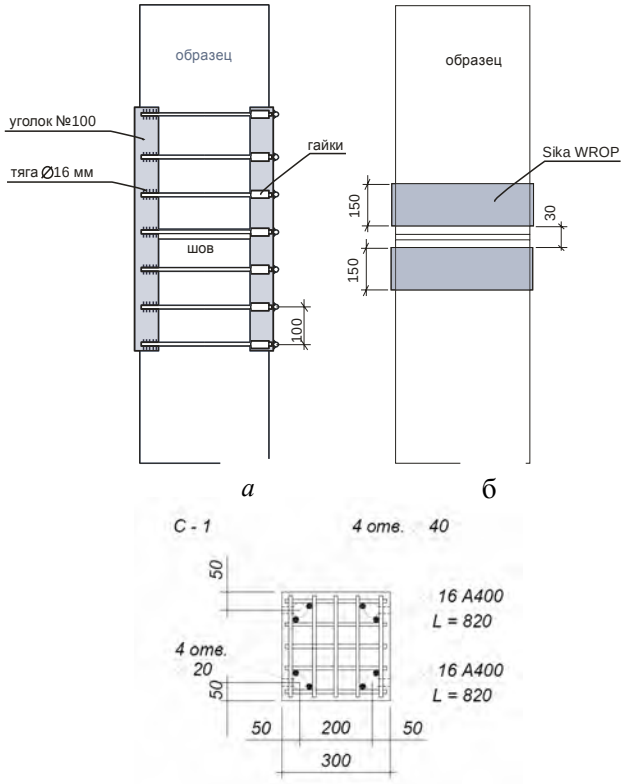


Рис. 1. Способы усиления штепсельного стыка колонн

Размеры и состав стальной обоймы приняты с учетом характера разрушения стыков при действии поперечных сил [1]. Вертикальные уголки предохраняли зону разрушения защитного слоя бетона от отрыва. Выбор их профиля определялся из условия работы сварных швов между уголками и поперечными хомутами с учетом преднапряжения последних до $0{,}3R_s$, $0{,}6R_s$ и $0{,}9R_s$. Шаг хомутов без предварительного их натяжения принят 100 мм, с преднапряженными — 300 мм. Контроль натяжения осуществлялся динамометрическим ключом, деформации хомутов и в уголках замерялись тензодатчиками базой 50 мм.

Усиление углеволоконной тканью, учитывая особенности работы материала на сдвиг, производилось в зонах отрыва защитного слоя бетона для увеличения сопротивления разрушению от растяжения на высоту $8d_s$ (d_s — диаметр продольной рабочей арматуры).

Испытания проводились на специально сконструированном стенде. Горизонтальная нагрузка создавалась протарированными гидравлическими домкратами поэтапно с выдержкой на каждом из них не менее 15 мин, течение которых снимались отсчеты по индикаторам часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленным в уровне горизонтальных швов, тензодатчикам, наблюдения за развитием трещин проводились с помощью микроскопа точностью 0,01 мм. Заполнение скважин в нижележащей колонне и горизонтального шва осуществлялось цементно-песчаным раствором марки М600.

Результаты испытаний в виде графиков зависимости поперечное усилие — перемещение представлены на рис. 2.

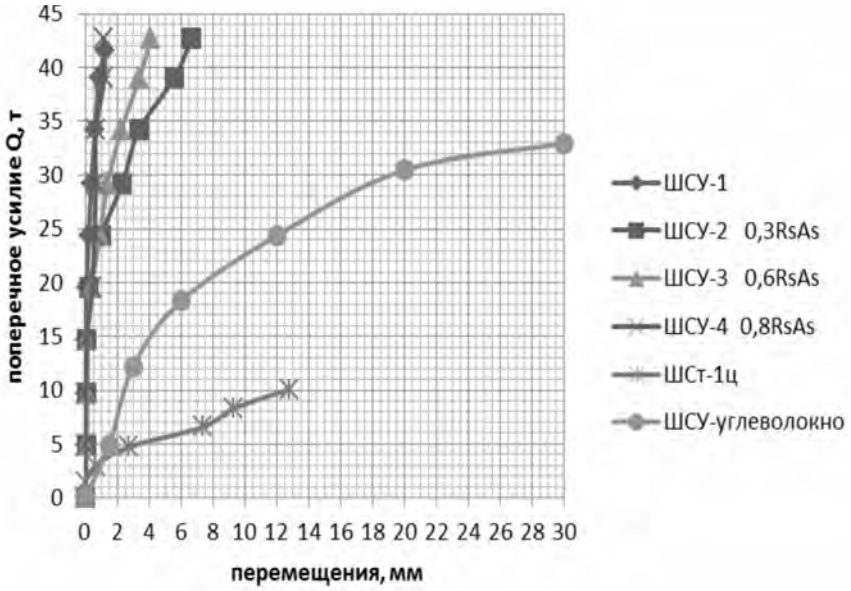


Рис. 2. График зависимости поперечное усилие — перемещение

В экспериментальных исследованиях были реализованы задачи, поставленные и перечисленные выше.

Усиление стальной обоймой с хомутами без преднапряжения привело к максимальному увеличению несущей способности стыка до 3 раз, повышению трещиностойкости за счет обжатия растянутой зоны бетона защитного слоя, к повышению жесткости. Податливость уменьшилась в 2,66 раза. Так как за варьируемый фактор принималось расстояние между хомутами и преднапряжение в них, сделали вывод, что несущая способность и эксплуатационная пригодность стыков с расстоянием между хомутами 30 см и максимально возможным преднапряжением их сопоставима с образцами, в которых расстояние между тягами принималось 10 см и отсутствовало преднапряжение. Следовательно, экономичнее применять стальную обойму с преднапряженными хомутами — экономия для одной обоймы 7,1 кг. Более подробное описание данных экспериментальных исследований представлено в [2].

Разрушение образцов, усиленных внешним армированием, происходило из-за расслоения и разрыва волокон холста в углах колонн. При этом горизонтальные деформации стыка достигали 30 мм в момент разрушения (см. рис. 1). Несущая способность таких образцов увеличилась в 2,5 раза по сравнению со стыками проектного решения [1], однако на податливости стыка такое усиление отразилось незначительно, так как такое усиление позволило лишь предотвратить отрыв защитного слоя бетона, тогда как сдвиг по контактной поверхности бетон — раствор начался с начала нагружения. Поэтому с учетом малой трудоемкости исполнения усиления и при необходимости увеличения прочности стыка этот способ является более целесообразным по сравнению с проектным решением, но экономичнее применять стальную обойму с преднапряженными хомутами.

Второе направление исследований связано с необходимостью оценки податливости стыков новых конструктивных решений, отмеченных патентами на полезную модель.

Первая группа образцов (рис. 3, *а*) выполнена по патенту на полезную модель [5, 6] и принципиально отличается от проектного тремя особенностями:

установкой в торцах колонн не сеток косвенного армирования, а гнутых замкнутых стальных пластин, опоясывающих продольную арматуру и поэтому выполняющих роль связей, препятствующих поперечным деформациям арматуры;

введением продольной арматуры верхней колонны в скважину нижней колонны, в которой располагается оголенная продольная арматура. Этим достигается двойной эффект — снижение металлоемкости стыка за счет ликвидации дублирующих стержней, устанавливаемых вдоль продольной арматуры нижележащей колонны, и обеспечение анкеровки продольных стержней выше- и нижележащих колонн после замоноличивания скважин раствором;

полость скважин образуется гофрированной трубой.

Вторая группа образцов (рис. 3, *б*), выполненная по патенту на полезную модель [6], отличалась от образцов проектного решения наличием в торцах колонн стальных уголков, способных выполнять двойную роль:

препятствовать поперечным деформациям стыка за счет положительного влияния на сопротивление разрушению бетона защитного слоя и отрыву, а также увеличения жесткости стыка совместно с продольной арматурой;

при необходимости к уголкам для повышения сопротивляемости сдвигу можно приварить соединительные элементы — накладные уголки или арматурные стержни.

Армирование образцов второй группы не отличалось от проектного решения, стальные уголки крепились к рабочей продольной арматуре вязальной проволокой.

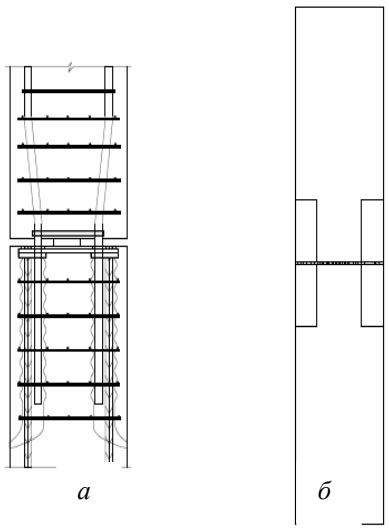


Рис. 3. Варианты новых решений стыков: *а* — по [5], *б* — по [6]

Изготовлено и испытано 6 образцов по методике, описанной выше. При этом в скважины инъектировался цементно-песчаный раствор марки М600 и полимерраствор на основе эпоксидной смолы. В маркировке образцов это показано буквами «ц» и «п» соответственно.

На рис. 4 представлены результаты испытаний в виде диаграмм зависимости поперечное усилие — перемещение на уровне горизонтального шва.

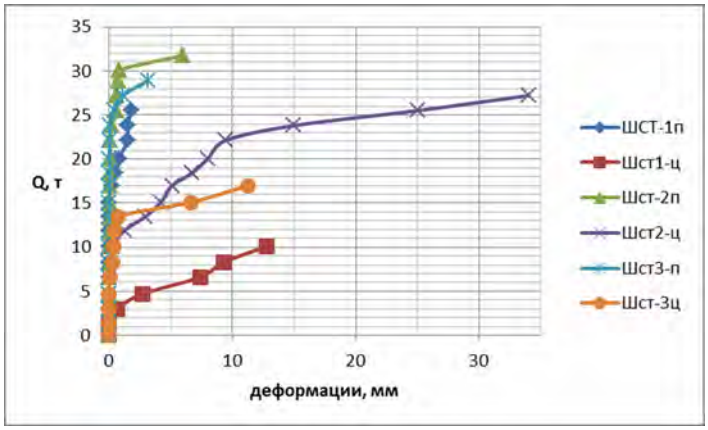


Рис. 4. Зависимость поперечное усилие — перемещение

Шст-1п и Шст-1ц — типовые образцы штепсельных стыков колонн, Шст-2п и Шст-2ц — образцы с закладными деталями в виде стальных уголков, расположенных в зоне разрушения стыка. Шст-3п и Шст-3ц — образцы с расположенной гофрированной трубой в области скважины и косвенным армированием хомутами из полосовой стали.

По результатам испытаний новых конструктивных решений стыков можно сделать следующие выводы:

несущая способность стыков новых конструктивных решений повысилась по сравнению с образцом проектного решения Шст-1ц в 2,7 и 1,7 раза для образцов Шст-2ц и Шст-3ц соответственно;

образцы, скважины и горизонтальные швы которых заполнены цементно-песчаным раствором, более деформативны, чем при заполнении полимерраствором. Применение полимерраствора увеличило прочность и уменьшило податливость по сравнению со стыками, замоноличенными цементно-песчаным раствором, в 2,5, 1,2 и 1,7 раза для образцов серий 1, 2 и 3 соответственно;

установка хомутов из полосовой стали вместо сеток косвенного армирования позволила уменьшить длину проекции трещины отрыва защитного слоя бетона на вертикальную ось до $3d_s$;

в стыке с установленными стальными уголками в зоне отрыва бетона защитного слоя и замоноличенным полимерраствором удалось свести податливость практически к нулю, вплоть до разрушения.

Проведенные комплексные исследования позволили повысить конструкционную безопасность и эксплуатационную пригодность стыков. Все это способствует эффективному использованию стыков в несущих системах зданий и сооружений и разработке методики расчета, что предполагается изложить в последующих публикациях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Соколов Б. С.*, *Латыпов Р. Р.* Прочность и податливость штепсельных стыков железобетонных колонн при действии статических и сейсмических нагрузок. М. : АСВ, 2010.

2. *Соколов Б. С.*, *Лизунова Н. С.*, *Латыпов Р. Р.* Экспериментальные исследования усиления штепсельных стыков железобетонных колонн // Градостроительство, реконструкция и инженерное обеспечение устойчивого развития городов Поволжья. Тольятти : ТГУ, 2009.

3. *Соколов Б. С.*, *Лизунова Н. С.* Экспериментальные исследования новых решений штепсельных стыков колонн // НАСКР-2012 : материалы I Международной конф. Чебоксары, 2012.

4. *Соколов Б. С.*, *Лизунова Н. С.* Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния штепсельных стыков железобетонных колонн, усиленных стальной обоймой на действие поперечной силы // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений. Челябинск, 2012.

5. *Соколов Б. С.*, *Латыпов Р. Р.*, *Лизунова Н. С.* Стыковое соединение сборных железобетонных колонн. Пат. на полезную модель РФ № 99506 от 20.11.2010 г.

6. *Соколов Б. С.*, *Травуш В. И.*, *Лизунова Н. С.* Стыковое соединение сборных железобетонных колонн для сейсмических районов строительства. Пат. на полезную модель РФ № 99036 от 10.11.2010 г.

1. *Sokolov B. S.*, *Latypov R. R.* Prochnost' i podatlivost' shtepsel'nykh stykov zhelezobetonnykh kolonn pri deystvii staticheskikh i seysmicheskikh nagruzok. M. : ACB, 2010.

2. *Sokolov B. S.*, *Lizunova N. S.*, *Latypov R. R.* Eksperimental'nye issledovaniya usileniya shtepsel'nykh stykov zhelezobetonnykh kolonn // Gradostroitel'stvo, rekonstruktsiya i inzhenernoe obespechenie ustoychivogo razvitiya gorodov Povolzh'ya. Tol'yatti : TGU, 2009.

3. *Sokolov B. S.*, *Lizunova N. S.* Eksperimental'nye issledovaniya novykh resheniy shtepsel'nykh stykov kolonn // NASKR-2012 : materialy I Mezhdunarodnoy konf. Cheboksary, 2012.

4. *Sokolov B. S.*, *Lizunova N. S.* Komp'yuternoe modelirovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya shtepsel'nykh stykov zhelezobetonnykh kolonn, usilennykh stal'noy oboymoy na deystvie poperechnoy sily // Aktual'nye problemy komp'yuternogo modelirovaniya konstruktsiy i sooruzheniy. Chelyabinsk, 2012.

5. *Sokolov B. S.*, *Latypov R. R.*, *Lizunova N. S.* Stykovoe soedinenie sbornykh zhelezobetonnykh kolonn. Pat. na poleznuyu model' RF № 99506 ot 20.11.2010 g.

6. *Sokolov B. S.*, *Travush V. I.*, *Lizunova N. S.* Stykovoe soedinenie sbornykh zhelezobetonnykh kolonn dlya seysmicheskikh rayonov stroitel'stva. Pat. na poleznuyu model' RF № 99036 ot 10.11.2010 g.

© Соколов Б. С., Лизунова Н. С., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Соколов Б. С., *Лизунова Н. С.* Анализ результатов экспериментальных исследований сдвиговой податливости штепсельных стыков железобетонных колонн // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 52—57.

УДК 69.07

Б. С. Соколов, В. М. Поздеев, Е. О. Трошков

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВОГО РЕШЕНИЯ УЗЛА СОПРЯЖЕНИЯ КОЛОНН С НАДКОЛОННОЙ ПЛИТОЙ В СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БЕЗБАЛОЧНЫХ ПЕРЕКРЫТИЯХ

Представлено новое конструктивное решение узла сопряжения колонн с надколонной плитой в сборных железобетонных безбалочных перекрытиях, выполненное на основе штепсельного соединения и отличающееся простотой монтажа и полным отсутствием сварочных работ. Дано обоснование целесообразности его применения по результатам технико-экономического сравнения с соответствующим узлом по серии «КУБ-2.5».

К л ю ч е в ы е с л о в а: сборный железобетонный безбалочный каркас, узел соединения колонны с надколонной плитой перекрытия, штепсельное соединение, технико-экономическое обоснование.

This article is devoted to the new type of column and slab connection in prefabricated reinforced concrete frameworks with the flat plate floor system based on the usage of bullet connection, and differs in the simplicity of installation and lack of welded connections. Also it deals with the feasibility study of its usage in comparison with the connection of «KUB-2.5» framework.

K e y w o r d s: prefabricated reinforced concrete framework with the flat plate floor system, column and slab connection, bullet connection, feasibility study.

В связи с возрастающей потребностью жилья в России наметилась тенденция к возвращению утраченных технологий сборного железобетона в домостроении.

В разных регионах страны в качестве конструктивного решения зданий используется серия «КУБ 2.5» [1], представляющая собой сборный железобетонный безбалочный каркас. Освоение такой системы было начато в Татарстане в 80—90-е гг. прошлого столетия, но не получило широкого развития из-за высокой материалоемкости и трудоемкости узла сопряжения колонн с надколонной плитой. Типовое решение соединения (рис. 1) включает в себя колонны верхнего *1* и нижнего *2* яруса, а также надколонную плиту перекрытия *3* с отверстием *4*, в котором установлена металлическая обечайка из неравнополочных уголков *5*. Стык колонн осуществляется посредством принудительного монтажа, при котором фиксирующий стержень *6*, выступающий из нижней грани верхней колонны, входит в патрубок *7*, расположенный в оголовке нижней колонны. Обечайка приваривается с помощью трапециевидных металлических пластин *8* к обнаженной в зоне стыка продольной арматуре колонны нижнего яруса *9*. В завершении монтажа узел замоноличивается бетоном класса В25 *10*.

Особенности технологии производства надколонной плиты перекрытия по системе «КУБ-2.5» заключаются в изготовлении металлической обечайки с приваренными к ней плоскими каркасами, вследствие чего появляются дополнительные технологические операции, а именно:

изготовление 4-х заготовок обечайки из уголка 100×63×6 (общий вес на одно соединение 13,25 кг);

выполнение в обечайке отверстий для последующего соединения с верхней продольной арматурой каркасов плиты (всего 12 отверстий);

сборка 12 плоских каркасов;

соединение (сварка) верхней и нижней продольной арматуры каркасов с металлической обечайкой (24 соединения).

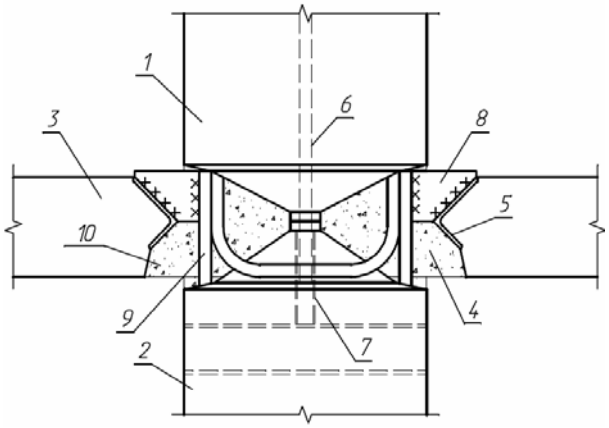


Рис. 1. Узел сопряжения колонн с надколонной плитой по серии «КУБ-2.5»

К отличительным особенностям колонн можно отнести то, что с целью применения технологий принудительного монтажа в тело элемента установлены дополнительные металлические детали.

При монтаже конструкций рассматриваемого соединения можно выделить следующие операции, влияющие на стоимость и трудоемкость:

заготовка металлических элементов для соединения обечайки плиты с продольной арматурой колонны, суммарный вес которых составляет 3,456 кг;

выполнение сварных соединений общей длиной 1360 мм при катете шва 6 мм;

замоноличивание узла бетоном класса В25 объемом 0,032 м^3;

обеспечение электропрогрева при отрицательной температуре воздуха для набора бетоном требуемой прочности.

Помимо вышеперечисленных операций, необходимо осуществление контроля и приемки стыка с ведением журнала производства работ и составление акта на скрытые виды работ.

Из изложенного следует, что такое решение узла сопряжения достаточно металлоемко, а технологическая составляющая монтажа элементов сложна, энергозатратна и трудоемка.

С целью исключения существующих недостатков разработан новый вариант соединения элементов несущей каркасной системы (рис. 2), на который получено решение о выдаче патента по заявлению на полезную модель № 2012129092/03. Узел представляет собой штепсельное соединение колонн [2] с надколонными плитами перекрытия. В оголовке нижней колонны *1* устроены выпуски продольной арматуры *2*, на которые устанавливается надколонная плита перекрытия *6* с 4 сквозными отверстиями *7* и верхняя колонна *3*, имеющая в торце скважины *4* с рабочей арматурой *5*. После установки конструктивных элементов стыка, через отверстия *8* инъецируется полимерный раствор *9*, заполняющий скважины и зазоры между плитой и колоннами, организованные за счет центрирующих прокладок *10*.

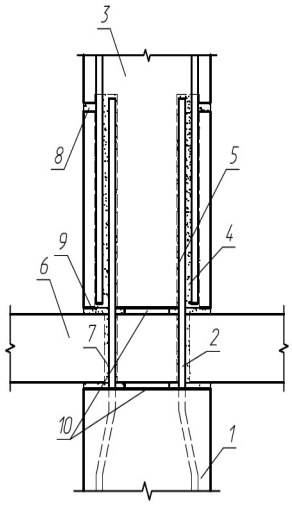


Рис. 2. Разработанный вариант решения узла сопряжения колонн с надколонной плитой

С целью обоснования целесообразности применения нового варианта произведено сопоставление узла соединения по системе «КУБ-2.5» с разработанным предложением по критериям стоимости и трудоемкости заводского изготовления элементов узла, а также их монтажа на строительной площадке.

В качестве эталона для сравнения технико-экономических показателей надколонных плит была принята плита марки 4.4НП30-30-16-14. Анализ стоимости и трудоемкости изготовления колонн проводился на основе сопоставления значений с колонной марки 4.4КВ-1.30-20. Рабочее армирование нового варианта плиты перекрытия и колонны принималось по серии «КУБ-2.5».

Определение трудоемкости заводского изготовления элементов производилось согласно соответствующему руководству [3]. Стоимость элементов определялась суммированием стоимости материалов со стоимостью заводского изготовления. Для расчета были приняты средние значения цен региона, отраженные в Информационно-аналитическом бюллетене по вопросам ценообразования в строительстве Республики Марий Эл.

Анализ стоимости и трудоемкости монтажа (табл.) выполнялся на основе сравнения данных параметров по операциям, отличающим рассматриваемые варианты. Трудоемкость работ оценивалась по ЕНиР на соответствующие работы.

Результаты сравнения вариантов узла по стоимости и трудоемкости

Наименование позиции	Трудоемкость, чел.-ч		Стоимость, р.	
	«КУБ-2.5»	Новое решение	«КУБ-2.5»	Новое решение
1. Заводское изготовление надколонной плиты перекрытия	9,04	7,64	11840,25	11520,39
2. Заводское изготовление колонны	6,68	6,69	4539,55	4498,20
3. Монтаж конструктивных элементов узла (без учета одинаковых технологических операций)	0,59	0,14	553,90	72,67
ИТОГО	16,31	14,47	16818,70	16091,27

Сопоставление данных показало, что новый вариант надколонной плиты перекрытия позволяет снизить стоимость и трудоемкость ее заводского изготовления на 3 и 15 % соответственно, что в масштабах крупного завода ЖБК приведет к весомому экономическому эффекту. Конструктивные особенности разработанного варианта колонны не повышают стоимость и трудоемкость ее изготовления в заводских условиях. Помимо этого, за счет применения штепсельного соединения элементов и отказа от сварочных работ суммарная трудоемкость по рассматриваемому узловому соединению снижается на 1,84 чел.-ч.

Таким образом, по результатам выполненной работы можно сделать следующие *выводы*:

1. Разработано новое решение узла сопряжения колонн с надколонной плитой в сборных железобетонных безбалочных перекрытиях, выполненное на основе штепсельного соединения и отличающееся простотой монтажа и полным отсутствием сварочных работ.

2. Технико-экономический анализ разработанного варианта сопряжения элементов показал, что его внедрение целесообразно с точки зрения повышения технологичности производства работ, экономии материалов и достижения положительного экономического эффекта за счет внедрения в массовое строительство.

3. Необходимы исследования напряженно-деформированного состояния разработанного узла соединения с целью разработки методики расчета по обеспечению конструкционной безопасности и эксплуатационной пригодности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Унифицированная система сборно-монолитного безригельного каркаса / НПСО «Монолит», ЦНИИПИ «Монолит». М., 1990. 491 с.

2. *Соколов Б. С., Латыпов Р. Р.* Прочность и податливость штепсельных стыков железобетонных колонн при действии статических и сейсмических нагрузок. М. : АСВ, 2010. 128 с.

3. Руководство по определению расчетной стоимости и трудоемкости изготовления сборных железобетонных конструкций на стадии проектирования. Конструкции жилых и общественных зданий / НИИ экономики строительства Госстроя СССР, НИИ бетона и железобетона Госстроя СССР, ЦНИИ типового экспериментального проектирования жилища Госстроя СССР. М. : Стройиздат, 1977. 80 с.

1. Unifitsirovannaya sistema sborno-monolitnogo bezrigel'nogo karkasa / NPSO «Monolit», TsNIIPI «Monolit». M., 1990. 491 s.

2. *Sokolov B. S., Latypov R. R.* Prochnost' i podatlivost' shtepsel'nykh stykov zhelezobetonnykh kolonn pri deystvii staticheskikh i seysmicheskikh nagruzok. M. : ASV, 2010. 128 c.

3. Rukovodstvo po opredeleniyu raschetnoy stoimosti i trudoemkosti izgotovleniya sbornykh zhelezobetonnykh konstruktsiy na stadii proektirovaniya. Konstruktsii zhilykh i obshchestvennykh zdaniy / NII ekonomiki stroitel'stva Gosstroya SSSR, NII betona i zhelezobetona Gosstroya SSSR, TsNII tipovogo eksperimental'nogo proektirovaniya zhilishcha Gosstroya SSSR. M. : Stroyizdat, 1977. 80 s.

© Соколов Б. С., Поздеев В. М., Трошков Е. О., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Соколов Б. С., Поздеев В. М., Трошков Е. О. Технико-экономическое обоснование целесообразности использования нового решения узла сопряжения колонн с надколонной плитой в сборных железобетонных безбалочных перекрытиях // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 58—61.

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

УДК 621.791.4: 621.783

В. В. Абрамов, В. В. Батищев, Ю. П. Ракунов

О КИНЕТИЧЕСКИХ ЗАКОНОМЕРНОСТЯХ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННОМ И ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Рассмотрена природа задержки схватывания от физического контакта на примере контактных пар корунда с медью и железо-никелевым сплавом. Показано, что рост прочности начинается при достижении уровня напряжений в скоплениях дислокаций в приконтактной зоне металла, достаточного для начала эстафетной передачи и развития пластической деформации в корунде (сапфире). Это соответствует достижению относительной площади контакта более 60 % при смятии микровыступов в процессе обработки металла.

К л ю ч е в ы е с л о в а: физический контакт, корунд, схватывание, напряжение, кинетика.

The nature of delaying between the joining strength growth and development of physical contact for contact pairs of sapphire with copper and iron-nickel alloy is considered. It is shown that strength growth begins when stress level in dislocation crowd in near-contact metal area is enough to start the relay — ruse transfer and development of plastic deformation in corundum (sapphire). It corresponds to more than 60 % relative square physical contact of microlugs rumpling by metal mechanical treatment.

K e y w o r d s: physical contact, corundum, setting, tension, kinetics.

Развитие науки, совершенствование техники и технологии предъявляет новые повышенные требования к машинам и оборудованию по сохранению геометрии деталей и узлов при длительной эксплуатации, прочности и надежности, а также исходных физико-механических и химических свойств материалов, непрерывности технологического процесса в целом. На современном этапе развития техники и технологии в основе многих конструкторско-технологических решений и технологических процессов получения и обработки материалов (триботехника, все виды механической обработки на основе резания, прессование и спекание, получение неразъемных соединений, в том числе с применением нанотехнологий и наноматериалов и т. д.) лежат процессы твердофазного контактного взаимодействия кристаллических материалов при различных видах физико-механического взаимодействия. Особое место среди них занимают технологические процессы, основанные на пластической деформации контактных поверхностей и последующим протеканием релаксационных процессов. В этом случае обеспечивается максимальное сочетание комплекса свойств получаемых материалов (изделий), эффективность управления технологическим процессом и регулирования степени прецизионности контакта. В этой связи одним из актуальных вопросов является

установление кинетических закономерностей контактного взаимодействия материалов при деформационном и термодеформационном воздействии, формоизменение и развитие физического контакта за счет пластической деформации микронеровностей обработки, изменение контактных напряжений и механических свойств на поверхности и приконтактных объемах, выяснение природы активации контактных поверхностей и установление кинетических закономерностей схватывания между ними.

Рассмотрение проблемы контактного взаимодействия материалов в указанных аспектах позволяет выйти на разработку новых схем и технологических решений получения материалов, прецизионных разъемных и неразъемных соединений, новых схем организации и технологии производства.

Исследование контактного взаимодействия имеет и самостоятельное значение в связи с проблемой поверхности (получение композиционных и наноматериалов, теории гетерогенного катализа и топохимических реакций), а также как метод научного исследования процессов, протекающих на границе раздела фаз материалов, триботехнических узлов механического оборудования и др.

Целью настоящей работы является установление кинетических закономерностей формирования контакта за счет пластической деформации микронеровностей обработки и развития схватывания в контакте разноименных материалов при термодеформационном воздействии.

При любых способах термодеформационного воздействия в твердом состоянии на материалы формирование контакта между ними происходит за счет пластической деформации микровыступов контактных поверхностей. Чем выше степень локализации пластической деформации в зоне контакта, тем выше эффективность термодеформационного воздействия с позиции сохранения геометрии и размеров изделий, лучше сохраняются исходные свойства обрабатываемых материалов и легче соединить хрупкие и малопластичные материалы (например, окислы алюминия и других металлов) в конкретные изделия.

Независимо от характера и интенсивности воздействия на контактирующие обрабатываемые материалы природа схватывания едина [1, 2]. Различия заключаются в кинетике протекания отдельных стадий процесса. С позиции общей теории несовершенств кристаллической решетки и кинетики химических реакций контактное взаимодействие материалов в твердом состоянии относится к классу твердофазных топохимических реакций с возникновением и последующим распространением ядра реакции по всей площади контакта и, согласно современным представлениям, протекает в три основные стадии [3, 4].

1. Образование физического контакта, то есть сближение атомов контактирующих поверхностей на расстояние, при котором возникает слабое химическое взаимодействие, обусловленное силами Ван-дер-Ваальса. Это достигается за счет пластической деформации микровыступов контактирующих поверхностей; повышение температуры в зоне контакта снижает сопротивляемость пластической деформации и, в зависимости от ее уровня, может происходить упрочнение или разупрочнение и изменение механических свойств (твердости) и структуры в приконтактном объеме.

2. Активация контактных поверхностей и образование сильных химических связей, то есть схватывание. Решающую роль на этой стадии играют квантовые процессы электронного взаимодействия. При этом явление схватывания («положительное» при сварке и «отрицательное» для триботехниче-

ских пар оборудования, обработке металлов резанием) происходит в субмикроскопических участках физического контакта на границе раздела двух фаз без изменения пространственного расположения атомов поверхности на уровне нанокластера, размеры которого соизмеримы с параметрами кристаллической решетки [5; 6]. Теория активных центров предполагает, с одной стороны, дискретность процессов схватывания, с другой стороны — коллективность взаимодействия атомов в поле активного центра. То что дислокации могут играть роль активных центров, является частным случаем, ибо установлено, что схватывание происходит на любых активных участках поверхности в процессе пластической деформации (полосы скольжения, деформационные микровыступы, сколы и т. п.). В принципе, элементарный акт активации атомов на границе раздела контактируемых материалов сводится к разрыву насыщенных химических связей в поле упругих искажений, которые можно реализовывать различными способами: термическим, механическим, термомеханическим, различными методами вскрытия внутренних поверхностей кристаллов и удаления адсорбированных слоев как с образованием, так и без образования дислокаций в поверхностном слое материала.

При контактировании одноименных или разноименных материалов, но с близкой сопротивляемостью пластической деформации, образование физического контакта происходит за счет совместной пластической деформации; активация поверхностей и образование («сшивание») связей происходит одновременно, и фактически после первой стадии наступает третья (стадия объемного взаимодействия). Кинетика образования активных центров на контактных площадках микровыступов определяется интенсивностью пластического течения поверхностного слоя материалов и удаления комплекса адсорбций, уровнем и соотношением напряжений контактной площадки, температурой (как активирующим фактором).

При контактировании материалов с резко различной сопротивляемостью пластической деформации (например, металл — керамика, металлокерамика, неорганический диэлектрик и т. п.) длительность второй стадии определяется запаздыванием образования активных центров на ответной контактной поверхности более твердого материала. Это будет проявляться в виде смещения кинетической кривой схватывания относительно кинетической кривой образования физического контакта.

Экспериментальные исследования по установлению уровня термодеформационного воздействия (T, P) на кинетику образования физического контакта за счет пластической деформации микровыступов обработки выполняли по методике профилографирования и фрактографирования фиксированного участка контактной поверхности [7].

Рис. 1. Фрактография фиксированного участка контактной поверхности

На контактных поверхностях алмазной пирамидой (прибор ПМТ-3) обкалывался фиксированный участок (рис. 1) на расстоянии R от оси симметрии, фотографировался и с него до и после нагружения снимали профилограммы при вертикальном (ВУ) и горизонтальном (ГУ) увеличении и сопоставляли их; по схеме (рис. 2) проводили измерения микротвердости до и после нагружения и определяли изменение твердости на поверхности контактных площадок и по сечению микровыступов, что позволяло определить глубину деформационного объема; по суммарной ширине контактных площадок определяли общую площадь образующегося физического контакта и рассчитывали действующие $\sigma_д$ напряжения на контактных площадках микровыступов.

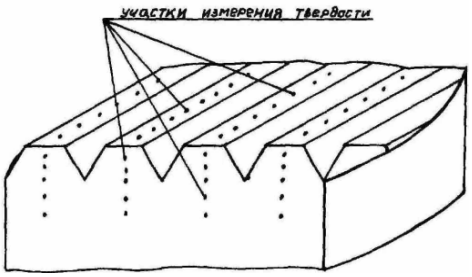


Рис. 2. Схема измерения микротвердости на контактных площадках поверхности

Статистическая обработка показателей шероховатости проводилась специальной компьютерной программой, анализирующей показатели поверхности. Исследования выполнялись на металлах: железо, железо-никелевый сплав 50 % Ni+50 % Fe, медь, никель, алюминиевый сплав АД1; в качестве контрматериала применялись полированные корундовые монокристаллические диски ø 12 мм, толщиной 6 мм, вырезанные под углом 60…70° к оси роста, высота микронеровностей $R = 0,03$ мкм.

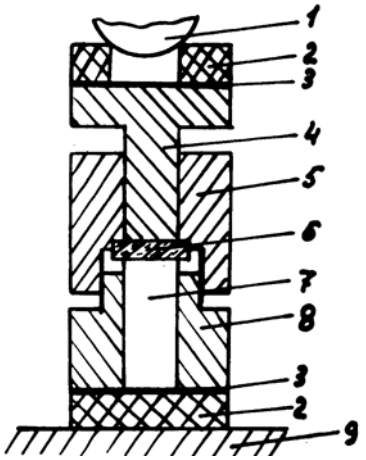


Рис. 3. Схема приспособления для исследования деформации рельефа поверхности: *1* — шар; *2* — керамическое кольцо; *3* — прокладка; *4* — шток; *5* — охватывающая втулка; *6* — сапфир; *7* — образец исследуемого металла; *8* — фиксирующая втулка; *9* — станина

Нагружение выполняли в специальном приспособлении (рис. 3) в установке с механическим осесимметричным нагружением; при температуре выше 200 ºС нагружение производили в камере с глубинной разряжения $1…5\cdot10^{-4}$мм рт. ст. Экспериментальные исследования проводились в интервале температур 0,05…0,9 температуры плавления металла и давлении P 5…80 МПа; R_z=3,2…6,3 мкм (точение) и 40…100 мкм (строгание).

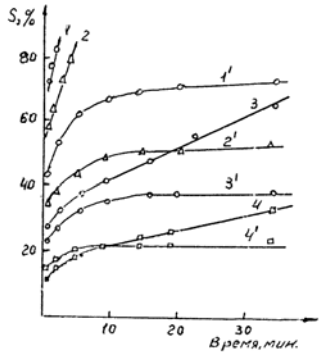


Рис. 4. Влияние давления и температуры на кинетику развития физического контакта меди с корундом. Кривые *1*, *2*, *3*, *4* при P = 80 МПа, *1*', *2*', *3*', *4*' — при P = 20 МПа. *1*,*1*' — T= 973 К, *2*,*2*' — T= 873 К, *3*,*3*' — T= 473 К, *4*,*4*' — T= 293 К

Экспериментальные данные по кинетике образования физического контакта и пластической деформации микровыступов при термодеформационном воздействии показывают, что T оказывает большее влияние, чем P (рис. 4), что хорошо согласуется с представлениями о пластической деформации как о термически активируемом процессе. Видно, что образование более 60 % физического контакта заканчивается на различных этапах кинетической кривой и сильно зависит от уровня действующих напряжений в контакте T и R_z. Анализ полученных данных показывает, что влияние T и P на скорость процесса существенно возрастает с ростом другого влияющего фактора — P или, соответственно, T. Показатель m степенной зависимости $S(P)$ при T = const, определенный во всем интервале температур, меняет свои значения от 1,2 при $T \le 473$ К до 2,8 при T = 973 К. Это свидетельствует о смене механизма, контролирующего пластическую деформацию микровыступов в различном температурном диапазоне.

Установленные кинетические закономерности смятия и формоизменения микровыступов и образования контакта, профилографирование и фрактографические исследования контактных поверхностей позволили установить, что процесс смятия микровыступов на контактных поверхностях протекает в четыре этапа.

1. Смятие вершин отдельных микронеровностей. При этом количество микроконтактов растет быстрее, чем площадь единичных пятен. На образовавшихся контактных площадках развиваются действующие напряжения $\sigma_д$, в десятки раз превышающие номинальные значения, заложенные во все формулы для расчета длительности образования физического контакта. При $T < 0{,}55$ температуры плавления металла наблюдается упрочнение поверхности металла контактных площадок (рис. 5).

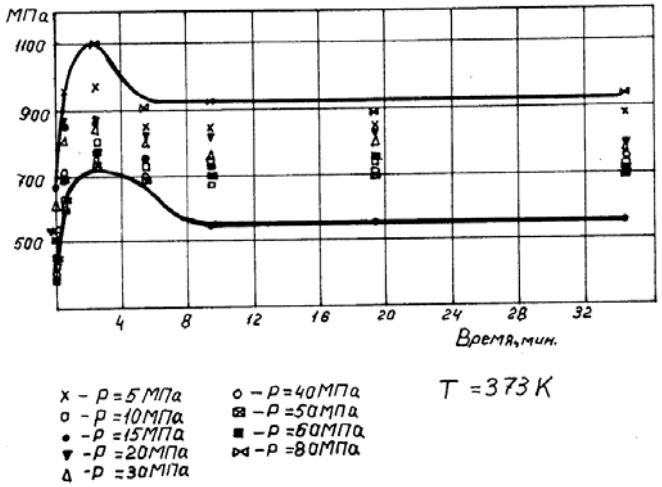


Рис. 5. Влияние давления и температуры на величину и характер изменения твердости Hμ на поверхности контактных площадок микровыступов меди

Данный этап соответствует периоду активной деформации (периоду нагружения).

2. Массовое образование микроучастков пятен плоского контакта и выравнивание плоскости контакта. На этом этапе идет осадка микровыступов без заметного искривления боковых образующих и отсутствует течение металла на поверхности контактных площадок. На этом этапе также происходит упрочнение металла контактных площадок. Этап заканчивается неустановившейся ползучестью участков различной протяженности в зависимости от уровня термодеформационного воздействия. Полученные кинетические кривые изменения HV на контактных площадках позволяют управлять направленным формированием механических свойств на контактных поверхностях металлов.

Слияние дискретных микроучастков (2—4) пятен плоского контакта с образованием макроучастков плоскости контакта и распространением этого процесса по всей контактной поверхности (рис. 6).

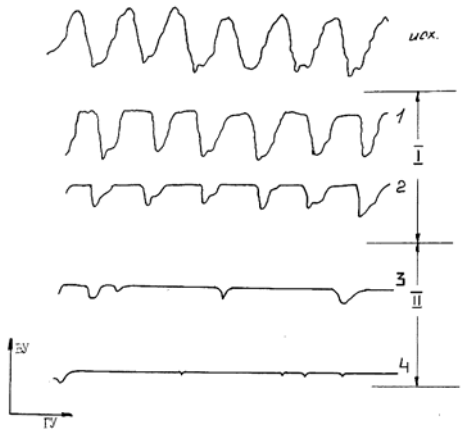


Рис. 6. Схема смятия микровыступов

По мере осадки микровыступов и увеличения ширины контактной площадки более 60 % возрастает соотношение τ к σ и начинается заметное пластическое течение металла на поверхности контактных площадок; величина отношения τ к σ зависит от упругих свойств контактирующих материалов, положения материальной точки на поверхности пятна контакта и достигает максимального значения при $r = 0{,}78a$ (где a — ширина контактной площадки) (рис. 7).

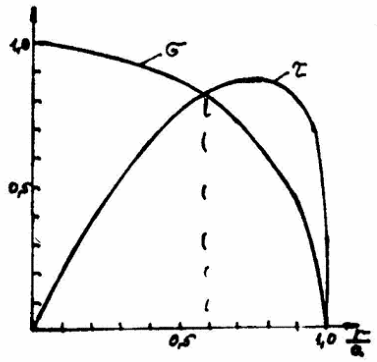


Рис. 7. Соотношение составляющих касательного и нормального напряжения на поверхности пятна контакта (по Гудману)

Вследствие этого всегда будет наблюдаться сдвиг материальной частицы (атома, группы атомов) на поверхности контактных площадок, то есть на границе раздела контактирующих материалов. Такое перемещение материальных частиц приводит к удалению комплекса адсорбций и изменению физико-химической активности металла на поверхности контактных площадок.

4. Дальнейшая осадка микровыступов (в меньшей степени) и продолжающееся пластическое течение металла контактных площадок приводит к образованию полного физического контакта. На 3-м и 4-м этапах смятия изменения механических свойств на поверхности контактных площадок HV не происходит. Характер смятия микровыступов и протекающие физико-химические и механические процессы на поверхности контактных площадок оказывают решающее влияние на активацию атомов контактирующих поверхностей и образование («сшивание») прочных связей.

Интегральными характеристиками процесса контактного взаимодействия является:

1) формирование поверхности с требуемыми показателями шероховатости (чистовая отделочная обработка, алмазное выглаживание и др.), обеспечивающей прецизионный контакт;

2) схватывание контактных поверхностей.

Если требуется получить разъемное соединение и поверхность с высоким классом чистоты обработки и направленным формированием механических свойств в приконтактном объеме, то процесс контактирования необходимо заканчивать 2-м этапом смятия; если требуется получить неразъемное прецизионное соединение, то процесс необходимо завершить на 4-м этапе смятия. Совершенно очевидно, что в этом случае течение металла контакт-

ных площадок приводит к удалению комплекса адсорбций с поверхности, эстафетной передаче деформации со стороны «мягкого» металла в более «твердый» и активации его, что проявляется в появлении на поверхности полос и пачек скольжения, образованию мостиков схватывания [1]. Если параметры процесса выбраны таковыми (ниже 0,55 температуры плавления металла), что процесс ограничивается «сшиванием» связей между поверхностями раздела, то можно утверждать, что рост прочности будет отражать кинетику активации и схватывания поверхности. В этом случае особенностью процесса будет локализация реакционной зоны на поверхности раздела фаз. Изменение этой зоны в пятне контакта будет обусловливать, с одной стороны, изменение интенсивности «сшивания» связей во времени, с другой — сложный характер макрокинетики в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамов В. В., Шоршоров М. Х., Алехин В. П.* О механизме взаимодействия при сварке давлением с нагревом разнородных металлов // Управление сварочными процессами. Тула : ТПИ, 1980 С. 43—53.

2. *Касьян М. В., Абрамов В. В., Мирзаев К. М.* К вопросу о механизме контактного взаимодействия сапфирового инструмента с металлами в процессе их отделочной обработки // Резание труднообрабатываемых материалов. Ереван : АН Арм. ССР, 1975. Вып. 4. С. 18—23.

3. *Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х., Красулин Ю. Л.* Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов // Изв. АН СССР. Сер.: Неорганические материалы. 1965. № 1. Вып. 1. С. 20—25.

4. *Красулин Ю. Л., Шоршоров М. Х.* О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии // Физика и химия обработки материалов. 1967. № 1. С. 15—18.

5. *Абрамов В. В., Джагури Л. В.* О роли термической и механической составляющих в активации контактных поверхностей при термодеформационном воздействии // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2003. № 5. С. 35—39.

6. *Абрамов В. В., Ракунов Ю. П., Батищев В. В.* О механизме контактного взаимодействия сапфирового инструмента с металлами в процессе их чистовой отделочной обработки // Проблемы устойчивости и безопасности системы жизнеобеспечения в сфере ЖКХ. М. : Граница, 2010. С. 29—43.

7. *Абрамов В. В.* Кинетика взаимодействия разнородных материалов в твердом состоянии и разработка совмещенного технологического процесса выглаживания и получения неразъемного соединения: автореф. дис… д-ра техн. наук. М. : МАТИ им. К.Э. Циолковского, 1990. С. 40.

1. *Abramov V. V., Shorshorov M. Kh., Alekhin V. P.* O mekhanizme vzaimodeystviya pri svarke davleniem s nagrevom raznorodnykh metallov // Upravlenie svarochnymi protsessami. Tula : TPI, 1980 S. 43—53.

2. *Kas'yan M. V., Abramov V. V., Mirzaev K. M.* K voprosu o mekhanizme kontaktnogo vzaimodeystviya sapfirovogo instrumenta s metallami v protsesse ikh otdelochnoy obrabotki // Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov. Erevan : AN Arm. SSR, 1975. Vyp. 4. S. 18—23.

3. *Rykalin N. N., Shorshorov M. Kh., Krasulin Yu. L.* Fizicheskie i khimicheskie problemy soedineniya raznorodnykh materialov // Izv. AN SSSR. Ser.: Neorganicheskie materialy. 1965. № 1. Vyp. 1. S. 20—25.

4. *Krasulin Yu. L., Shorshorov M. Kh.* O mekhanizme obrazovaniya soedineniya raznorodnykh materialov v tverdom sostoyanii // Fizika i khimiya obrabotki materialov. 1967. № 1. S. 15—18.

5. *Abramov V. V., Dzhaguri L. V.* O roli termicheskoy i mekhanicheskoy sostavlyayushchikh v aktivatsii kontaktnykh poverkhnostey pri termodeformatsionnom vozdeystvii // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova. 2003. № 5. S. 35—39.

6. *Abramov V. V., Rakunov Yu. P., Batishchev V. V.* O mekhanizme kontaktnogo vzaimodeystviya sapfirovogo instrumenta s metallami v protsesse ikh chistovoy otdelochnoy obrabotki // Problemy ustoychivosti i bezopasnosti sistemy zhizneobespecheniya v sfere ZhKKh. M. : Granitsa, 2010. S. 29—43.

7. *Abramov V. V.* Kinetika vzaimodeystviya raznorodnykh materialov v tverdom sostoyanii i razrabotka sovmeshchennogo tekhnologicheskogo protsessa vyglazhivaniya i polucheniya neraz"emnogo soedineniya: avtoref. dis… d-ra tekhn. nauk. M. : MATI im. K.E. Tsiolkovskogo, 1990. S. 40

© Абрамов В. В., Батищев В. В., Ракунов Ю. П., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Абрамов В. В., *Батищев В. В.*, *Ракунов Ю. П.* О кинетических закономерностях контактного взаимодействия материалов при деформационном и термодеформационном воздействии // Вестник Волгор. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 62—70.

УДК 621.791.4: 621.783

В. В. Абрамов, В. В. Батищев, Ю. П. Ракунов

О МЕХАНО-ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЯХ НА ГРАНИЦЕ РАЗДЕЛА ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Рассмотрена природа задержки схватывания от физического контакта на примере контактных пар корунда с медью и железо-никелевым сплавом. Показано, что рост прочности начинается при достижении уровня напряжений в скоплениях дислокаций в приконтактной зоне металла, достаточного для начала эстафетной передачи и развития пластической деформации в корунде (сапфире). Это соответствует достижению относительной площади контакта более 60 % при смятии микровыступов в процессе обработки металла.

К л ю ч е в ы е с л о в а: физический контакт, корунд, схватывание, напряжение, кинетика.

The nature of delaying between the joining strength growth and development of physical contact for contact pairs of sapphire with copper and iron-nickel alloy is considered. It is shown that strength growth begins when stress level in dislocation crowd in near-contact metal area is enough to start the relay — ruse transfer and development of plastic deformation in corundum (sapphire). It corresponds to more than 60 % relative square physical contact of microlugs rumpling by metal mechanical treatment.

K e y w o r d s: physical contact, corundum, setting, tension, kinetics.

Установление кинетических закономерностей и характера формирования контакта при твердофазном взаимодействии позволяет управлять технологическими процессами (выглаживанием, резанием, сваркой, прессованием, спеканием и др.), центральным моментом является вопрос феноменологического анализа кинетических кривых «сшивания» связей в соответствии с закономерностями развития контактных площадок и течением металла контактных площадок микровыступов как основного активирующего фактора.

Представленное сопоставление кинетических кривых образования физического контакта, пластической деформации микровыступов и развития схватывания меди с α-корундом (рис. 1) показывает, что они имеют вид кривых сигмоидного типа.

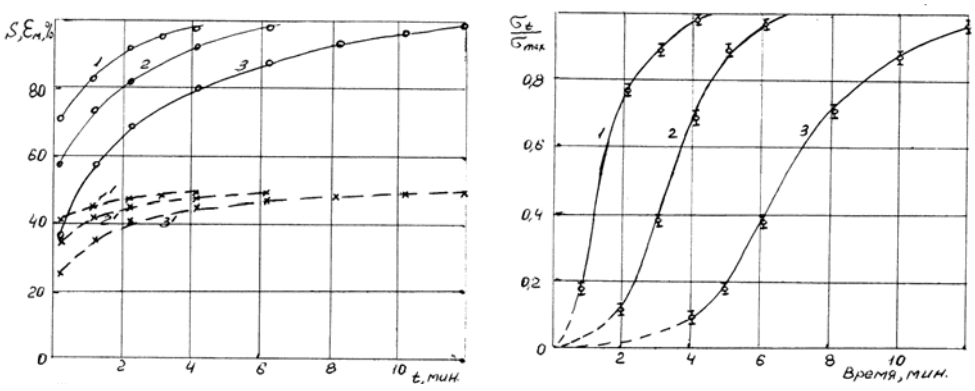


Рис. 1. Сопоставление кинетических кривых образования физического контакта, пластической деформации микровыступов и развития схватывания меди с α- корундом; *T* = 1173 К; кривые: *1* — σн — 20 МПа; *2* — 15 МПа; *3* — 10 МПа — кривые образования физического контакта; *1′*, *2′*, *3′* — кривые пластической деформации микровыступов

Низкие температуры процесса (ниже 0,5 температуры плавления корунда) и затрудненность диффузионных процессов не приводит к изменению состава конденсированных фаз, и твердофазная топохимическая реакция становится полностью локализованной на поверхности раздела. С представленных позиций предлагается следующее объяснение развития контактного взаимодействия материалов в твердом состоянии при термодеформационном воздействии.

При смятии и пластическом течении металла микровыступов из его внутренних объемов, где металл физически чист, происходит перемещение и поставка атомов с некомпенсированными связями на поверхность в зону пятна контакта; возникающие «разрывы» металла на контактных площадках являются активными поверхностями с некомпенсированными связями и подготовленными к взаимодействию с аналогичными атомами ответной поверхности твердого материала.

О высокой химической активности внутренних объемов металла и корунда свидетельствует факт схватывания атомов металла на поверхности контактных площадок с атомами внутренних объемов корунда, вышедших на поверхность в зону контакта при образовании полос и пачек скольжения (рис. 2). В этом месте образуются мостики схватывания, металл которых при последующем разделении поверхностей остается на корунде. На поперечных профилограммах отпечатка полосы скольжения корунда на металле видно, что полоса скольжения при выходе на поверхность образовала деформационный микровыступ и продеформировала металл контактной площадки микровыступа вглубь, а на образовавшейся поверхности ступенек произошло схватывание атомов корунда и металла.

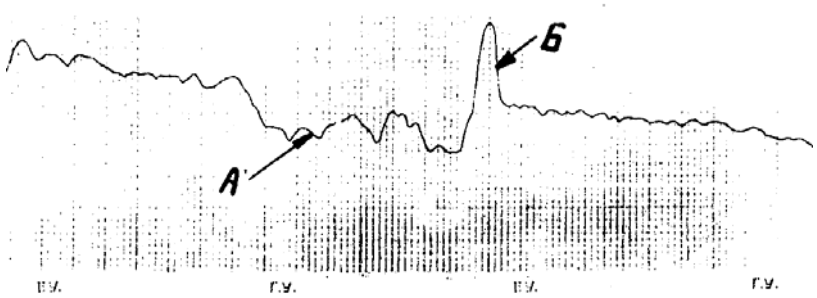


Рис. 2. Поперечная профилограмма отпечатка полосы скольжения сапфира на меди после разрушения соединения. ВУ — 40 000; ГУ — 1000 крат

Учитывая, что на 1-м и 2-м этапах смятия микровыступов имеется только их осадка без заметного пластического течения металла поверхности контактных площадок, отсутствие пластической деформации в приконтактных объемах более твердого материала и наличие на его поверхности хемосорбированного кислорода с высокой энергией связи, образование активных атомов на контактной поверхности «твердого» материала в этот период времени не происходит. В связи с этим на первых двух этапах смятия микровыступов образования прочных химических связей не происходит, а на кинетических кривых «сшивания» будет наблюдаться период задержки образования прочных связей.

После периода задержки наступает этап интенсивного «сшивания» связей, что соответствует 3-му и 4-му этапам смятия. При этом относительная площадь физического контакта превышает 60 % от номинального значения, а отношение τ к σ на контактных площадках достигает необходимых значений, обеспечивающих перемещение материальной точки в пятне контакта от симметрии к периферии, то есть обеспечивается пластическое течение металла на контактных площадках микровыступов. С одной стороны, оно поддерживает высокий уровень активности атомов металла и выхода на поверхность в зону контакта активных атомов, с другой — такое течение металла способствует разрыву связей хемосорбированного кислорода с более твердым материалом и его удалению. Кроме того, пластическое течение поверхностного слоя металла контактных площадок за счет эстафетной передачи деформации приводит к возникновению пластической деформации в более твердом материале и его активации. В этих условиях на поверхности более твердого материала образуются активные атомы, которые, находясь в состоянии физического контакта, вступают во взаимодействие и образуют прочные химические связи за счет структурного кислорода корунда; атомы металла компенсируют частично незаполненные связи ионов кислорода в кристаллической решетке корунда. Интенсивность накопления сильных связей в этот период времени имеет максимальное значение и сохраняется практически постоянной до окончания пластического течения металла на контактных площадках (3-й и 4-й этапы смятия): изменение длительности 3-го этапа смятия приводит к изменению интенсивности «сшивания» связей, то есть изменению угла наклона кинетической кривой.

При контактном взаимодействии материалов в твердом состоянии под действием термодеформационного воздействия необходима пластическая деформация как мягкого, так и твердого материалов. Однако их роль в общем процессе взаимодействия различна. Роль пластической деформации мягкого материала сводится не только к образованию физического контакта, активации собственной поверхности, удалению сорбированного кислорода с поверхности более твердого материала, но и созданию условий для возникновения и развития пластической деформации в более твердом материале. Пластическая деформация более твердого материала является определяющей в активации поверхности и развитии схватывания. Начало интенсивного схватывания будет определяться длительностью периода задержки развития пластической деформации в более твердом материале. Совершенно очевидно, что в этом случае на поверхности последнего должны наблюдаться следы пластической деформации, например полосы и пачки скольжения. В области контактной площадки, охваченной пачкой скольжения, и происходит образование мостиков схватывания.

Таким образом, запаздывание второй стадии взаимодействия в контакте разноименных пар материалов будет определяться протеканием двух взаимосвязанных параллельных процессов, а именно: влиянием интенсивности образования физического контакта при смятии микровыступов «мягкого» металла на удаление комплекса адсорбции с поверхности более «твердого» материала и влиянием напряжений, возникающих на границе раздела мягкое — твердое вследствие протекания внутризеренной сдвиговой деформации в приконтактных объемах микровыступов, на развитие пластической деформации в более

твердом материале. Совместное протекание этих процессов приводит к активации атомов ответной поверхности более твердого материала и образованию на границе раздела сильных химических (металлических) связей. В связи с изложенным выше совершенно ясно, что на поверхности более твердого металла должны наблюдаться следы пластической деформации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамов В. В., Шоршоров М. Х., Алехин В. П.* О механизме взаимодействия при сварке давлением с нагревом разнородных металлов // Управление сварочными процессами. Тула : ТПИ, 1980 С. 43—53.

2. *Касьян М. В., Абрамов В. В., Мирзаев К. М.* К вопросу о механизме контактного взаимодействия сапфирового инструмента с металлами в процессе их отделочной обработки // Резание труднообрабатываемых материалов. Ереван : АН Арм. ССР, 1975. Вып. 4. С. 18—23.

3. *Рыкалин Н. Н., Шоршоров М. Х., Красулин Ю. Л.* Физические и химические проблемы соединения разнородных материалов // Изв. АН СССР. Сер.: Неорганические материалы. 1965. № 1. Вып. 1. С. 20—25.

4. *Красулин Ю. Л., Шоршоров М. Х.* О механизме образования соединения разнородных материалов в твердом состоянии // Физика и химия обработки материалов. 1967. № 1. С. 15—18.

5. *Абрамов В. В., Джагури Л. В.* О роли термической и механической составляющих в активации контактных поверхностей при термодеформационном воздействии // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2003. № 5. С. 35—39.

6. *Абрамов В. В., Ракунов Ю. П., Батищев В. В.* О механизме контактного взаимодействия сапфирового инструмента с металлами в процессе их чистовой отделочной обработки // Проблемы устойчивости и безопасности системы жизнеобеспечения в сфере ЖКХ. М. : Граница, 2010. С. 29—43.

7. *Абрамов В. В.* Кинетика взаимодействия разнородных материалов в твердом состоянии и разработка совмещенного технологического процесса выглаживания и получения неразъемного соединения : автореф. дис… д-ра техн. наук. М. : МАТИ им. К.Э. Циолковского, 1990. С. 40.

1. *Abramov V. V., Shorshorov M. Kh., Alekhin V. P.* O mekhanizme vzaimodeystviya pri svarke davleniem s nagrevom raznorodnykh metallov // Upravlenie svarochnymi protsessami. Tula : TPI, 1980 S. 43—53.

2. *Kas'yan M. V., Abramov V. V., Mirzaev K. M.* K voprosu o mekhanizme kontaktnogo vzaimodeystviya sapfirovogo instrumenta s metallami v protsesse ikh otdelochnoy obrabotki // Rezanie trudnoobrabatyvaemykh materialov. Erevan : AN Arm. SSR, 1975. Vyp. 4. S. 18—23.

3. *Rykalin N. N., Shorshorov M. Kh., Krasulin Yu. L.* Fizicheskie i khimicheskie problemy soedineniya raznorodnykh materialov // Izv. AN SSSR. Ser.: Neorganicheskie materialy. 1965. № 1. Vyp. 1. S. 20—25.

4. *Krasulin Yu. L., Shorshorov M. Kh.* O mekhanizme obrazovaniya soedineniya raznorodnykh materialov v tverdom sostoyanii // Fizika i khimiya obrabotki materialov. 1967. № 1. S. 15—18.

5. *Abramov V. V., Dzhaguri L. V.* O roli termicheskoy i mekhanicheskoy sostavlyayushchikh v aktivatsii kontaktnykh poverkhnostey pri termodeformatsionnom vozdeystvii // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova. 2003. № 5. S. 35—39.

6. *Abramov V. V., Rakunov Yu. P., Batishchev V. V.* O mekhanizme kontaktnogo vzaimodeystviya sapfirovogo instrumenta s metallami v protsesse ikh chistovoy otdelochnoy obrabotki // Problemy ustoychivosti i bezopasnosti sistemy zhizneobespecheniya v sfere ZhKKh. M. : Granitsa, 2010. S. 29—43.

7. *Abramov V. V.* Kinetika vzaimodeystviya raznorodnykh materialov v tverdom sostoyanii i razrabotka sovmeshchennogo tekhnologicheskogo protsessa vyglazhivaniya i polucheniya neraz"emnogo soedineniya : avtoref. dis… d-ra tekhn. nauk. M. : MATI im. K.E. Tsiolkovskogo, 1990. S. 40.

© Абрамов В. В., Батищев В. В., Ракунов Ю. П., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Абрамов В. В., Батищев В. В., Ракунов Ю. П. О механо-физико-химических явлениях на границе раздела твердых тел при термодеформационном воздействии // Вестник Волгор. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 71—74.

УДК 666.972.16

М. В. Акулова, Б. Р. Исакулов

МЕХАНОХИМИЧЕСКАЯ АКТИВАЦИЯ И ДЕТОКСИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЯЖУЩИХ ЛЕГКИХ БЕТОНОВ

Рассматриваются основы новых безотходных технологий обезвреживания и комплексного использования отходов нефтегазовой отрасли Центральной Азии в виде строительных материалов. Обосновывается возможность применения термодинамического и экспериментальных методов для взаимной механохимической, окислительно-восстановительной детоксикациии хромсодержащих отходов совместно с технической серой, пиритными огарками и отсевами мелких фракций бурого угля.

К л ю че в ы е с л о в а: отходы, бетон, термодинамика, эксперимент, активация, детоксикация.

Bases of new technologies of neutralization and complex use of wastes from oil and gas industry in Central Asia in the form of construction materials are considered in this paper. The possibility of using thermodynamic and experimental methods for mutual mechanochemical, oxidation-reduction detoxication of chromiferous wastes together with technical sulfur, pyrite cynder and siftings of small fractions of brown coal is proved.

K e y w o r d s: wastes, concrete, thermodynamics, experiment, activation, detoxication.

В регионах Центральной Азии количество твердых, жидких и сельскохозяйственных отходов сейчас превышает более 25 млрд т, из которых более 10,5 млрд т — это твердые и жидкие отходы горно-обогатительных, металлургических и нефтехимических отраслей промышленности и более 400 млн т — золы и шлаки энергетических производств и отходы растительного происхождения [1]. Одним из наиболее рациональных способов уменьшения отрицательного влияния многотоннажных отходов на окружающую среду является использование их в качестве сырья для строительных материалов и, в частности, при производстве искусственных пористых заполнителей и вяжущих для бетонных изделий. Таким образом, проблема комплексной переработки твердых и жидких отходов становится приоритетным направлением промышленности [2, 3, 4].

При исследовании новых безотходных технологий обезвреживания и комплексного использования отходов в производстве строительных материалов был использован принцип взаимной нейтрализации токсичных компонентов отходов путем их механохимической обработки при невысокой температуре.

Объектом исследования являются накопленные и продолжающие накапливаться на действующих предприятиях Казахстана промышленные отходы в виде шламов, сточных вод и твердых веществ [1, 5].

1. Хромосодержащий шлам Актюбинского завода хромовых соединений следующего среднего состава, %: CrO_3 общий — 9,5; CrO_3 водорастворимый — 3,4; CrO_3 кислоторастворимый — 1,6; CaO акт. — 2,3; CaO общ. — 21,4; MgO — 35,3; Fe_2O_3 — 19,2; Al_3O_3 — 2,8; SiO_2 — 4,5.

2. Бор- и магнийсодержащие сточные воды бывшего АО «Фосфохром», мг-экв/л: сульфат — 29,8; фторид — 0,6; кальций — 14,0; магний — 14,2; оксид калия — 7,90 мг/л; оксид фосфора — 55 мг/л; сумма солей — 2,54 %.

3. Техническая сера, побочный продукт очистки нефти Жанажолского месторождения с чистотой 99,06 %, массовая доля золы — 0,40 %; массовая доля летучих органических веществ — 0,53 %; массовая доля влаги — 0,01 %.

4. Пиритные огарки бывшего АО «Фосфорхим», состоящие в основном из смеси оксидов железа (II, III) Fe_3O_4 (FO_3, Fe_3O_3), с пересчетом на содержание железа 40...63 % и примесей серы 1...2 %. Остальное — оксиды цветных металлов.

5. Мелкая фракция (отсевы) бурых углей Момытского месторождения Актюбинской области со средней зольностью, равной 10 %, и содержанием летучих веществ 20 %. По отношению к горючей массе элементарный состав угля, %, составляет: C — 70,0; H — 5,5; O — 23,5; N — 1,0; теплотворная способность — 6580 ккал/кг.

В качестве теоретического обоснования совмещенной механохимической активации и детоксикации промышленных отходов в присутствии воды с получением сырьевых смесей для производства арболитобетонов использован принцип взаимной нейтрализации химически вредных веществ, содержащихся в промышленных отходах, например, при окислительно-восстановительных реакциях, комплексообразовании, полимеризации, образовании нерастворимых и других соединений. В ряде случаев процессы детоксикации и активации, рассмотренные ниже, приводят к улучшению эксплуатационных и качественных характеристик получаемых строительных материалов. Наиболее токсичными веществами в этих отходах являются соединения хрома и бора [5].

В исследуемых отходах в качестве окислителей выступают шестивалентный хром и железо в третьей степени окисления (в виде Fe_3O_3), а восстановительными свойствами обладают элементарная сера, отсев бурых углей и железо во второй степени окисления (FeO). Бор в виде борной кислоты способен к комплексообразованию с органическими веществами, имеющими парные оловые (диоловые) гидроксогруппы [5].

Предварительно была проведена термодинамическая оценка вероятности прохождения химических реакций между данными компонентами промышленных отходов с помощью стандартных термодинамических величин и электрохимических потенциалов [6].

Анализ вычисленных значений ЭДС электрохимических систем по нормальным электродным потенциалам показывает, что трехвалентное железо способно окислять серу, переходя затем в двухвалентное железо. Сера, являясь многотоннажным отходом сероочистки нефтегазового сырья, представляет собой относительно недорогой продукт, что расширяет возможности ее технологического применения в промышленном масштабе. Следует отметить, что хромосодержащие шламы имеют pH > 7 (щелочную реакцию водной вытяжки) [7]. Величины стандартных энтальпий $\Delta H°$ и энтропий $\Delta S°$ при температуре 289 К, взятые из литературных источников [6], приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения стандартных энтальпий ΔH^o_{298} и энтропий ΔS^o_{298} для веществ, участвующих в реакциях детоксикации

Вещество	ΔH^o_{298} Ккал/моль	ΔS^o_{298} Ккал/(град·моль)	Вещество	ΔH^o_{298} Ккал/моль	ΔS^o_{298} Ккал/(град·моль)
CrO_3	–142,1	17,2	Fe_3O_4	–266,5	35,0
CO_2	–94,0	51,1	FeS	–22,8	16,1
Cr_2O_3	–273,0	19,4	Fe_2O_3	–145,2	21,5
Cr_2C_3	–21,0	—	FeS_2	–38,8	12,7
SO_2	–71,0	59,2	FeO	–64,5	13,4

Расчеты изменения термодинамических величин в химических реакциях ведутся по формулам:

$$\Delta H^o_{298}\ \text{х. р} = \Delta H^o_{298}\ (\text{конечных}) - \sum \Delta H^o_{298}\ (\text{переходный}). \quad (1)$$

Количество отходов брали в весовых соотношениях, пропорциональных стехиометрическим коэффициентам реакций, а сырьевую смесь слегка увлажняли до консистенций влажного песка. Продукты реакции визуально отличались по цвету от исходной сырьевой смеси. В процессе обработки отмечалось заметное повышение температуры реакционной среды (около 40 °С).

Можно предположить, что сырьевая масса нагревается вследствие химических экзотермических реакций, а также перехода механической энергии удара в тепловую [6]. Вероятно, при механохимическом измельчении заметную роль играет температурный фактор мгновенного местного нагрева реагентов в момент механического удара. Кроме того, в твердофазных реакциях следует учитывать дефекты примесного и нестехиометрического происхождения в кристаллических решетках оксида железа (вюстите) [8]. Известно, в частности, что в вюстите (FeO) обнаружено железо в разных состояниях окисления (0, +2, +3) с различной концентрацией. Поэтому общую валовую формулу вюстита в специальной литературе записывают как $FeO_{(1 \pm x)}$, где величина *x* может меняться в пределах 0,05...0,2. Дефекты кристаллической решетки FeO могут дополнительно увеличивать ее химическую активность в твердофазных (топохимических) реакциях за счет внедрения атомов и ионов реагирующего вещества в междоузлия решетки вюстита, что уменьшает энергию активации топохимической реакции.

Например, скорость спекания обычно увеличивается с ростом отклонения от стехиометрии [8], а энергия активации ползучести кристаллической решетки нестехиометрического оксида уменьшается, по сравнению с нормальным оксидом, на 20...25 ккал/моль. К этому следует добавить, что невозможная с точки зрения термодинамики реакция по формуле (1) в присутствии металлического железа (Fe^o) становится возможной ($\Delta H < 0$):

$$3Fe^o + Fe_3O_4 + 2S \rightarrow 2FeS + 4FeO,\ \Delta H = -37{,}1\ \text{ккал}. \quad (2)$$

На основании изложенного выше материала становится очевидной возможность связывания серы с оксидами железа при механическом воздействий в условиях температур, близких к нормальным. Полученное сырье можно использовать в качестве компонентов вяжущего для получения легких арболитобетонов.

Бор- и хромосодержащие сточные воды целесообразно очищать, используя соединения магния, полученные из отходов переработки хромитовых руд. Соль хлорида магния (бишофит) добывают из природных рассолов региона, а компоненты растительного сырья берут из отходов целлюлозы (в виде опилок и стружек древесины, тростника камыша, шелухи риса, стебли хлопчатника и т. д.). Извлечение H_3BO_3 из природных и сточных вод при большом содержаний бора рекомендуется с помощью адсорбции оксидом магния при температуре 55 ºС, однако остаточное количество бора в растворе после этого еще довольно значительно — 12 мг/л, что выше ПДК бора в питьевых водах (0,5 мг/л). Бор в виде H_3BO_3 и хром в виде Cr^{3+}-, CrO_4^{2}-, $Cr_2O_7^{2}$-ионов можно достаточно эффективно сорбировать на мерсеризованных волокнах целлюлозы.

В ходе данного исследования в качестве вяжущих компонентов арболита были использованы: пиритные огарки Алгинского химического комбината АО «Фосфорхим», сера отходов Жанажолского нефтеперегонного завода, цемент Чимкентского цементного завода, магнезиальное вяжущее и, частично, компоненты хромосодержащего шлама Актюбинского завода хромовых соединений.

Для получения многокомпонентных серохромосодержащих вяжущих помол пиритных огарков и серы производился отдельно. Подготовленные компоненты пиритных огарков, серы и хромошлама были взвешены в соотношениях 200:100:50, 250:100:50, 250:150:40 и размолоты до тонкости, характеризующейся 8…10 % остатка на сите № 008. Затем полученную добавку перемешивали с цементом совместным помолом в течение 20 мин. При этом количество добавки составляло 26, 30 и 33 % от массы вяжущего. Помол цементного клинкера и последующее введение смешанных добавок обеспечивали тонкое измельчение частиц цемента и его равномерное распределение среди составляющих серосодержащих смесей. Оптимальная дозировка активных минеральных добавок составляет 30…33 % от массы вяжущего.

При подборе оптимальных составов серохромосодержащего арболита исследовалась зависимость прочности при сжатии от вида заполнителя, расхода наполнителей и добавок. Полученный состав серохромосодержащей арболитовой смеси приведен в табл. 2.

Таблица 2

Состав серохромосодержащей арболитовой смеси

Компоненты	Масса, %	Расход на, кг/м^3
Портландцемент	36,0	350
Сера (отходы)	3,6	35
Пиритный огарок	7,2	70
Тростник камыша	20,6	200
Хромошлам	1,7	16,5
Вода	30,9	300

Результаты испытаний показали, что оптимальным заполнителем для арболита на серохромосодержащем вяжущем являются измельченные отходы тростника камыша: при сопоставимых средних плотностях достигается минимальный расход серохромосодержащего затворителя. Арболит на измель-

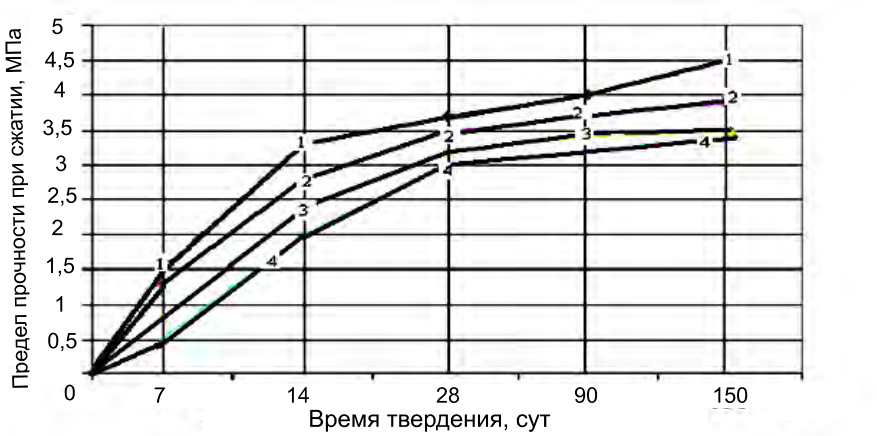
ченном тростнике камыша обладает наибольшей прочностью. С увеличением расхода серохромосодержащих наполнителей до 33 % от массы вяжущего прочность и средняя плотность арболита увеличиваются. Результаты экспериментальных и полупромышленных данных показаны в табл. 3.

Таблица 3

Физические и физико-механические свойства серохромосодержащего арболита

Свойства арболита	Единицы измерения	Показатели свойств образцов, изготовленных в условиях	
		лабораторных	п/промышленных
Плотность	кг/м	620	600
Прочность при сжатии	МПа	3,9	3,4
Теплопроводность	Вт/(м·С)	0,120	0,115
Водопоглощение	%	49	53

Испытания показали, что оптимальные условия для твердения серохромосодержащего арболита создаются при пропаривании. Прочность пропаренных изделий при этом в среднем в 2,3 раза выше, чем у образцов нормального твердения или образцов, твердевших при сушке.



Нарастание прочности серохромосодержащего и портландцементного арболита во времени в зависимости от условия твердения: *1* — пропаренный серохромосодержащий арболит; *2* — серохромосодержащий арболит нормального твердения; *3* — пропаренный портландцементный арболит; *4* — портландцементный арболит нормального твердения

Зависимость нарастания прочности серохромосодержащего и портландцементного арболита от времени и условий твердения представлена на рис. Как видно из приведенных графиков, интенсивное нарастание прочности арболита происходит в первые 7…10 суток, что, очевидно, обусловлено удалением избыточной сверхравновесной влажности воды из образцов и увеличением жесткости растительного заполнителя, а также сцепления заполнителя с камнем вяжущего. Кинетика нарастания прочности у всех типов арболита совпадает, однако у серохромосодержащего арболита нарастание прочности происходит несколько быстрее и предел прочности при сжатии через 28 суток в 1,36 раза больше по сравнению с обычным образцом.

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что применение добавок, полученных путем механохимической активации и детоксикации серохромосодержащего вяжущего, не только не ухудшают, но и в некоторых случаях улучшают свойства легких бетонов. Детоксикация промышленных отходов положительно влияет на экологическую обстановку региона, способствует снижению расхода цемента для производства арболита и решает проблему вторичной переработки сырья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Получение многокомпонентных цементов из твердых отходов промышленности Казахстана и Средней Азий / Л. С. Запорожец, С. М. Базарбаева, А. М. Сарсенов, Р. А. Сарсенов // Аналитический обзор. Актюбинск : РГП КазГосИНТИ, ДГП Актюб. ЦНТИ. 2006. 28 с.

2. Использование золошлаковых отходов ТЭЦ г. Грозного для получения строительных композитов / Ш. Ш. Заурбеков, С-А. Ю. Муртазаев, А. С. Успанова, М. С. Сайдумов // Экология и промышленность России. 2011. Январь. С. 26—28.

3. *Сулейменов А. Т.* Вяжущие материалы из побочных продуктов промышленности. М. : Стройиздат, 1986. 192 с.

4. Свойства цементных композитов на механоактивированном растворе силиката натрия / С. В. Федосов, М. В. Акулова, Т. Е. Слизнева, Ю. С. Ахмадуллина, В. А. Падохин, А. В. Базанов // Вестник МГСУ. 2011. № 1. С. 57—62.

5. *Сарсенов А. М.* Экологическая безопасность и ресурсосбережение при переработке хромитовых и боратовых руд Западного Казахстана. Алматы : Изд-во ВШ РК, 2006. 343с.

6. *Агеев В. Г., Михеев. Я. Я.* Металлургические расчеты. М. : Металлургия, 1982. 207 с.

7. *Тойшибаев Н. К.* Повышение эффективности вяжущего с помощью гидродинамического излучателя : автореф… канд. техн. наук. М., 1990. 20 с.

8. *Мень А. Н.* Физико-химические свойства нестехиометрических оксидов М. : Химия, 1973. 224 с.

1. Poluchenie mnogokomponentnykh tsementov iz tverdykh otkhodov promyshlennosti Kazakhstana i Sredney Aziy / L. S. Zaporozhets, S. M. Bazarbaeva, A. M. Sarsenov, R. A. Sarsenov // Analiticheskiy obzor. Aktyubinsk : RGP KazGosINTI, DGP Aktyub. TsNTI. 2006. 28 s.

2. Ispol'zovanie zoloshlakovykh otkhodov TETs g. Groznogo dlya polucheniya stroitel'nykh kompozitov / Sh. Sh. Zaurbekov, S-A. Yu. Murtazaev, A. S. Uspanova, M. S. Saydumov // Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2011. Yanvar'. S. 26—28.

3. *Suleymenov A. T.* Vyazhushchie materialy iz pobochnykh produktov promyshlennosti. M. : Stroyizdat, 1986. 192 s.

4. Svoystva tsementnykh kompozitov na mekhanoaktivirovannom rastvore silikata natriya / S. V. Fedosov, M. V. Akulova, T. E. Slizneva, Yu. S. Akhmadullina, V. A. Padokhin, A. V. Bazanov // Vestnik MGSU. 2011. № 1. S. 57—62.

5. *Sarsenov A. M.* Ekologicheskaya bezopasnost' i resursosberezhenie pri pererabotke khromitovykh i boratovykh rud Zapadnogo Kazakhstana. Almaty : Izd-vo VSh RK, 2006. 343s.

6. *Ageev V. G., Mikheev. Ya. Ya.* Metallurgicheskie raschety. M. : Metallurgiya, 1982. 207 s.

7. *Toyshibaev N. K.* Povyshenie effektivnosti vyazhushchego s pomoshch'yu gidrodinamicheskogo izluchatelya : avtoref… kand. tekhn. nauk. M., 1990. 20 s.

8. *Men' A. N.* Fiziko-khimicheskie svoystva nestekhiometricheskikh oksidov M. : Khimiya, 1973. 224 s.

© Акулова М. В., Исакулов Б. Р., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Акулова М. В., Исакулов Б. Р. Механохимическая активация и детоксикация промышленных отходов для получения вяжущих легких бетонов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 75—80.

УДК 691:699.88:504

Р. М. Алоян, М. В. Акулова, Т. Г. Ветренко, А. В. Попов

ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ФОРМИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ГИДРАТАЦИОННОГО ТВЕРДЕНИЯ

Определены параметры эманирования Ra226 для оценки радоновыделения строительных материалов. Исследованы радиационные свойства бетонов, модифицированных частицами шунгита.

К л ю ч е в ы е с л о в а: радон, эффективная удельная активность, коэффициент эманирования, эманирующая способность, строительные материалы, бетоны, химические добавки, шунгит.

Parameters for Ra226 emanation for assessment of radon release from construction materials are determined. Investigated are the radiative properties of concrete modified by shungite particles.

K e y w o r d s: radon, effective volume activity, emanation coefficient, emanation capacity, construction materials, concrete, chemical additives, shungite.

В настоящее время одним из наиболее перспективных научно-технологических направлений развития строительной индустрии является разработка эффективных и экологически безопасных строительных композитов. В уже построенных зданиях и сооружениях изменить состояние жилой среды, особенно снизить уровень воздействия радиоактивного радона, достаточно сложно, для этого требуется проведение дорогостоящих технических мероприятий. Поэтому в процессе проектирования здания необходимо оценивать возможное негативное воздействие жилой среды на человека, в том числе прогнозировать радиационный фон помещения [1].

Предпроектные, проектные и контрольные исследования радиационно-опасных факторов включают [2]:

измерение уровня мощности эквивалентной дозы (МЭД) на участке застройки (допустимые значения не превышают 0,15 мкЗв/ч);

измерение содержания ЕРН (допустимые значения эффективной удельной активности ($А_{эф}$) не превышают 370 Бк/кг);

измерение уровня плотности потока радона (ППР) на участке застройки (допустимые значения не превышают 80 мБк/м^2·с);

измерение уровня объемной активности радона (ОАР) в жилище (допустимые значения не превышают 100 Бк/м^3 для вновь строящихся зданий и 200 Бк/м^3 для эксплуатируемых зданий);

измерение уровня МЭД в жилище (допустимые уровни не должны превышать фон на открытой местности более чем 0,2 мкЗв/ч).

Для строительного сырья характерен большой диапазон изменчивости активности ЕРН. Это важное обстоятельство, свидетельствующее о возможности управления радиационным качеством строительных материалов и изделий путем исключения или сокращения в них доли высокорадиоактивного сырья, использования разнообразных химических добавок, а также применения различных технологических методов. Положительный опыт убедительно опровергает утверждение о невозможности влияния на уровень облучения, обусловленного природными источниками [3].

Объемная активность радона в помещении зависит от плотности потока радона, характеристик помещения и интенсивности воздухообмена. Плотность потока радона строительных материалов определяется эманирующей способностью радона из данного строительного материала, т. е. произведением удельной активности радия на коэффициент эманирования [2]. Коэффициент эманирования зависит от состава и строения вещества, его удельной поверхности, температуры и других факторов.

Ивановская область обладает комплексом природного сырья для производства строительных материалов. Наибольшую ценность представляют: мелкозернистые пески, крупнозернистый гравий, щебень и различные типы глин. Известняк, цемент, мел завозятся в Ивановскую область из других регионов России. Традиционными строительными материалами и изделиями являются силикатный и керамический кирпич, керамзитовый гравий, бетонные и железобетонные изделия для строительства объектов жилищного и промышленного назначения.

При производстве строительных материалов и изделий все чаще стали применять некондиционное сырье и отходы различных отраслей промышленности. Выросли объемы использования золошлаковых отходов, особенно при производстве керамического кирпича. Изменение состава сырьевых компонентов обусловило, соответственно, изменение содержания естественных радионуклидов в готовой продукции и параметры ее эманирования. В связи с сокращением сырьевых ресурсов и тенденцией к использованию в более широких масштабах промышленных отходов встает вопрос об обязательном контроле радиационных свойств строительных материалов, содержащих промышленные отходы и различные химические добавки.

Исследования большой группы используемых в Ивановской области строительных материалов, в том числе гидратационного твердения (мелкозернистый и тяжелый бетоны, цементные и цементно-песчанные растворы, силикатный кирпич), показали, что коэффициент эманирования меняется в широких пределах.

Наиболее низкие значения коэффициента эманирования в ходе проводимых экпериментов наблюдались у материалов, полученных высокотемпературной обработкой (табл.), это согласуется с результатами, полученными другими исследователями [3, 4].

Было выявлено, что коэффициент эманирования строительных материалов гидратационного твердения (бетонов, растворов и силикатного кирпича) значительно зависит от открытой пористости, неоднородностей и дефектов структуры, а также удельной поверхности как исходных компонентов, так и новообразований. Установлено, что с увеличением удельной поверхности, открытой пористости, а также при наличии микротрещин, имеющих выход на поверхность материала, значение коэффициента эманирования возрастает.

Цементные растворы и бетоны являются многокомпонентными материалами, в которых коэффициент эманирования будет определяться не только величинами коэффициентов его составляющих, но и структурой материала в целом. Более высокие значения $K_{эм}$ бетонов и растворов предположительно обясняются их капиллярно-пористой структурой и образованием микротрещин в процессе усадки при гидратации. При взаимодействии цемента с водой основная масса новообразований получается в виде гелевидных масс, состоящих преимущественно из субмикроскопических частичек гидросиликатов кальция [5].

Значения коэффициента эманирования и эманирующей способности строительных материалов

Наименование материала	Коэффициент эманирования $K_{эм}$, отн. ед	Удельная активность радия A_{Ra}, Бк/кг	Эманирующая способность $K_{эм}$ A_{Ra}, Бк/кг
Песок кварцевый «Хромцовский», намывной	0,27	10,2	2,75
Песок «Хромцовский», немодифицированный	0,34	14,3	4,86
Песок городского карьера	0,44	9,4	4,14
Щебень гравийный, фр. 20…40 мм	0,12	53,1	6,37
Щебень гравийный, фр. 5…20 мм	0,14	42,2	5,91
Гравий керамзитовый	0,22	20,1	4,42
Зола (ТЭС-2, г. Иваново)	0,21	121,8	25,58
Кирпич силикатный	0,11	17,3	1,9
Кирпич керамический	0,09	31,3	2,82
Плитка керамическая глазурованная	0,05	68,1	3,41
Цемент	0,09	65,8	5,92
Цементный камень	0,28	27,2	7,62
Цементно-песчаный раствор	0,32	22,3	7,14
Бетон мелкозернистый	0,48	26,1	12,53
Бетон тяжелый	0,25	20,8	5,20

Частички, слагающие гель, характеризуются кристаллической структурой, однако достаточно высокая дисперсность обусловливает их коллоидные свойства. Увеличение пористости приводит к увеличению коэффициента эманирования.

Перемещение атомов радона в структуре строительных материалов с последующим выходом происходит по открытым порам, капиллярам, трещинам и другим дефектам структуры [6]. Коэффициент эманирования бетонов зависит от наличия условий, способствующих удержанию атомов радона в порах и капиллярах. Эти условия определяются размерами пор и капилляров, площадью их поверхности и наличием в них среды, удерживающей атомы отдачи. Диаметр атомов радона составляет ≈ 0,26 нм, капиллярных пор бетона ≈ 50 нм, пор геля ≈ 1…3 нм, а в кристаллитах ≈ 0,5 нм. Поэтому молекулы радона свободно перемещаются по порам геля и капиллярным порам, а затем выходят наружу. В замкнутых порах радон находится в радиоактивном равновесии с продуктами своего распада. Средой, удерживающей атомы радона, является вода, в том числе в виде капиллярных пленок. Предположительно, атомы эманации, задержанные водой, попадают путем диффузии из нее во внешнюю, свободную от воды часть капилляров и по ней выводятся из бетона. Если открытые капилляры полностью заполнены водой, то часть атомов радона распадается в воде за время диффузии.

Введение в состав бетона различных химических добавок, а также дисперсного шунгита позволило изменить параметры эманирования.

Шунгит — промежуточный продукт между аморфным углеродом и графитом, содержащий углерод (≈ 30 %), кварц (≈ 45 %) и силикатные слюды (≈ 20 %). Кроме углерода, в состав шунгита входят также SiO_2 (≈ 57,0 %), TiO_2 (≈ 0,2 %), Al_2O_3 (≈ 4,0 %), FeO (≈ 2,5 %), MgO (≈ 1,2 %), MnO (≈ 0,15), K_2O(≈ 1,5 %), S (≈ 1,2 %).

Структура шунгита характеризуется равномерным распределением полярных высокодисперсных кристаллических силикатных частиц в неполярной углеродной матрице из сферических, пустотелых, многослойных фуллереноподобных глобул углерода размером от 10 до 20 нм [7]. Строение шунгитового углерода характеризует материал высокой ударной прочности, адсорбционной активности, бактерицидными свойствами, способностью экранировать электромагнитные излучения и стойкостью к агрессивным средам. Благодаря данным преимуществам, шунгит можно эффективно использовать в дальнейших исследованиях; кроме того, вероятно наличие у шунгита наноуглеродной составляющей [8].

Механизм влияния углеродных наночастиц на структурообразование бетона заключается в уменьшении расклинивающего давления воды затворения и ускорения коагуляции частиц цемента [9].

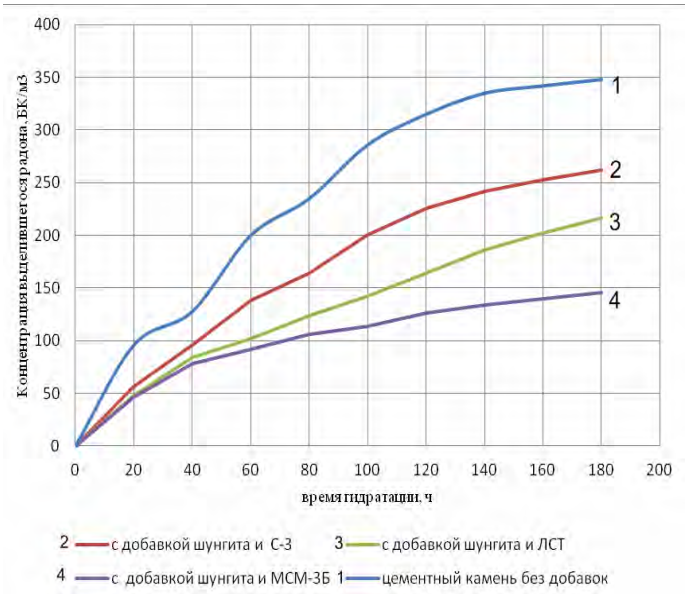
При исследованиях использовались портландцемент ПЦ М 500 Д0 «Мордовцемент», шунгитовый щебень (фракции 5…10 мм) после измельчения до фракции 62…74 мкм из Зажогинского месторождения (Карелия) и вода.

Шунгит применялся в виде суспензии с водой затворения, получаемой путем диспергирования шунгитового микронаполнителя (≈ 75 мкм) в высокоскоростной мешалке.

Механическое диспергирование шунгитового микронаполнителя в воде позволило уменьшить его частицы до 360…6230 нм. Однако такая суспензия является достаточно неоднородной и неустойчивой, что приводит к седиментации частиц шунгита. Для получения суспензии, устойчивой к агрегации и седиментации частиц, проводилось механическое диспергирование шунгита в воде затворения совместно с пластифицирующей добавкой [9]. Использовались добавки С-3, ЛСТ и МСМ-3Б, выбор которых обусловлен различием их влияния на скорость гидратации цемента, а также доступностью и широким применением данных добавок в строительной индустрии. Полученные добавки вводились в состав бетонных смесей. В результате диспергирования дисперсность частиц снизилась с 35 до 62 %. Максимальный эффект наблюдался для условий с использованием ЛСТ-3 (≈ 55 %) и МСМ-3Б (≈ 62 %). При этом происходило значительное снижение эманирующей способности цементного бетона (≈ 40 %) и одновременное повышение прочности на сжатие (≈ 35 %). Наибольший эффект наблюдался при использовании пластифицирующей добавки МСМ-3Б (рис.).

Установлено, что эманирующая способность бетона снижается на 43…51 %, а прочность при сжатии повышается на ≈ 42 %.

Введение в состав микро- и нанодисперсного шунгита одновременно снижает радоновыделение цементного бетона, но в меньшей степени (≈ 22 %).



Кривые радоновыделения при гидратации цементного камня без добавок и с добавками шунгитовой суспензии

Таким образом, использование различных добавок и соответствующие технологические приемы позволяют изменять радиационные свойства строительных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические вопросы организации и проведения радиационного контроля зданий и сооружений / М. В. Терентьев, И. П. Стамат, Э. М. Крисюк и др. // АНРИ. 1996/97. № 3 (9). С. 31—36.

2. НРБ-99. Нормы радиационной безопасности. М., 1999. 115 с.

3. *Назиров Р. А.* Влияние различного вида покрытий и условий твердения на выход радона из бетона // Вестник КрасГАСА. 2000. Вып. 3. С. 60—64.

4. *Лукутцова Н. П.* Строительные материалы в экологическом аспекте. Брянск : БГИТА, 2001. 215 с.

5. *Баженов Ю. М., Воробьев В. А., Илюхин А. В.* Основные подходы к компьютерному материаловедению строительных композитных материалов // Строительные материалы. Наука. 2006. № 7. С. 2—4.

6. Цементные бетоны с пониженным радоновыделением / Р. А. Назиров, Е. В. Пересыпкин, С. А. Кургуз, В. И. Верещагин // Строительные материалы. Наука. 2005. № 3. С. 28—30.

7. Наномодифицированный мелкозернистый бетон / Н. П. Лукутцова, Е. Г. Матвеева, А. А. Пыкин, О. А. Чудакова // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов : материалы V Международной научно-технической конференции, 23—24 апреля 2009 г. Ч. 1. Волгоград, 2009. С. 166—170.

8. Влияние микро- и нанодисперсного шунгита на свойства бетонов / Н. П. Лукутцова, А. А. Пыкин, Г. В. Костюченко // Вестник МГСУ. 2011. С. 282—287.

9. Модификация строительных материалов наноуглеродными трубками/ Е. В. Королев, Ю. М. Баженов, А. А. Береговой // Строительные материалы. Наука. 2006. № 8. С. 2—5.

1. Metodicheskie voprosy organizatsii i provedeniya radiatsionnogo kontrolya zdaniy i sooruzheniy / M. V. Terent'ev, I. P. Stamat, E. M. Krisyuk i dr. // ANRI. 1996/97. № 3 (9). S. 31—36.

2. NRB-99. Normy radiatsionnoy bezopasnosti. M., 1999. 115 s.

3. *Nazirov R. A.* Vliyanie razlichnogo vida pokrytiy i usloviy tverdeniya na vykhod radona iz betona // Vestnik KrasGASA. 2000. Vyp. 3. S. 60—64.

4. *Lukuttsova N. P.* Stroitel'nye materialy v ekologicheskom aspekte. Bryansk : BGITA, 2001. 215 s.

5. *Bazhenov Yu. M., Vorob'ev V. A., Ilyukhin A. V.* Osnovnye podkhody k komp'yuternomu materialovedeniyu stroitel'nykh kompozitnykh materialov // Stroitel'nye materialy. Nauka. 2006. № 7. S. 2—4.

6. Tsementnye betony s ponizhennym radonovydeleniem / R. A. Nazirov, E. V. Peresypkin, S. A. Kurguz, V. I. Vereshchagin // Stroitel'nye materialy. Nauka. 2005. № 3. S. 28—30.

7. Nanomodifitsirovannyy melkozernistyy beton / N. P. Lukuttsova, E. G. Matveeva, A. A. Pykin, O. A. Chudakova // Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov, konstruktsiy i osnovaniy fundamentov : materialy V Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, 23—24 aprelya 2009 g. Ch. 1. Volgograd, 2009. S. 166—170.

8. Vliyanie mikro- i nanodispersnogo shungita na svoystva betonov / N. P. Lukuttsova, A. A. Pykin, G. V. Kostyuchenko // Vestnik MGSU. 2011. S. 282—287.

9. Modifikatsiya stroitel'nykh materialov nanouglerodnymi trubkami/ E. V. Korolev, Yu. M. Bazhenov, A. A. Beregovoy // Stroitel'nye materialy. Nauka. 2006. № 8. S. 2—5.

© Алоян Р. М., Акулова М. В., Ветренко Т. Г., Попов А. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Влияние структурно-технологических факторов на формирование радиационных свойств строительных материалов гидратационного твердения / Р. М. Алоян, М. В. Акулова, Т. Г. Ветренко, А. В. Попов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 81—86.

УДК 666.913/.914

Б. С. Баталин, М. П. Красновских

ОБ УТИЛИЗАЦИИ СУЛЬФАТНО-КАЛЬЦИЕВЫХ ШЛАМОВ ПЕРЕРАБОТКОЙ В СТРОИТЕЛЬНЫЕ ИЗДЕЛИЯ

Рассматривается возможность утилизации сульфатно-кальциевых шламов переработкой в высокопрочные водостойкие строительные изделия. Исследована возможность применения технологии ускорения процесса твердения шлама путем теплового воздействия, позволяющая получать прочные водостойкие строительные изделия непосредственно из шлама, минуя получение гипсового вяжущего.

К л ю ч е в ы е с л о в а: золь-гель технология, микрокристаллизация, хемогенные антропогенные отходы.

The possibility of calcic sulphate sludge disposal by recycling into high strength and water resistant construction units is considered. The authors investigate the possibility of using technology of process acceleration of sludge hardening under thermal effect that allow get water-resistant construction units directly from sludge and without producing gypsum binder.

K e y w o r d s: sol-gel technology, microcrystallization, chemogenic anthropogenic wastes.

Широко применяемые в строительстве гипсовые вяжущие получают из горной породы под названием гипс (гипсовый камень), представляющей собой такой же по минералогическому составу материал, что и затвердевший строительный гипс, т. е. двуводный сульфат кальция $CaSO_4 \cdot 2H_2O$. Однако горные породы имеют при сжатии прочность 40...80 МПа и высокую водостойкость — до 0,95. Несмотря на довольно высокую растворимость и низкую твердость гипса (2 по шкале Мооса), гипсовый камень характеризуется низким водопоглощением, вследствие чего обладает высокой морозостойкостью. Тем не менее, природный гипсовый камень, по крайней мере на территории Пермского края, очень сильно закарстован, трещиноват, а потому произвести из такой породы крупноразмерные изделия строительного назначения (например, стеновые камни) не представляется возможным. Иногда состояние гипсового камня позволяет изготовить из него лишь мелкие облицовочные плитки для стен.

С древних времен известно, что для получения гипсовых вяжущих гипсовый камень необходимо обжечь или подвергнуть тепло-влажностной обработке при температуре 160...200 ^{o}C. Полученное вяжущее — полуводный гипс β- или α-модификации — после затворения водой и двухчасового твердения имеет невысокую прочность, обычно равную 4...16 МПа, и низкую водостойкость. Значение коэффициента размягчения строительного гипса, характеризующего водостойкость материала, составляет 0,4...0,5. Быстрое схватывание таких вяжущих при принимаемых обычно значениях водо-гипсового фазового отношения (0,3...0,6) не позволяет снизить фазовое отношение до более низких значений, хотя для полного протекания реакции гидратации требуется примерно 22,4 % воды.

Высокая прочность и водостойкость природного гипса могут быть объяснены условиями формирования этой горной породы. Дело в том, что в природе хемогенные породы, каковой является гипс, образуются в лагунах — теплых внутренних мелких морях с высокоминерализованной водой. В этой воде, кроме сульфата кальция, присутствуют также сульфаты, хлориды, карбонаты, гидроксиды различных металлов, кварц и силикаты в виде высокодисперс-

ных образований, попавших в эту смесь при выветривании других горных пород, органические биогенные вещества, растворенные в воде кислород, азот и диоксид углерода. При высокой концентрации всех этих соединений такая вода представляет собой коллоидный раствор — золь. В условиях длительного образования осадка его самоуплотнения, а затем испарении воды золь коагулировал, начинал кристаллизовываться. В такой среде зародыши кристаллизации не успевали значительно вырасти, образовавшаяся порода оставалась часто микрокристалической и ультрамикрокристаллической. Именно поэтому и возник прочный водостойкий гипс [1]. Таким образом, природный процесс, длившийся сотни тысяч и даже миллионы лет, представлял собой подобие золь-гель перехода.

В технологии гипсовых изделий золь-гель процессы никогда не применяют из-за высокой энергоемкости измельчения гипсовой породы до размера коллоидных частиц. При затворении гипсового вяжущего водой золь может образоваться только при очень малом количестве воды в смеси, но тогда такую смесь невозможно сформовать в изделие, она немедленно схватится [2].

В то же время среди антропогенных материалов — отходов и побочных продуктов различных производств — есть высокодисперсные золеподобные шламы и осадки. Во многих регионах России накопилось огромное количество отходов и побочных продуктов промышленных производств в виде высокодисперсных шламов, содержащих сульфаты и карбонаты кальция, кремнезем, гидроксиды различных металлов, в том числе редкоземельных и тяжелых. Шламы занимают большие площади, их компоненты отравляют окружающую среду, создавая реальную угрозу здоровью населения, животному миру и растительности. Утилизация их практически отсутствует, поскольку не существует эффективной технологии переработки таких шламов в полезную или хотя бы безопасную форму [3].

В ряде случаев это двуводные сульфаты кальция — фторогипс, борогипс и т. д., в связи с чем у производственников и ученых-материаловедов возникает естественное стремление получить из такого отхода гипсовое вяжущее. Данной проблеме посвящены сотни публикаций, разными авторами запантетованы многочисленные разработки [4—8].

Однако широкого применения гипсовые вяжущие из различного рода элементоангидритов и элементогипсов не получили, так как подобные вяжущие обычно обладают замедленным твердением, требуют специального регулирования сроков схватывния, иногда не соответствуют требованиям гигиенической безопасности. Это объясняется тем, что ангидрит образуется за счет нейтрализации серной кислоты известью или известняком, в результате чего происходит самогрануляция продукта. Гранулы размерами 5...25 мм и более в своем центре содержат концентрированную серную кислоту, которая не взаимодействует с нейтрализующим веществом. Производство таких вяжущих часто является экономически нецелесообразным: требуются значительные затраты на помол отхода и его донейтрализацию. Поэтому предприятия предпочитают складировать такие отходы в шламохранилищах с помощью гидроудаления.

Так, на предприятии ОАО «ГалоПолимер» (г. Пермь) скопилось огромное количество шлама. В процессе транспортировки и еще более во время вылеживания в дисперсной системе, являющейся концентрированной суспен-

зией — пастой, происходит полная нейтрализация серной кислоты и образование двуводного сульфата кальция. При нейтрализации возникают вначале лишь зародыши кристалликов двуводного сульфата кальция (рост их ограничен высокой концентрацией дисперсной фазы). Таким образом, происходит процесс, аналогичный образованию гипсовой горной породы.

Пролежавшие в шламохранилище 20…40 лет шламы предприятия «ГалоПолимер» превратились в твердое тело высокой прочности. При попытке удалить затвердевший шлам из старого хранилища оказалось, что возникший камень не поддается воздействию ни бульдозера, ни отбойного молотка. Прочность при сжатии этого камня оказалась равной 60 МПа при водостойкости 0,89. Естественно, долгие годы твердения абсолютно не приемлемы для возможной технологии утилизации подобного шлама.

Нами была исследована возможность применения данного способа утилизации так называемого фторгипсового шлама с помощью теплового воздействия на него в целях ускорения процесса твердения.

Возраст шлама не менее 20 лет, он представляет собой пасту светло-серого цвета. Влажность пасты 25...35 %, расплыв конуса на встряхивающем столике 6...7 мм. Размер кристалликов гипса, измеренный под микроскопом МИН-8 при увеличении ×160 с помощью окулярной линейки, составляет 3...5 мкм.

Из шлама формовали образцы-балочки размером 4×4×16 см, которые затем подвергали термообработке.

Первая серия (6 образцов) была высушена при температуре 85 °С в течение 12 часов, вторая серия была пропарена по режиму 2 — 8 — 2 часа при температуре изотермии 80 °С, третья серия была автоклавирована при давлении 0,2 МПа в течение 6 часов. Результаты испытаний образцов приведены в табл.

Результаты испытаний образцов фторгипсового шлама, полученных в разных условиях твердения

Номер образца	Прочность образцов, МПа					
	Сушка		Пропаривание		Автоклавирование	
	сжатие	изгиб	сжатие	изгиб	сжатие	изгиб
1	10,2	3,3	16,8	4,5	21,2	6,1
2	12,4	3,9	16,9	4,7	23,6	5,8
3	12,9	3,7	17,6	4,2	19,8	6,4

Как видно из табличных данных, наиболее эффективной является термовлажностная обработка образцов в автоклаве. Кроме того, образцы-близнецы были испытаны на водостойкость. Как и предполагалось, коэффициент размягчения высушенных образцов составляет 0,41, а образцов после термовлажностной обработки — 0,74 (пропаренных) и 0,87 (автоклавированных).

Таким образом, удалось показать, что можно существенно ускорить процесс твердения шлама и получить готовые изделия из него без предварительного обжига и помола исходного сырья.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. http://www.ekologyprom.ru/uchebnik-po-promyshlennoj-ekologii.html (дата обращения: 21.01.2013).

2. *Полак А. Ф.* Твердение мономинеральных вяжущих веществ (вопросы теории). М. : Стройиздат, 1966. 216 с.

3. Гипс и материалы на его основе / А. Г. Губская и др. Минск : Стринко, 2009. 184 с.

4. *Пурескина О. А., Гашкова В. И., Катышев С. Ф.* Утилизация фторангидрита отхода производства плавиковой кислоты с получением гранулированного гипса // Экология промышленного производства. 2008. № 4. С. 19—21.

5. *Пурескина О. А., Гашкова В. И., Катышев С. Ф.* Переработка твердых техногенных отходов — фторангидрита и феррошлаков, самораспадающихся с получением гипсового вяжущего вещества // Экология промышленного производства. 2009. № 1. С. 36—38.

6. *Гордашевский П. Ф., Долгарев Л. В.* Производство гипсовых вяжущих материалов из гипсосодержащих отходов. М. : Стройиздат, 1987. 105 с.

7. *Кочеткова Р. Г.* Применения вторичных ресурсов в строительстве [Электронный ресурс]. URL: http: //www.sovtehnostroy.ru/viewart.php?arts_id_=86 (дата обращения: 21.01.2013).

8. Сульфатносиликатное вяжущее и способ его получения / Б. С. Баталин, О. Г. Еремин, Д. В. Ивенских, В. С. Попов // Патент на изобретение № 2450989.

1. http://www.ekologyprom.ru/uchebnik-po-promyshlennoj-ekologii.html (data obrashcheniya: 21.01.2013).

2. *Polak A. F.* Tverdenie monomineral'nykh vyazhushchikh veshchestv (voprosy teorii). M. : Stroyizdat, 1966. 216 s.

3. Gips i materialy na ego osnove / A. G. Gubskaya i dr. Minsk : Strinko, 2009. 184 s.

4. *Pureskina O. A., Gashkova V. I., Katyshev S. F.* Utilizatsiya ftorangidrita otkhoda proizvodstva plavikovoy kisloty s polucheniem granulirovannogo gipsa // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2008. № 4. S. 19—21.

5. *Pureskina O. A., Gashkova V. I., Katyshev S. F.* Pererabotka tverdykh tekhnogennykh otkhodov — ftorangidrita i ferroshlakov, samoraspadayushchikhsya s polucheniem gipsovogo vyazhushchego veshchestva // Ekologiya promyshlennogo proizvodstva. 2009. № 1. S. 36—38.

6. *Gordashevskiy P. F., Dolgarev L. V.* Proizvodstvo gipsovykh vyazhushchikh materialov iz gipsosoderzhashchikh otkhodov. M. : Stroyizdat, 1987. 105 s.

7. *Kochetkova R. G.* Primeneniya vtorichnykh resursov v stroitel'stve [Elektronnyy resurs]. URL: http: //www.sovtehnostroy.ru/viewart.php?arts_id_=86 (data obrashcheniya: 21.01.2013).

8. Sul'fatnosilikatnoe vyazhushchee i sposob ego polucheniya / B. C. Batalin, O. G. Eremin, D. V. Ivenskikh, V. S. Popov // Patent na izobretenie № 2450989.

© Баталин Б. С., Красновских М. П., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Баталин Б. С., Красновских М. П. Об утилизации сульфатно-кальциевых шламов переработкой в строительные изделия // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 87—90.

УДК 624.011.9.620.169.1

Б. А. Бондарев, А. Б. Бондарев, Р. Ю. Сапрыкин, М. Ф. Мелешкин

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ, АРМИРОВАННЫХ СТЕКЛОПЛАСТИКОВОЙ АРМАТУРОЙ, НА ВЫНОСЛИВОСТЬ

Рассмотрены вопросы расчета на выносливость элементов конструкций с учетом усталостных явлений. Предложена методика расчета конструкций из полимерных композиционных материалов на выносливость.

К л ю ч е в ы е с л о в а: выносливость, усталость, полимерные композиционные материалы, стеклопластиковая арматура, полимербетон.

The authors study the issues of fatigue calculation of the elements of construction taking into account their fatigue effect. They also suggest the methodology of fatigue calculation of constructions made of polymeric composite materials.

K e y w o r d s: fatigue, fatigue effect, polymeric composite materials, glass-reinforced plastic bar, polymer concrete.

В 1960—1980-е гг. строительство конструкций из полимерных композиционных материалов находило широкое применение в народном хозяйстве. Так, в СССР было налажено массовое производство клееных деревянных конструкций, армированных стеклопластиковой арматурой (СПА), а на предприятиях цветной и черной металлургии применялись полимербетонные конструкции, армированные стальной и стеклопластиковой арматурой. Научные школы Москвы, Минска, Воронежа, Липецка, Курска и др. принимали активное участие в этом процессе. После двадцати лет «безвременья» в Российской Федерации возрождается интерес бизнеса к исследованиям и внедрению агрессивно стойких долговечных конструкций из полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных СПА.

Т а б л и ц а 1

Рекомендуемые составы полимерных композиционных материалов [1]

Наименование ПКМ	% по массе								
	Щебень	Песок	Андезитовая мука	Смола	Нафтенат кобальта	Гипериз	Молотый кварц	ПЭПА	БСК
Полимербетон ПН-609-21М	52	28	22	9	8 (от массы смолы)	4 (от массы смолы)	—	—	—
Полимербетон ПН-1	52	28	—	9	8 (от массы смолы)	4 (от массы смолы)	11	—	—
Полимербетон ФАЭИС-30	50	19	26,5	12	—	—	—	2,5	—
Полимербетон ФАМ	52	28	10	10	—	—	—	—	2 (от массы смолы)

Однако до настоящего времени отсутствует методика расчета конструкций из ПКМ, армированных СПА, с учетом усталостных явлений, а также соответствующая нормативная база. В связи с этим исследование работы конструкций из ПКМ в условиях циклических воздействий нагрузок и создание методики расчета на выносливость является актуальной научной задачей.

Разрабатываемая методика расчета конструкций из ПКМ, армированных СПА, на выносливость основана на применении в этих конструкциях ПКМ на основе полиэфирных, фурфурол-ацетоновых, фурано-эпоксидных смол. Рекомендуемые составы из ПКМ приведены в табл. 1. В расчетах учитывались физико-механические характеристики СПА, ИСиА Госстроя Республики Беларусь, полученные в работе [2], а также Бийского завода стеклопластиков, приведенные в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Нормативные и расчетные характеристики СПА [2]

Вид характеристики	Нормативное значение	Выборочная дисперсия	Выборочное среднее квадрат. отклон.	Выборочный коэф. вариации	Коэф. изменяемости	Расчетн. значение
Разрывное усилие, кН	39,0	2,89	1,7	4,36	0,87	34,0
Предельная ($\varepsilon \cdot 10^{-4}$) растяжимость	278,2	131,41	11,46	4,12	0,87	242,0
Модуль упругости, МПа	50125	4874130	2207,74	4,40	0,86	43105

Таблица 3

Характеристики стеклопластиковой арматуры периодического профиля, выпускаемой ООО «Бийский завод стеклопластиков»

Номинальный диаметр, мм	Прочность				Модуль упругости, МПа
	Предельная		Расчетная (долговременная)		
	кН	МПа	кН	МПа	
12	100	890	56	500	Не менее 45000
13	137		77		
16	179		100		
18	226		127		

В связи с отсутствием нормативных документов, регламентирующих порядок расчета элементов из ПКМ со стеклопластиковой арматурой на выносливость, использовалась методика расчета, приведенная в [3].

В этом случае порядок расчета следующий:

1. Определяются заменяющие максимальные и минимальные изгибающие моменты (рис. 1):

$$\begin{aligned} M_{з}^{\max} &= \pm M_{\max} + P_e; \\ M_{з}^{\min} &= \pm M_{\min} + P_e, \end{aligned} \tag{1}$$

где $M_{з}^{\max}$ и $M_{з}^{\min}$ — соответственно максимальные и минимальные заменяющие моменты, определяемые в пределах цикла изменения нагрузки; P — усилие предварительного обжатия с учетом всех потерь; e — эксцентриситет приложения нагрузки.

2. Устанавливают величину коэффициента асимметрии цикла в сжатом полимербетоне и растянутый СПА:

$$p_B = M_{з}^{\min} / M_{з}^{\max}, \tag{2}$$

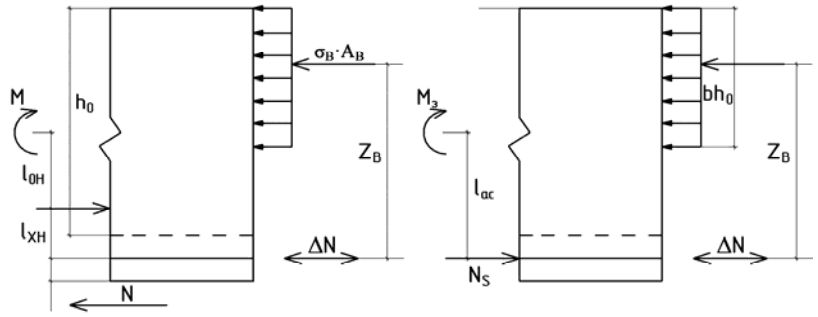
$p_{ср}$=0,8…0,9 (для предварительно напряженной арматуры).

3. Устанавливаются коэффициенты условий работы полимербетона и СПА γ_{b1} и γ_{b3}.

4. Определяют максимальные и минимальные напряжения в полимербетоне и СПА по формулам:

$$\begin{aligned} \sigma_{з}^{\max} &= R_s \gamma_{s3}; \\ \sigma_{з}^{\min} &= p_s \sigma_{з}^{\max}; \\ \sigma_{з}^{\max} &= R_b \gamma_{b1}; \\ \sigma_{з}^{\min} &= p_B \sigma_B^{\max}, \end{aligned} \tag{3}$$

где R_b и R_s — расчетное сопротивление полимербетона сжатию и растяжению арматуры.



а *б*

Рис. 1. Фактическая (*а*) и заменяющая (*б*) схемы усилий внешних нагрузок и предварительного обжатия

5. Находят величины относительной сжатой зоны полимербетона:

$$\begin{aligned} \xi_{B1} &= \frac{\sigma_s^{\max} A_s}{\sigma_b^{\max} b h_0}; \\ \xi_{B2} &= \frac{\sigma_s^{\max} A_s}{\sigma_b^{\max} b h_0}, \end{aligned} \tag{4}$$

где A_s — площадь рабочего сечения арматуры; h_0 — величина сжатой зоны полимербетона.

6. Определяют приведенные сечения сжатой зоны полимербетона:

$$A_{B1}=bh_0\xi_{B1};\ A_{B2}=bh_0\xi_{B2}. \tag{5}$$

7. Определяют величину плеча внутренней пары сил:

$$\begin{aligned} Z_{B1} &= h_0(1-0,5\xi_{B1});\\ Z_{B2} &= h_0(1-0,5\xi_{B2}). \end{aligned} \tag{6}$$

8. Находят величину усилий, соответствующих максимальному и минимальному напряжению в растянутой арматуре:

$$\begin{aligned} \Delta N_{\max} &= M_s^{\max} / Z_{B1} - P;\\ \Delta N_{\min} &= M_з^{\min} / Z_{B2} - P. \end{aligned} \tag{7}$$

9. Определяют усилие, соответствующее моменту образования трещин, нормальных к предельной оси элемента:

$$N_{p.t.в}=R_{bt}A_{\text{red}}, \tag{8}$$

где R_{bt} — расчетное сопротивление полимербетона растяжению; A_{red} — площадь приведенного сечения.

10. Проверяют условие $0< \Delta N_{\max} < N_{p.t.в}$ и определяют максимальные и минимальные напряжения в растянутой арматуре:

$$\begin{aligned} \sigma_s^{\max} &= \sigma_{sp} + \Delta N_{\max} / A_{\text{red}}\eta;\\ \sigma_s^{\min} &= \sigma_{sp} + \Delta N_{\min} / A_{\text{red}}\eta;\\ &\text{при } \Delta N_{\max} < 0, \end{aligned} \tag{9}$$

где σ_{sp} — предварительное напряжение в СПА, расположенной в растянутой зоне, с учетом всех потерь.

$$\begin{aligned} \sigma_s^{\max} &= \sigma_{sp} - \Delta N_{\max} / A_{\text{red}}\eta;\\ \sigma_s^{\min} &= \sigma_{sp} - \Delta N_{\min} / A_{\text{red}}\eta; \end{aligned} \tag{10}$$

и при $\Delta N_{\max} > N_{p.t.в}$

$$\begin{aligned} \sigma_s^{\max} &= \sigma_{sp} + \Delta N_{\max} / A_s;\\ \sigma_s^{\min} &= \sigma_{sp} + \Delta N_{\min} / A_s. \end{aligned} \tag{11}$$

11. Устанавливают коэффициент асимметрии цикла:

$$\begin{aligned} \rho_в &= \sigma_в^{\min} / \sigma_в^{\max};\\ \rho_s &= -\sigma_s^{\min} / \sigma_s^{\max} \end{aligned} \tag{12}$$

и находят новые значения коэффициентов условий работы γ_{b1} *и* γ_{s3}.

Если полученные коэффициенты работы и асимметрии цикла окажутся мало отличающимися от предшествующих своих значений, то проверяются условия прочности

$$\sigma_{в}^{max} \le \gamma_{b1} R_b; \quad \sigma_{s}^{max} \le \gamma_{s3} R_s. \tag{13}$$

Если условия выполняются, тогда выносливость нормальных сечений обеспечена.

Для расчета стеклопластополимербетонных элементов на выносливость по первой группе предельных состояний разработана компьютерная программа расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бондарев А. Б.* Прогнозирование циклической долговечности полимерных композиционных материалов: афтореф. дис… канд. техн. наук. Волгоград, 2011. 180 с.

2. *Набоков В. Д.* Исследование полимербетонных конструкций, армированных стеклопластиковой арматурой, на основе полиэфирной смолы НПС-609-21М : автореф. дис… канд. техн. наук. Воронеж, 1979. 231 с.

3. Инструкция по проектированию зданий и сооружений из армополимербетона. М. : МЦМ, 1985. 128 с.

1. *Bondarev A. B.* Prognozirovanie tsiklicheskoy dolgovechnosti polimernykh kompozitsionnykh materialov: aftoref. dis… kand. tekhn. nauk. Volgograd, 2011. 180 s.

2. *Nabokov V. D.* Issledovanie polimerbetonnykh konstruktsiy, armirovannykh stekloplastikovoy armaturoy, na osnove poliefirnoy smoly NPS-609-21M : avtoref. dis… kand. tekhn. nauk. Voronezh, 1979. 231 s.

3. Instruktsiya po proektirovaniyu zdaniy i sooruzheniy iz armopolimerbetona. M. : MTsM, 1985. 128 s.

© Бондарев Б. А., Бондарев А. Б., Сапрыкин Р. Ю., Мелешкин М. Ф., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Методика расчета конструкций из полимерных композиционных материалов, армированных стеклопластиковой арматурой, на выносливость / Б. А. Бондарев, А. Б. Бондарев, Р. Ю. Сапрыкин, М. Ф. Мелешкин // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 91—95.

УДК 691.1

Б. А. Бондарев, Р. Н. Черноусов, А. Б. Бондарев, М. Ф. Мелешкин

МАЛОЦИКЛОВАЯ УСТАЛОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (ПКМ)

Рассматривается вопрос малоцикловой усталости полимерных композиционных материалов. Представлены кривые малоцикловой усталости полимербетонов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: малоцикловая усталость, полимерные композиционные материалы.

The issues of low-cycle fatigue of polymeric composite materials are investigated. The curves of low-cycle fatigue of polymer concrete are provided.

K e y w o r d s: low-cycle fatigue, polymer composite materials.

Под усталостью ПКМ понимают процесс постепенного накопления локальных повреждений под действием изменяющейся нагрузки. Если разрушение материала является результатом действия циклического напряжения, то оно именуется усталостным [1]. Графическим отображением результатов усталостных испытаний является кривая Велера, которая строится в координатах $\sigma_{max}/R_b - \lg N$. Представление усталостной кривой в виде прямой с перегибом является приближенным, но удобным в применении с практической точки зрения. В действительности кривая имеет *S*-образный вид (рис. 1).

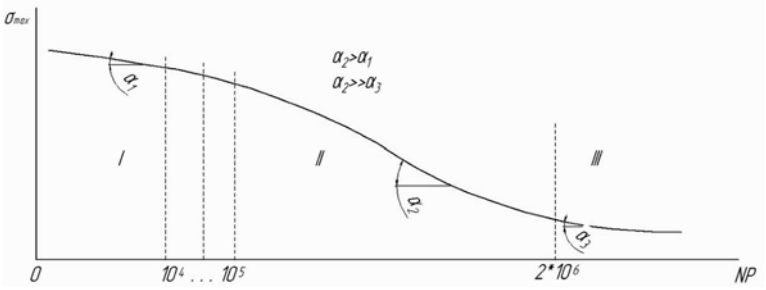


Рис. 1. Временные области кривой усталости

Здесь кривую усталости можно условно разбить на три участка: I участок — малоцикловая усталость; II участок — многоцикловая усталость и III участок — длительное сопротивление усталости.

Наличие трех участков на кривой отражает различие в кинетике накопления усталостных разрушений в материале при различной продолжительности циклического нагружения. И если исследованиям многоцикловой усталости ПКМ посвящено значительное количество работ, то поведение композиционных материалов в области малоцикловой усталости (т. е. в диапазоне до 10^5 циклов) практически не освещено в современной научно-технической литературе.

Анализом действующих на строительные конструкции зданий и сооружений временных нагрузок установлено, что большинство из них (снеговые, ветровые, а также нагрузки на перекрытия от находящихся на них людей

и ремонтных материалов в зонах обслуживания и ремонта оборудования или складируемых материалов и др.) имеют малоцикловый характер. Количество их повторений за гарантированный срок службы составляет десятки или сотни раз (во всех случаях меньше $2 \cdot 10^6$ циклов).

Согласно современным теоретическим представлениям, особенность такого рода нагружений заключается в возможности периодического возникновения в материалах напряжений высоких уровней, превышающих так называемые критические величины. При этом возможно прогрессирующее накопление повреждений и последующее хрупкое разрушение конструкции. Кроме того, эти напряжения приближаются к прочности при однократном нагружении. Малоцикловые нагружения могут привести к тяжким последствиям вплоть до аварии здания или сооружения. Однако имеющихся экспериментальных данных и разработанных на их основе рекомендаций по проблеме работы материалов и конструкций при таких нагружениях недостаточно для обобщения знаний и учета малоцикловых нагрузок при расчете строительных конструкций в нормативных документах.

Сопротивление малоцикловой усталости — самостоятельная прочностная характеристика, и она должна войти в практику механических испытаний материалов, обладающих упругопластическими свойствами.

Методика проведения испытаний аналогична испытаниям на циклические взаимодействия нагрузок и детально описана в работах [2—4].

Для исследований малоцикловой усталости были исследованы ПКМ на фурановых и полимерных смолах. Их составы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Вид полимербетона	% по массе						
	Щебень	Песок	Андезитовая мука	Смола	Нафтенат кобальта	Гипериз	БСК
Полимербетон ПН-609-21М [2]	52	28	11	9	8 от массы смеси	4 от массы смеси	—
Полимербетон ФАМ [4]	52	28	10	10	—	—	2

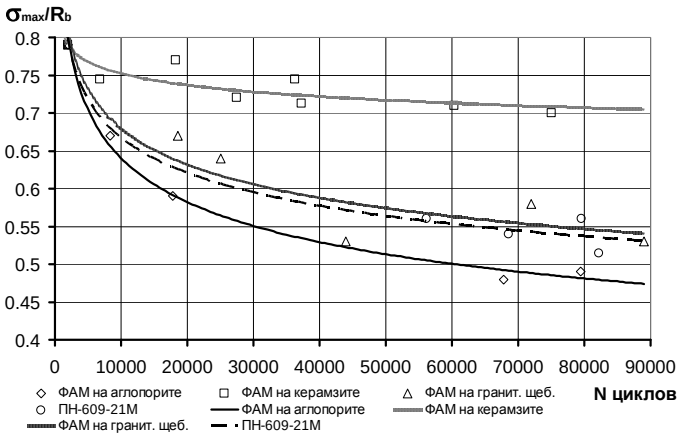


Рис. 2. График малоцикловой усталости полимербетонов различного состава

В табл. 2 приведем результаты испытаний ПКМ при коэффициенте асимметрии цикла $\rho = \sigma_{min}/\sigma_{max} = 0{,}1$ и частоте применения нагрузки $\omega = 670$ цикл/мин.

Таблица 2

№ смеси	Наименование ПКМ	Отношение σ_{max}/R_b	Количество циклов до разрушения
1	Полимербетон ФАМ на аглопорите [4]	0,79	2000
		0,67	8400
		0,59	17800
		0,49	79400
		0,48	67800
2	Полимербетон ФАМ на керамзите [4]	0,770	18200
		0,745	36300
		0,745	6800
		0,720	27500
		0,713	37200
		0,710	60300
		0,700	75000
3	Полимербетон ФАМ на гранитном щебне [4]	0,75	800
		0,72	2000
		0,67	18600
		0,64	25000
		0,58	72000
		0,53	44000
		0,53	89000
4	Полимербетон ПН-609-21М [2]	0,54	68520
		0,520	82180
		0,515	56150
		0,560	79610

По результатам испытаний были построены графики, приведенные на рис. 2.

Аппроксимация кривых малоцикловой усталости полимербетонов осуществляется с помощью дробно-степенной функции вида [5]:

$$R_{b,mal} = 1 - \alpha\left(N^{\delta} - 1\right)\Big/ N^{\delta}, \qquad (1)$$

где α и δ — постоянные коэффициенты материала, определенные из условия минимума квадратных и абсолютных отклонений опытных и теоретических кривых [5]. Предельные значения $R_{b,mal}$ определялись на базе 10^5 циклов, и эти значения принимались за относительные пределы малоцикловой усталости. В табл. 3 приведены эти значения, а также пределы выносливости этих материалов на базе $2 \cdot 10^6$ циклов.

Таблица 3

Вид полимербетона	Постоянные характеристики		Пределы малоцикловой усталости				Предел выносливости
	α	δ	10^4	$2\cdot10^4$	$5\cdot10^4$	10^5	$2\cdot10^6$
Полимербетон ФАМ на аглопорите [4]	0,33	0,34	0,65	0,58 0,46	0,5	0,46	0,35
Полимербетон ФАМ на керамзите [4]	0,37	0,34	0,74	0,73	0,71	0,7	0,66
Полимербетон ФАМ на гранитном щебне [4]	0,29	0,34	0,72	0,66	0,54	0,53	0,45
Полимербетон ПН-609-21М [2]	0,305	0,34	0,73	0,68	0,58	0,5	0,35

Под выносливостью здесь понимается способность материалов сопротивляться усталости. Критерием оценки малоцикловой усталости служит коэффициент выносливости:

$$K_{b,mal,pul} = \frac{R_{b,mal,pul}}{R_b}, \qquad (2)$$

где $R_{b,mal,pul}$ — предел малоцикловой выносливости ПКМ; R_b — предел прочности ПКМ при сжатии.

При этом коэффициент выносливости является критерием оценки циклической долговечности, и его физический смысл заключается в том, что он показывает долю сохранившейся прочности или несущей способности после воздействия циклической нагрузки для принятой базы испытаний.

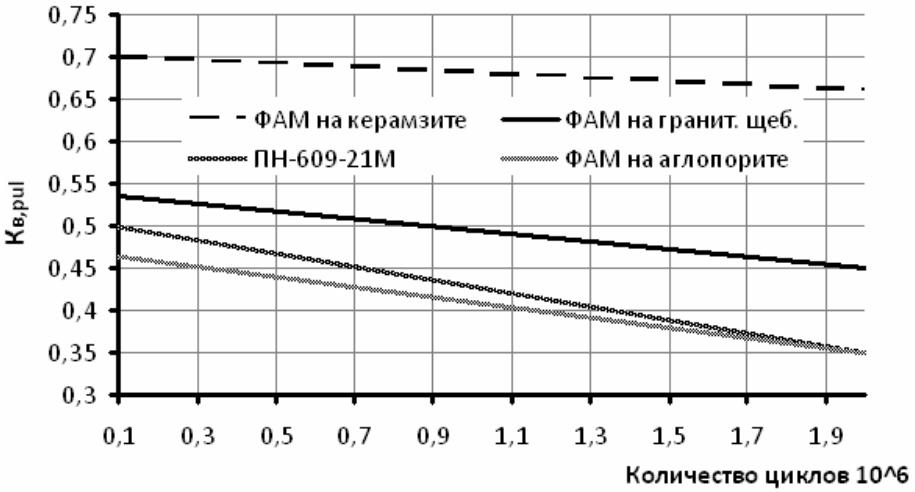


Рис. 3. График изменения $K_{b,mal,pul}$ при малоцикловых и многоцикловых нагрузках

Сравнивая значение $K_{b,mal,pul}$ на базе 10^5 и $2 \cdot 10^6$ циклов, можно видеть уменьшение его значения в зависимости от состава ПКМ, а на рис. 3 приведены графики изменения коэффициентов малоцикловой и многоцикловой выносливости. Снижение значения коэффициента выносливости связано с развитием микроразрушений, трещин в ПКМ, обусловлено виброползучестью и саморазогревом полимербетонов [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Прокофьев А. С., Кабанов В. А., Сморчков А. А.* Проектирование строительных конструкций с учетом усталости. Тула : ТПИ, 1988. 105 с.

2. *Бондарев А. Б.* Прогнозирование циклической долговечности полимерных композиционных материалов : автореф. дис… канд. техн. наук. Волгоград, 2001. 21 с.

3. *Чуйко П. К.* Прочность и деформативность полимерного бетона при многократном загружении // Вопросы строительства, эксплуатации и экономики железнодорожного транспорта. Тр. МИИТ(а). Вып. 258. 1969. С. 5—16.

4. *Меднов А. Е.* Исследование армополимербетонных элементов на действие многократно приложенных нагрузок : дис... канд. техн. наук. М., 1979. 190 с.

5. *Черноусов Р. Н.* Малоцикловая усталость сталефиброшлакобетона // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 5. С. 66—67.

1. *Prokof'ev A. S., Kabanov V. A., Smorchkov A. A.* Proektirovanie stroitel'nykh konstruktsiy s uchetom ustalosti. Tula : TPI, 1988. 105 s.

2. *Bondarev A. B.* Prognozirovanie tsiklicheskoy dolgovechnosti polimernykh kompozitsionnykh materialov : avtoref. dis… kand. tekhn. nauk. Volgograd, 2001. 21 s.

3. *Chuyko P. K.* Prochnost' i deformativnost' polimernogo betona pri mnogokratnom zagruzhenii // Voprosy stroitel'stva, ekspluatatsii i ekonomiki zheleznodorozhnogo transporta. Tr. MIIT(a). Vyp. 258. 1969. S. 5—16.

4. *Mednov A. E.* Issledovanie armopolimerbetonnykh elementov na deystvie mnogokratno prilozhennykh nagruzok : dis... kand. tekhn. nauk. M., 1979. 190 s.

5. *Chernousov R. N.* Malotsiklovaya ustalost' stalefibroshlakobetona // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2010. № 5. S. 66—67.

© Бондарев Б. А., Черноусов Р. Н., Бондарев А. Б., Мелешкин М. Ф., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Малоцикловая усталость полимерных композиционных материалов (ПМК) / Б. А. Бондарев, Р. Н. Черноусов, А. Б. Бондарев, М. Ф. Мелешкин // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 96—100.

УДК 691.33

С. В. Вавренюк, Ю. В. Ефименко

ОСОБЕННОСТИ КАРБОНИЗАЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ В ПРИСУТСТВИИ ОРГАНИЧЕСКИХ ДОБАВОК

Проведены исследования процессов карбонизации цементных материалов, содержащих органические добавки. Установлено, что цементные материалы, модифицированные органическими добавками, в воздушно-сухих средах подвержены карбонатной депрессии, усиливающейся в водных и влажных условиях.

К л ю ч е в ы е с л о в а: цементный материал, карбонизация, органические добавки, гидроксид кальция, карбонат кальция, условия твердения, термогравиметрический анализ, полупроницаемая мембрана.

The authors carry out the research of processes of carbonation of cement materials containing organic additives. It is defined that cement materials modified by organic additives in air-dry environment are subject to carbonate depression, intensifying under water or wet conditions.

K e y w o r d s: cement material, carbonation, organic additives, calcium hydroxide, calcium carbonate, hardening conditions, thermogravimetric analysis, semi-permeable membrane.

Вопросы, связанные с карбонизацией модифицированных цементных материалов [1—5], являются актуальными, так как напрямую связаны с долговечностью и защитными свойствами бетона по отношению к стальной арматуре.

Авторами проведены исследования процессов карбонизации цементно-органических материалов (ЦОМ) термогравиметрическим (ТГ) методом, включающим «ацетоновое» обезвоживание, съемки в условиях ограниченного доступа кислорода и расчеты гидратных и карбонатных соединений в ЦОМ [6].

В качестве анализируемых параметров рассматривали изменения наиболее термодинамически уязвимого известкового компонента — портландита $Ca(OH)_2$, составляющего от 10 до 20 % от цемента, и его устойчивой формы — карбоната кальция. Содержание $Ca(OH)_2$ и $CaCO_3$ рассчитывали по соответствующим для этих соединений интервальным потерям при термической диссоциации. Общее содержание известково-карбонатной составляющей (ИКС) и степень ее карбонизации (СК) определяли по формулам, %:

$$ИКС = Ca(OH)_2 + CaCO_3;$$

$$СК = CaCO_3 / ИКС.$$

На первом этапе были выявлены параметрические особенности дифференциально-термогравиметрических (ДТГ) спектров индивидуальных органических соединений и их рабочих соотношений в смесевых препаратах с термонейтральными порошками керамики и гидратированного в течение 7 лет цемента.

Исследовались процессы карбонизации цементно-минеральных систем в присутствии добавок поливинилового спирта (ПВС) и его комплексов с ремнийорганическими соединениями (КОС) и суперпластификатором С-3.

ДТГ — анализ состава исходной цементно-песчаной смеси 70 : 30 ($S_{уд.}$ = 500 м^2/кг) показал наличие гипса $C\bar{S}H_2$ (ДТГ 140 и 160 °С), песка по β-кварцу (ДТА 560 °С), незначительное содержание первичных гидратов (ДТГА 110 °С) и повышенное (до 4 %) количество карбонатов кальция с эндоэффектами на ДТГА 660 и 700 °С при практически полном отсутствии $Ca(OH)_2$, что связано с режимом измельчения в мельнице.

Исследования процессов карбонизации цементного камня проводились на образцах толщиной 4...10 мм. Принималось три режима твердения образцов: воздушный, водный (с добавлением CaO) и нормально-влажностный (над H_2O в эксикаторе). В качестве параметров воздушных условий были приняты: температура окружающей среды 20...25 °С, относительная влажность воздуха 60...80 %. Образцы водного твердения помещались в воду через 48 ч после хранения над H_2O.

Исследования образцов без добавок и с добавками при водном хранении за период 28...700 сут показали, что фазовый состав цементной матрицы мало зависит от времени хранения и вида добавки. Общий вид кривых ДТГА свидетельствует о наличии продуктов гидратации, характерных для зрелых цементсодержащих композиций. Однако содержание гидроксида кальция в цементном материале с добавкой поливинилового спирта в возрасте 28 сут было на 40 % меньше, чем содержание портландита в цементном камне без ПВС. Еще более существенное снижение (до 80 %) содержания $Ca(OH)_2$ определено для цементного камня с комплексом ПВС+С-3+КОС, что, вероятно, обусловлено образованием полиорганокальцийсилоксанов, комплексных соединений ПВС и интенсивной карбонизацией цементного камня.

Для подтверждения наличия вероятной реакции органических соединений (ОС) с твердеющей цементной матрицей были выполнены ДТГ четырех препаратов: 1) поливинилового спирта; 2) гидратированного цементного камня обычного фазового состава в возрасте 7 лет (В/Ц = 0,3); 3) смеси ПВС и гидратированного цементного камня; 4) гидратированного (28 сут) цементного материала из молотой ($S_{уд}$ = 500 м^2/кг) цементно-песчаной смеси (ЦПС), содержащей комплекс добавок ПВС+КОС+С-3.

Сравнение формы эндо- и экзотермических эффектов ДТГ, ДГА, ТГ и расчеты соответствующих им интервальных потерь показали, что в «механической» смеси № 3 регистрируются ослабленные (из-за разбавления) эффекты «материнского» ПВС (–240, –315, –400 °С на ДТГ) и зафиксированы эффекты термоокисления ПВС в присутствии $Ca(OH)_2$ по временному приращению массы в интервале 510...580 °С с соответствующими экзоэффектами на ДТГ и ДТА. Это временное приращение массы обусловлено пиролитической реакцией углерода в составе ПВС с оксидом кальция из $Ca(OH)_2$ и последующим образованием карбоната кальция в процессе обжига.

В препарате № 4 найдены отличия ДТГА-спектров в сравнении с препаратом № 3. Так, не наблюдаются: эффект приращения массы при 510...580 °С, эндотермические эффекты ДТГ 240 и 315 °С. В то же время отмечен сильный эндоэффект ДТГ –690 °С. Эти результаты свидетельствуют о том, что состав карбоцепного полимера ПВС в контакте с твердеющим цементом претерпел изменения.

По данным ДТГА, в цементном материале, содержащем органические добавки, регистрируется повышенное в 1,5...1,8 раз, по сравнению с цементным камнем без добавок, количество карбонатов с эффектами в области 700

и 800 °С. Повышенное содержание карбонатов фиксируется уже на 28-е сут. При этом общее количество известковых продуктов гидратации (по ИКС) остается неизменным (на уровне 18 ± 0,5 %), кроме 28 сут воздушного хранения.

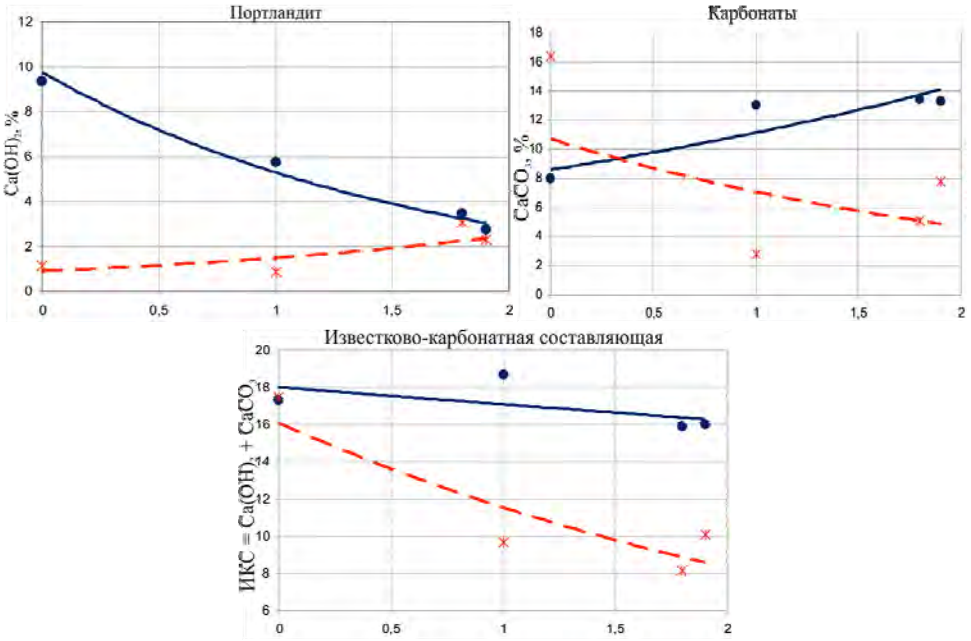
При воздушном хранении контрольный образец без добавок в результате агрессивного воздействия атмосферного воздуха уже на 28 сут претерпел серьезные изменения (табл.). Степень его карбонизации достигла 94 %, что подтверждается явно выраженными эффектами при 600, 700 и 800 °С. За период от 28 до 700 сут. в результате проникновения водяных паров воздуха в цементном камне прошла дополнительная гидратация и содержание $Ca(OH)_2$ увеличилось с 1,1 до 2,2 %.

Влияние поливинилового спирта на содержание известковых компонентов цементного материала

Содержание компонентов	Жидкость затворения цементно-песчаной смеси ($S_{уд}$ = 500 кг/м^2) (Ж/Т = 0,35)							
	Вода				8%-й раствор ПВС			
	28 сут		700 сут		28 сут		700 сут	
	W	A	W	A	W	A	W	A
$Ca(OH)_2$	9,35	1,11	9,65	2,17	5,75	0,84	6,12	0,8
$CaCO_3$	8,0	16,4	7,66	25,7	13,0	8,85	12,4	12,2
ИКС	17,3	17,5	17,3	27,9	18,7	9,7	18,5	13
СК	46	94	44	92	70	91	67	94

W — водное хранение;

A — воздушное хранение при относительной влажности воздуха 60...80 %.



Влияние (тренд) количества органической добавки (по углероду) на состояние известковых продуктов гидратации цемента водного (—•) и воздушного (– –ж) твердения (образцы цементно-песчаного (2,3:1) раствора с Ж/Т = 0,4; период 28 сут)

Содержание $Ca(OH)_2$ в цементном камне воздушного твердения с добавкой ПВС сравнимо с бездобавочным, а с комплексами ПВС+КОС и ПВС+КОС+С-3 значительно выше. Но в дальнейшем количество $Ca(OH)_2$ у этих образцов снижается до «следового» содержания

На рис. проиллюстрирован характер изменения содержания портландита и продуктов карбонизации цементного камня в зависимости от содержания органических добавок. Как видно из графиков, с увеличением количества органических добавок содержание $Ca(OH)_2$ в цементном камне воздушного хранения в 28 сут возрастает незначительно, а водного существенно снижается. При этом цементный камень в воздушно-сухой среде подвергается карбонизации, ускоряющейся в водных и влажных условиях, что, в свою очередь, повышает его стойкость к коррозии 1-го вида (выщелачиванию).

Полученные результаты оказались неожиданными, так как большинство исследователей отмечают, что диффузия CO_2 в воздухе происходит в 10^4 раз быстрее, чем в воде, вследствие чего карбонизацией цементного камня в водонасыщенном состоянии пренебрегают.

Результаты исследований дают основание выдвинуть предположение о том, что цементный камень, содержащий органические добавки, может проявлять свойства полупроницаемой мембраны, обладающей хемосорбционными свойствами по отношению к углекислому газу в водной среде.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль. М. : Стройиздат, 1990.

2. *Баженов Ю. М.* Бетонополимеры. М. : Стройиздат, 1983.

3. *Батраков В. Г.* Модифицированные бетоны. М. : Стройиздат, 1998.

4. *Воронков М. Г.* Силоксановая связь. Новосибирск, 1976.

5. *Вавренюк С. В.*, *Орентлихер Л. П.*, *Аликовский А. В.* Модифицирование цементно-минеральных систем нефункциональными кремнийорганическими соединениями // Строительные материалы, оборудование и технологии XXI в. 2004. № 10.

6. *Ефименко Ю. В.*, *Кузнецова Л. А.*, *Антропова В. А.* Особенности влияния микрокремнезема на структуру мелкозернистого керамзитобетона литьевой консистенции // Труды Международной научн.-практ. конф. Т. 5. М., 2003.

1. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh / S. N. Alekseev, F. M. Ivanov, S. Modry, P. Shissl'. M. : Stroyizdat, 1990.

2. *Bazhenov Yu. M.* Betonopolimery. M. : Stroyizdat, 1983.

3. *Batrakov V. G.* Modifitsirovannye betony. M. : Stroyizdat, 1998.

4. *Voronkov M. G.* Siloksanovaya svyaz'. Novosibirsk, 1976.

5. *Vavrenyuk S. V.*, *Orentlikher L. P.*, *Alikovskiy A. V.* Modifitsirovanie tsementno-mineral'nykh sistem nefunktsional'nymi kremniyorganicheskimi soedineniyami // Stroitel'nye materialy, oborudovanie i tekhnologii XXI v. 2004. № 10.

6. *Efimenko Yu. V.*, *Kuznetsova L. A.*, *Antropova V. A.* Osobennosti vliyaniya mikrokremnezema na strukturu melkozernistogo keramzitobetona lit'evoy konsistentsii // Trudy Mezhdunarodnoy nauchn.-prakt. konf. T. 5. M., 2003.

© Вавренюк С. В., Ефименко Ю. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Вавренюк С. В., Ефименко Ю. В. Особенности карбонизации цементных систем в присутствии органических добавок // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 101—104.

УДК 691: 519.7

А. М. Данилов, А. Н. Круглова

РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ КОМПОЗИТЫ НА ЭПОКСИДНОМ ВЯЖУЩЕМ: МОДИФИКАЦИЯ, МОДЕЛИРОВАНИЕ, ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ

Приводятся результаты моделирования, многокритериальной оптимизации структуры и свойств радиационно-защитных композитов на эпоксидном вяжущем с использованием нейронных сетей. Дается сравнительная оценка разработанных материалов с прототипом.

К л ю ч е в ы е с л о в а: композиты, радиационная защита, эпоксидное вяжущее, многокритериальная оптимизация.

The results of modeling, structure and properties multi-criteria optimization of radiation-protective epoxy binder composites using neural networks are given in the article. The comparative evaluation of the developed materials to the prototype is considered.

K e y w o r d s: composites, radiation protection, epoxy binder, multi-criteria optimization.

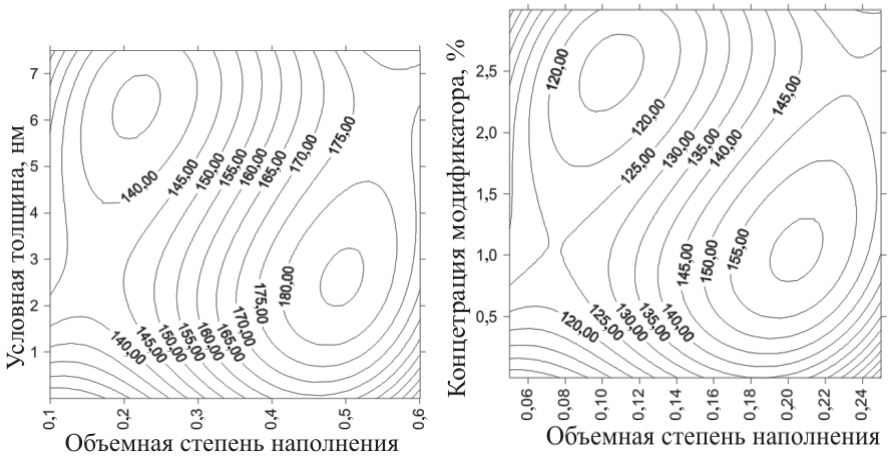
В работе рассматриваются вопросы разработки радиационно-защитных эпоксидных композиционных материалов с улучшенными защитными и физико-механическими свойствами на основе оптимизации химического (элементного) состава материала (исходя из вида и характерных энергий излучения) и модификации межфазной границы полимер — наполнитель (аппретирование наполнителя). Необходимость защиты персонала и оборудования от ионизирующего излучения в ряде отраслей промышленности делает актуальными определение защитных свойств эпоксидных композиционных материалов (ЭКМ) при воздействии смешанного гамма-нейтронного излучения, оптимизацию химического состава, а также технологии изготовления радиационно-защитных материалов. Среди материалов для защиты от ионизирующих излучений, применяемых на объектах атомной энергетики, пока распространены цементные бетоны на тяжелых заполнителях. К сожалению, они характеризуются высокой проницаемостью и недостаточной стойкостью при воздействии некоторых агрессивных сред, а также недостаточной трещиностойкостью. Оказалось, что улучшение защитных свойств материала возможно при одновременном решении экологических задач (инкапсуляция высокоплотных отходов производства с высоким содержанием соединений свинца в радиационно-защитных ЭКМ). Разработки велись исходя из справедливости для дисперсно наполненных ЭКМ гипотезы о возможности достижения высокой радиационной стойкости и стойкости к воздействию агрессивных сред (наряду с необходимым комплексом других физико-механических свойств) на основе модификации границ раздела фаз.

В основном рассматривались материалы на основе эпоксидного связующего, наполненного аппретированными отходами производства оптического стекла (ОПОС) или техническим углеродом. Для прогнозирования влияния технологических параметров при структурообразовании и определения механизмов упрочнения широко использовались методы имитационного и численного моделирования на уровнях микро- и макроструктуры. Так, на основе экспериментальных данных были получены экспериментально-статистические модели предела прочности при сжатии наполненного связующего на основе ОПОС и технического углерода, которые соответственно имеют следующий вид:

$$R_p = 163 + 32{,}9x_1 - 16{,}7x_2 - 1{,}17x_1^2 - 6{,}17x_2^2 + 8{,}88x_1^2x_2 - 0{,}86x_1x_2^2 - 12x_1^3 - 7{,}87x_2^3;$$

$$R_p = 141 + 29x_1 - 20{,}1x_2 - 0{,}5x_1^2 - 7x_2^2 + 10{,}7x_1^2x_2 - 2{,}68x_1x_2^2 - 11{,}3x_1^3 + 9{,}5x_2^3.$$

Линии равной прочности при сжатии приводятся на рис. 1 *а*, *б*.



а *б*

Рис. 1. Линии равной прочности при сжатии, МПа: *а* — на основе ОПОС; *б* — на основе технического углерода

Как видно из рис. 1, образование жесткого каркаса из частиц наполнителя, связанных прослойками пленочной фазы матрицы, определяет выход прочностных показателей на максимальное значение. Формирование на частицах наполнителя слоя аппрета (2,5 нм) дополнительно увеличивает прочность более, чем на 10 %. Модификация вяжущего фторхлоруглеродными жидкостями приводит к росту прочности связующего, наполненного техническим углеродом, до 17 %. Структурные трансформации в эпоксидном связующем отражаются двуэкстремальным характером зависимостей прочности от объемной степени наполнения.

Были получены и *модели предела прочности при изгибе*, МПа, которые для связующих на основе ОПОС или технического углерода имеют вид:

$$R_b = 38{,}8 - 0{,}75x_1 + 0{,}335x_2 + 0{,}85x_1x_2 - 1{,}53x_1^2 - 0{,}9x_2^2 + 0{,}18x_1^2x_2 + 0{,}03x_1x_2^2 - 0{,}34x_1^3 - 0{,}16x_2^3;$$

$$R_b = 45{,}2 + 3{,}1x_1 - 13{,}4x_2 + 1{,}1x_1x_2 - 3{,}5x_1^2 - 1{,}2x_2^2 + 7{,}1x_1^2x_2 + 0{,}59x_1x_2^2 + 0{,}471x_1^3 + 6{,}3x_2^3;$$

где x_1, x_2 — кодированные значения объемной степени наполнения и расчетной толщины слоя аппрета (или концентрации модификатора) соответственно. При использовании ОПОС $x_2 \in [0...7{,}5]$ нм; при введении технического углерода — $x_2 \in [0...3]$ %. При избытке наполнителя предел прочности при изгибе, в основном, определяется объемной степенью наполнения и практически не зависит от концентрации и способа введения модификатора. Максимальное значение предела прочности при изгибе достигается при меньшей объемной степени наполнения. Аппретирование позволяет увеличить предел прочности при изгибе на 15 %; введение модификатора — примерно на 5 %.

Существенными преимуществами использования эпоксидных смол являются низкая пористость и плотная структура композитов на их основе. Это открывает возможность создания радиационно-защитных материалов с малой проницаемостью, высокой стойкостью к действию агрессивных сред и расширяет область применения радиационно-защитных ЭКМ. Так, блокировка силанольных групп на поверхности частиц наполнителя при аппретировании позволяет получить материалы с пониженным водопоглощением, повышенной водостойкостью и стойкостью к воздействию атмосферных факторов.

Нанесение слоя аппрета (5 нм) позволяет снизить водопоглощение (после года экспозиции) почти на 25 %; коэффициент водостойкости возрастает на 20 %. Коэффициент стойкости (определяется по изменению предела прочности при сжатии) к воздействию атмосферных факторов (рис. 2) возрастает до 30 %; зависит от объемной степени наполнения и толщины слоя аппрета. Для оптимального по прочностным показателям состава ($\nu_f = 0,4$) прирост составляет до 30 %.

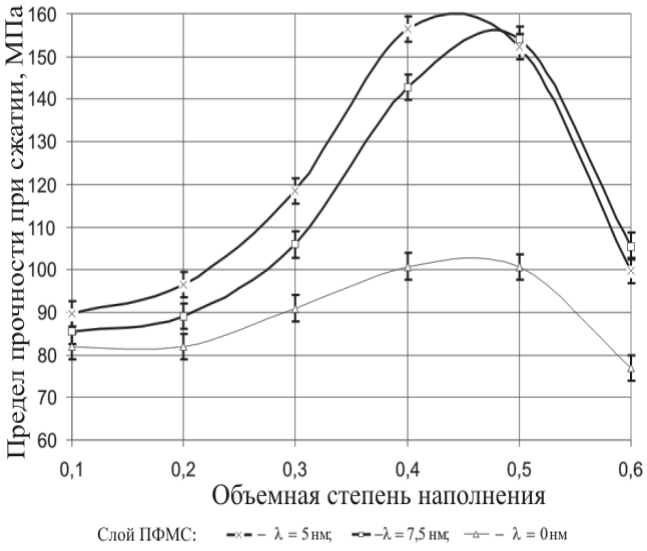


Рис. 2. Прочность ЭС на основе ОПОС (экспозиция — 3 года)

Далее экспериментально определялась возможность создания эпоксидных композиционных материалов с требуемыми физико-механическими свойствами на основе совмещения приведенных выше наполненного связующего и грубодисперсных фаз (свинцовые волокна, порошок свинцового глета, отходы производства оптического стекла; фракции — 0,14...0,315 мм).

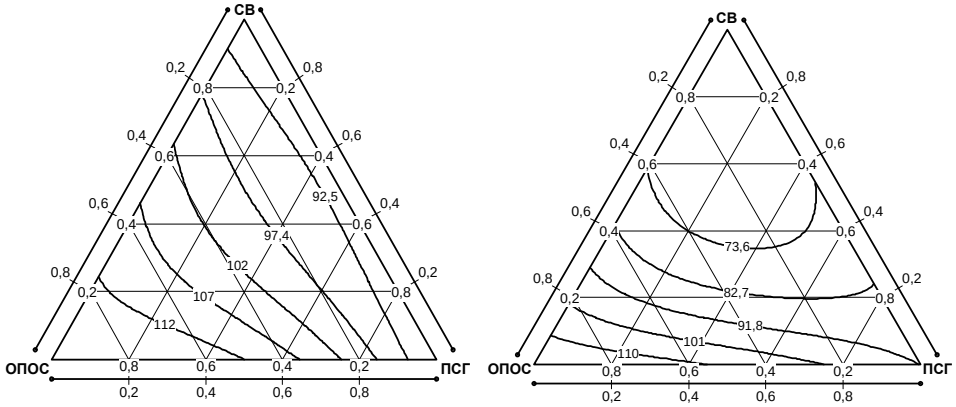
Суммарная объемная доля дисперсных фаз составляла 0,33; 0,61; 0,65. Для прогнозирования *прочности при сжатии*, МПа, были получены модели в зависимости от вида указанных грубодисперсных фаз, которые соответственно имеют вид:

$$R_p = 89x_1 + 87,6x_2 + 116x_3 + 12,9x_1x_2 + 14,5x_1x_3 + 41,3x_2x_3 - 128x_1x_2x_3;$$

$$R_p = 93,7x_1 + 70,3x_2 + 150x_3 + 74,5x_1x_2 - 28,4x_1x_3 + 120x_2x_3 - 385x_1x_2x_3;$$

$$R_p = 64,5x_1 + 91,7x_2 + 119x_3 - 13,4x_1x_2 - 56,3x_1x_3 + 12,9x_2x_3 - 289x_1x_2x_3,$$

где $x_1, x_2, x_3 \in [0,1]$ определяют (в долях) содержание соответствующих дисперсных фаз в базовых составах. Высокая адгезия эпоксидного связующего и ОПОС как грубодисперсной фазы позволяет получить повышенные прочностные показатели (рис. 3); прочность при сжатии для высоконаполненных составов на основе ОПОС возрастает на 45 %; для малонаполненных составов — на 25 %. Объемная доля свинцовых волокон не оказывает заметного влияния на величину предела прочности ЭКМ при изгибе. Наилучшие прочностные показатели имеет состав на основе ОПОС (следствие прочной адгезии ОПОС и эпоксидной матрицы). Введение ОПОС приводит к снижению деформативности ЭКМ (при разных суммарных объемных долях дисперсных фаз модуль деформации составов на основе ОПОС на 40...70 % выше модуля деформации составов на основе свинцового волокна).



а *б*

Рис. 3. Линии равной прочности при сжатии ЭКМ: *а* — объемная доля дисперсных фаз 0,33; *б* — объемная доля дисперсных фаз 0,65

Определялись также свойства рассматриваемых радиационно-защитных эпоксидных композиционных материалов, в том числе на аппретированном наполнителе. Они, в основном, определяются средней плотностью γ материала (кг/м^3; зависит от элементного состава использованных компонентов).

Все указанные выше составы имеют высокую плотность; наибольшую — при использовании свинцовых волокон (для малонаполненных составов введение свинцовых волокон увеличивает плотность на 25 %, для высоконаполненных — почти на 40 %). Для прогнозирования использовались экспериментально-статистические модели для каждого вида материала:

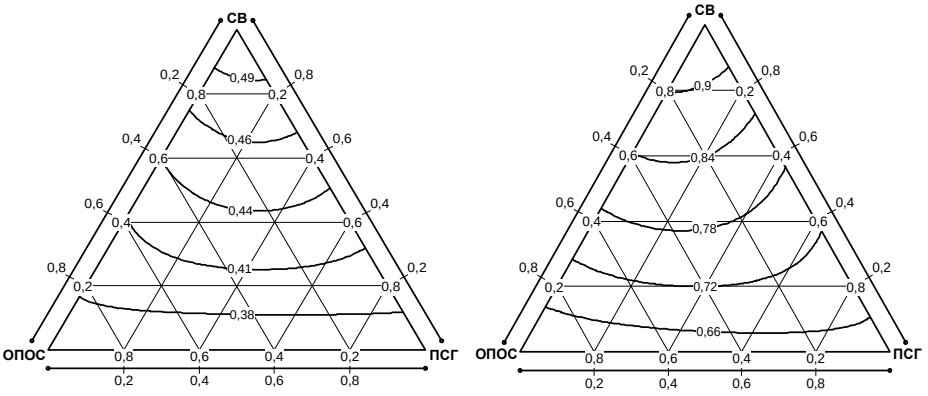
$$\gamma = 3680A + 2760B + 2780C - 160AB - 610AC - 419BC + 4609ABC;$$

$$\gamma = 6300A + 4300B + 3854C - 749AC + 184BC + 5527ABC;$$

$$\gamma = 6430A + 4500B + 3964C - 1060AB + 305AC - 53BC + 7546ABC,$$

где A, B, C определяют (в долях) содержание соответствующих дисперсных фаз (свинцовые волокна, порошок свинцового глета, отходы производства оптического стекла) в базовых составах.

На основании брутто-формул компонентов и экспериментальных значений средней плотности ЭКМ определялись линейный коэффициент ослабления γ-излучения и коэффициент выведения нейтронов. Характер зависимости линейного коэффициента ослабления γ-излучения близок к характеру зависимости средней плотности. Как оказалось, при равной средней плотности лучшими защитными свойствами обладают составы на основе свинцовых волокон (содержат больше тяжелых элементов; при суммарной объемной доле дисперсных фаз 0,65 прирост защитных характеристик составляет почти 50 %; рис. 4).



а *б*

Рис. 4. Линии равного коэффициента ослабления γ-излучения: *а* — доля дисперсных фаз 0,33, E_γ = 0,5 МэВ; *б* — доля дисперсных фаз 0,65, E_γ = 0,5 МэВ

Максимум коэффициента выведения нейтронов соответствует составу на основе свинцового волокна. Изменение коэффициента выведения при переходе к другим базовым составам (вершинам диаграммы состав — свойство) не превышает 25 %. Эффективное ослабление потока нейтронов обеспечивается при использовании ЭКМ с матричным материалом в количестве 0,7 от объема композиции. Максимум коэффициента выведения нейтронов находится внутри исследуемой факторной области (рациональный выбор границ рецептурных факторов; их оптимальное сочетание увеличивает защитные показатели на 13 %).

Наконец, была проведена многокритериальная оптимизация параметров эпоксидных радиационно-защитных композиционных материалов с использованием искусственной нейронной сети (трехслойный персептрон), весовые коэффициенты которой формируются исходя из ограничений на свойства материала [1]. Равные предпочтения физико-механических (пределы прочности при сжатии и изгибе) и защитных показателей (линейный коэффициент ослабления γ-излучения и коэффициент выведения нейтронов) определяются линиями равного уровня (рис. 5). Максимуму сетевого отклика соответствует оптимальная в принятом смысле рецептура ЭКМ. Численные значения показателей материала с данной рецептурой приведены в табл. 1.

Оптимальные характеристики материала (см. табл. 1) достигаются при оптимальной его рецептуре (табл. 2).

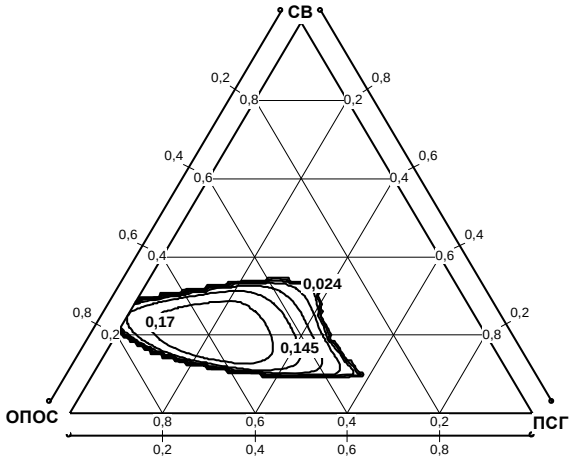


Рис. 5. Области равных оценок качества ЭКМ

Таблица 1

Свойства ЭКМ

Показатель	Прототип [2]	Достигнуто	Прирост, %
Предел прочности при сжатии, МПа	110	125	14
Предел прочности при изгибе, МПа	—	41	—
Средняя плотность, кг/м^3	3800	4786	21
Коэффициент выведения нейтронов (полное макроскопическое сечение выведения, см$^{-1}$)	—	0,12 (0,47)	—
Линейный коэффициент ослабления γ-излучения, см$^{-1}$	0,55	0,72	25

Таблица 2

Рецептура ЭКМ

Компонент	Содержание, %	Расход композита, кг/м^3
Свинцовое волокно	14,6	700
ПСГ	15,5	742
ОПОС (грубодисперсная фаза)	35,9	1718
Аппретированный ОПОС (наполнитель)	23,9	1144
Эпоксидная смола ЭД-20	9,1	436
Полиэтиленполиамин	1,0	48

Таким образом, разработанный радиационно-защитный композит на основе аппретированного наполнителя по основным физико-механическим и защитным характеристикам превосходит характеристики прототипа от 14 до 25 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прогнозирование кинетических процессов с использованием искусственных нейронных сетей / А. М. Данилов, А. Н. Круглова, В. А. Смирнов, А. П. Прошин // Вестник РААСН. 2005. Вып. 9. С. 359—363.

2. *Смирнов В. А.* Акустико-эмиссионное исследование эпоксидных композитов специального назначения : дисс… канд. техн. наук. Пенза, 2001. 226 с.

1. Prognozirovanie kineticheskikh protsessov s ispol'zovaniem iskusstvennykh neyronnykh setey / A. M. Danilov, A. N. Kruglova, V. A. Smirnov, A. P. Proshin // Vestnik RAASN. 2005. Vyp. 9. S. 359—363.

2. *Smirnov V. A.* Akustiko-emissionnoe issledovanie epoksidnykh kompozitov spetsial'nogo naznacheniya : diss… kand. tekhn. nauk. Penza, 2001. 226 s.

© Данилов А. М., Круглова А. Н., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Данилов А. М., Круглова А. Н. Радиационно-защитные композиты на эпоксидном вяжущем: модификация, моделирование, оптимизация структуры и свойств // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 105—111.

УДК 691

И. В. Жерновский, В. В. Строкова

К ПРОБЛЕМЕ ФАЗОВО-РАЗМЕРНОЙ ГЕТЕРОГЕННОСТИ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ КАК ФАКТОРА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ[1]

Рассмотрены некоторые вопросы применения фазово-размерной гетерогенности минерального сырья как инструмента управления структурообразованием композитов на основе вяжущих различных типов твердения.

Ключевые слова: фазово-размерная гетерогенность, минеральное сырье, композиционные материалы, геоника.

Some issues of use of phase-dimentional heterogeneity of mineral raw materials as tool to manipulate composite structuring on basis of bindings of different maturing types are considered in the article.

Key words: phase-dimentional heterogeneity, mineral raw materials, composite materials, geonics.

Классическое строительное материаловедение сыграло исключительную роль в формировании диадной системы материал — среда обитания. Ориентация его на решение системных задач в триаде человек — материал — среда обитания и своевременное формулирование концептуальных основ нового научного направления — геоники — позволило расширить системные границы строительного материаловедения до масштабов планетарных гео- и экосистем [1—3]. В данном случае мы имеем дело с гносеологическим приемом, являющимся неформальным аналогом следствия из знаменитой теоремы Геделя о неполноте: на любом классе понятий найдется понятие, для формулировки которого необходимо расширить сам класс.

Авторам представляется, что в отношении строительного материаловедения геоника, даже в начальной стадии своего развития как научного направления, с одной стороны, может стать эвристической основой при решении ряда проблемных материаловедческих задач и, с другой стороны, способствовать его самоидентификации в ряду фундаментальных и прикладных отраслей знания.

К последнему аспекту следует отнести разработку собственных, а не привнесенных из междисциплинарных областей законов функционирования объектов строительного материаловедения. С методологической точки зрения, по нашему мнению, к этому следует отнести разработку основ онтогенического подхода к строительным материалам как фундаментального раздела петрографии искусственного камня на всех этапах его жизненного цикла — от рационального выбора сырьевых компонентов, технологии синтеза вяжущих и композитов, периода эксплуатации до исчерпания своих функциональных возможностей и утилизации.

Кроме этого, в практическом аспекте положения геоники могут представлять идеологическую основу для решения актуальных задач строительной индустрии:

[1] Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: соглашение 14.B37.21.1218, программа стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова; РФФИ, договор № 12-08-87603.

рационального выбора сырьевых материалов для производства традиционных строительных материалов;

повышения эффективности существующих видов материалов;

создания новых видов строительных материалов — неокомпозитов;

разработки новых энергоэффективных и экологически чистых технологий производства строительных материалов;

углубленной разработки теоретических разделов современного строительного материаловедения.

Не требует доказательства, что основным, наиболее энергоемким компонентом для производства строительных композиционных материалов является вяжущее. От особенностей реализации процессов его структурообразования, способности формировать прочные реакционные контактные зоны с материалом наполнителей и заполнителей зависят практически все эксплуатационные свойства композита.

Большой вклад в понимание процессов структурообразования внесен трудами И. А. Рыбьева, В. И. Соломатова, Г. И. Горчакова, Ю. М. Баженова, Е. М. Чернышова, В. С. Лесовика и др.

Ранее было доказано, что учет генетических и типоморфных особенностей минерального сырья для производства различных видов вяжущих и композитов на их основе позволяет существенно снизить энергоемкость их производства и улучшить эксплуатационные свойства [2, 4].

По нашему мнению, одним из важнейших факторов, определяющих особенности формирования минеральных новообразований, формирующих структурно-обусловленные прочностные свойства композиционных вяжущих, является фазово-размерная гетерогенность (ФРГ) сырьевых минеральных компонентов. Представляется непротиворечивым утверждение, что *отличия параметров ФРГ у однотипного по минеральному и химическому составу сырья различного генезиса определяют его различное энергетическое состояние и, как следствие, реакционную способность.*

Следует отметить, что *под фазовой гетерогенностью необходимо понимать не только присутствие в полиминеральном сырье компонентов, принадлежащих к различным минеральным видам, но и наличие в мономинеральном различных полиморфных модификаций одного минерального вида. Под размерной гетерогенностью понимается различная степень кристалличности минеральных компонентов, которая количественно может быть охарактеризована в виде такого фундаментального параметра кристаллического состояния, как размер кристаллитов.* Размерный диапазон этого показателя в реальных минеральных системах различной генетической принадлежности варьирует от нано- до микромасштабного уровня структурной организации вещества — от первых нанометров у скрытокристаллических до первых микрон у высококристаличных минеральных образований.

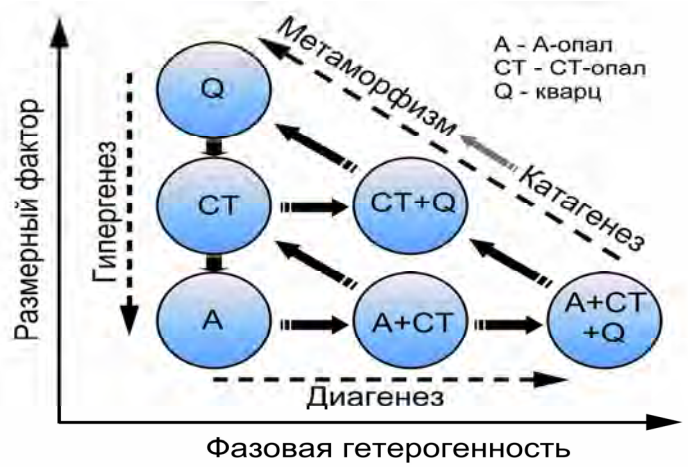
Вопросы изучения особенностей ФРГ и проявление фазово-размерного эффекта в природных минеральных системах всегда находились в сфере интересов исследователей геологического профиля [5, 6]. Целесообразность введения в понятийно-предметную систему строительного материаловедения теоретических представлений о ФРГ минерального сырья обусловлена возможностью реализации на ее основе *основополагающей триады материаловедения: состав — размер — свойство*.

Идеологической основой для этого может служить положение, что *функциональные наносистемы в композиционных материалах приводят к расширению области оптимальности структуры* [7].

На основании этого можно сформулировать *концепцию вариативности фазово-размерной гетерогенности минерального сырья как фактора управления синтезом материалов и процессами структурообразования композитов.*

Для обоснования концепции вариативности ФРГ необходимо решение ряда задач фундаментальной направленности. К важнейшей из них следует отнести разработку *минералого-генетических критериев выбора минерального сырья с оптимальными параметрами ФРГ для синтеза вяжущих различного типа твердения.* Ко второй задаче этого уровня значимости относится разработка *принципов управления ФРГ сырьевых материалов механоактивационным воздействием.*

Природа ФРГ минерального сырья является генетически и кристаллоструктурно обусловленной. Это можно проиллюстрировать на упрощенной феноменологической модели изменения параметров ФРГ минералов кремнезема в процессах литогенеза (рис.).



Схематичное представление феноменологической модели изменения параметров ФРГ минералов кремнезема в процессах литогенетического цикла

Фазовая гетерогенность отражает увеличение количества фаз в минеральном парагенезисе[2] кремнезема. Величина размерного фактора на приведенной модели адекватна усредненному размеру кристаллитов наиболее низкоразмерной фазы. В частности, он наименьший для аморфной формы кремнезема — А-опала (первые нанометры), возрастает до 15…20 нм для структурированного кристобалит-тридимитового CT-опала (трепелоподобные породы) и может достигать первых сотен нанометров для высококристалличных разновидностей кварца.

[2] Парагенезис минералов — совокупность минералов, находящихся в равновесии при определенных значениях экстентивных и интенсивных параметров природной системы [8].

Исходя из различной при прочих одинаковых условиях (например, удельной поверхности) реакционной активности в ряду А-опал > СТ-опал > кварц, появляется возможность рационального выбора сырья для его полифункционального применения в качестве компонента композиционных вяжущих. При этом А- и СТ-опалы будут выполнять функцию реакционного (наногетерогенного), а микрогетерогеный кварц — функцию структурообразующего компонента.

Активное влияние на параметры ФРГ минеральных систем может осуществляться механоактивационным воздействием. Механоактивационная диспергация является инструментом достаточно тонкого управления размерными, фазовыми и реакционными параметрами кварцевого материала, являющегося компонентом композиционных вяжущих на основе портландцемента, известково-кремнеземных и наноструктурированных вяжущих. При этом в материале, в зависимости от величины и интенсивности энергетического воздействия, будут не только образовываться аморфные и скрытокристаллические разновидности, в данном случае кремнезема (А-опал при сухом и СТ-опал при мокром способе помола), но и происходить наноструктурирование кварцевой матрицы путем образования в ней наноразмерных кластеров высокотемпературного β-кварца [9].

Необходимо отметить, что рассмотрение минерального сырья с позиций его ФРГ тесно связано с получившим широкое развитие в настоящее время наносистемным подходом к синтезу материалов и процессам структурообразования композитов.

В связи с этим, выбор минерального сырья с оптимальными параметрами ФРГ для синтеза композитов на основе вяжущих различных механизмов твердения может осуществляться на основе предложенных ранее временных отношений возникновения функциональных (структурообразующих) наносистем (фазово-размерная наногетерогенность) и синтеза вяжущего [7].

В частности, следует различать прото- и сингенетическую[3] ФРГ минеральных систем.

Протогенетические минеральные системы с ФРГ являются единственно возможными для применения в качестве компонентов композиционных материалов на основе портландцементных и гипсовых вяжущих высокотемпературного синтеза.

Результаты авторских исследований по применению протогенетических SiO_2-систем с фазово-размерной гетерогенностью для полифункциональной модификации вяжущих на основе портландцемента подтвердили возможность управления структурообразованием композиционных вяжущих за счет использования кварцевого сырья различных генетических типов. При этом установлено влияние параметров ФРГ кремнеземной компоненты вяжущего на особенности морфологии наноразмерных парагенезисов новообразований гидросиликатов кальция, выявлена зависимость прочностных свойств цементного камня от размеров и концентрации полиморфных модификаций кремнезема [10, 11].

[3] Под прото- (греч. πρ0τος — «первый») и сингенетическими (греч. σιν — «вместе») следует понимать процессы, произошедшие до момента начала и во время реализации синтеза вяжущих либо композитов.

Одним из направлений в реализации геомиметических технологий [4] в строительной индустрии является создание энергоэффективных и экологичных минеральных вяжущих с атермальной технологической историей. Этим требованиям соответствуют вяжущие с существенной функционально-структурообразующей ролью наноразмерной компоненты. К ним относятся наноструктурированные силикатные (НВ) и алюмосиликатные (геополимерные) вяжущие с поликонденсационно-полимеризационным механизмом твердения [12]. Прочностные свойства этих вяжущих формируются благодаря искусственному созданию ФРГ в объеме вяжущего в процессе его синтеза (сингенетические системы с ФРГ).

Основу технологии производства НВ составляет холодный механохимический синтез А- и СТ-опалов в водной среде, что позволяет идентифицировать его, с позиций геоники, как результат начальной стадии гипергенеза (создание ФРГ кварцевого материала) с последующими диагенетическими преобразованиями (поликондексационно-полимеризационная твердофазная консолидация низкоразмерных форм кремнезема).

Представляется непротиворечивым утверждение, что использование вариативности генетически и технологически обусловленной ФРГ силикатного сырья создает реальные предпосылки для управления финальными эксплуатационными показателями синтезируемых наноструктурированных вяжущих.

Кроме этого, в ряде работ показана возможность регулирования структурообразования при синтезе силикатных автоклавных материалов с применением ФРГ кремнеземных систем природного и искусственного (НВ) происхождения в качестве активных компонентов [13, 14].

Применение НВ (SiO_2-система с ФРГ) в качестве активного модификатора гипсовых вяжущих позволило реализовать создание буферных новообразований между сульфатной и силикатной компонентами системы в виде наноразмерных сульфосиликатов кальция — гидроксиэллестадита, что позволило существенно повысить прочностные свойства композиционного вяжущего [15].

Использование реакционно-активных ФРГ-систем кремнезема дало возможность реализовать эпикристаллизационное модифицирование [5] матрицы как цементных, так и автоклавных силикатных материалов для инкапсуляции нано- и микроразмерных гидратных новообразований гидрофобизирущим слоем толщиной несколько нанометров. В основе подхода лежит диффузионный механизм транспорта в матрицу композита наномодифицирующих компонентов при участии жидкой фазы, находящейся в поровом капиллярном пространстве перколяционного кластера [16, 17]. Это является предпосылкой для создания нового класса «интеллектуальных» бетонов и силикатных автоклавных материалов конструкционно-теплоизоляционого назначения с существенно улучшенными гидрофобными свойствами.

---

[4] Геомиметические (греч. γε — «земля» и μίμησις — «подражание») технологии — подход к созданию искусственных каменных материалов на основе имитирования процессов природного минерало- и петрогенезиса.

[5] Эпикристаллизационым (греч. epi — «после») модифицированием в строительных материалах на основе неорганических вяжущих называется инфильтрационое метасоматическое преобразование активированными функциональными (протогенетическими) минеральными системами кристаллической матрицы материала с целью образования новых парагенезисов или преобразования поверхностей минеральных индивидов.

Следует отметить, что предложенный механизм инфильтрационного кремнещелочного метасоматического эпикристаллизационного модифицирования строительных композитов соответствует идеологии геоники, как методологической основы создания современных строительных технологий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лесовик В. С.* Генетические основы энергосбережения в промышленности строительных материалов // Изв. вузов. Строительство. 1994. № 7, 8. С. 96—100.

2. *Лесовик В. С.* Повышение эффективности производства строительных материалов с учетом генезиса горных пород. М. : АСВ, 2006. 526 с.

3. *Лесовик В. С.* Геоника. Предмет и задачи. Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2012. 213 с.

4. *Строкова В. В.*, *Шамшуров А. В.* Влияние типоморфизма минерального сырья на синтез строительных материалов. Белгород : БГТУ им. В.Г. Шухова, 2008. 211 с.

5. *Таусон Л. В.*, *Абрамович М. Г.* Физико-химические превращения реальных кристаллов в минеральных системах. Новосибирск : Наука, 1988. 271 с.

6. Наноминералогия. Ультра- и микродисперсное состояние минерального вещества / под ред. Н. П. Юшкина, А. М. Асхабова и В. И. Ракина. СПб. : Наука, 2005. 214 с.

7. *Строкова В. В.*, *Жерновский И. В.* Некоторые актуальные вопросы междисциплинарного направления «Наносистемы в строительном материаловедении» // Вестник Центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук : сб. науч. ст. РААСН. Воронеж : ВГАСУ. 2011. С. 99—105.

8. *Жариков В. А.* Парагенезис минералов, фации и формации. Записки ВМО. 1968. Вып. 4. С. 510—514.

9. Некоторые вопросы структурных преобразований кварцевого сырья при механоактивации / И. В. Жерновский, В. В. Строкова, А. И. Бондаренко, Н. И. Кожукова, К. Г. Соболев // Строительные материалы. 2012. № 10. С. 56—58.

10. *Строкова В. В.*, *Жерновский И. В.*, *Фоменко Ю. В.* О влиянии размерных параметров полиморфных модификаций кварца на его активность в композиционных вяжущих // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2007. № 4. С. 48—49.

11. *Лесовик Р. В.*, *Жерновский И. В.* Выбор кремнеземсодержащего компонента композиционных вяжущих веществ // Строительные материалы. 2008. № 8. С. 78—79.

12. *Череватова А. В.*, *Жерновский И. В.*, *Строкова В. В.* Минеральные наноструктурированные вяжущие. Природа, технология и перспективы применения // LAM LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. Saarbrucken. 2011. 170 с.

13. Силикатные материалы автоклавного твердения с использованием наноструктурированного модификатора в условиях высокотемпературных воздействий. / В. В. Нелюбова, И. В. Жерновский, В. В. Строкова, М. В. Безродных // Строительные материалы. 2012. № 9. С. 8—9.

14. *Фомина Е.В.*, *Жерновский И. В.*, *Строкова В. В.* Свойства силикатных ячеистых изделий автоклавного твердения с применением алюмосиликатного сырья и особенности фазообразования // Строительные материалы. 2012. № 9. С. 38—39.

15. Особенности фазообразования в композиционном наноструктурированном гипсовом вяжущем / В. В. Строкова, А. В. Череватова, И. В. Жерновский, Е. В. Войтович // Строительные материалы. 2012. № 7. С. 9—11.

16. Гранулированный наноструктурирующий заполнитель пролонгированного действия на основе сырья различных типов для легких бетонов / В. В. Строкова, А. В. Максаков, И. В. Жерновский, Ю. Н. Огурцова // Белгород : БГТУ им. В. Г. Шухова, 2012. 118 с.

17. Стеновые автоклавные силикатные материалы пониженной теплопроводности с гранулированными заполнителями / В. В. Строкова, И. В. Жерновский, А. В. Мосьпан, А. В. Максаков // Строительные материалы. 2010. № 6. С. 70—71.

1. *Lesovik V. S.* Geneticheskie osnovy energosberezheniya v promyshlennosti stroitel'nykh materialov // Izv. vuzov. Stroitel'stvo. 1994. № 7, 8. S. 96—100.

2. *Lesovik V. S.* Povyshenie effektivnosti proizvodstva stroitel'nykh materialov s uchetom genezisa gornykh porod. M. : ASV, 2006. 526 s.

3. *Lesovik V. S.* Geonika. Predmet i zadachi. Belgorod : BGTU im. V. G. Shukhova, 2012. 213 s.

4. *Strokova V. V., Shamshurov A. V.* Vliyanie tipomorfizma mineral'nogo syr'ya na sintez stroitel'nykh materialov. Belgorod : BGTU im. V.G. Shukhova, 2008. 211 s.

5. *Tauson L. V., Abramovich M. G.* Fiziko-khimicheskie prevrashcheniya real'nykh kristallov v mineral'nykh sistemakh. Novosibirsk : Nauka, 1988. 271 s.

6. Nanomineralogiya. Ul'tra- i mikrodispersnoe sostoyanie mineral'nogo veshchestva / pod red. N. P. Yushkina, A. M. Askhabova i V. I. Rakina. SPb. : Nauka, 2005. 214 s.

7. *Strokova V. V., Zhernovskiy I. V.* Nekotorye aktual'nye voprosy mezhdistsiplinarnogo napravleniya «Nanosistemy v stroitel'nom materialovedenii» // Vestnik Tsentral'nogo regional'nogo otdeleniya Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk : sb. nauch. st. RAASN. Voronezh, VGASU. 2011. S. 99—105.

8. *Zharikov V. A.* Paragenezis mineralov, fatsii i formatsii. Zapiski VMO. 1968. Vyp. 4. S. 510—514.

9. Nekotorye voprosy strukturnykh preobrazovaniy kvartsevogo syr'ya pri mekhanoaktivatsii / I. V. Zhernovskiy, V. V. Strokova, A. I. Bondarenko, N. I. Kozhukova, K. G. Sobolev // Stroitel'nye materialy. 2012. № 10. S. 56—58.

10. *Strokova V. V., Zhernovskiy I. V., Fomenko Yu. V.* O vliyanii razmernykh parametrov polimorfnykh modifikatsiy kvartsa na ego aktivnost' v kompozitsionnykh vyazhushchikh // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova. 2007. № 4. S. 48—49.

11. *Lesovik R. V., Zhernovskiy I. V.* Vybor kremnezemsoderzhashchego komponenta kompozitsionnykh vyazhushchikh veshchestv // Stroitel'nye materialy. 2008. № 8. S. 78—79.

12. *Cherevatova A. V., Zhernovskiy I. V., Strokova V. V.* Mineral'nye nanostrukturirovannye vyazhushchie. Priroda, tekhnologiya i perspektivy primeneniya // LAM LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG. Saarbrucken. 2011. 170 s.

13. Silikatnye materialy avtoklavnogo tverdeniya s ispol'zovaniem nanostrukturirovannogo modifikatora v usloviyakh vysokotemperaturnykh vozdeystviy / V. V. Nelyubova, I. V. Zhernovskiy, V. V. Strokova, M. V. Bezrodnykh // Stroitel'nye materialy. 2012. № 9. S. 8—9.

14. *Fomina E.V., Zhernovskiy I. V., Strokova V. V.* Svoystva silikatnykh yacheistykh izdeliy avtoklavnogo tverdeniya s primeneniem alyumosilikatnogo syr'ya i osobennosti fazoobrazovaniya // Stroitel'nye materialy. 2012. № 9. S. 38—39.

15. Osobennosti fazoobrazovaniya v kompozitsionnom nanostrukturirovannom gipsovom vyazhushchem / V. V. Strokova, A. V. Cherevatova, I. V. Zhernovskiy, E. V. Voytovich // Stroitel'nye materialy. 2012. № 7. S. 9—11.

16. Granulirovannyy nanostrukturiruyushchiy zapolnitel' prolongirovannogo deystviya na osnove syr'ya razlichnykh tipov dlya legkikh betonov / V. V. Strokova, A. V. Maksakov, I. V. Zhernovskiy, Yu. N. Ogurtsova // Belgorod : BGTU im. V. G. Shukhova, 2012. 118 s.

17. Stenovye avtoklavnye silikatnye materialy ponizhennoy teploprovodnosti s granulirovannymi zapolnitelyami / V. V. Strokova, I. V. Zhernovskiy, A. V. Mos'pan, A. V. Maksakov // Stroitel'nye materialy. 2010. № 6. C. 70—71.

© Жерновский И. В., Строкова В. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Жерновский И. В., Строкова В. В. К проблеме фазово-размерной гетерогенности минерального сырья как фактора структурообразования строительных материалов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 112—118.

УДК 629.23:699.86

Б. А. Крылов, В. А. Кириченко

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ТРЕХСЛОЙНЫХ ПАНЕЛЕЙ НАРУЖНЫХ СТЕН ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ЗДАНИЙ С ВЫСОКИМИ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫМИ СВОЙСТВАМИ ПРИ МАЛЫХ ЗАТРАТАХ ЭНЕРГОРЕСУРСОВ

Разработана новая технология изготовления трехслойных панелей с внутренним теплоизоляционным слоем из полистиролбетона. Такая технология требует в несколько раз меньших затрат на термообработку при более высокой производительности при выпуске изделий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: полистирол, электропрогрев, давление, структура.

The authors develop a new technology of manufacturing triple-layer panels with inner heat-insulation layer made of polysterene concrete. Such technology requires less energy for heat processing but allows get higher output when introducing products.

K e y w o r d s: polysterene, heat tracing, pressure, structure.

С момента выхода ГОСТ Р51263 «Полистиролбетон» полистиролбетон как вид легкого бетона обрел юридическую основу для применения его в строительстве в широких масштабах. К моменту выхода ГОСТа основной вид средней плотности вспученного полистирола находился в пределах 20…30 кг/м^3 [1, 2]. По мнению ряда специалистов, на сегодняшний день это практически безальтернативный материал, четко вписывающийся в идеологию энергоресурсосбережения.

В современных условиях полистиролбетон эффективно применяется в качестве теплоизоляционного слоя в трехслойных стеновых панелях, в чердачных перекрытиях и мелких стеновых блоках. Это позволяет обеспечить повышенное сопротивление теплопередаче ограждающих конструкций в соответствии с требованиями теплозащиты зданий по СНиП-3—79 «Строительная теплотехника». Используя полистиролбетон средней плотности D200...D350, мы имеем сопоставимые результаты по коэффициенту теплопроводности λ=0,065...0,087 с классическими трехслойными панелями, в качестве утеплителя в которых применяется минеральная вата и прессованный полистирол.

Однако, применяя плитные материалы, невозможно уйти от дискретных связей между слоями жестких или гибких, которые являются мостиками холода, снижая эффект утеплителя. Последовательность укладки ограждающих слоев и теплоизоляционного полистиролбетона дает возможность проводить работы в едином технологическом цикле, что позволяет улучшить сцепление между слоями.

Наибольшее распространение изготовления изделий с применением полистиролбетона получила технология с введением в бетонную смесь воздухововлекающих добавок. Главное преимущество применения таких добавок — это хорошая связность смеси и удобоукладываемость, что позволило Т. И. Милых получить полистиролбетон классов В1,5...В3,5 при средней плотности D500...D700 [3]. А. А. Евдокимов достиг значения прочности на сжатие от 0,35 до 2,0 МПа при средней плотности D250...D450 [4]. В обоих

случаях термообработка проводилась паром. А. А. Евдокимов показал, что пропаривание целесообразно осуществлять по ступенчатым режимам с равной продолжительностью каждой ступени, с температурой изотермического прогрева 65, 75 и 85 °С. Но при ТВО паром полный цикл достигает 15 ч [3, 4], поскольку термообработка изделий осуществляется по общепринятым в стройиндустрии режимам: предварительная выдержка от 2 до 5 ч, затем медленный подъем температуры до уровня изотермы, примерно +70 °С в течение 2-х ч, и далее изотермический прогрев от 5 до 10 ч. Однако в связи с высокими теплоизоляционными свойствами вспученного полистирола требуется большее количество пара, чем при ТВО других изделий. К вышеуказанному недостатку добавляется еще один — производство пара дороже электроэнергии в 5...8 раз. Авторы провели исследования по составам полистиролбетона, отказались от введения воздухововлекающих добавок и паровую термообработку заменили электротермообработкой.

В работах [1, 2, 5] показаны результаты с наименьшими затратами времени на прогрев, что немаловажно с экономической точки зрения. При этом разработанные режимы электротермообработки дают на выходе сразу несколько эффектов: отказ от предварительной выдержки бетонной смеси; ускорение твердения бетона; превышение прочности термообработанного полистиролбетона над полистиролбетоном естественного твердения до 100 %.

Эксперименты, выполненные по разработанным режимам, показали преимущество данной технологии по сравнению с другими методами термовлажностной обработки. В нашем случае полистиролбетон, прошедший термообработку, в зависимости от принятого состава и режима прогрева превосходил по прочности на сжатие полистиролбетон не только в 28-суточном возрасте, но и в более поздние сроки на 40…100 %. Применяя пар для термообработки, достичь такой скорости подъема температуры для легких бетонов при средней плотности D200…D400 весьма затруднительно. Отказ от предварительной выдержки позволил работать с вязкопластичной смесью, обойдя отрицательный эффект начинающего твердеть полистиролбетона вследствие температурной деформации, возникающей в результате расширения гранул вспученного полистирола.

В нашем случае образцы средней плотности D350 имели класс по прочности на сжатие В1,5, что наглядно показывает переход прочностных характеристик в более высокий класс.

В трехслойных панелях важное значение имеет сцепление между наружными слоями из керамзитобетона и внутренним теплоизоляционным слоем. Для определения влияния режимов электропрогрева на сцепление между слоями были взяты составы полистиролбетона D350, D340, D250 и керамзитобетона D850 (рис. 1). При электропрогреве использовалась тройная форма с размерами ячейки 10×10×10 см. Во время формования каждая секция делилась по вертикали по центру сечения тонкой перегородкой. В одну половину укладывалась смесь полистиролбетона, в другую — керамзитобетона. Затем перегородка извлекалась, смесь уплотнялась. После этого проводился электропрогрев по разработанным режимам. Далее поддерживался изотермический прогрев с управлением посредством электронного потенциометра КСП 2-057И. Образцы испытывались через 3, 7 и 28 сут, и часть образцов оставлялась на более длительный срок. В такие же сроки испытывались образцы естественного твердения.

Рис. 1. Образцы двухслойные керамзитобетон — полистиролбетон для определения сцепления на разрыв между слоями

Было проведено испытание образцов в 6-летнем возрасте. Для определения сил сцепления между слоями были изготовлены металлические пластины размерами 100×100×100 мм, к которым были приварены металлические стержни диаметром 22 мм длиной 200 мм. Пластины крепились с помощью эпоксидного клея к образцам с обеих сторон так, чтобы с одной стороны оказывался слой полистиролбетона, с другой — слой керамзитобетона. После суточного твердения клея проводились испытания на разрыв на разрывной машине (рис. 2).

Как показали испытания, во всех образцах естественного твердения границей разрыва была граница раздела слоев. В образцах, прошедших термообработку электрическим током, разрыв происходил по центру сечения полистиролбетона. Показатели сил сцепления между слоями полистиролбетона различной плотности и керамзитобетона со средней плотностью D850 для 28 сут приведены в табл. 1.

Таблица 1

Сцепление между слоями керамзитобетон — полистиролбетон (28 суток)

Средняя плотность полистиролбетона	Образец I. Значение Rbt, МПа	Образец II. Значение Rbt, МПа	Образец III. Значение Rbt, МПа	Среднее значение осевого растяжения $К_г$, МПа
D350	0,308	0,307	0,306	0,306
D340	0,3077	0,3001	0,3010	0,3027
D250	0,1681	0,1680	0,1678	0,1679

Показатели сил сцепления между слоями полистиролбетона D340 и керамзитобетона D850 для 6-летних образцов приведены в табл. 2.

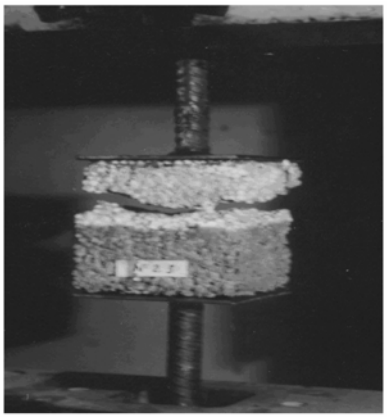


Рис. 2. Испытание двухслойных термообработанных образцов керамзитобетон — полистиролбетон на разрыв между слоями

Таблица 2

Сцепление между слоями керамзитобетон - полистиролбетон (6 лет)

Средняя плотность полистиролбетона	Образец I, МПа	Образец II, МПа	Образец III, МПа	Среднее значение осевого растяжения, МПа
D340 После электропрогрева	0,40816	0,40905	0,40871	0,40864
D340 Естественное твердение	0,200	0,2001	0,2001	0,2003

Выводы:

1. Создана новая технология получения трехслойных стеновых конструкций с улучшенными прочностными и теплотехническими показателями с применением тепловлажностной обработки электрическим током, а также с улучшенными прочностными характеристиками на сжатие и сцепление между слоями. Экономия от применения разработанной технологии выражается как в финансовом эквиваленте (дешевле паровой термообработки), так и во временном факторе (ликвидируется цикл по созданию пены), а также в более оперативном управлении процессом прогрева. Отказ от прогрева паром автоматически убирает потери пара с ликвидацией паросилового хозяйства и коммуникаций.

2. Разработанные режимы тепловлажностной обработки электрическим током для подобранных составов являются фактором улучшения сцепления слоев в многослойных конструкциях. Это позволяет отказаться от дискретных связей между слоями и улучшить теплоизоляционные свойства трехслойных конструкций. Нарастание прочности бетона разных составов, полученное путем электропрогрева, остается постоянным в длительные сроки, в данном случае 6 лет.

3. Производительность при тепловлажностной обработке электрическим током в 15 раз выше термообработки паром при использовании одного поста термообработки (формования и прогрева).

4. На разработанную технологию получен патент на изобретение [6].

5. Данный способ термообработки для вновь появляемых сверхлегких заполнителей должен быть востребован. Характерно, что разработанная технология требует высокой культуры обслуживающего персонала, тщательного соблюдения правил техники безопасности и хорошо поддается автоматизации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кириченко В. А.* Оценка влияния режимов электропрогрева на физико-механические свойства полистиролбетонов // Бетон и железобетон. 1995. № 3. С. 4— 5.

2. *Крылов Б. А.* Трехслойные панели с теплоизоляционным слоем из пенополистирлбетона // Бетон и железобетон. 1994. № 3. С. 10—12.

3. *Милых Т. И.* Конструкционно-теплоизоляционный полистиролбетон // Бетон и железобетон. 1988. № 10. С. 11—13 ; 2003. № 3. С. 2—7.

4. *Евдокимов А. А.* Физико-механические свойства теплоизоляционных бетонов на пористых заполнителях для многослойных ограждающих конструкций : дисс канд. техн. наук. М., 1989. 241 с.

5. *Кириченко В. А.* Технология повышения прочности полистиролбетона // Строительные материалы XXI века. Технологии бетонов. 2005. № 1. С. 66—67.

6. Патент на изобретение № 2278096. Способ изготовления строительных изделий из полистиролбетонной смеси / В. А. Кириченко и Б. А. Крылов (Россия). Заявка № 2004119356. Бюл. № 17 (II ч.). 2006.

1. *Kirichenko V. A.* Otsenka vliyaniya rezhimov elektroprogreva na fiziko-mekhanicheskie svoystva polistirolbetonov // Beton i zhelezobeton. 1995. № 3. S. 4— 5.

2. *Krylov B. A.* Trekhsloynye paneli s teploizolyatsionnym sloem iz penopolistirlbetona // Beton i zhelezobeton. 1994. № 3. S. 10—12.

3. *Milykh T. I.* Konstruktsionno-teploizolyatsionnyy polistirolbeton // Beton i zhelezobeton. 1988. № 10. S. 11—13 ; 2003. № 3. S. 2—7.

4. *Evdokimov A. A.* Fiziko-mekhanicheskie svoystva teploizolyatsionnykh betonov na poristykh zapolnitelyakh dlya mnogosloynykh ograzhdayushchikh konstruktsiy : diss kand. tekhn. nauk. M., 1989. 241 s.

5. *Kirichenko V. A.* Tekhnologiya povysheniya prochnosti polistirolbetona // Stroitel'nye materialy XXI veka. Tekhnologii betonov. 2005. № 1. S. 66—67.

6. Patent na izobretenie № 2278096. Sposob izgotovleniya stroitel'nykh izdeliy iz polistirolbetonnoy smesi / V. A. Kirichenko i B. A. Krylov (Rossiya). Zayavka № 2004119356. Byul. № 17 (II ch.). 2006.

© Крылов Б. А., Кириченко В. А., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Крылов Б. А., Кириченко В. А. Изготовление трехслойных панелей наружных стен для различных зданий с высокими теплоизоляционными свойствами при малых затратах энергоресурсов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 119—123.

УДК 691.327:666.973

С. Н. Леонович, Н. Л. Полейко, Ю. Н. Темников, С. В. Журавский

ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БЕТОНА С ДОБАВЛЕНИЕМ СИСТЕМЫ ПРОНИКАЮЩЕГО ДЕЙСТВИЯ «КАЛЬМАТРОН»

Приводятся результаты исследований поровой структуры бетона с добавкой «Кальматрон» в зависимости от условий и сроков твердения, а также от содержания кольматирующей добавки. Подтверждены предположения о том, что со временем, в результате химических реакций, происходит кольматация капиллярных пор, снижается водопоглощение бетона, увеличивается его водонепроницаемость и морозостойкость.

Полученные результаты нашли применение в изготовлении железобетонных конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по водонепроницаемости и морозостойкости, на промышленных предприятиях строительной отрасли.

Определены конструкции, где применение системы «Кальматрон» наиболее эффективно.

К л ю ч е в ы е с л о в а: кольматирующая добавка, капиллярные поры, бетон, водопоглощение, водонепроницаемость, морозостойкость, железобетонные конструкции.

In this work the results of the investigation of pore concrete structures with application of “Kalmatron” system, depending on conditions and terms of solidification, as well as the maintenance of lost circulation material are presented. Predictions that in due course colmatation occurs in capillary pores as a result of chemical reactions, concrete water absorption decreases and its watertightness and frost-resistance increases are proved.

The results are used to manufacture reinforced concrete structures, that meet the requirements of watertightness and frost-resistance, at industrial enterprises of construction industry.

The authors determine structures where application of “Kalmatron” system is most effective.

K e y w o r d s: lost circulation material, capillary pores, concrete, water absorption, watertightness, frost-resistance, reinforced concrete constructions.

Введение. Учитывая тенденции последних лет использования в промышленности строительных материалов, отходов производства, применения для изготовления бетонных и железобетонных конструкций вяжущих с пониженным содержанием клинкерного фонда, необходимо решать вопросы долговечности этих конструкций даже при эксплуатации в нормальных атмосферных условиях [1].

Водонепроницаемость — одна из основных технических характеристик, определяющих эксплуатационность и долговечность бетонных конструкций.

Проницаемость бетона в значительной степени зависит от состава бетонной смеси, качества уплотнения, ухода за бетоном, степени гидратации цемента и условий эксплуатации конструкций. Особо остро стоит вопрос о восстановлении водонепроницаемости бетона в условиях эксплуатации, при которых выявлены признаки разрушения бетона.

Технологический процесс изготовления конструкций, режим тепловлажностной обработки бетона сопряжены с большой вероятностью образования температурных, усадочных и силовых трещин, наличия зон контакта свежеуложенной бетонной смеси и затвердевшего бетона, водных пленок под арматурой и крупным заполнителем.

Постоянная миграция влаги в массиве бетона за счет капиллярного подсоса, испарения, перепада температур на различных поверхностях является определяющим фактором процесса интенсификации разрушения цементного камня.

Установлено, что от параметра проницаемости в значительной степени зависит и морозостойкость, косвенно характеризующая долговечность бетона конструкции. Снижение проницаемости в бетонных конструкциях достигается различными способами, но наиболее эффективным и радикальным, по нашему мнению, является кольматация пор и капилляров бетона [2—4].

Экспериментальные исследования, анализ результатов. Для бетонных и железобетонных конструкций наибольший интерес представляют неорганические растворные смеси на основе цементного вяжущего, реализующие проникающие и кольматирующие свойства в присутствии воды. К такого рода материалам относится система материалов «Кальматрон», которая представляет собой серию цементирующих материалов капиллярного действия, обеспечивающих водонепроницаемость бетона, цементно-песочного раствора и других цементсодержащих капиллярно-пористых материалов. Эффект водонепроницаемости обеспечивается за счет ряда строго последовательных химических реакций, продолжающихся во времени, проходящих внутри структуры бетона между его составляющими с компонентами, содержащимися в растворе смеси «Кальматрон» [4—6].

Состав «Кальматрон» — это жесткая однокомпонентная смесь проникающего действия, изготавливается согласно СТБ 1543-2005, EN 1504-2 (CE 1397-CPD-0198). Он представляет собой готовый к применению сухой сыпучий материал серого цвета с белыми включениями, состоящий из портландцемента, кварцевого песка и комплексной химической добавки. По физико-химическим показателям состав «Кальматрон» должен соответствовать требованиям, указанным в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические показатели системы «Кальматрон»

Наименование показателя	Нормативные значения
Внешний вид	Серый порошок с серыми включениями
Влажность, %, не более	1
Сроки схватывания, мин: начало, не менее окончание, не более	 30 180
Прочность при сжатии, МПа, не менее	М25
Марка по морозостойкости, не менее	F300
Марка по водонепроницаемости, не менее	W10
Коррозионное состояние стальной арматуры	Устойчиво-пассивное
Удельная поверхность, $см^2/г$	2874

Систему, повышающую долговечность бетонных конструкций, обеспечивают составы «Кальматрон», которые применяются как в виде защитных покрытий на бетонных поверхностях, так и в качестве добавки при изготовлении бетонных и железобетонных конструкций.

Составляющие бетонной смеси с добавкой материала «Кальматрон» вводятся в бетоносмеситель в следующем порядке: песок, щебень гранитный фракции 5...10 и 10...20, состав «Кальматрон», цемент. Время перемешивания сухих составляющих с составом «Кальматрон» не менее 2...3 мин, затем вводится вода, и смесь дополнительно перемешивается 2...3 мин.

Подвижность бетонной смеси ОК=2…4 см для всех составов. Из каждого состава изготавливались контрольные образцы для определения пористости, морозостойкости, водонепроницаемости и водопоглощения. Прочность бетона определялась на образцах-кубах размером 100×100×100 мм согласно ГОСТ 10180—90. Результаты испытаний приведены в табл. 2

Таблица 2

Результаты испытания образцов на прочность

Номер состава	Среднее значение, $R_{сж}$, МПа	Прирост прочности, %
1	37,8	—
2	41,9	10,8
3	38,3	1,3
4	43,6	—
5	44,4	1,8
6	46,0	10,5

Анализ результатов испытания образцов на прочность при сжатии показывает, что оптимальным расходом системы «Кальматрон» является 16,6 кг на 1 м^3 бетона. Водопоглащение бетона определялось на образцах-кубах размером 100×100×100 мм по ГОСТ 12730.3—78. Результаты испытаний по определению водопоглащения бетона приведены в табл. 3.

Таблица 3

Определение водопоглощения бетона

Номер состава	Среднее значение, водопоглащения, %	Снижение водопоглащения, %
1	5,49	—
2	5,14	6,4
3	5,21	5,1
4	5,86	—
5	5,14	12,2
6	5,33	9,0

Анализ результатов табл. 3 показывает, что снижение водопоглощения бетонных образцов с ситемой «Кальматрон» достигало от 5,1 до 12,2 % в зависимости от состава бетона и расхода добавки.

Водонепроницаемость бетона определялась на образцах-цилиндрах диаметром 150 мм по ГОСТ 12730.5 методом «мокрого пятна». Водонепроницаемость бетонных образцов с системой «Кальматрон» увеличилась на 1…2 марки с W8 до W10—W12.

Морозостойкость бетона определялась на образцах-кубах 100×100×100 мм по ГОСТ 10160.2—95 третьим методом. Составы 1, 3, 4 соответствуют марке по морозостойкости F150, а составы 2, 5, 6 соответствуют F200.

При исследовании поровой структуры бетона с кольматирующей добавкой «Кальматрон» получены результаты, подтверждающие изменение среднего размера и показателя однородности размеров открытых капиллярных пор в зависимости от условий и сроков твердения бетона [4]. Составы бетона приведены в табл. 4.

Таблица 4

Составы бетона

Номер состава	Расход материалов на 1 м^3 бетона, кг				
	Цемент	Песок	Щебень гранитный фракций		«Кальматрон»
			5…10	10…20	
1	430	547	731	487	—
2	414	547	731	487	16,6
3	417	547	731	487	13,0
4	527	611	800	343	—
5	507	611	800	343	20,0
6	511	611	800	343	16,6

Величину показателя пористости определяли по кинетике водонасыщения бетонных образцов, высушенных до постоянной массы, дискретным взвешиванием через 0,25, 1,0, 24 и 48 ч. По результатам испытаний рассчитывали относительное водопоглощение по массе в момент времени t_1=0,25 и t_2=1,0 ч. Кажущуюся пористость (интегральный объем открытых пор, доступный водопоглощению) оценивали значением объемного водопоглощения. По этим величинам с помощью номограмм определяли вспомогательный параметр λ_1 и параметр α, по которым рассчитывали параметр λ (λ_1 и λ — величины, характеризующие некоторые средние размеры капилляров бетона, а величины α — однородность размеров капилляров). Параметры пористости λ и α серий образцов определяли как среднее арифметическое значение результатов испытаний всех образцов серии [7].

На образцах первой серии определяли изменения параметров показателей пористости в разные сроки твердения. Для этого определяли водопоглощение первой серии на бетонных образцах после 28 сут твердения в нормально-влажностных условиях. Затем образцы в течение 14 сут выдерживали в воде и повторно проводили определение водопоглощения.

Результаты определения водопоглощения первой серии образцов приведены в табл. 5.

Таблица 5

Водопоглощение бетонных образцов нормально-влажностного твердения

Номер состава	Водопоглощение, % по массе			
	$W_{15\ мин}$	$W_{1\ час}$	$W_{1\ сут}$	$W_{2\ сут}$
1	2,86/1,40	4,35/2,22	5,64/5,41	5,69/5,44
2	2,76/1,22	4,30/1,93	5,51/5,42	5,82/5,47
3	3,09/1,27	4,38/2,10	5,79/5,42	5,89/5,47
4	2,81/1,24	4,83/2,40	6,23/5,93	6,42/5,93
5	2,88/1,19	4,47/2,00	6,16/5,48	6,35/5,49
6	2,76/1,18	4,36/1,96	6,15/5,47	6,31/5,50

Примечание: в числителе приведено начальное водопоглощение образцов, в знаменателе — после выдержки их в течение 14 сут в воде.

Результаты определения показателей пористости λ, α и вспомогательного параметра λ_1 первой серии образцов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Показатели пористости образцов нормально-влажностного твердения

Номер состава	$\overline{\lambda_1}$	α	$\overline{\lambda}$
1	0,80/1,24	0,24/0,96	0,38/1,20
2	0,76/1,20	0,20/0,93	0,24/1,25
3	0,80/1,24	0,21/0,99	0,33/1,18
4	0,76/1,17	0,19/0,88	0,24/1,16
5	0,83/1,29	0,29/0,99	0,51/1,27
6	0,76/1,24	0,19/0,99	0,23/1,26

Влияние условий твердения на поровую структуру бетона определяли на второй серии образцов, которые 1 сутки выдерживали в форме и 27 суток — в воде, т. е. создавались благоприятные условия для образований нерастворимых кристаллических соединений в капиллярах и порах бетона. Затем бетонные образцы дополнительно выдерживали еще 14 суток в воде и повторно проводили дискретное взвешивание. Результаты испытаний приведены в табл. 7.

Таблица 7

Водопоглощение бетонных образцов при твердении в воде

Номер состава	Водопоглощение, % по массе			
	$W_{15\ мин}$	$W_{1\ час}$	$W_{1\ сут}$	$W_{2\ сут}$
1	1,27/0,73	2,12/1,08	5,74/4,12	5,91/5,16
2	1,53/0,75	2,51/1,16	5,86/4,84	5,98/5,59
3	1,64/0,89	2,71/1,39	5,98/5,37	6,08/5,85
4	1,88/0,92	3,07/1,49	6,50/5,81	6,58/6,43
5	1,59/0,71	2,49/1,11	6,15/4,72	6,26/5,75
6	1,77/0,80	2,70/1,32	6,20/5,41	6,32/6,02

Примечание: в числителе приведено начальное водопоглощение образцов, в знаменателе — после выдержки их в течение 14 суток в воде.

Результаты определения показателей пористости λ, α и вспомогательного параметра λ_1 образцов, твердевших в водной среде, приведены в табл. 8.

Таблица 8

Показатели пористости образцов при твердении в воде

Номер состава	$\overline{\lambda_1}$	α	$\overline{\lambda}$
1	0,76/1,21	0,14/0,80	0,13/1,16
2	0,83/1,27	0,29/0,98	0,51/1,28
3	0,69/1,21	0,10/0,88	0,25/1,24
4	0,70/1,17	0,11/0,87	0,24/1,15
5	0,69/1,18	0,10/0,88	0,25/1,16
6	0,70/1,29	0,11/088	0,24/1,16

В результате исследований влияния состава «Кальматрон» на водопоглощение бетона в зависимости от условий и сроков твердения установлено, что водопоглощение бетонных образцов меняется в зависимости от содержания кольматирующих системы.

В зависимости от условий твердения (нормально-влажностных или водных) меняется водопоглощение и показатели пористости бетона. В благоприятных условиях создаются предпосылки для развития химических реакций формирования нерастворимых новообразований, которые накапливаются в капиллярах. Это подтверждается изменением показателей однородности размеров открытых капиллярных пор (показатель α приближается к единице) и показателем среднего размера открытых капиллярных пор λ.

Показатели пористости значительно изменяются со временем. Повторные исследования через 14 суток водного твердения показали динамику снижения водопоглощения бетонных образцов, изменение показателей однородности размеров открытых капиллярных пор и показателей среднего размера открытых капиллярных пор. Это подтверждает предположение о том, что со временем, в результате химических реакций, происходит кольматация капиллярных пор, снижается водопоглощение бетона, увеличивается его водонепроницаемость и долговечность.

В результате промышленной апробации на заводе «Спецжелезобетон» была изготовлена тридцать одна виброгидропрессованная труба. Восемь труб содержали состав «Кальматрон». Контрольные трубы испытывались избыточным давлением в 1,2 МПа, основные с составом «Кальматрон» — давлением 1,4 МПа. Гидростатические испытания труб проводили постепенным повышением давления на 0,1…0,25 МПа в минуту до указанных значений и выдерживали под испытательным давлением в течение 10 минут. Трубы считаются выдержавшими испытание на водонепроницаемость, если к моменту его окончания на поверхности труб не будет обнаружено фильтрации воды в виде влажных пятен, капель или течи. Результаты испытаний труб приведены в табл. 9.

Таблица 9

Результаты гидростатического испытания труб

№ состава	Количество труб		Испытательное давление, МПа	Результаты испытаний, количество труб
	Контрольных	С добавкой «Кальматрон»		
1	23	—	1,2 1,0 0,8	21 1 1
2	—	8	1,4	8

Проведенные исследования по использованию состава «Кальматрон» в качестве кольматирующей добавки в бетон показали, что химические реагенты равномерно распределяются в объеме бетонной смеси на стадии приготовления, растворяются в воде затворения и вступают в химические реакции с активными составляющими цемента. В результате формируются сложные соли, способные создавать нерастворимые кристаллогидраты. Их образование происходит постепенно, с меньшей скоростью, чем реакции гидратации цемента, поэтому сеть новообразованных кристаллов заполняет капилляры, микротрещины и поры бетона. При этом кристаллы являются составной частью структуры бетона и оказывают влияние на его физико-механические свойства [5].

Процесс формирования кристаллов приостанавливается в результате снижения влажности бетона. Во время эксплуатации конструкции, например при увеличении гидростатического давления, химическая реакция кристаллообразования возобновляется, в результате чего повышается водонепроницаемость бетона, что позволяет изготавливать виброгидропрессованные трубы со стабильным показателем напорности [6]. В последующем завод «Спецжелезобетон» выпустил промышленную партию указанных труб с применением состава «Кальматрон».

Заключение. Проведенными исследованиями установлено:

1) оптимальным расходом состава «Кальматрон» является 16,6 кг на 1 $м^3$ бетона;

2) водопоглощение бетона с применением состава «Кальматрон» уменьшается на 10…12 %;

3) водонепроницаемость бетона с применением состава «Кальматрон» увеличивается на 1—2 марки;

4) применение системы защиты «Кальматрон» позволяет получать стабильно марки бетона по морозостойкости не менее F200;

5) применение системы «Кальматрон» может быть эффективным в железобетонных конструкциях, работающих в условиях, предъявляющих повышенные требования по водонепроницаемости и морозостойкости (дорожное и мелиоративное строительство, производство железобетонных труб, свай и т. д.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Розенталь Н. К., Степанова В. Ф., Чехний Г. В.* Защитные материалы проникающего действия для повышения долговечности конструкций // Долговечность строительных конструкций. Теория и практика защиты от коррозии. М. : Центр экономики и маркетинга, 2002. С. 75—79.

2. *Герчин Д. В.* Особенности применения защитного состава «Кальматрон» для повышения долговечности бетонов зданий и сооружений // Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве. СПб. : Роза мира, 2007. С. 338—343.

3. *Полейко Н. Л., Осос Р. Ф., Полейко Д. Н.* Применение гидрофобизатора типа «Кальматрон» в производстве железобетонных труб методом виброгидропрессования // Наука и технология строительных материалов: состояние и перспективы развития. Минск : БГТУ, 2005. С. 2016—2019.

4. *Полейко Н. Л., Осос Р. Ф., Полейко Д. Н.* Структура пространства бетона с добавкой «Кальматрон» // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров РБ. Минск : БНТУ, 2006. С. 126—131.

5. Повышение долговечности бетона с применением состава «Кальматрон» / Н. Л. Полейко, Р. Ф. Осос, Д. Н. Полейко, С. В. Журавский // Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве. СПб. : Роза мира, 2007. С. 377—383.

6. *Полейко Н. Л., Журавский С. В.* Повышение физико-механических свойств бетона смесью «Кальматрон» при производстве напорных труб // Перспективы развития новых технологий в строительстве и подготовке инженерных кадров Республики Беларусь : сб. тр. XVI Международного науч.-метод. семинара. Брест : БГТУ, 2009. С. 77—81.

7. ГОСТ 12730.4—78. Бетоны. Методы определения показателей пористости.

1. *Rozental' N. K., Stepanova V. F., Chekhniy G. V.* Zashchitnye materialy pronikayushchego deystviya dlya povysheniya dolgovechnosti konstruktsiy // Dolgovechnost' stroitel'nykh konstruktsiy. Teoriya i praktika zashchity ot korrozii. M. : Tsentr ekonomiki i marketinga, 2002. S. 75—79.

2. *Gerchin D. V.* Osobennosti primeneniya zashchitnogo sostava «Kal'matron» dlya povysheniya dolgovechnosti betonov zdaniy i sooruzheniy // Problemy dolgovechnosti zdaniy i sooruzheniy v sovremennom stroitel'stve. SPb. : Roza mira, 2007. S. 338—343.

3. *Poleyko N. L.*, *Osos R. F.*, *Poleyko D. N.* Primenenie gidrofobizatora tipa «Kal'matron» v proizvodstve zhelezobetonnykh trub metodom vibrogidropressovaniya // Nauka i tekhnologiya stroitel'nykh materialov: sostoyanie i perspektivy razvitiya. Minsk : BGTU, 2005. S. 2016—2019.

4. *Poleyko N. L.*, *Osos R. F.*, *Poleyko D. N.* Struktura prostranstva betona s dobavkoy «Kal'matron» // Perspektivy razvitiya novykh tekhnologiy v stroitel'stve i podgotovke inzhenernykh kadrov RB. Minsk : BNTU, 2006. S. 126—131.

5. Povyshenie dolgovechnosti betona s primeneniem sostava «Kal'matron» / N. L. Poleyko, R. F. Osos, D. N. Poleyko, S. V. Zhuravskiy // Problemy dolgovechnosti zdaniy i sooruzheniy v sovremennom stroitel'stve. SPb. : Roza mira, 2007. S. 377—383.

6. *Poleyko N. L.*, *Zhuravskiy S. V.* Povyshenie fiziko-mekhanicheskikh svoystv betona smes'yu «Kal'matron» pri proizvodstve napornykh trub // Perspektivy razvitiya novykh tekhnologiy v stroitel'stve i podgotovke inzhenernykh kadrov Respubliki Belarus' : sb. tr. XVI Mezhdunarodnogo nauch.-metod. seminara. Brest : BGTU, 2009. S. 77—81.

7. GOST 12730.4—78. Betony. Metody opredeleniya pokazateley poristosti.

© Леонович С. Н., Полейко Н. Л., Темников Ю. Н., Журавский С. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Физико-механические свойства бетона с добавлением системы проникающего действия «Кальматрон» / С. Н. Леонович, Н. Л. Полейко, Ю. Н. Темников, С. В. Журавский // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 124—131.

УДК 693.554-486

У. Х. Магдеев, Ю. В. Пухаренко, В. И. Морозов, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТАЛЕФИБРОБЕТОНА НА ОСНОВЕ АМОРФНОЙ МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ФИБРЫ

Произведены сравнительные испытания образцов, изготовленных на основе исследуемого материала, сконструировано несколько оригинальных приборов для испытаний в соответствии с ГОСТ 29167—91 и для ряда других испытаний. Получены физико-механические характеристики материала. Определены особенности работы под нагрузкой.

К л ю ч е в ы е с л о в а: трещиностойкость, прочность, изгиб, модуль упругости.

The comparative tests of samples made on the basis of the investigated material, constructed by several new devices for testing in accordance with GOST 29167—91, and a number of other tests are carried out. Physical and mechanical characteristics of the material are received. The features of operation under load are detected.

K e y w o r d s: crack resistance, strength, curve, flexural modulus.

В настоящее время для дисперсного армирования бетонов применяют металлические (чаще всего стальные) и неметаллические (минеральные, синтетические и др.) высоко- и низкомодульные волокна различной длины и поперечного сечения. При этом стальную фибру получают резанием низкоуглеродистой проволоки, фольги или листовой стали, формованием из расплава, фрезерованием полос и слябов, а также в результате токарного процесса. Неметаллические фибры (стеклянные, базальтовые, синтетические и др.) представляют собой отрезки моноволокон, комплексных нитей и фибриллированных пленок, для изготовления которых в ряде случаев целесообразно использование промышленных отходов соответствующих производств [1].

Несмотря на многообразие конструкторских предложений и решаемых при этом технических, экономических, социальных и других задач, основной вопрос — оптимизация геометрических параметров и размеров фибр — определялся двумя важнейшими условиями:

необходимостью обеспечения надежного сцепления фибр с бетонной матрицей при допускаемых нагрузках;

необходимостью повышения технологичности операций, сопровождающих процесс получения сталефибробетонных конструкций.

И то, и другое в значительной мере зависит от относительной длины фибр l/d, которая может изменяться в широких пределах и влиять на степень анкеровки фибр в бетоне, а также на технологические процессы получения армированных смесей. Учитывая это, в большинстве случаев относительная длина фибр из проволоки принимается равной l/d = 80…100, что в определенной мере удовлетворяет сформулированным выше условиям, однако не устраняет всех проблем, основными из которых являются:

дефицитность и высокая стоимость стальных фибр малых диаметров, изготавливаемых резкой стальной проволоки;

сравнительно низкая степень насыщения бетонных матриц фибрами такого типа, что ограничивает дальнейшее улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств сталефибробетона;

необходимость перевооружения бетоносмесительных узлов предприятий сборного железобетона в связи с недостаточной технологичностью фибр из проволоки, которая проявляется в отсутствии сыпучести, в слеживаемости и т. п.

В создавшихся условиях радикальным способом улучшения конструкционных возможностей стальных фибр с одновременным повышением их технологичности становится увеличение боковой поверхности армирующих элементов, то есть применение фибр некруглого поперечного сечения, получаемых резанием стальной ленты или фольги, выплескиванием из расплава стали, а также прерывистым вибрационным резанием из полуфабриката прокатного металлургического производства в ходе фрезерного или токарного процесса. При этом последние заслуживают особого внимания, так как их производство реализовано в промышленных масштабах, стоимость таких фибр оказывается гораздо ниже, чем цилиндрических, получаемых из стальной проволоки, для их изготовления могут применяться наиболее дешевые малоуглеродистые стали в виде блюмсов, слябов или слитков.

Форма поперечного сечения, обусловленная процессом изготовления, обеспечивает значительную жесткость такой фибры в продольном направлении, что, в свою очередь, облегчает процессы ее транспортирования, растаривания и дозирования при работе из запаса, способствует равномерному распределению фибр в объеме при повышенном содержании в смеси и, следовательно, значительному улучшению физико-механических характеристик сталефибробетона. Наконец, следует отметить, что при равновеликом поперечном сечении фрезерная или токарная фибра имеет большую, по сравнению с проволочной, боковую поверхность, что является одним из главных резервов повышения прочности фибробетона, разрушение которого в большинстве случаев происходит в результате выдергивания фибр из бетонной матрицы [2].

В последние годы получает распространение еще одна разновидность фибры подобного типа: аморфная металлическая, не имеющая кристаллической структуры. Такого эффекта удалось добиться путем быстрого охлаждения тонкой металлической пленки. Расплавленный металл с различными легирующими добавками выливается на охлаждаемую подложку и отверждается, не успевая приобрести упорядоченную кристаллическую решетку. Аморфная фибра представляет собой отрезки лент определенной длины толщиной в 100…200 мкм и шириной 2…3 мм (рис.).

Аморфная металлическая фибра

Целью данной работы являлось определение в основном механических характеристик сталефибробетона на аморфнометаллической фибре и сравнение их с аналогичными показателями неармированных (контрольных) образцов и образцов, армированных фиброй из проволоки, того же состава.

В качестве матрицы для получения сталефибробетонных образцов использовался мелкозернистый бетон, который позволяет обеспечить высокую степень дисперсности армирования стальной фиброй.

При проведении исследований был использован портландцемент ПЦ 400-Д20 производства ООО «Цемент». В качестве мелкого заполнителя применялся кварцевый песок с модулем крупности $M_{кр}$=2,1…2,3 по ГОСТ 8736 производства ЦБИ «Воронцовское». Для регулирования подвижности бетонных смесей использовался суперпластификатор Schomburg Remicrete SP-10 (FM).

Для дисперсного армирования бетонов применялись:

фибра стальная волнового профиля из проволоки длинной 22 мм, диаметром 0,7 мм, длиной волны 5,5 мм производства Белорусского металлургического завода;

фибра металлическая аморфная производства ООО «Химмет» длиной 37 мм;

фибра металлическая аморфная производства французской фирмы «Сожефибр» длиной 10 и 30 мм.

Все образцы, изготовленные в ходе данного исследования, имели одинаковый состав матрицы: Ц/П=1/2 при В/Ц=0,35 и расходе добавки суперпластификатора 0,5 % от массы цемента.

Приготовление сталефибробетонных смесей производилось вручную следующим образом. В сферическую чашу помещались песок и цемент и перемешивались до однородного состояния. После этого добавлялась вода с растворенной в ней добавкой суперпластификатора. Подвижность смеси соответствовала марке П4 (погружение конуса 14 см). По готовности цементно-песчаного раствора в него вводилась фибра при постоянном перемешивании, которое продолжалось до обеспечения равномерного распределения ее по объему замеса. Из приготовленных смесей были изготовлены образцы размером 4×4×16 см, которые пропаривались в камере и затем выдерживались в естественно-воздушных условиях в течение 14 суток, после чего определялись средняя плотность и показатели прочности сталефибробетона. Результаты испытаний представлены в табл.

Результаты испытаний образцов

Вид и количество фибры	Ср. плотность, кг/м^3	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Прочность на срез, МПа	Прочность на растяжение при раскалывании, МПа	Прочность на сжатие, МПа
Бетон без фибры	2298	7,97	1,85	1,90	32,0
Фибра из проволоки, 1,0 % об.	2327	12,50	3,25	3,10	34,0
Фибра из проволоки, 0,4 % об.	2279	9,38	3,25	2,10	31,0

Вид и количество фибры	Ср. плотность, кг/м^3	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Прочность на срез, МПа	Прочность на растяжение при раскалывании, МПа	Прочность на сжатие, МПа
Фибра ООО «Химмет», 1,0 % об.	2355	18,10	4,55	5,05	46,0
Фибра ООО «Химмет», 0,8 % об.	2324	16,60	4,45	3,00	45,0
Фибра ООО «Химмет», 0,6 % об.	2311	10,90	2,70	3,65	42,0
Фибра ООО «Химмет», 0,4 % об.	2322	8,79	2,85	3,20	46,0
Фибра фирмы «Сожефибр» длиной 30 мм, 1,0 % об.	2376	23,40	4,80	5,00	47,0
Фибра фирмы «Сожефибр» длиной 30 мм, 0,4 % об.	2318	12,1	3,15	3,20	44,0
Фибра фирмы «Сожефибр» длиной 10 мм, 1,0 % об.	2286	13,00	3,65	4,30	50,0
Фибра фирмы «Сожефибр» длиной 10 мм, 0,4 % об.	2268	9,22	3,40	3,50	48,0

Результаты испытаний показывают значительное увеличение прочности при изгибе, сжатии, раскалывании и срезе при добавлении аморфной металлической фибры как по сравнению с контрольным образцом, так и по сравнению с образцами, армированными проволочной фиброй. При этом имеет место различный характер разрушения сталефибробетона от растягивающих усилий. Разрушение образцов, армированных проволочной фиброй, сопровождалось вытягиванием волокон из бетона. Разрушение образцов, армированных аморфной металлической фиброй, происходит в результате разрыва волокон, что свидетельствует о полном использовании их прочностных характеристик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пухаренко Ю. В.* Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Вестник гражданских инженеров. 2005. № 1. С. 86—91.

2. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / Ю. В. Пухаренко, А. И. Вахмистров, В. И. Морозов, В. С. Стерин // Вестник гражданских инженеров. 2006. № 4 (9). С. 130—134.

1. *Pukharenko Yu. V.* Printsipy formirovaniya struktury i prognozirovanie prochnosti fibrobetonov // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2005. № 1. S. 86—91.

2. Effektivnost' primeneniya fibrobetona v konstruktsiyakh pri dinamicheskikh vozdeystviyakh / Yu. V. Pukharenko, A. I. Vakhmistrov, V. I. Morozov, V. S. Sterin // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2006. № 4 (9). S. 130—134.

© Магдеев У. Х., Пухаренко Ю. В., Морозов В. И., Пантелеев Д. А., Жаворонков М. И., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры / У. Х. Магдеев, Ю. В. Пухаренко, В. И. Морозов, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 132—135.

УДК 691.327:539.4

Н. И. Макридин, О. В. Тараканов, И. Н. Максимова, И. А. Суров

ФАЗОВЫЙ СОСТАВ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ МНОГОЛЕТНЕГО ТВЕРДЕНИЯ

Экспериментально показано влияние количественной дозировки и процедуры дозирования суперпластификатора на фазовый состав продуктов гидратации цементного камня многолетнего твердения. Приведены основные механические свойства модифицированной структуры цементного камня для сравниваемых серий образцов. Структурно-системный анализ фазового состава и комплексная оценка механических свойств позволяют предложить обобщенный коэффициент качества критерия трещиностойкости и сформулировать технологический принцип модифицирования.

К л ю ч е в ы е с л о в а: цементный камень, суперпластификатор, фазовый состав, структура, механические свойства.

Influence of quantitative dosage and the procedure of high-range water reducer dosing on phase composition of hydration products of long-term solidifying concrete stone is shown experimentally. Main mechanical properties of modified structure of concrete stone for compared patterns are given. Structural and systematic analysis of phase composition and full assessment of mechanical properties allow suggest generalized quality coefficient of crack resistance criteria and formulate technological principle of modification.

K e y w o r d s: concrete stone, high-range water reducer, phase composition, structure, mechanical properties.

Сложность получения высококачественных бетонов заключается в особенности гидратационного твердения цементного вяжущего, в процессе которого внесение даже незначительного количества того или иного компонента или изменение условий твердения может привести к кардинальным изменениям структуры и свойств цементных материалов. Вместе с тем, современную технологию бетонов невозможно представить без модификаторов различного химического состава и функционального назначения.

С целью определения характера влияния пластифицирующих добавок и процедуры их введения был выполнен комплекс исследований микроструктуры и основных механических свойств, включающих изучение характера изменения основных структурно-механических показателей цементного камня в течение длительного периода твердения (до 18 лет) и состава продуктов гидратации цементного камня. В качестве основных варьируемых факторов были приняты дозировки суперпластификатора (СП) С-3 и процедура введения модификатора в процессе водозатворения.

В табл. 1 приведены характеристики состава, процедуры затворения водой и введения добавки СП С-3 в цементное тесто. Процедура дозирования СП С-3 в замесе серии 4 отличалась тем, что на первой стадии СП не дозировали, а в составах 2 и 3 на первой и второй стадиях его дозировали по 50 % общего объема СП.

Т а б л и ц а 1

Серия образцов	В/Ц	СП С-3, % по массе	Процедура приготовления цементной пасты
1	0,24	—	Ц+0,12H_2O+0,12H_2O
2	0,24	1,0	Ц+(0,12H_2O+0,5СП)+(0,12H_2O+0,5СП)
3	0,24	0,5	Ц+(0,12H_2O+0,25СП)+(0,12H_2O+0,25СП)
4	0,24	0,5	Ц+0,12H_2O+(0,12H_2O+0,5СП)

Рентгенофазовые исследования составов продуктов гидратации цементного камня выполнялись на дифрактометре ДРОН-7 в интервале брэгговских углов 7…60° с шагом съемки 0,05°.

На рис. 1 и 2 приведены рентгенограммы опытных образцов сравниваемых серий в возрасте цементного камня 18 лет.

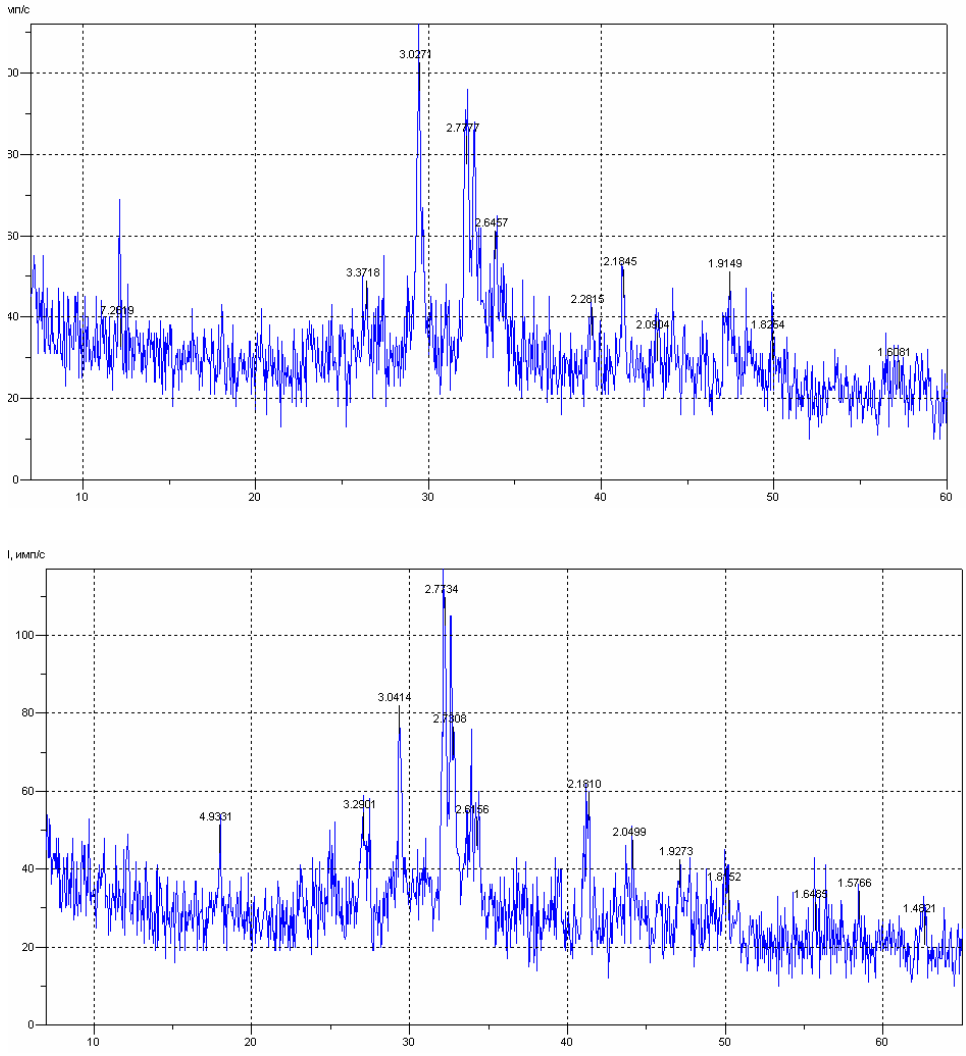


Рис. 1. Рентгенограммы опытных образцов серии 1 и 2

При анализе рентгенограмм составов № 1 и 2 установлено, что для образца № 2 наблюдается более высокая интенсивность негидратированного алита (2,77; 2,74 Å), что может косвенно свидетельствовать о некотором замедлении гидратации. Однако соотношение интенсивностей алита и $Ca(OH)_2$ (2,63 Å) примерно одинаково. Для образцов № 3 и 4, приведенных на рис. 2, также характерна более высокая интенсивность алита по отношению к составу № 1, но для 3-го и 4-го составов относительно алита возрастает интенсивность $Ca(OH)_2$ (2,63 Å), что свидетельствует о некоторой активации гидрата-

ции силикатных фаз и высвобождении гидратной извести вследствие диспергирующего действия суперпластификатора. В большей степени это проявляется для 4-го состава, для которого характерно разное увеличение интенсивности отражений $Ca(OH)_2$ (4,93 и 1,93 Å). Это также подтверждает возможность активации гидратации силикатных фаз. Очевидно, что, несмотря на увеличение контактной зоны цементных частиц с жидкой фазой в присутствии СП, наиболее активно процесс гидратации протекает при первоначальном взаимодействии цементных частиц с чистой водой. Следует отметить, что прочность образцов состава № 4, в котором на первой стадии вводилась часть чистой воды, а затем оставшаяся вода с добавкой С-3, превышает прочность не только контрольных образцов, но и образцов, в которых добавка С-3 вводилась хотя и порционно, но первоначально с водой затворения. Таким образом, структура, сформированная при первичном контакте с чистой водой, в период твердения до 18 лет сохраняет более высокие прочностные свойства.

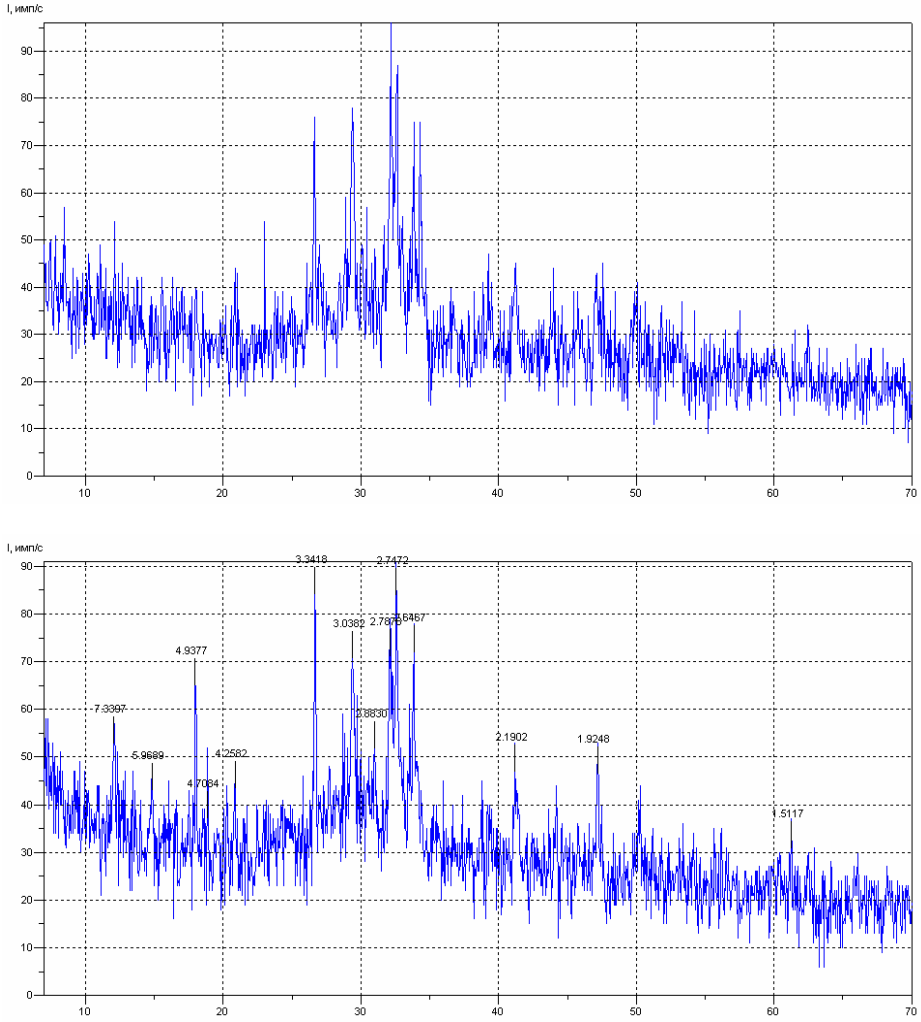


Рис. 2. Рентгенограммы опытных образцов серии 3 и 4

Повышение прочности составов № 4 по сравнению с контрольными образцами можно объяснить также диспергирующим влиянием добавки С-3 вследствие увеличения площади контактной зоны в дисперсной системе. Увеличение интенсивности отражений $Ca(OH)_2$: 2,63 Å и особенно 4,93, 1,92 Å в составе № 4 свидетельствует об активации гидратации не только силикатных, но и алюминатных фаз, поскольку процесс взаимодействии C_3A и C_4AF с водой связан с экстрагированием CaO из структуры алюминатов, а при дальнейшем взаимодействии алюминатных комплексов с $Ca(OH)_2$ — с возможностью образования гидроалюминатов кальция различной основности, свойств и структуры.

Характерно, что практически для всех составов с добавкой С-3 наблюдается снижение интенсивности отражений кальцита (3,029 Å) по сравнению с контрольным образцом, что свидетельствует о некотором снижении карбонизационных процессов в присутствии суперпластификатора.

В отношении гидросиликатных фаз следует отметить, что в присутствии добавки С-3 (№ 2 и 3) происходит некоторое снижение интенсивности отражений фазы CSH II (1,82 Å) (кроме № 4). В № 2, и особенно в № 3, отмечаются размытые отражения (1,82 Å) по сравнению с № 1, что свидетельствует о том, что в присутствии С-3 возможно образование широкого спектра мелкокристаллических гидросиликатных фаз, имеющих близкую, но искаженную структуру. Об этом косвенно свидетельствуют формы отражений (пиков) гидросиликатных фаз, имеющих ступенчатую несимметричную форму. Формирование многофазовой, мелкокристаллической гидросиликатной структуры может являться одной из причин повышения прочности цементных систем. Косвенно о некотором замедлении гидратации цементной системы в присутствии С-3 можно судить по значительному снижению интенсивности отражений кальцита в составах с добавкой С-3, вводимой одновременно с водой затворения.

Известно [1], что при адсорбции пластификаторов, и особенно высокомолекулярных, они оказывают влияние на морфологию гидратных фаз. В результате адсорбции не только изменяется форма кристаллов, но и замедляется их рост. Структура гидросиликатных фаз становится мелкокристаллической и состоящей из различных близких по строению гидратов. С одной стороны, на гидросиликатную систему это оказывает положительное влияние, поскольку переплетение различных фаз в целом упрочняет структуру, с другой стороны, замедляется кристаллизация гидросиликатов — основных носителей прочности цементного камня.

Несколько иначе органические добавки влияют на гидратацию алюминатных составляющих цемента. Отличительной особенностью гидратации алюминатных фаз является стабилизация метастабильных гидроалюминатов кальция и замедление процесса высвобождения межслоевой воды в структуре AFm-фаз. Структура гидроалюминатов вследствие высокой скорости их образования и присутствия добавок практически с момента водозатворения становится не только мелкокристаллической, но и значительно искаженной. Вместе с тем, в присутствии некоторых органических добавок, содержащих активные функциональные группы, на рентгенограммах гидратированных C_3A и C_4AF резко возрастают количество и интенсивности отражений гидра-

тов C_2AH_8 и $C_4AH_{13\text{-}19}$ в отличие от контрольных составов на рентгенограммах, в которых присутствует множество четких отражений, характерных для стабильной фазы C_3AH_6. Механизм этой стабилизации до конца не ясен. Однако в основе его лежат электрохимические явления (ион-дипольные, диполь-дипольные и др.), приводящие, главным образом, к изменению структуры связанной межслоевой воды и затрудняющие ее высвобождение и, следовательно, процессы перекристаллизации AFm-фаз в наиболее стабильную C_3AH_6.

При гидратации алюминатных фаз в присутствии органических ПАВ, содержащих активные функциональные группы, адсорбция происходит в основном на продуктах гидратации алюминатных фаз, поскольку дисперсность гидратов значительно превосходит дисперсность исходных минералов. Находясь в диффузионном потоке, зародыши гидратов AFm-фаз, образующиеся практически с момента водозатворения, оказываются под влиянием анионоактивных функциональных групп СП, влияющих на координационную среду межслоевых ионов Al^{3+} разрушенных алюминатных комплексов. Это приводит к изменению зарядового состояния межслоевого пространства и к затруднению высвобождения межслоевой воды и, как следствие, к стабилизации гидратов. На стадии кристаллизации гидратов, протекающей в кинетической области, большое влияние на процессы кристаллизации оказывает не только вид и активность функциональных групп, но и концентрация добавок.

При определенных условиях в процессе адсорбции органических ПАВ на активных центрах гидратов (появляющихся уже на стадии образования трехмерных зародышей из пересыщенных растворов) возможна не только адсорбция (хемосорбция) молекул добавок, но и образование новых химических соединений, например при взаимодействии СП нафталин-формальдегидного типа с алюминатными фазами [1]. Подобные комплексы так же, как и сами добавки, могут не только оказывать стабилизирующее влияние на гидраты, но и препятствовать растворению исходной фазы, перекрывая активные центры.

Таким образом, в цементной системе в присутствии органических добавок, содержащих активные функциональные группы, параллельно протекают процессы, с одной стороны, активации гидратации вследствие диспергирования частиц вяжущего, с другой стороны, процессы изменения морфологии гидросиликатов кальция и стабилизации гидроалюминатных фаз. Причем последние могут оказать негативное влияние на долговременную прочность. Известно [2, 3], что для цементных бетонов характерен «пилообразный» характер изменения прочности, сопровождающийся как нарастанием, так и спадом прочности.

Касаясь анализа рентгенограмм составов цементного камня без добавок и с добавками С-3, отметим, что в отношении гидроалюминатных фаз характерной особенностью является присутствие четких отражений фазы CAH_{10} в образцах № 1 и 4, в которых первичный контакт цементной системы осуществлялся с чистой водой (№ 1 — контрольный состав; № 4 — с добавкой С-3 0,5 % от массы цемента с двухстадийной процедурой водозатворения, при которой добавка вводится во вторую стадию).

В образцах № 2 и 3 подобные отражения в области малых углов (2Q=15—20°) отсутствуют. В области средних углов (2*Q*=25—30°) в образцах № 2 и 3 отражения CAH_{10} также присутствуют, но имеют многоступенчатую форму, свидетельствующую об искажении кристаллической структуры. Возможно, что в присутствии добавки С-3, вводимой на первой стадии приготовления, кристаллическая структура CAH_{10}, формирующаяся в цементной системе в ранние сроки и сохраняющаяся на поздних стадиях, имеет искаженную структуру, обусловленную электростатическим влиянием функциональных групп СП. Присутствие сростков кристаллов фазы CAH_{10}, имеющих форму гексагональных призм, возможно, является одной из причин повышения прочности образцов № 4 как в ранние, так и поздние сроки.

Характерной особенностью образцов № 3 и 4 с малым содержанием С-3 в интервале углов 15…30° является то, что, в отличие от образцов № 1 и 2, на их рентгенограммах присутствуют отражения, характерные для эттрингита (3,85 и 4,69Å) и C_3AH_6 (3,37Å) (особенно хорошо сформировано в № 4!). Хотя отражения 3,37 Å присутствуют и на рентгенограмме образца № 1, интенсивность их значительнее ниже, чем на рентгенограммах состава № 4. Возможно, что введение малого количества чистой воды (состав № 4) способствует активации формирования стабильной фазы C_3AH_6 и последующее введение оставшейся воды с добавкой С-3 не влияет на состояние фазы C_3AH_6 в последующем. Это является весьма положительным фактором с точки зрения формирования в цементной системе стабильных гидроалюминатных структур. Формы отражений, характерные для эттрингита, 2,209 Å во всех образцах с добавкой С-3 имеют многоступенчатый характер, и интенсивность их несколько выше, чем в № 1 (особенно в образце № 2). Это свидетельствует о возможности стабилизации эттрингита в присутствии добавки С-3 в период до 18 лет, и, кроме того, характер и форма пиков также свидетельствуют о возможных дефектах и искажениях структуры эттрингита. Присутствие и интенсивность отражений, характерных для моногидросульфоалюмината кальция в образцах № 3 и 4, несколько ниже, чем в образцах № 1 и 2, и это свидетельствует о стабильном присутствии этой фазы в течение длительного периода наряду с эттрингитом.

При широком внедрении в строительную практику высокомолекулярных органических добавок СП при назначении дозировок и, особенно, при значительном водопонижении в цементных системах следует более внимательно подходить к анализу процессов гидратации цементных минералов и в целом цементных камней, особенно в стесненных условиях, а также к процедуре введения добавки, которая может в значительной степени повлиять на состояние микроструктуры и состав гидратных фаз в течение достаточно длительного периода твердения.

В табл. 2 приведены основные механические свойства цементного камня в возрасте 28 сут и 18 лет для четырех сравниваемых серий образцов, отражающие влияние факторов: концентрации СП С-3 и процедуры его введения с указанием численных значений коэффициента изменения контролируемых параметров в названном интервале времени. Названные параметры механических свойств оценивали по формулам, приведенным в работе [4].

Таблица 2

Параметры качества цементного камня	Показатели качества сравниваемых серий образцов в возрасте	
	28 сут	18 лет
Серия 1		
Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа	76,7 / 1	90 / 1,17
Прочность на растяжение при изгибе $R_{ри}$, МПа	5,19 / 1	5,35 / 1,03
Коэффициент трещиностойкости $K_{тр}$	0,068 / 1	0,059 / 0,85
Коэффициент интенсивности напряжений K_c^*, МПа·м^{0,5}	0,51 / 1	0,525 / 1,03
Энергия разрушения G_c, Дж/м^2	85,6 / 1	115,6 / 1,35
Серия 2		
Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа	68,2 / 1	81,8 / 1,2
Прочность на растяжение при изгибе $R_{ри}$, МПа	3,88 / 1	6,53 / 1,68
Коэффициент трещиностойкости $K_{тр}$	0,057 / 1	0,08 / 1,4
Коэффициент интенсивности напряжений K_c^*, МПа·м^{0,5}	0,381 / 1	0,641 / 1,68
Энергия разрушения G_c, Дж/м^2	75,3 / 1	122,7 / 1,63
Серия 3		
Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа	94,1 / 1	104,7 /1,11
Прочность на растяжение при изгибе $R_{ри}$, МПа	3,98 / 1	6,18 / 1,55
Коэффициент трещиностойкости $K_{тр}$	0,042 / 1	0,059 / 1,4
Коэффициент интенсивности напряжений, K_c^*, МПа·м^{0,5}	0,392 / 1	0,606 / 1,55
Энергия разрушения G_c, Дж/м^2	94,2 / 1	159,6 / 1,69
Серия 4		
Прочность при сжатии $R_{сж}$, МПа	100,4 / 1	119,5 / 1,19
Прочность на растяжение при изгибе $R_{ри}$, МПа	4 / 1	7 / 1,75
Коэффициент трещиностойкости $K_{тр}$	0,04 / 1	0,059 / 1,46
Коэффициент интенсивности напряжений K_c^*, МПа·м^{0,5}	0,393 / 1	0,697 / 1,77
Энергия разрушения G_c, Дж/м^2	90,2 / 1	156,9 / 1,74

Примечание. Энергия разрушения в возрасте цементного камня 420 сут.

Выполненные исследования показали, что в присутствии органических добавок, имеющих активные функциональные группы в цементной системе даже в течение длительного периода твердения, происходят процессы перекристаллиза-

ции гидратов. Для силикатных составляющих наиболее характерной особенностью является некоторое торможение гидратации на ранних этапах твердения (при равных В/Ц) и формирование различных по строению, но близких по структуре гидросиликатов кальция, которые в целом, и особенно при значительном водопонижении в присутствии СП, способствуют повышению прочности цементного камня.

Для гидроалюминатных структур в присутствии органических добавок характерной особенностью является стабилизация гидратов AFm- и AFt-фаз и замедление процессов их перекристаллизации в наиболее стабильные фазы, например C_3AH_6 и др.

При изменении температурно-влажностных условий твердения, особенно в течение длительного периода, структурные изменения, связанные, например, с дестабилизацией гидроалюминатных фаз, разуплотнением вследствие формирования вторичных кристаллогидратов различной плотности, высвобождением гидратной воды, могут являться одной из причин изменения прочности цементных систем во времени. Это и было отмечено в наших исследованиях в периода твердения цементного камня до 18 лет.

Таким образом, структурно-системный анализ фазового состава продуктов гидратации и комплексная оценка механических свойств цементного камня многолетнего твердения позволяют предложить обобщенный кинетический коэффициент критерия трещиностойкости $K_{об} = K_{тр}K_cG_c$ как важнейший параметр механической прочности и сформулировать основной технологический принцип модифицирования цементных дисперсных систем современными СП: на начальном этапе смешивания (приготовления) дисперсной системы ничто не должно мешать взаимодействию минералов цемента с водой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ратинов В. Б., Розенберг Т. И.* Добавки в бетон. М : Стройиздат, 1989. 188 с.

2. *Миронов С. А.* Теория и методы зимнего бетонирования. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Стройиздат, 1975. 700 с.

3. *Сычев М. М.* Некоторые вопросы химии бетона и цементного камня // ЖПХ АН СССР. 1981. Т. LIV. № 9. С. 2036—2043.

4. *Макридин Н. И., Максимова И. Н., Овсюкова Ю. В.* Долговременная прочность модифицированной структуры цементного камня. Ч. 2 // Строительные материалы. 2011. № 7. С. 72—75.

1. *Ratinov V. B., Rozenberg T. I.* Dobavki v beton. M : Stroyizdat, 1989. 188 s.

2. *Mironov S. A.* Teoriya i metody zimnego betonirovaniya. 3-e izd., pererab. i dop. M. : Stroyizdat, 1975. 700 s.

3. *Sychev M. M.* Nekotorye voprosy khimii betona i tsementnogo kamnya // ZhPKh AN SSSR. 1981. T. LIV. № 9. S. 2036—2043.

4. *Makridin N. I., Maksimova I. N., Ovsyukova Yu. V.* Dolgovremennaya prochnost' modifitsirovannoy struktury tsementnogo kamnya. Ch. 2 // Stroitel'nye materially. 2011. № 7. S. 72—75.

© Макридин Н. И., Тараканов О. В., Максимова И. Н., Суров И. А., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Фазовый состав и механические свойства модифицированной структуры цементного камня многолетнего твердения / Н. И. Макридин, О. В. Тараканов, И. Н. Максимова, И. А. Суров // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки . С. 136—143.

УДК 624.45:620.193.4

С. Г. Парфенов, М. В. Моргунов

К ВОПРОСУ ВЛИЯНИЯ СТЕПЕНИ АГРЕССИВНОСТИ СРЕДЫ НА КОРРОЗИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Предложена зависимость для оценки коррозии железобетона, учитывающая более полно свойства конструкции и параметры среды ее эксплуатации.

К л ю ч е в ы е с л о в а: железобетон, глубина коррозии, параметры среды, степень агрессивности, скорость коррозии.

The authors suggest that there is the dependence for reinforced concrete corrosive level that fully takes into account the construction properties and parameters of operation environment.

K e y w o r d s: reinforced concrete, deep corrosion, parameters of the environment, corrosive power, corrosion speed.

В настоящее время важным направлением научно-технических разработок в области железобетона является развитие бетонных и железобетонных конструкций высокой долговечности, коррозийной стойкости и стойкости при биологической коррозии, изготавливаемых по экономичным технологиям с использованием отходов промышленности и сельского хозяйства, разработка расчетных методов прогноза долговечности подземных и надземных железобетонных конструкций, работающих при воздействии жидких и газовоздушных агрессивных сред.

Современный подход основывается на детальном рассмотрении физико-химических процессов, развивающихся в материале при воздействии агрессивной среды. Результаты такого рассмотрения коррозионных процессов можно распространить на широкий круг условий эксплуатации бетона. К настоящему времени установлены и исследованы принципиальные схемы химических реакций взаимодействия гидроксида кальция с компонентами агрессивных сред; разработаны математические описания коррозионных процессов в сульфатных, хлоридных и кислых жидких средах. Этот большой теоретический и практический материал о процессах коррозии бетона создает предпосылки для дальнейшего развития элементов теории коррозии железобетона.

По данным, приведенным С. Н. Алексеевым [1], для процессов коррозии, находящихся в диффузионной области, справедливо уравнение, полученное на основе описания кинетики гетерогенной реакции:

$$\delta = A_{\delta}\sqrt{D^{*}C_{0}Э\tau}, \qquad (1)$$

где δ — глубина коррозионного повреждения; A_{δ} — коэффициент, принимаемый в зависимости от состава бетона; D^{*} — эффективный коэффициент диффузии агрессивного вещества через слой продуктов коррозии, см^2/ч, определяется экспериментально; C_0 — концентрация агрессивного вещества, кг/м^3; Э — химический эквивалент; τ — время воздействия агрессивной среды на бетон, ч.

Химический эквивалент, представляющий собой соотношение масс оксида кальция и кислоты, вступающих во взаимодействие, определяется по формуле

$$Э = mM_{CaO} / nM_{H_2SO_4}, \quad (2)$$

где m и n — стехиометрические коэффициенты уравнения реакции между кислотой и оксидом кальция; $M_{CaO} = 56,077$ г/моль и $M_{H_2SO_4} = 98,082$ г/моль — молекулярные массы оксида кальция и серной кислоты.

В то же время, для определения глубины коррозии как функции времени может быть использована следующая формула [2]:

$$\delta = \sqrt{Kt}, \quad (3)$$

где K — константа скорости коррозионного процесса, см^2/ч; t — время, ч.

Используя данные уравнения, выведем зависимость, учитывающую параметры реакции цементного камня с агрессивной средой, позволяющую более точно оценить глубину повреждения железобетонной конструкции.

Приравняем правые части уравнений, учитывая следующие параметры:

$$1)\ A_б = \sqrt{\frac{2(1 - g_3 / \rho_3)}{Цk}}; \quad (4)$$

$$2)\ K = \frac{2C_{1\infty} D_1 П_{2c}}{m_1}\left(1 + \frac{1}{\mu_1}\frac{D^* C_0}{D_1 C_{1\infty}}\right), \quad (5)$$

где C_0 — концентрация агрессивной жидкости; $C_{1\infty}$ — «растворимость» цементного камня в воде; m_1 — количество вещества, которое может раствориться в воде в единице объема бетона; D^* — эффективный коэффициент диффузии агрессивного вещества через слой продуктов коррозии, см^2/ч; D_1 — коэффициент диффузии ионов растворенного цементного камня; μ_1 — коэффициент, рассчитываемый по химической реакции и учитывающий необходимое количество кислоты для нейтрализации одного грамма щелочи цементного камня; $П_{2c}$ — сквозная пористость разрушенного слоя бетона.

3. Количество CO_2, которое содержалось в единичном объеме цементного камня и вступило в взаимодействие с агрессивной средой, определяется как:

$$g_1 = Цk. \quad (6)$$

4. Уравнение химической реакции для потока агрессивного вещества имеет вид:

$$g_2 = g_1 \frac{nM_{H_2SO_4}}{mM_{CaO}}. \quad (7)$$

5. Согласно уравнению Фика, для потока агрессивного вещества g_2 с концентрацией C_0 можно записать:

$$g_2 = \frac{D^* C_0}{\delta}. \quad (8)$$

В результате всех преобразований получим:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\Pi_{2c}(C_{1\infty}D_1\mu_1 + D^*C_0)}{m_1\mu_1\left(1-\frac{g_3}{\rho_3}\right)}}t. \qquad (9)$$

Рассчитаем глубину коррозии бетона по полученной зависимости. Для расчета примем тяжелый бетон марки В25, в качестве заполнителя использован гранитный щебень. Показатели плотности заполнителя бетона принимаем:

$\rho_ц = 2000$ кг/м^3 — плотность цемента марки М500;

$\rho_ц = 2000$ кг/м^3, — плотность воды;

$\rho_ц = 2650$ кг/м^3, $\rho_к = 2610$ кг/м^3 — плотность заполнителя;

$g_3 = 335$ кг/м^3 — расход заполнителя на 1 м^3 бетонной смеси.

Агрессивное вещество — серная кислота (H_2SO_4), концентрация $n = 0,0005$; pH = 4.

Состав бетона 1:1,2:1,53:2,8.

Расчетное время 50 лет. Водоцементное отношение $W = 0,5$.

Допуская, что «сквозная» пористость буферного слоя бетона Π_{2c} прямо пропорциональна общей пористости Π_{2c}, т. е. $\Pi_{2c}=\Pi_2$, получим зависимость для расчета пористости бетона:

$$\Pi_2 = \frac{Ц}{\rho_ц}\left[W\frac{\rho_ц}{\rho_в} - \theta(\gamma-1)(1-\beta) + \beta\right], \qquad (10)$$

где W — водоцементное отношение; θ — степень гидратации цемента в бетоне, выражающаяся отношением массы прогидратированного цемента к массе всего цемента (θ=0,67); γ — коэффициент, учитывающий расширение цемента при его гидратации. Для обычного портландцемента $\gamma = 1,58$; β — доля растворимого вещества в цементе $\left(\beta = \frac{1}{1,2} = 0,83\right)$.

Вычислим недостающие величины. Величина μ_1 рассчитывается по химической реакции и учитывает необходимое количество кислоты для нейтрализации одного грамма щелочи цементного камня, т. е. μ_1 рассчитывается по реакции:

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 = CaSO_4 + 2H_2O. \qquad (11)$$

Величина m_1 — это количество вещества, которое может раствориться в воде в единице объема бетона, она пропорциональна расходу цемента:

$m_1 = Ц\beta = 335 \cdot 0,83 = 279,2$ кг.

Кристаллогидраты (гидросиликаты, алюминаты и ферриты кальция), образующиеся при взаимодействии с водой клинкерных минералов и состав-

ляющие вместе с наполнителями цементный камень, имеют значительную равновесную растворимость в воде. Это значит, что они остаются устойчивыми при контакте с водами только в том случае, если в воде имеется достаточная концентрация $Ca(OH)_2$.

Величина $C_{1\infty}$ — это растворимость цементного камня в воде. Наиболее растворимым в воде из состава цемента является $Ca(OH)_2$, его растворимость 1,13 г/л при нормальных условиях, поэтому примем в расчет его растворимость как показатель растворимости всего цементного камня, т. е. $C_{1\infty} = 2,26 \cdot 10^{-4}$.

Величина D_1 — это коэффициент, диффузии ионов растворенного цементного камня. Принимаем: $D_1 = 10^{-3}$ см/ч.

Проведем расчет:

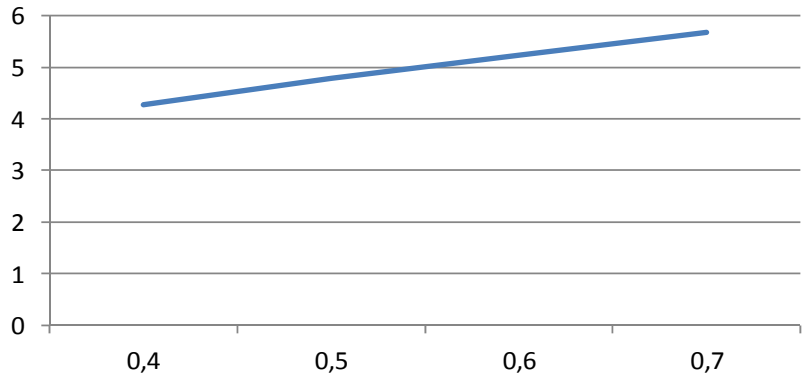
$$\Pi_2 = \frac{335}{2000}\left[0,5\frac{2000}{1000} - 0,67(1,53-1)(1-0,83)0,83\right] = 0,16.$$

Вычислим глубину коррозии:

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,16(2,26 \cdot 10^{-4} \cdot 1 \cdot 10^{-3} + 0,041 \cdot 0,4)438000}{279,2 \cdot 1\left(1 - 1,53\frac{335}{2650} - 2,8\frac{335}{2610}\right)}} = 4,28 \text{ см}.$$

Будем проводить расчет, увеличивая C_0 на 0,1 до значения $C_0 = 0,7$ кг/м^3.

По результатам расчета построим график (рис.).



Зависимость между глубиной коррозии и степенью агрессивности среды

Рассчитаем константу скорости коррозионного процесса:

$$K = \frac{\delta^2}{t} = \frac{4,28}{50} = 0,37 \text{ см}^2/\text{г}. \quad (12)$$

Из графика видно, что глубина коррозии бетона линейно возрастает с увеличением концентрации агрессивного вещества (см. рис.). С увеличением глубины коррозии возрастает константа скорости коррозионного процесса.

Предложенная зависимость позволяет установить влияние на глубину коррозии следующих параметров: пористости бетона конструкции; растворимости цементного камня в воде; коэффициента диффузии растворенного цементного камня; эффективного коэффициента диффузии агрессивного вещества через слой продуктов коррозии. Соответственно она позволяет более точно оценить глубину коррозионного повреждения бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры, П. Шиссль ; под общ. ред. Ф. М. Иванова. М. : Стройиздат, 1990. 320 с.

2. *Полак А. Ф., Ратинов В. В., Гольфман Г. Н.* Коррозия железобетонных конструкций зданий нефтехимической промышленности. Уфа : Башкирское книжное издательство, 1980. 80 с.

1. Dolgovechnost' zhelezobetona v agressivnykh sredakh / S. N. Alekseev, F. M. Ivanov, S. Modry, P. Shissl' ; pod obshch. red. F. M. Ivanova. M. : Stroyizdat, 1990. 320 s.

2. *Polak A. F., Ratinov V. V., Gol'fman G. N.* Korroziya zhelezobetonnykh konstruktsiy zdaniy neftekhimicheskoy promyshlennosti. Ufa : Bashkirskoe knizhnoe izdatel'stvo, 1980. 80 s.

© Парфенов С. Г., Моргунов М. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Парфенов С. Г., Моргунов М. В. К вопросу влияния степени агрессивности среды на коррозию железобетона // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 144—148.

УДК 691.544: 666.913.2

Р. З. Рахимов, М. И. Халиуллин, А. Р. Гайфуллин

КОМПОЗИЦИОННОЕ ГИПСОВОЕ ВЯЖУЩЕЕ С ДОБАВКАМИ ИЗВЕСТИ И КЕРАМЗИТОВОЙ ПЫЛИ

Исследовано влияние на физико-технические свойства строительного гипса совместного введения добавок извести и молотой керамзитовой пыли различного химического, минерального и фазового составов и удельной поверхности. Керамзитовую пыль, содержащую в своем составе недегидратированную глину и дегидратированные глинистые минералы с кристаллическими решетками различного уровня дефектности, следует рассматривать как гидравлически активную добавку. Разработаны составы композиционных гипсовых вяжущих средней и повышенной водостойкости.

К л ю ч е в ы е с л о в а: керамзитовая пыль, композиционное гипсовое вяжущее, известь, искусственный камень, недегидратированная глина.

Influence on physical and technical properties of construction gypsum with lime additives and powdered haydite dust of different chemical, mineral and phase composition and specific surface is investigated. The haydite dust containing non-dehydrated clay and dehydrated clay minerals with crystal lattices of various deficiency level, should be considered as hydraulically active additive. Structures of composite gypsum binders of medium and high water resistance are developed.

K e y w o r d s: haydite dust, composite gypsum binder, lime, artificial stone, non-dehydrate clay.

Разработка и производство композиционных гипсовых вяжущих повышенной прочности и водостойкости с добавками отходов промышленности является одним из способов обеспечения устойчивого развития строительной индустрии: ресурсо-, энергосбережения и экологии [1, 2].

Известными недостатками гипсовых композиций по сравнению с цементными являются их пониженная прочность и водостойкость.

В настоящее время повышение прочности и водостойкости гипсовых композиций на основе строительного гипса достигается прессованием, снижением водопотребности и повышением плотности при введении пластифицирующих добавок, гидрофобизацией, пропиткой мономерами и водорастворимыми полимерами, полимерными защитными покрытиями [1].

Наиболее экономически и технически эффективным способом повышения прочности и водостойкости гипсовых композиций является введение в их состав тонкодисперсных минеральных добавок, образующих водостойкие продукты гидратации, в частности активных минеральных добавок в сочетании с известью или портландцементом [1, 3, 4].

Для повышения прочности и долговечности гипсоизвестковых штукатурных и кладочных растворов и бетонов в их состав с древних времен вводились добавки молотого керамического кирпича, черепицы и других керамических изделий [5, 6].

В последние десятилетия в ряде работ [7, 8] показана эффективность использования в качестве активной минеральной добавки в цементные, гипсоизвестковые и гипсоцементные композиции керамзитовой пыли, которая является одной из разновидностей многотоннажных отходов промышленности строительных материалов [9]. На каждом из более 300 предприятий по производству керамзитового гравия в нашей стране ежесуточно образуется 7…8 т керамзитовой пыли [10], утилизация и рациональное использование которой является актуальной проблемой.

Однако практически во всех известных работах в каждом случае проводились исследования эффективности единичных проб керамзитовой пыли отдельных предприятий, что не позволяет определить особенности влияния химического, минерального и фазового составов керамзитовой пыли на свойства вяжущих. Недостаточны исследования и влияния дисперсности керамзитовой пыли различного состава. Керамзитовая пыль при производстве керамзитового гравия собирается в системах пылеочистки: пылеосадительных камерах, циклонах, фильтрах. В известных работах проводились исследования эффективности добавок в минеральные вяжущие керамзитовой пыли только одного из упомянутых способов очистки.

В отдельных работах не указывается производитель керамзитовой пыли, способ ее отбора и состав. В итоге может сложиться представление о том, что керамзитовая пыль — постоянный по химическому, минеральному, фазовому составу и дисперсности материал с определенной гидравлической активностью независимо от состава глинистого сырья, технологических режимов производства керамзита и способа отбора.

В настоящей работе приведены результаты исследований влияния на свойства строительного гипса совместного введения добавок извести и керамзитовой пыли различных предприятий и способов отбора.

Исследования проводились введением добавок в строительный гипс Г-6БII производства ООО «Аракчинский гипс». В состав композиционного вяжущего вводилась строительная известь второго сорта производства ООО «Казанский завод силикатных стеновых материалов» в количестве 5 % по массе.

Исследовано введение добавок проб керамзитовой пыли цехов керамзитового гравия Нижнекамского ООО «Камэнергостройпром» с циклонов пылеочистки (КП-1) и с фильтров пылеочистки (КП-2), Казанского завода керамзитового гравия ООО «Строительное управление-4» ОАО «Татстрой» с циклонов пылеочистки (КП-3), ООО «Уфимская гипсовая компания» с циклонов пылеочистки (КП-4).

Проведенные исследования показали, что все перечисленные пробы керамзитовой пыли имеют различные гранулометрический, химический, минеральный, фазовый составы и гидравлическую активность.

Содержание оксидов в пробах керамзитовой пыли меняется в пределах, % по массе: SiO_2 от 58,38 до 62,74; Al_2O_3 от 15,28 до 17,85; Fe_2O_3 от 7,04 до 9,7; CaO от 1,74 до 3,66; MgO от 2,35 до 3,01; остальных от 3,66 до 5,81. Потери при прокаливании составляют от 3,05 до 5,5 %.

Рентгенофазовый анализ показал изменения содержания в принятых при исследованиях пробах керамзитовой пыли, % по массе: глинистых минералов (гидрослюд, монтмориллонита) от 45 до 54; кварца от 14 до 24; полевых шпатов от 5 до 8; ангидрита от 0 до 3; кальцита от 0 до 3; рентгеноаморфной фазы от 14 до 30.

Исследования методом набухания выявили, что керамзитовая пыль содержит недегидратированную глину, соответственно, в пробах КП-1, КП-2, КП-3 и КП-4, % по массе: 9,5; 11,3; 12,5 и 14,1.

В исходном состоянии пробы КП-1, КП-2, КП-3 и КП-4 имеют гидравлическую активность по поглощению CaO, мг/г, соответственно: 130; 121; 118 и 115.

На основании приведенных выше и известных [4] результатов исследований керамзитовую пыль следует рассматривать как гидравлически активный минеральный материал, представляющий собой термически активированную глину, содержащую в своем составе недегидратированную глину и дегидратированные глинистые минералы с кристаллическими решетками различного уровня дефектности.

В табл. 1 приведены результаты исследований гидравлической активности керамзитовой пыли с различной тонкостью помола.

Гидравлическая активность по поглощению CaO керамзитовой пыли различной тонкости помола

Разновидность керамзитовой пыли	Тонкость помола, $м^2/кг$	Активность, мг/г
КП-1	250	336
	500	462
	800	477
КП-2	250	316
	500	424
	800	447
КП-3	250	303
	500	379
	800	385
КП-4	250	292
	500	377
	800	383

В настоящей работе исследовано влияние совместного введения керамзитовой пыли различной тонкости помола и извести на свойства теста и искусственного камня на основе строительного гипса.

На первом этапе исследований определялось влияние на свойства теста и камня содержания только добавок керамзитовой пыли. Известно отсутствие какого-либо химического взаимодействия керамзитовой пыли со строительным гипсом [7, 8].

Нормальная густота и сроки схватывания гипсового теста возрастают прямо пропорционально при увеличении содержания и тонкости помола керамзитовой пыли. При увеличении содержания добавки керамзитовой пыли от 0 до 30 % нормальная густота возрастает с 53 до 62 %, начало схватывания — с 5 мин до 9 мин 20 с, а конец схватывания с 8 мин до 11 мин 30 с.

На рис. 1 приведены зависимости изменения прочности при сжатии гипсового камня от вида и содержания добавок керамзитовой пыли с удельной поверхностью 250 $м^2/кг$.

Аналогичными закономерностями описываются изменения прочности при сжатии гипсового камня от содержания керамзитовой пыли дисперсностью 500 и 800 $м^2/кг$.

Анализ установленных закономерностей показал, что введение добавки 20…30 % керамзитовой пыли различного состава и тонкостью помола 250…800 $м^2/кг$ приводит к некоторому снижению прочности при сжатии гипсового камня: с 16,2 до 14,3…11,8 МПа, что позволяет использовать такие составы наравне с бездобавочным строительным гипсом.

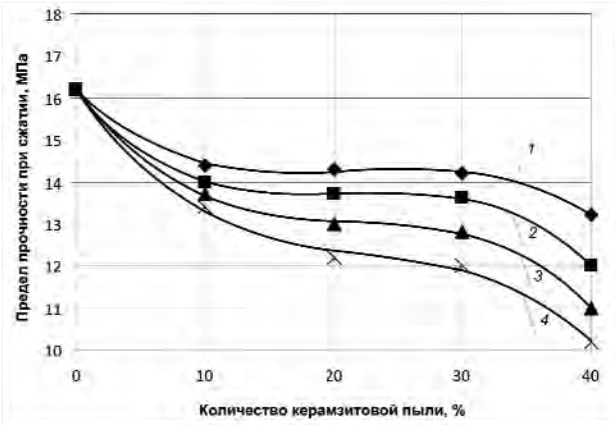


Рис. 1. Влияние вида и содержания добавок молотой керамзитовой пыли с удельной поверхностью 500 м^2/кг на предел прочности при сжатии искусственного камня на основе строительного гипса. Вид керамзитовой пыли: *1* — КП-1; *2* — КП-2; *3* — КП-3; *4* — КП-4

Подобные закономерности влияния содержания добавок инертных наполнителей на свойства камня различных вяжущих описаны и интерпретированы в работах В. И. Соломатова и Л. И. Дворкина [11].

Коэффициент размягчения гипсового камня при введении добавок керамзитовой пыли в зависимости от содержания и дисперсности несколько снижается — с 0,33 до 0,31…0,23.

Совместное введение керамзитовой пыли и извести в количестве 5 % по массе в строительный гипс позволяет повысить прочность и водостойкость искусственного камня.

На рис. 2 приведены закономерности изменения предела прочности при сжатии камня композиционного вяжущего на основе строительного гипса с введением 5 % извести от содержания керамзитовой пыли различного состава при удельной поверхности 500 м^2/кг.

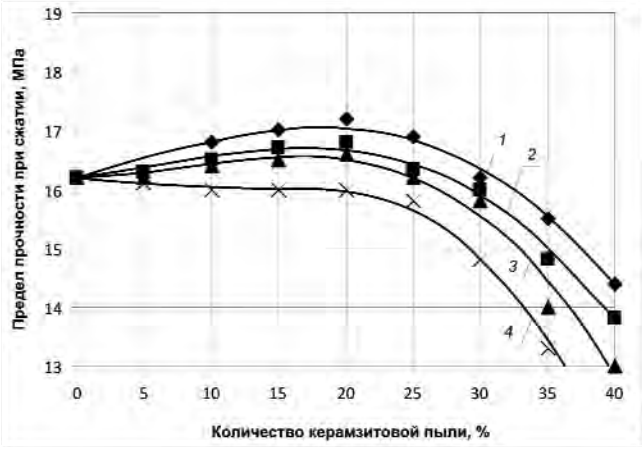


Рис. 2. Влияние вида и содержания добавок молотой керамзитовой пыли с удельной поверхностью 500 м^2/кг при совместном введении с добавкой извести в количестве 5 % от массы вяжущего на предел прочности при сжатии искусственного камня на основе композиционного гипсового вяжущего. Вид керамзитовой пыли: *1* — КП-1; *2* — КП-2; *3* — КП-3; *4* — КП-4

Подобными закономерностями описываются изменения прочности при сжатии композиционного вяжущего на основе строительного гипса с добавками 5 % извести и керамзитовой пыли с удельной поверхностью 250 и 800 м^2/кг.

Анализ установленных закономерностей показал, что совместное введение добавок извести в количестве 5 % по массе и 20…25 % керамзитовой пыли различного состава с удельной поверхностью от 250 до 800 м^2/кг обеспечивает в одних случаях повышение прочности вяжущего с 16,2 до 17,3 МПа, в других — прочность на уровне прочности бездобавочного вяжущего, в третьих — некоторое снижение прочности до 14…15 МПа. Наибольшее повышение прочности достигается при введении добавки КП-1 дисперсностью 500 м^2/кг.

На рис. 3 приведены результаты исследований закономерностей изменения коэффициента размягчения композиционного гипсового вяжущего с добавками 5 % извести и керамзитовой пыли различного состава с удельной поверхностью 500 м^2/кг.

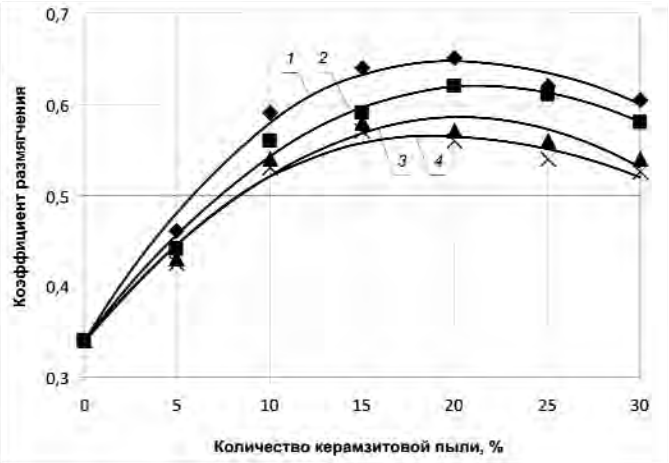


Рис. 3. Влияние вида и содержания добавки молотой керамзитовой пыли с удельной поверхностью 500 м^2/кг при совместном введении с добавкой извести в количестве 5 % от массы вяжущего на коэффициент размягчения искусственного камня на основе композиционного гипсового вяжущего. Вид керамзитовой пыли: *1* — КП-1; *2* — КП-2; *3* — КП-3; *4* — КП-4

Влияние добавок керамзитовой пыли тонкостью помола 250 и 800 м^2/кг на коэффициент размягчения гипсового камня с 5 % извести описывается закономерностями, аналогичными приведенным на рис. 3. Результаты исследования показывают, что совместное введение добавок 5 % извести и керамзитовой пыли в зависимости от состава, дисперсности и содержания от 5 до 20 % приводит к повышению коэффициента размягчения камня вяжущего от 0,37 до 0,68.

Повышение прочности и водостойкости камня на основе композиционного гипсового вяжущего при совместном введении добавок извести и керамзитовой пыли связано с образованием при гидратации композиционного вяжущего водостойких и относительно высокопрочных продуктов взаимодействия извести и содержащихся в керамзитовой пыли оксидов кремния, алюминия и железа. При этом средняя плотность камня на основе композиционного гипсового вяжущего повышается до 12,3 %, снижаются на 37 % его общая пористость и в 6 раз сорбционная влажность.

Приведенные результаты исследований показывают, что введение в состав строительного гипса керамзитовой пыли различного состава и тонкости помола в количестве 20…25 % по массе совместно с 5 % извести позволяет получать композиционное вяжущее с прочностью при сжатии от 14 до 17 МПа и более, относящееся к группе средней и повышенной водостойкости, которое может применяться для производства штукатурных, кладочных и напольных растворов и низкомарочных бетонов для помещений с повышенной влажностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ферронская А. В.* Гипсовые материалы и изделия (производство и применение). Справочник. М. : АСВ, 2004. 488 с.

2. *Рахимов Р. З., Магдеев У. Х., Ярмаковский В. Н.* Экология, научные достижения и инновации в производстве строительных материалов на основе и с применением техногенного сырья // Строительные материалы. 2009. № 12. С. 8—12.

3. *Волженский А. В., Стамбулко В. И., Ферронская А. В.* Гипсоцементно-пуццолановые вяжущие, бетоны и изделия. М. : Стройиздат, 1971. 318 с.

4. *Khaliullin M. I., Rakhimov R. Z., Gayfullin A. R.* Composite gypsum binders of higher water resistance with an active mineral additive — claydite dust // Non-Traditional Cement & Concrete IV. Proceedings of the International Conference. Brno : Brno University of Technology & ŽPSV, a.s., Uherský Ostroh, 2011. S. 331—337.

5. *Ветрувий М.* Десять книг об архитектуре. М. : Изд-во Всесоюзной Академии архитектуры, 1936. 331 с.

6. *Значко-Яворский И. Л.* Очерки истории вяжущих веществ от древнейших времен до середины XIX века. М. — Л. : АН СССР, 1963. 500 с.

7. *Баженов Ю. М., Коровяков В. Д., Денисов Г. А.* Технология сухих строительных смесей. М. : АСВ, 2003. 96 с.

8. *Лесовик В. С., Погорелов С. А., Строкова В. В.* Гипсовые вяжущие материалы и изделия : учеб. пособие. Белгород : БелгТАСМ, 2000. 224 с.

9. Сборник удельных показателей образования отходов производства и потребления. М. : Государственный комитет РФ по охране окружающей среды, 1999. 52 с.

10. *Онацкий С. П.* Производство керамзита. М. : Стройиздат, 1987. 333 с.

11. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Л. И. Дворкин, В. И. Соломатов, В. Н. Выровой, С. М. Чудновский. Киев : Будивельник, 1996. 136 с.

1. *Ferronskaya A. V.* Gipsovye materialy i izdeliya (proizvodstvo i primenenie). Spravochnik. M. : ASV, 2004. 488 s.

2. *Rakhimov R. Z., Magdeev U. Kh., Yarmakovskiy V. N.* Ekologiya, nauchnye dostizheniya i innovatsii v proizvodstve stroitel'nykh materialov na osnove i s primeneniem tekhnogennogo syr'ya // Stroitel'nye materialy. 2009. № 12. S. 8—12.

3. *Volzhenskiy A. V., Stambulko V. I., Ferronskaya A. V.* Gipsotsementno-putstsolanovye vyazhushchie, betony i izdeliya. M. : Stroyizdat, 1971. 318 s.

4. *Khaliullin M. I., Rakhimov R. Z., Gayfullin A. R.* Composite gypsum binders of higher water resistance with an active mineral additive — claydite dust // Non-Traditional Cement & Concrete IV. Proceedings of the International Conference. Brno : Brno University of Technology & ŽPSV, a.s., Uherský Ostroh, 2011. S. 331—337.

5. *Vetruviy M.* Desyat' knig ob arkhitekture. M. : Izd-vo Vsesoyuznoy Akademii arkhitektury, 1936. 331 s.

6. *Znachko-Yavorskiy I. L.* Ocherki istorii vyazhushchikh veshchestv ot drevneyshikh vremen do serediny XIX veka. M. — L. : AN SSSR, 1963. 500 s.

7. *Bazhenov Yu. M., Korovyakov V. D., Denisov G. A.* Tekhnologiya sukhikh stroitel'nykh smesey. M. : ASV, 2003. 96 s.

8. *Lesovik V. S., Pogorelov S. A., Strokova V. V.* Gipsovye vyazhushchie materialy i izdeliya : ucheb. posobie. Belgorod : BelgTASM, 2000. 224 s.

9. Sbornik udel'nykh pokazateley obrazovaniya otkhodov proizvodstva i potrebleniya. M. : Gosudarstvennyy komitet RF po okhrane okruzhayushchey sredy, 1999. 52 s.

10. *Onatskiy S. P.* Proizvodstvo keramzita. M. : Stroyizdat, 1987. 333 s.

11. Tsementnye betony s mineral'nymi napolnitelyami / L. I. Dvorkin, V. I. Solomatov, V. N. Vyrovoy, S. M. Chudnovskiy. Kiev : Budivel'nik, 1996. 136 s.

© Рахимов Р. З., Халиуллин М. И., Гайфуллин А. Р., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Рахимов Р. З., Халиуллин М. И., Гайфуллин А. Р. Композиционное гипсовое вяжущее с добавками извести и керамзитовой пыли // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 149—155.

УДК 666.94.052.6

В. П. Селяев, Т. А. Низина, А. В. Балбалин

МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ МОДИФИКАТОРЫ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ОСНОВЕ МИНЕРАЛЬНЫХ ДОБАВОК И ПОЛИКАРБОКСИЛАТНЫХ ПЛАСТИФИКАТОРОВ

Рассматривается влияние минеральных добавок (три вида микрокремнезема и метакаолин) на реологические и прочностные характеристики цементных композитов. Изучено изменение водопотребности, водопоглощения по массе и объем открытых капиллярных пор цементных композитов с многофункциональными модификаторами на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: нормальная густота, плотность, предел прочности при сжатии, цементные композиты, минеральные добавки, микрокремнезем, метакаолин, суперпластификатор.

The authors examine the influence of mineral additives (three types of silica fume and metakaolin) on rheological and strength characteristics of cement composites. Water requirement, weight water absorption and volume of open capillary pores of cement composites with multifunctional modifiers based on mineral additives and polycarboxylate plasticizers are investigated.

K e y w o r d s: normal consistency, density, compressive strength, cement composites, mineral additives, silica fume, metakaolin, superplasticizer.

Современная технология изготовления бетона предлагает широкое использование разнообразных добавок для направленного изменения его свойств и экономии основных ресурсов [1]. Для различных видов строительных работ требуются бетоны и цементные растворы, отвечающие различным, порой специфическим, требованиям по прочности, водонепроницаемости, стойкости к действию агрессивных сред и т. п. Разнообразить номенклатуру выпускаемых бетонов и растворов помогают многочисленные добавки, позволяющие достигать требуемых характеристик составов с одновременным снижением расхода цемента. Наиболее перспективными добавками, позволяющими повысить плотность и прочность и, как следствие, морозостойкость и коррозионную стойкость цементных композитов, являются минеральные добавки (МД), представляющие собой порошки различной минеральной природы, получаемые на основе природных материалов и техногенного сырья [2].

Введение активных МД в бетоны, смеси и растворы различного назначения в связи с их высокой тонкостью помола и, соответственно, развитой поверхностью зерен минерального порошка неминуемо сопряжено с необходимостью применения высокоэффективных добавок-пластификаторов для регулирования реологических свойств бетонных смесей и растворов. На сегодняшний день наибольшей эффективностью среди таких добавок обладают суперпластификаторы на поликарбоксилатной основе.

Разработка эффективных многофункциональных добавок на основе мелкодисперсных минеральных порошков и поликарбоксилатных пластификаторов, несомненно, является актуальной задачей, решение которой позволит существенно повысить эксплуатационные характеристики цементных композитов при одновременном снижении расхода цемента.

В качестве объекта исследования был выбран цемент марки ЦЕМ I 42,5Б производства ОАО «Мордовский цементный завод» и минеральные наполнители — метакаолин и микрокремнезем трех видов — братский, новокузнецкий уплотненный и новокузнецкий неуплотненный. Для обеспечения необходимых реологических свойств в состав вводился высококачественный пластификатор для строительных материалов на основе цементных вяжущих Melflux 1641 F (MF 1641).

В качестве контрольного был принят цементный раствор с В/Ц=0,27. Содержание всех видов микрокремнезема варьировалось на уровне 5, 10 и 15 %, метакаолина — 1, 3, 5 % от массы вяжущего, вводимого взамен части цемента, суперпластификатора Melflux 1641 F — 0,4 и 0,8 % от массы вяжущего.

Микрокремнезем (МК) — отход производства кремнийсодержащих сплавов, состоящий из сферических частиц размером 0,01…0,1 мкм и содержащий до 95 % чистого аморфного кремнезема, способного активно реагировать с известью, выделяемой портландцементом при его гидратации с образованием нерастворимых в воде вяжущих. Высокоактивный метакаолин (ВМК) — искусственный экологически чистый материал, продукт дегидратации каолиновой глины (природного гидроалюмосиликата $Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot H_2O$). ВМК представляет собой порошок от белого до серовато-бежевого или розового цветов со средним размером частиц 1...5 мкм. По своей химической природе ВМК существенно отличается от МК, представляя собой смесь аморфного кремнезема и глинозема практически в равных количествах. Частицы ВМК имеют пластинчатую форму, что обусловливает при указанном размере частиц высокую удельную поверхность, достигающую 30 $м^2/г$ [3].

Нормальная густота определяет водопотребность вяжущего и является важнейшей характеристикой цементных композитов. Введение в состав цементных композиций МД, обладающих достаточно высокой удельной поверхностью, приводит к значительному повышению водопотребности (рис. 1), что наиболее ярко проявляется для составов, содержащих новокузнецкий уплотненный или братский микрокремнезем. При условии обеспечения равноподвижности исследуемых составов отношение В/Ц для композитов с максимальным (15 % от массы цемента) содержанием данных добавок без пластификатора достигает, соответственно, 34 и 39 %. Введение эффективного поликарбоксилатного пластификатора Melflux 1641 F в количестве 0,4…0,8 % от массы связующего позволяет снизить водопотребность наполненных МД составов на 40 % по отношению к составам без МД.

Анализ изменения нормальной густоты цементного теста в присутствии МД показал, что введение до 10 % новокузнецкого неуплотненного микрокремнезема при содержании пластификатора от 0,3 до 0,7 % от массы вяжущего не приводит к повышению водопотребности (рис. 1, *а*). Для составов с другими видами исследуемых МД наибольшая водопотребность для получения равноподвижных систем зафиксирована при их максимальном содержании (рис. 1).

Наибольший эффект от введения пластификатора для составов с микрокремнеземом новокузнецким неуплотненным наблюдается (в зависимости от содержания добавки) в интервале от 0,25...0,4 % до 0,65…0,75 % от массы вяжущего (см. рис. 1, *а*). В случае использования уплотненного микрокремнезема этого же производителя добиться необходимой реологии смеси при содержании добавки более 8 % возможно при введении не менее 0,5 % пластификатора (см. рис. 1, *б*). Несмотря на высокие абсолютные значения водо-

потребности для составов с братским микрокремнеземом, обладающим значительной удельной поверхностью, введение суперпластификатора позволяет получить хороший водоредуцирующий эффект (см. рис. 1, *в*). Введение пластификатора в системы, содержащие метакаолин, также приводит к значительному уменьшению водопотребности (см. рис. 1, *г*).

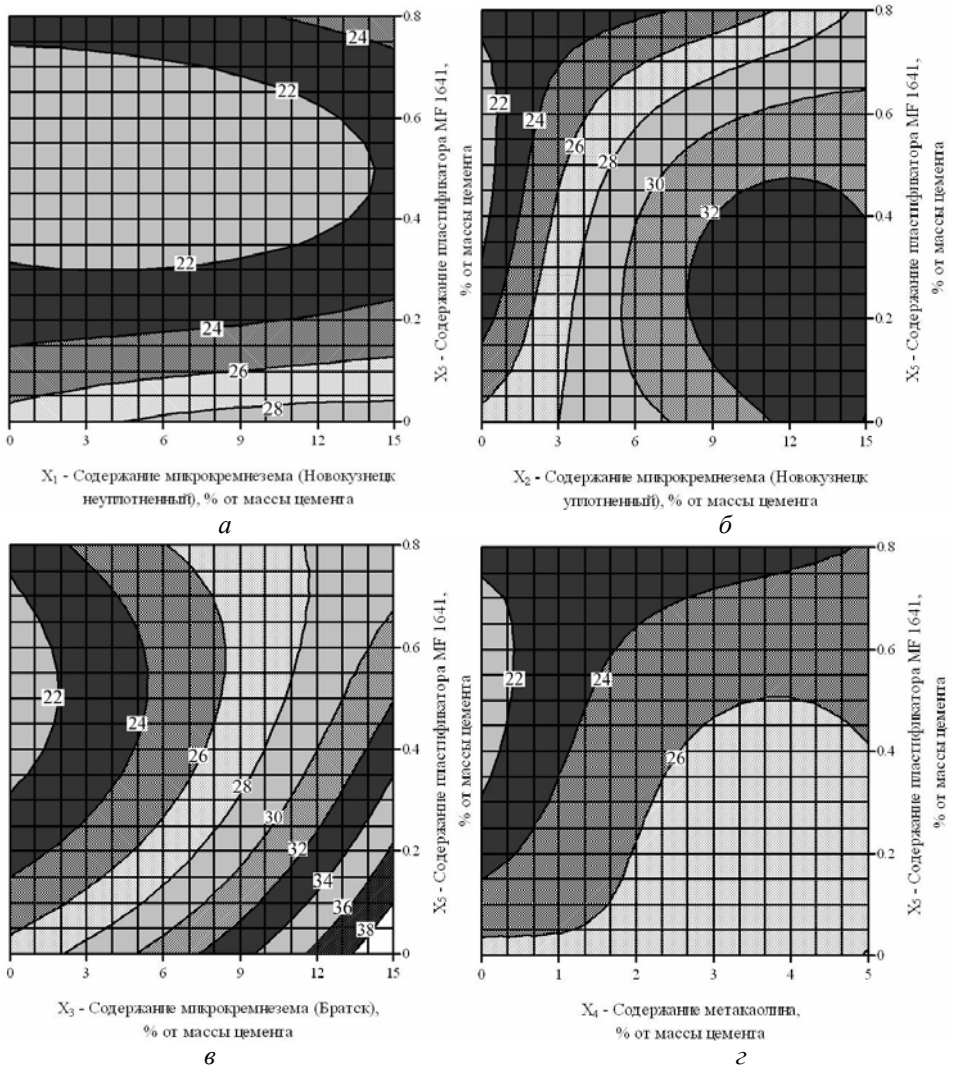


Рис. 1. Изолинии изменения нормальной густоты, %, цементных композитов с минеральными добавками: *а* — микрокремнезем новокузнецкий неуплотненный; *б* — микрокремнезем новокузнецкий уплотненный; *в* — микрокремнезем братский; *г* — метакаолин

Как следствие, повышенная водопотребность составов без пластификаторов с высоким содержанием МД ведет к падению плотности и предела прочности цементного камня (рис. 2). Основными механизмами повышения прочности наполненных цементных систем являются уплотнение структуры цементных материалов, создание условий для сближения частиц, образование контактов между ними и формирование кристаллических контактных зон на поверхности частиц, повышающих прочность структуры [2].

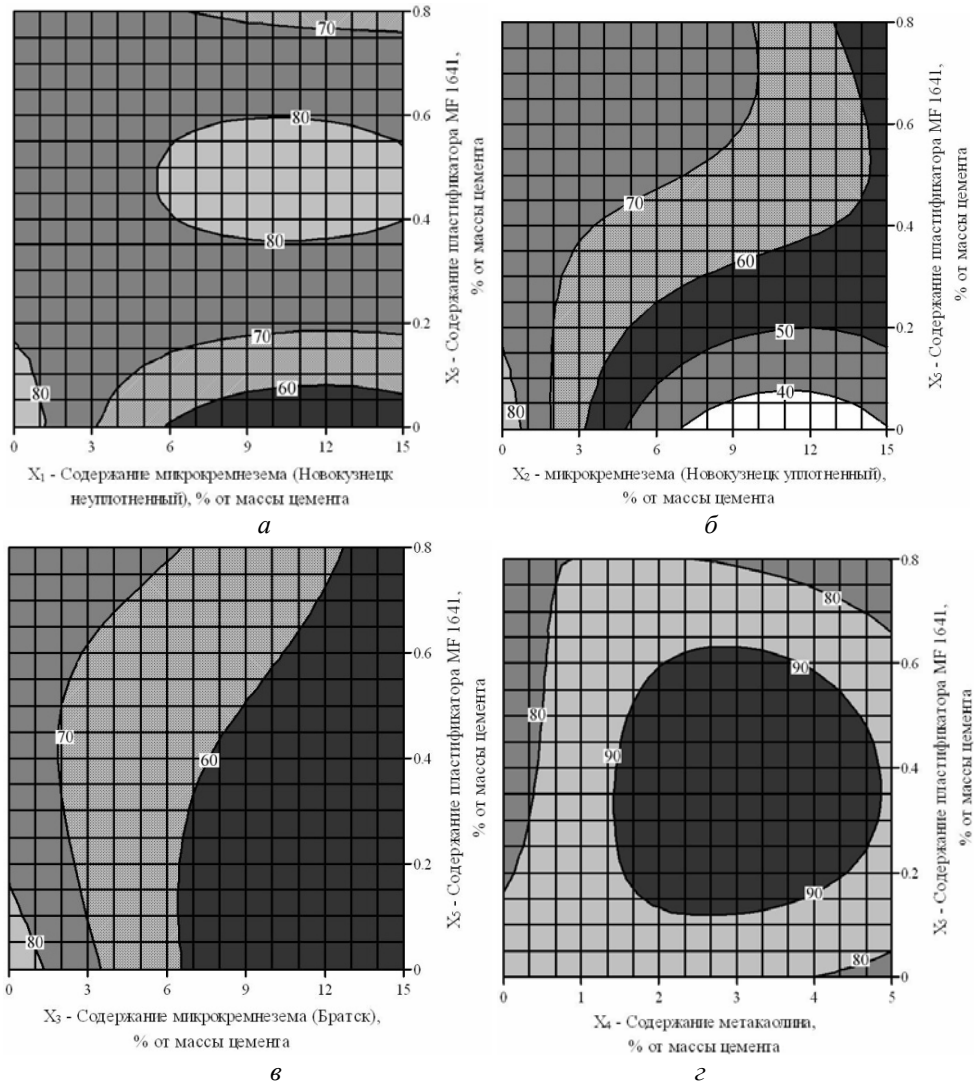


Рис. 2. Изолинии изменения предела прочности при сжатии, МПа, 28 сут, цементных композитов с минеральными добавками: *а* — микрокремнезем новокузнецкий неуплотненный; *б* — микрокремнезем новокузнецкий уплотненный; *в* — микрокремнезем братский; *г* — метакаолин

Оптимальные составы по прочностным показателям получены при введении от 6 до 15 % микрокремнезема новокузнецкого неуплотненного и содержании пластификатора 0,4…0,6 % от массы цемента (см. рис. 2, *а*). Использование в качестве минеральных добавок новокузнецкого уплотненного (рис. 2, *б*) и братского (см. рис. 2, *в*) микрокремнеземов не позволило в исследуемых диапазонах получить составы, не уступающие контрольному немодифицированному по прочности. Наилучший результат получен для композитов с содержанием метакаолина 2…4,5 % и пластификатора 0,2…0,6 % от массы цемента. Для данного наполнителя предел прочности при сжатии в зоне оптимума превышает 90 МПа (см. рис. 2, *г*).

Позитивное влияние пластификаторов на растворную смесь и физико-механические характеристики растворов реализуется посредством нескольких механизмов:

резкого повышения подвижности растворной смеси, улучшения удобоукладываемости при повышении плотности, гомогенности и снижении дефектности структуры раствора;

водоредуцирования растворной смеси, снижения общей пористости при значительном повышении прочности.

Использование минеральных модификаторов на основе микрокремнезема и метакаолина включает в работу, помимо суперпластификации, дополнительные механизмы:

химическое превращение в низкоосновные гидросиликаты кальция механически слабой гидратной фазы портландцемента;

улучшение дифференциальной пористости цементного камня с ее приближением к одноранговой тонкодисперсной структуре [4].

Применение комплексных добавок позволяет максимально использовать положительные и устранить отрицательные свойства индивидуальных добавок. Правильно сочетая типы и количественные соотношения добавок, можно направленно регулировать структуру и, соответственно, физико-механические свойства цементного камня [5].

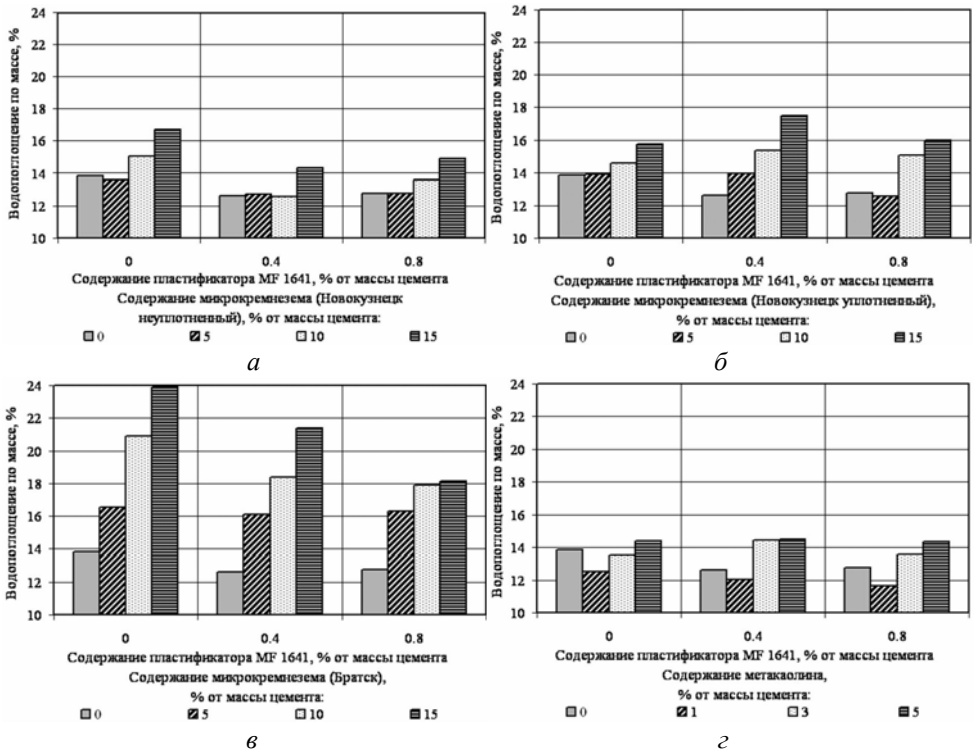


Рис. 3. Гистограммы изменения водопоглощения по массе цементных композитов с минеральными добавками: *а* — микрокремнезем новокузнецкий неуплотненный; *б* — микрокремнезем новокузнецкий уплотненный; *в* — микрокремнезем братский; *г* — метакаолин

Анализ водопоглощения показал, что наибольший прирост массы наблюдается для составов с братским микрокремнеземом (см. рис. 3, *в*). Увеличение содержания пластификатора в этих составах до 0,8 % позволяет существенно улучшить структуру и снизить водопоглощение. В случае использования микрокремнезема новокузнецкого уплотненного и неуплотненного в количестве 5 % от массы вяжущего возможно получить составы, водопоглощение по массе которых сопоставимо с контрольными составами (см. рис. 3, *а*, *б*). Повышение содержания микрокремнезема до 10…15 % и метакаолина до 3…5 % приводит к повышению данной характеристики.

Наилучший результат зафиксирован для композитов с содержанием метакаолина 1 % от массы цемента. При введении данного количества ВМК снижение водопоглощения по массе по сравнению с бездобавочными составами наблюдается как для пластифицированных систем, так и для композиций без Melflux 1641 F (см. рис. 3, *г*).

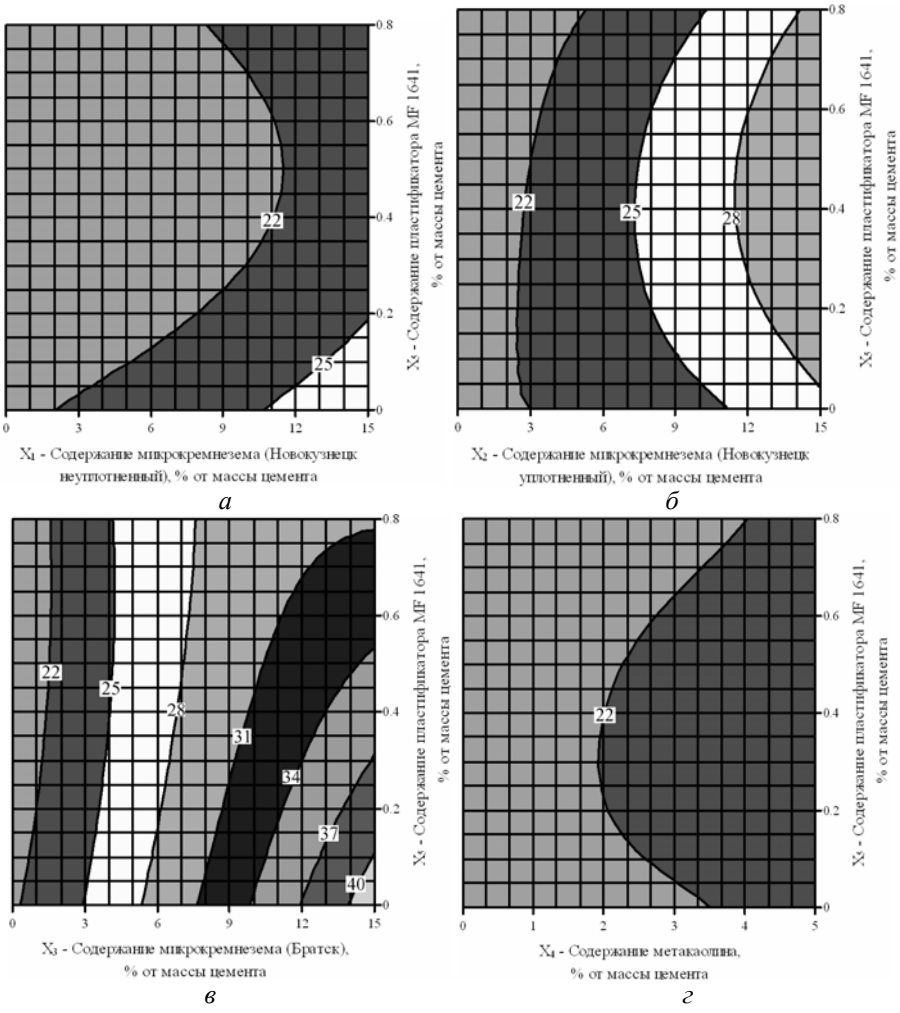


Рис. 4. Изолинии изменения объема открытых капиллярных пор цементных композитов с минеральными добавками: *а* — микрокремнезем новокузнецкий неуплотненный; *б* — микрокремнезем новокузнецкий уплотненный; *в* — микрокремнезем братский; *г* — метакаолин

Значения открытой капиллярной пористости определяли по кинетике водопоглощения образцов по ГОСТ 12730.4—78 «Бетоны. Методы определения показателей пористости». В ходе исследований выявлено (см. рис. 4), что наибольшей пористостью обладают составы, содержащие братский и новокузнецкий уплотненный микрокремнеземы. Введение в состав от 8 до 11 % микрокремнезема новокузнецкого неуплотненного в присутствии MF 1641 (0,2…0,8 % от массы цемента) позволяет получить составы, не уступающие немодифицированным (рис. 4, *а*). Следует отметить, что применение МД с содержанием метакаолина до 2…3,5 % от массы цемента не приводит к повышению пористости (рис. 4, *г*). Установлено, что введение комплексных добавок на основе метакаолина приводит к снижению открытой капиллярной пористости и среднего размера пор, а также увеличению равномерности распределения пор по объему. Совокупность этих факторов способствует повышению эксплуатационных качеств цементных растворов и бетонов.

Наиболее плотная структура с наименьшей пористостью зафиксирована для составов с 1%-м содержанием метакаолина, что, очевидно, связано с гранулометрией ВМК, дополняющей структуру цемента. Увеличение содержания пластификатора позволяет существенно улучшить структуру и снизить водопоглощение цементного камня.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что ультрадисперсный размер частиц МД обусловливает их высокую водопотребность и загущающую способность цементных растворов. Наиболее рациональным способом повышения эффективности модификаторов цементных композитов на основе минеральных добавок является их применение совместно с суперпластификаторами. Введение в состав минеральных добавок в комплексе с пластификатором Melflux 1641 F существенно влияет на кинетику твердения и подвижность цементного композита, позволяя получать в зонах оптимума композиции с требуемой реологией, высокой прочностью и низкой проницаемостью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Батраков В. Г.* Модифицированные бетоны. Теория и практика. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1998. 768 с.

2. *Тараканов О. В., Тараканова Е. О.* Применение комплекса минеральных добавок в составе органоминеральных модификаторов бетона [Электронный ресурс] // СтройПРОФИль 2009. № 8 (78). URL: http://stroyprofile.com/archive/3810 (дата обращения: 25.12.2012).

3. *Caladrone M. A., Gruber K. A. and Burg R. G.* 1994 High Reactivity Metakaolin // A. New Generation of Mineral Admixture. Concrete International. Now. Vol. 16. № 11. P. 32—40.

4. *Сахибгареев Р. Р.* Управление процессами структурообразования модифицированных цементных бетонов : автореф. дис... д-ра техн. наук. Уфа, 2010. 51 с.

5. *Изотов В. С., Соколова Ю. А.* Химические добавки для модификации бетона. М. : Палеотип, 2006. 244 с.

1. *Batrakov V. G.* Modifitsirovannye betony. Teoriya i praktika. 2-e izd., pererab. i dop. M., 1998. 768 s.

2. *Tarakanov O. V., Tarakanova E. O.* Primenenie kompleksa mineral'nykh dobavok v sostave organomineral'nykh modifikatorov betona [Elektronnyy resurs] // StroyPROFIl' 2009. № 8 (78). URL: http://stroyprofile.com/archive/3810 (data obrashcheniya: 25.12.2012).

3. *Caladrone M. A., Gruber K. A. and Burg R. G.* 1994 High Reactivity Metakaolin // A. New Generation of Mineral Admixture. Concrete International. Now. Vol. 16. № 11. P. 32—40.

4. *Sakhibgareev R. R.* Upravlenie protsessami strukturoobrazovaniya modifitsirovannykh tsementnykh betonov : avtoref. dis... d-ra tekhn. nauk. Ufa, 2010. 51 s.

5. *Izotov V. S.*, *Sokolova Yu. A.* Khimicheskie dobavki dlya modifikatsii betona. M. : Paleotip, 2006. 244 s.

© Селяев В. П., Низина Т. А., Балбалин А. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Селяев В. П., Низина Т. А., Балбалин А. В. Многофункциональные модификаторы цементных композитов на основе минеральных добавок и поликарбоксилатных пластификаторов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 156—163.

УДК 678.664

Ю. А. Соколова, Е. М. Готлиб, А. Г. Соколова

ПОЛИУРЕТАНОВЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ПЛАСТИФИЦИРОВАННЫЕ ЭДОС

Полиуретаны широко применяются в строительстве для производства химически стойких наливных полов в производственных помещениях нефтехимического комплекса.

Их использование перспективно для получения антикоррозионных покрытий, лакокрасочных материалов, клеевых и герметизирующих составов и других современных материалов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пластификатор, полиуретановые композиционные материалы, уретанообразование, термодеструкция.

Polyurethane is widely used in construction for production of chemically persistent poured floor in industrial premises of oil and chemical complexes.

Their use is prospective for production of corrosion resistant coatings, paint-and-lacquer materials, clay and sealant compounds and other modern materials.

K e y w o r d s: plasticizing agent, polyurethane composite materials, urethane units, thermal destruction.

Полиуретаны обладают уникальным комплексом эксплуатационных свойств, регулируемых в широких пределах. В то же время высокая стоимость значительно ограничивает область их практического применения, особенно в такой материалоемкой области, как строительство. В связи с этим подбор недорогих модифицирующих добавок, улучшающих экономические показатели полиуретановых материалов с сохранением их деформационно-прочностных характеристик и устойчивости к агрессивным воздействиям, представляет большой практический интерес.

Пластификатор ЭДОС может быть успешно использован с целью направленного регулирования свойств и снижения стоимости полиуретановых композиционных строительных материалов (ПКМ) [1].

Методом ИК-спектроскопии установлено (рис. 1), что при модификации полиуретанов происходит взаимодействие изоцианатных групп полиизоцианата (ПИЦ) с гидроксильными группировками ЭДОС по реакции уретанообразования [2]. Это дает возможность считать его не только пластификатором, но и модифицирующим агентом для ПКМ.

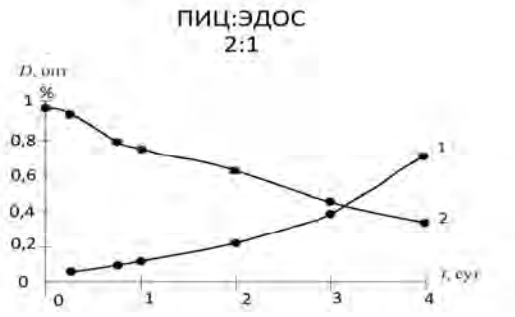


Рис. 1. Кинетика взаимодействия системы ПИЦ — ЭДОС: *1* — уретановая группа (1720 $см^{-1}$); *2* — изоцианатная группа (2275 $см^{-1}$)

Действительно, введение пластификатора ЭДОС способствует резкому увеличению скорости отверждения полиуретановых композиций. Кроме того, необходимо иметь в виду, что параллельно с проходящими процессами уретанообразования (1) имеет место реакция аллофанатообразования по (2):

$$\sim R — OH + OCN — R' \sim \rightarrow \sim R — O — CO — NH — R' \sim \quad (1)$$

полиуретан полиизоцианат уретановая группа

$$\sim R — NCO + \sim R' — NH – CO — R \sim \rightarrow \sim R' — \underset{\displaystyle CO — NH — R' \sim}{\overset{\displaystyle |}{N}} — CO — O — R \sim \quad (2)$$

полиизоцианатуретановая группа аллофанатная группа

Как видно из табл. 1, увеличение количества пластификатора приводит к росту пластичности. Кроме того, введение ЭДОС влияет на режим приготовления резиновой смеси, уменьшая время смешения на вальцах. При небольших дозировках (от 5,0 до 7,5 %) ЭДОС действует как классический пластифицирующий агент, увеличивая подвижность молекулярных цепей, что отражается в росте эластичности ПКМ. В его присутствии значительно растет относительное удлинение полиуретановых композиций при одновременном некотором повышении их прочности.

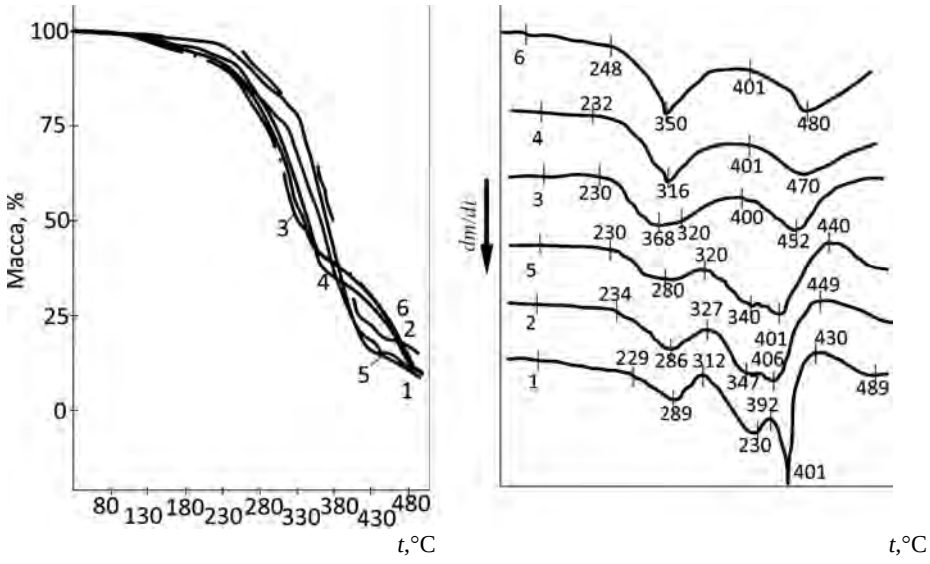
Таблица 1

Физико-механические показатели ПКМ (соотношение СКУ: ПИЦ = 100 :10)

Показатели	ЭДОС, масс. %				
Резиновая смесь	0	5	7,5	10	15
Пластичность, усл. ед.	0,1	0,3	0,4	0,4	0,3
Вулканизат					
Условная прочность при разрыве, МПа	12,7	13,1	8,4	9,4	6,0
Относительное удлинение, %	80	460	440	450	450
Остаточное удлинение, %	8	12	12	12	12
Эластичность по отскоку, %	24	34	28	28	24

Однако при содержании ЭДОС выше 7,5 масс. % эластичность и прочность образцов начинают снижаться. Это связано с ростом концентрации гидроксильных группировок, присутствующих в диоксановом спирте, входящем в состав ЭДОС. Они реагируют с изоцианатными группами ПИЦ, приводя к образованию уретановой связи (реакция 1). Таким образом, при концентрации выше 7,5 масс. % ЭДОС играет роль модификатора, взаимодействующего с ПИЦ и изменяющего параметры сетчатой структуры ПКМ [2].

При исследовании термического поведения пластифицированного ЭДОС ПУ установлено (рис. 2), что наблюдается начальный участок потери массы с небольшой скоростью в интервале 230…313 °С, что практически совпадает с данными для вулканизированного каучука. До начала разложения образец теряет 5 масс. %, в отличие от 1 масс. % для непластифицированного СКУ, что связано с присутствием легколетучих компонентов (смеси диоксановых спиртов) в составе ЭДОС [2].



а *б*

Рис. 2. Кривые ТГА (*а*) и ДТА (*б*) ПКМ и его составляющих: *1* — СКУ; *2* — СКУ+ПИЦ; *3* — пробка; *4* — СКУ+ПИЦ+пробка; *5* — СКУ+ПИЦ+ЭДОС; *6* — ЭДОС+пробка+СКУ+ПИЦ

Процесс интенсивной потери массы проходит в интервале 331…438 °С, что совпадает с данными для вулканизированного СКУ, не содержащего ЭДОС [3]. Однако потеря массы при температуре начала интенсивного разложения для ПКМ с пластификатором почти на 10 % ниже, что обусловлено химическим взаимодействием ЭДОС и вулканизующего агента [4]. Это приводит к затруднениям при термическом распаде пластифицированного ПКМ, что выражается в повышении его термостабильности.

По данным ТГА были рассчитаны кинетические параметры термодеструкции исследованных ПКМ: энергия активации на участке кривой интенсивной потери массы и порядок реакции (табл. 2).

Таблица 2

Значения энергии активации и порядка процесса деструкции ПКМ

Показатели	СКУ	СКУ+ПИЦ	СКУ+ПИЦ+ +ЭДОС
E_a, кДж/(моль·К)	31,76	36,93	38,40
n	0,6	1,0	1,2

Значения E_a всех исследованных образцов отличаются незначительно, причем E_a несколько выше у вулканизованного каучука. Наибольшее значение энергии активации наблюдается у пластифицированного ПКМ, что подтверждает возможность возникновения дополнительных энергетических затруднений в процесс термодеструкции материала, содержащего ЭДОС.

Таким образом, ЭДОС не только пластифицирует композицию, но и, благодаря своей химической активности, способствует повышению термостойкости ПКМ примерно на 9 °С (табл. 3).

Таблица 3

Влияние количества пластификатора на температурные характеристики процесса деструкции ПКМ

СКУ + ПИЦ + ЭДОС							
Содержание ЭДОС, масс. %	$T_н$, °С	Сод-е, %	$T_{н.\ инт}$, °С	Сод-е, %	$T_{к\ инт}$, °С	Сод-е, %	$Ост_{500}$, %
0	233	99,3	312	84,9	436	15,9	5,7
5	244	96,4	315	80,5	437	18,7	10,8
10	230	96,0	313	76,4	438	16,8	6,2
15	228	97,5	310	75,0	435	17,7	9,3
20	222	94,2	314	70,1	433	18,0	9,0

Таким образом, применение пластификатора ЭДОС в рецептуре полиуретановых композиций значительно увеличивает их эластичность, относительное удлинение растет практически в 5 раз. Одновременно на 10 % возрастает прочность материала. Оптимальным является содержание ЭДОС порядка 5 масс. %.

Исходя из полученных экспериментальных данных, можно сделать вывод, что ЭДОС рационально применять для уретановых материалов в области концентраций, в которой он играет роль пластифицирующей добавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шильникова Н. В. Разработка технологий получения композиционных материалов на основе полиуретанов и натуральной пробки : автореф. дис… канд. техн. наук. Казань, 2002. 16 с.

2. Композиционные материалы с целлюлозосодержащими наполнителями / Н. В. Шильникова, Л. А. Зенитова, Е. М. Готлиб, А. Г. Соколова. М. : ГАСИС, 2005. 43 с.

3. *Шильникова Н. В.*, *Галимзянова Г. Р.*, *Зенитова Л. А.* Новый прокладочный уретановый материал // Тез. докл. 7 Рос. науч.-практ. конф. резинщиков «Сырье и материалы для резиновой промышленности». М., 2000. С. 277—278.

4. Получение и исследование свойств прокладочного полимерного материала «Пробкур-В» / Н. В. Шильникова, Л. А. Зенитова, Л. В. Верижников // Химия и химическая технология. 2002. Т. 45. Вып. 6 . С. 145—146.

1. *Shil'nikova N. V.* Razrabotka tekhnologiy polucheniya kompozitsionnykh materialov na osnove poliuretanov i natural'noy probki : avtoref. dis… kand. tekhn. nauk. Kazan', 2002. 16 s.

2. Kompozitsionnye materialy s tsellyulozosoderzhashchimi napolnitelyami / N. V. Shil'nikova, L. A. Zenitova, E. M. Gotlib, A. G. Sokolova. M. : GASIS, 2005. 43 s.

3. *Shil'nikova N. V.*, *Galimzyanova G. R.*, *Zenitova L. A.* Novyy prokladochnyy uretanovyy material // Tezisy dokladov 7 Ros. nauch.-prakt. konf. rezinshchikov «Syr'e i materialy dlya rezinovoy promyshlennosti». M., 2000. S. 277—278.

4. Poluchenie i issledovanie svoystv prokladochnogo polimernogo materiala «Probkur-V» / N. V. Shil'nikova, L. A. Zenitova, L. V. Verizhnikov // Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya. 2002. T. 45. Vyp. 6 . S. 145—146.

© Соколова Ю. А., Готлиб Е. М., Соколова А. Г., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Соколова Ю. А., *Готлиб Е. М.*, *Соколова А. Г.* Полиуретановые композиционные материалы, пластифицированные ЭДОС // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки . С. 164—167.

УДК 629.042-039-419

Ю. А. Соколова, Д. Е. Жарин, А. Ф. Гумеров

МНОГОСЛОЙНЫЕ ПОЛИМЕРНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ С ПОВЫШЕННЫМИ ВИБРОЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИМИ СВОЙСТВАМИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Представлены исследования виброзвукопоглощающих свойств различных композитных материалов и систем. Представлен сравнительный анализ разработанных сэндвичевых систем и зарубежных аналогов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: композит, звукопоглощение, демпфирование.

The paper presents the research of vibro-acoustic properties of different composite materials and systems. The comparative analysis of the developed sandwich systems and their foreign versions is described.

K e y w o r d s: composite, acoustic absorption, damping.

Современное строительство требует разработки новых полимерных композиционных материалов (КМ) и систем с комплексом заданных специальных свойств (вибродемпфирующих, звукопоглощающих, теплопроводности, коррозионной стойкости и др.). Широкое распространение в производстве отечественных строительных материалов нашли вибропоглощающие КМ (лист «Радуга») и звукопоглощающие акустические материалы (АА 12.5SMT) [1].

Однако современные условия производства диктуют необходимость разработки новых композитных (сэндвичевых) систем, сочетающих в себе высокие как вибро-, так и звукопоглощающие свойства. Подобные композитные системы нашли широкое распространение в автомобильной промышленности (SCANIA, Mercedes, КАМАЗ) в качестве листовых шумо-виброизоляционных экранов.

На рис. 1 представлен сэндвичевый листовой материал с повышенными виброзвукопоглощающими свойствами.

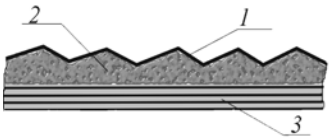


Рис. 1. Схема сэндвичевых образцов: *1* — изолирующий слой; *2* — звуковибропоглощающий слой; *3* — конструкционный слой

В качестве исходных материалов для получения сэндвичевых систем использовали: алюминиевую фольгу, полиэфирную смолу М105ТВ (ТУ 2226-130-05011907-2009), катализатор Бутанокс М-50 (ТУ 6-06-2019), композицию уретановую «СУРЭЛ-27» марки 1 ТУ 2253-027-13175942-2011. Наполнителями КМ служили керамзит ($\rho_и$=2650 кг/м^3, $S_{уд}$=250 м^2/кг), стеклоткань Ortex 560 (ТУ 5952-006-52788109-2005), стекломат М501. В рецептуре варьировали массовое содержание простого полиэфира (компонент ГСС «СУРЭЛ-27» марка 1), изоцианата (компонент ПФП «СУРЭЛ-27 марка 1) и объемное содержание наполнителей.

Оценка звукопоглощающих ($K_з$ — коэффициент поглощения звука), демпфирующих (Q^{-1}) и упругих ($E_д$) свойств композиционных материалов проведена тестированным оборудованием фирмы «Брюль и Къер» (Дания) (труба Кундта 4002, прибор для измерения динамического модуля упругости и коэффициента потерь типа 3930) согласно действующим ГОСТам и нормативным документам.

Конструктивно сэндвичевая система изготовлена из трех различных материалов-слоев. Данная система эффективно описывается с помощью динамической модели, в которой источник колебаний заменяется твердым телом массой m, а слои сэндвичевой системы связаны посредством последовательно соединенных пружин жесткости k_1, k_2, k_3 и демпферами с коэффициентами вязкости h_1, h_2, h_3. В соответствии с классической теорией колебаний коэффициент демпфирования равен [2]:

$$\alpha = \frac{F_0'}{F_0} = \sqrt{\frac{1+\frac{\gamma^2}{Q^2}}{(1-\gamma^2)^2+\frac{\gamma^2}{Q^2}}} = \sqrt{\frac{1+\gamma^2(Q^{-1})^2}{(1-\gamma^2)^2+\gamma^2(Q^{-1})^2}}, \tag{1}$$

где α — коэффициент демпфирования; F_0' — амплитуда силы, действующей на передающую конструкцию; F_0 — амплитуда внешней силы (постоянная величина); Q — добротность; Q^{-1} — коэффициент внутреннего трения; $\gamma=p/\omega$, ω — частота возмущающих сил источника вибраций; p — собственная частота композитного материала.

В сэндвичевой системе

$$\alpha = \frac{F_0'''}{F_0 - F_0' - F_0''}, \tag{2}$$

где F_0 — возмущающая сила, передаваемая источником колебаний; F_0'— сила, компенсируемая в первом слое; F_0'' — сила, компенсируемая во втором слое; F_0''' — сила, компенсируемая в третьем слое.

С учетом (2) зависимость (1) имеет вид:

$$\begin{aligned}\alpha &= \sqrt{\frac{k_3^2+(h_3p)^2}{(k_1-mp^2)^2+(h_1p)^2-k_1^2-(h_1p)^2-k_2^2-(h_2p)^2}} = \\ &= \sqrt{\frac{k_3^2+(h_3p)^2}{(k_1-mp^2)^2-(k_1^2+k_2^2)-(h_2p)^2}}.\end{aligned} \tag{3}$$

Тогда γ_1, γ_2, γ_3, добротности и коэффициенты демпфирования для многослойных полимерных композитов находятся по формулам:

$$Q_1 = \frac{m\omega_1}{h_1};\ Q_2 = \frac{m\omega_2}{h_2};\ Q_3 = \frac{m\omega_3}{h_3}, \tag{4}$$

$$k_1 = m\omega_1^2;\ k_2 = m\omega_2^2;\ k_3 = m\omega_3^2, \tag{5}$$

$$\gamma_1 = \frac{p}{\omega_1};\ \gamma_2 = \frac{p}{\omega_2};\ \gamma_3 = \frac{p}{\omega_3}\ , \tag{6}$$

где Q_1 — добротность первого слоя; Q_2 — добротность второго слоя; Q_3 — добротность третьего слоя; ω_1 — собственная частота колебаний первого слоя; ω_2 — собственная частота колебаний второго слоя; ω_3 — собственная частота колебаний третьего слоя; p — круговая частота внешней силы.

С учетом (4), (5), (6) зависимость (3) преобразуется в следующий вид:

$$\alpha = \sqrt{\frac{(m\omega_3^2)^2 + \left(\frac{m\omega_3 p}{Q_3}\right)^2}{(m\omega_1^2 - mp^2)^2 - (m\omega_1^2)^2 - (m\omega_2^2)^2 - \left(\frac{m\omega_2 p}{Q_2}\right)^2}} = \sqrt{\frac{\omega_3^4 + \left(\omega_3 p Q_3^{-1}\right)^2}{(\omega_1^2 - p^2)^2 - \omega_1^4 - \omega_2^4 - \left(\omega_2 p Q_2^{-1}\right)^2}}. \quad (7)$$

Полученная математическая модель (7) позволяет эффективно оптимизировать составы и определять коэффициент демпфирования и вибропоглощающие параметры многослойных полимерных композитов (коэффициент внутреннего трения, добротность) при условии динамического нагружения при известных частотных характеристиках колебательной системы.

Для оптимизации состава волокнисто-армированного конструкционного слоя были подготовлены серии образцов с различными схемами армирования (рис. 2, табл. 1).

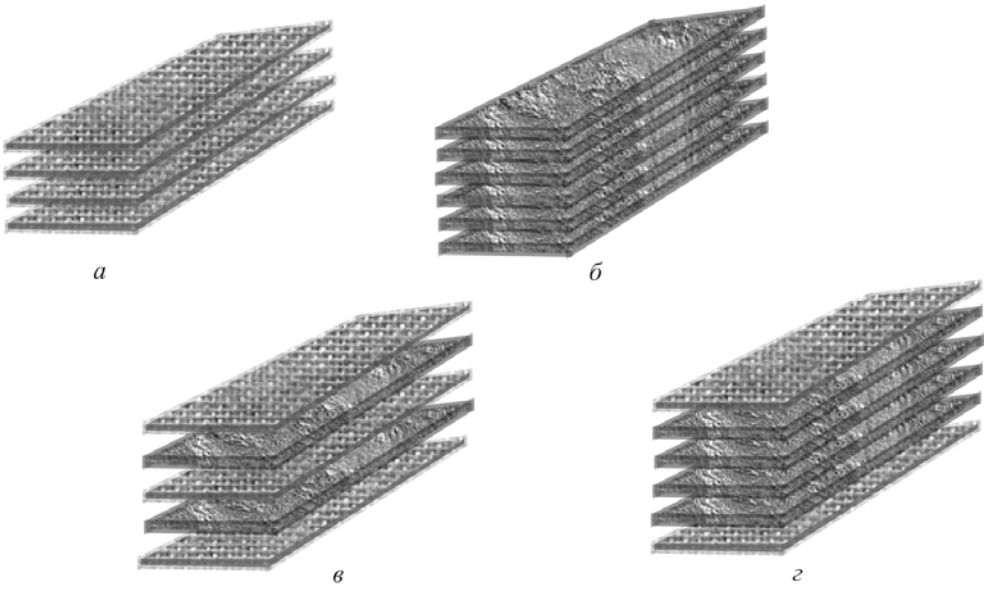


Рис. 2. Схемы армирования конструкционного слоя: *а* — ткань-ткань-ткань-ткань (т-т-т-т); *б* — мат-мат-мат-мат-мат-мат (м-м-м-м-м-м); *в* — ткань-мат-ткань-мат-ткань (т-м-т-м-т); *г* — ткань-мат-мат-мат-мат-ткань (т-м-м-м-м-т)

Таблица 1

Составы образцов конструкционного слоя с различными схемами армирования

№ образца	Состав композита	Схема армирования
1	М105ТВ — 100 мас. ч; Бутанокс М-50 — 1 мас. ч; Ortex 560 — 48 мас. ч	т-т-т-т
2	М105ТВ — 100 мас. ч; Бутанокс М-50 — 1 мас. ч; М501 — 27 мас. ч	м-м-м-м-м-м
3	М105ТВ — 100 мас. ч; Бутанокс М-50 — 1 мас. ч; Ortex 560 + М501– 42,7 мас. ч	т-м-т-м-т
4	М105ТВ — 100 мас. ч; Бутанокс М-50 — 1 мас. ч; Ortex 560 + М501– 37 мас. ч	т-м-м-м-м-т

Результаты экспериментальных исследований упругих свойств конструкционного слоя представлены в табл. 2.

Таблица 2

Влияние схемы армирования на упругие свойства волокнистых конструкционных полиэфирных композитов

Схема армирования	т-т-т-т	м-м-м-м-м-м	т-м-т-м-т	т-м-м-м-м-т
Динамический модуль упругости, МПа	200000	320000	270000	510000

В ходе экспериментальных исследований установлено, что наиболее эффективной схемой армирования является (т-м-м-м-м-т).

В ходе экспериментальных исследований виброзвукопоглощающего полиуретанового композита СУРЭЛ-27 установлено оптимальное соотношение компонентов ГСС и ПФП как 1:1, а объемное содержание наполнителя (керамзита) υ=0,5.

Высокие виброзвукопоглощающие свойства подтверждаются высокопористой микроструктурой (рис. 3).

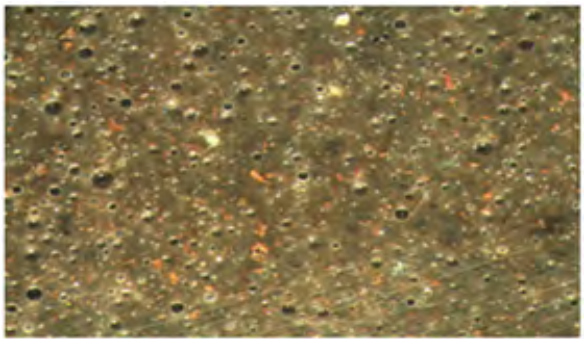


Рис. 3. Микроструктура полиуретанового композита, наполненного керамзитом (×70)

Для моделирования звукопоглощающих композиционных материалов использована классическая топологическая модель Шкловского — де-Жена [3], предполагающая формирование суперструктуры бесконечного перколяционного кластера композита в виде искаженного пространственного каркаса, состоящего из частиц наполнителя, разделенных пленочной прослойкой матрицы и делящегося на сам структурный каркас и тупиковые ветви структурного каркаса, что подтверждается микроструктурой, приведенной на рис. 3.

Для реализации этой модели произведен сравнительный анализ данных экспериментов по $K_з$ для полиуретановых композитов и расчетных значений, полученных с помощью методов теории протекания.

С учетом всех использованных опытных величин и υ произведен корреляционный анализ уравнения:

$$K_з = K_{з.м} = \left(1 + \alpha \upsilon^{\gamma}\right), \quad (8)$$

где $K_{з.м}$ — коэффициент поглощения звука полимерной матрицы; $\alpha = K_з/K_{з.м}$ — коэффициент поглощения звука единичного структурного элемента композита; υ — объемное содержание наполнителя; γ — критический индекс.

В результате проведенного анализа установлено, что α=0,5…0,58; γ=1,23. Полученный индекс γ свидетельствует о том, что именно в тупиковых ветвях структурного каркаса расположен основной механизм диссипации колебательной энергии.

Фольгирующий слой имеет сложную неравномерную гофрированную структуру, элементы которой выполнены в виде отдельных полусфер. Такая поверхность позволяет эффективно рассеивать звуковые волны, а также играет роль коррозионностойкого материала.

Результаты сравнительного анализа разработанной сэндвичевой системы и зарубежных аналогов представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнительный анализ данных по коэффициенту поглощения звука разработанной сэндвичевой системы и зарубежных аналогов

Частота звука *f*, Гц	AA 12.5SMT	SCANIA	Mercedes	Разработанный сэндвичевый композит
315	0,16	0,14	0,13	**0,12**
400	0,20	0,17	0,15	**0,22**
500	0,23	0,23	0,29	**0,24**
630	0,27	0,21	0,36	**0,46**
800	0,32	0,42	0,43	**0,65**
1000	0,45	0,47	0,59	**0,77**
1250	0,61	0,58	0,71	**0,78**
1600	0,82	0,61	0,83	**0,88**

В ходе проведенных экспериментальных исследований, а также с использованием теории виброизолирующей подвески, теории перколяции, структурно-фазовых переходов определены эффективные составы сэндвичевых листовых панелей с повышенными виброзвукопоглощающими свойствами, которые по своим характеристикам превосходят известные зарубежные аналоги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Новиков В. У.* Полимерные материалы для строительства : справочник. М. : Высш. шк., 1995. 448 с.

2. *Стрелков С. П.* Введение в теорию колебаний. М. : Главная редакция физ.-мат. лит., 1964. 440 с.

3. Синергетика дисперсно-наполненных композитов / А. Н. Бобрышев, В. Н. Козомазов, Р. И. Авдеев, В. И. Соломатов. М. : ЦКТ, 1999. 252 с.

1. *Novikov V. U.* Polimernye materialy dlya stroitel'stva : cpravochnik. M. : Vyssh. shk., 1995. 448 s.

2. *Strelkov S. P.* Vvedenie v teoriyu kolebaniy. M. : Glavnaya redaktsiya fiz.-mat. lit., 1964. 440 s.

3. Sinergetika dispersno-napolnennykh kompozitov / A. N. Bobryshev, V. N. Kozomazov, R. I. Avdeev, V. I. Solomatov. M. : TsKT, 1999. 252 s.

© Соколова Ю. А., Жарин Д. Е., Гумеров А. Ф., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Соколова Ю. А., Жарин Д. Е., Гумеров А. Ф. Многослойные полимерные композиционные материалы с повышенными виброзвукопоглощающими свойствами в строительстве // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 168—173.

УДК 625.8

В. В. Строкова, Т. В. Дмитриева

МИКРОСТРУКТУРНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ГРУНТОБЕТОНОВ В ПРИСУТСТВИИ СТАБИЛИЗАТОРА

Рассматриваются микроструктурные особенности стабилизированных пород различных генетических типов как перспективного сырья для получения грунтобетонов с высокими технико-эксплуатационными показателями.

К л ю ч е в ы е с л о в а: стабилизация грунтов, глинистые минералы, микроструктура, грунтобетон.

Microstructural peculiarities of stabilized solids of different genetic types are considered as prospective raw material for soil-concrete with high technical and performance indexes.

Key words: soil stabilization, clay mineral, microstructure, soil-concrete.

Высокий рост интенсивности дорожного движения и увеличение нагрузки транспорта выдвигают более высокие требования к транспортно-эксплуатационным характеристикам автомобильных дорог, комфортности проезда, а также бесперебойному движению по ним в течение всего года.

В настоящее время во многих регионах России намечена тенденция роста объемов строительства объектов транспортной сферы. Но тормозящим фактором является дефицит традиционных каменных материалов, что предопределяет их высокую стоимость и вызывает увеличение общей стоимости объектов строительства.

Практика строительства и эксплуатации автомобильных дорог, а также научные исследования в этой области со всей очевидностью подтвердили необходимость максимального использования верхнего слоя земляного полотна с учетом зонального различия свойств и минерального состава слагающих его пород.

Основная часть пород, залегающих в верхних слоях земляного полотна ЦФО РФ, является глинистой. Данные виды осадочных пород отличаются высокой дисперсностью, предполагающей большую изменчивость свойств при воздействии внешней среды: влаги, температуры, нагрузок.

В связи с вышеизложенным перспективным направлением строительного материаловедения является создание дорожно-строительного материала на основе местных глинистых грунтов с учетом их генетических особенностей с улучшенными показателями по водо-, морозостойкости и прочности. Данным условиям отвечают грунтобетоны с использованием стабилизатора.

Стабилизаторы являются многокомпонентными системами, положительное воздействие которых на глинистый грунт связано с возникновением новообразований, обладающих вяжущими свойствами, пластифицирующим и гидрофобизирующим воздействием [1].

Различное происхождение пород обусловливает различие в химическом и минералогическом составах. В связи с полиминеральностью и генетическими особенностями глинистые породы характеризуются большим разнообразием в микростроении, типе и характере структурных связей [2].

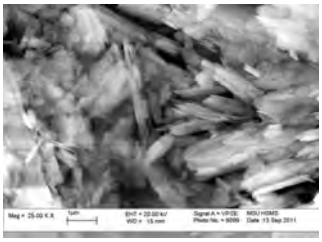
Следует отметить, что взаимодействие активных низкомолекулярных комплексов стабилизатора с глинистыми минералами является предметом пристального внимания. Несмотря на значительные успехи в области интерпретации механизмов взаимодействия органических комплексов с полимерными образованиями глин, некоторые вопросы в данной области необходимо подвергнуть дополнительному обсуждению [3].

Таким образом, для получения высоких технико-эксплуатационных характеристик грунтобетона необходимо понимание процессов, происходящих в системе глинистый грунт — стабилизатор органического происхождения.

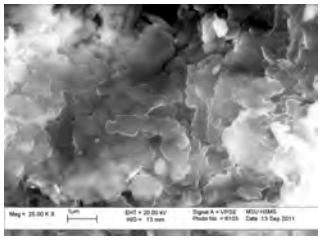
В соответствии с феноменологической моделью взаимодействия низкомолекулярных комплексов стабилизатора с породообразующими минералами грунтов степень влияния органических комплексов находится в прямой зависимости от структурно-химической природы слоистых алюмосиликатов и соответствует обобщенной последовательности: рентгеноаморфные фазы → монтмориллонит → смешаннослойные образования → иллит → каолинит. Каркасные силикаты и алюмосиликаты в данной системе выполняют роль наполнителя и не вступают в активное взаимодействие с низкомолекулярными органическими комплексами [3].

Для доказательства вышеизложенных утверждений были проведены исследования по изучению микростроения стабилизированных глинистых материалов для наиболее полного раскрытия механизма действия добавки, а также определения значимых факторов, оказывающих непосредственное влияние на процессы структурообразования грунтобетонных композитов, в состав которых входят органические комплексы. В качестве объектов исследования были выбраны мономинеральные глинистые породы, состоящие из наиболее распространенных представителей — каолинита, иллита и смектита.

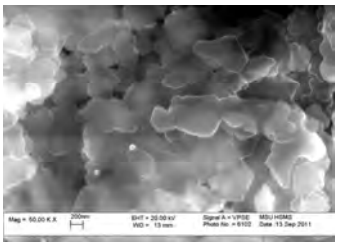
Структура каолинитсодержащего грунта после введения стабилизатора коренным образом отличается от исходного (рис. 1). «Пачки» пакетов каолинита формируют основу матрицы грунта (см. рис. 1, *а*), отличающуюся низкой водостойкостью, связанной с внедрением воды в межслоевое пространство пластинок.



а



б



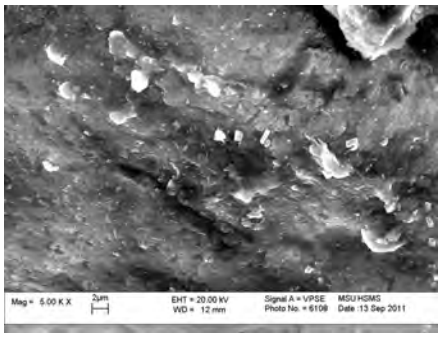
в

Рис. 1. Микроструктура каолинитсодержащего глинистого грунта:
а — исходного; *б*, *в* — стабилизированного

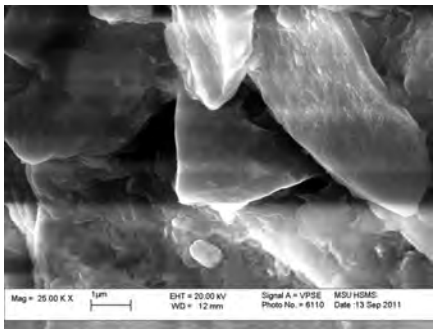
Стоит отметить высокую дисперсность как самих агрегатов (размер отдельных «пакетов» составляет 2…3 мкм), так и отдельных глинистых чешуек (толщиной до 100…200 нм). Реализация микрокомпозиционного механизма взаимодействия низкомолекулярных органических комплексов с описанными индивидами каолинита приводит к агрегированию в плоскости базиса (см. рис. 1, *б*, *в*). При этом отчетливо видны сами скрепленные между собой пластинки (размер отдельных не превышает 1 мкм) с четкими гранями. Образуемый таким образом барьер в виде пленки препятствует прониканию влаги внутрь структуры глинистого минерала. Так происходит гидрофобизация поверхности глинистой матрицы грунта, что способствует значительному расширению областей применения таких материалов.

В случае с ультрадисперсным иллитом (рис. 2) образуются сферообразные микроагрегаты (см. рис. 2, *в*, *г*). Их создание может быть связано со сворачиванием тонкодисперсных пластинок толщиной порядка 100 нм (см. рис. 2, *б*) за счет взаимодействия молекул вводимой добавки с активными центрами глинистой фазы. Размер отдельных формируемых изометричных образований не превышает 1…1,5 мкм (см. рис. 2, *г*).

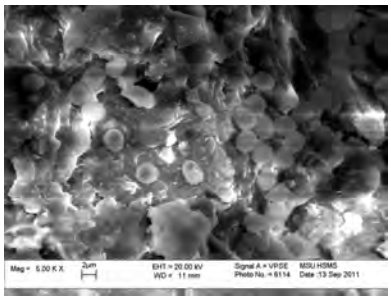
Для смектитов (рис. 3) характерно внедрение (интеркаляция) молекул в межслоевое пространство, образование в периферийных зонах водородных связей (см. рис. 3, *в*, *г*), а также взаимодействие по микрокомпозиционному механизму. В результате происходит «блокирование» гидрофильных поверхностей скрытокристаллических пластинок. Создаваемая таким образом структура отличается от образцов исходного глинистого материала (см. рис. 3, *а*, *б*).



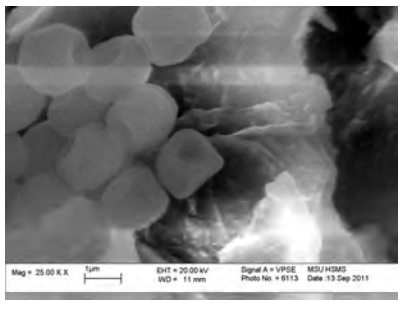
а



б

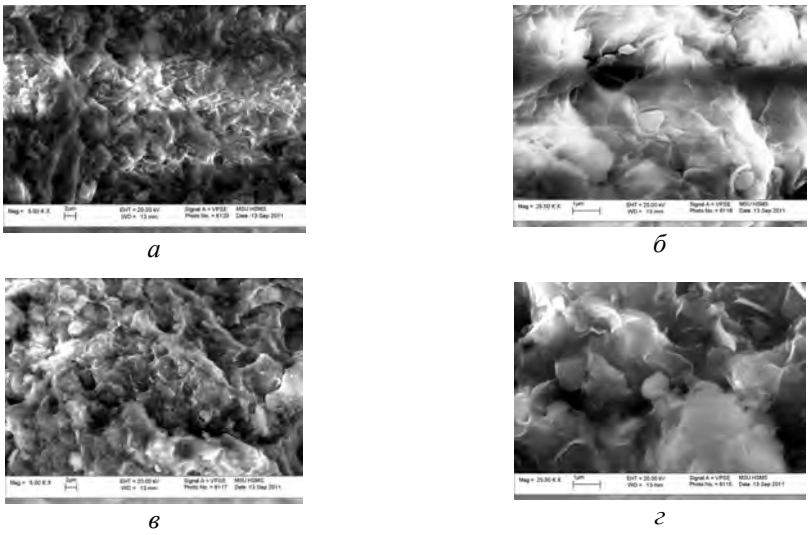


в



г

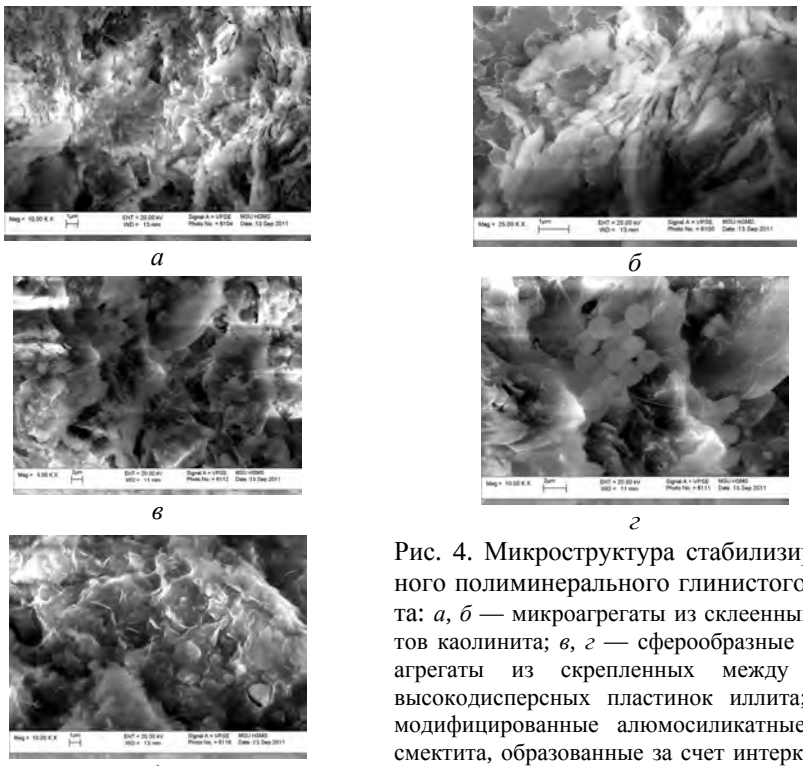
Рис. 2. Микроструктура иллитсодержащего глинистого грунта: *а*, *б* — исходного; *в*, *г* — стабилизированного



а *б* *в* *г*

Рис. 3. Микроструктура смектитсодержащего глинистого грунта: *а*, *б* — исходного; *в*, *г* — стабилизированного

Влияние вводимого органического комплекса на реальные полиминеральные системы рассматривали на примере стабилизированных глинистых грунтов региона КМА (рис. 4). Исходя из того, что минеральный состав этих пород включает описанные выше глинистые фазы, характер модифицирования аналогичен вышерассмотренным системам.



а *б* *в* *г* *д*

Рис. 4. Микроструктура стабилизированного полиминерального глинистого грунта: *а*, *б* — микроагрегаты из склеенных пакетов каолинита; *в*, *г* — сферообразные микроагрегаты из скрепленных между собой высокодисперсных пластинок иллита; *д* — модифицированные алюмосиликатные фазы смектита, образованные за счет интеркаляции и периферийной склейки молекулами добавки

В микроструктуре имеются участки микрокомпозиционной склейки «пакетов» каолинита (см. рис. 4, *а*, *б*) и ультрадисперсные сферообразные агломераты иллита (см. рис. 4, *в*, *г*). Также присутствуют участки с наличием обработанных высокодисперсных глинистых чешуек смектита (см. рис. 4, *д*). Однако для реальных систем характерно преобладание других породообразующих минералов (кварца и полевых шпатов). Влияние органокомплекса на их стабилизацию будет существенно ниже из-за больших (микроскопических) размеров этих минералов.

Таким образом, за счет вышеописанных процессов повышается водо- и морозостойкость глинистых пород как сырья для получения грунтобетонов. Образовавшиеся глинистые микрокомпозиты совместно с каркасными минералами выступают в качестве заполнителя и микронаполнителя, а также, вероятно, представляют собой активные составляющие грунтобетонных композиций. Эти образования выступают в качестве центров кристаллизации гидросиликатов кальция при введении цемента, что положительным образом сказывается на прочностных показателях дорожно-строительного материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ольховиков В. М.* Опыт использования стабилизатора глинистых грунтов // Автомобильные дороги. 1994. № 3. С. 11—13.

2. Анализ микроструктуры алюмосиликатного сырья с позиции применения его в дорожном строительстве / А. О. Лютенко, В. В. Строкова, М. С. Лебедев и др. // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова . 2011. № 2. С. 33—38.

3. *Строкова В. В., Жерновский И. В., Дмитриева Т. В.* Феноменологическая модель стабилизации глинистых грунтов низкомолекулярными органическими комплексами // Строительные материалы. 2011. № 10. С. 64—66.

1. *Ol'khovikov V. M.* Opyt ispol'zovaniya stabilizatora glinistykh gruntov // Avtomobil'nye dorogi. 1994. № 3. S. 11—13.

2. Analiz mikrostruktury alyumosilikatnogo syr'ya s pozitsii primeneniya ego v dorozhnom stroitel'stve / A. O. Lyutenko, V. V. Strokova, M. S. Lebedev i dr. // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova . 2011. № 2. S. 33—38.

3. *Strokova V. V., Zhernovskiy I. V., Dmitrieva T. V.* Fenomenologicheskaya model' stabilizatsii glinistykh gruntov nizkomolekulyarnymi organicheskimi kompleksami // Stroitel'nye materialy. 2011. № 10. S. 64—66.

© В. В. Строкова, Т. В. Дмитриева, 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Строкова В. В., Дмитриева Т. В. Микроструктурные особенности грунтобетонов в присутствии стабилизатора // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 174—178.

УДК 691.54

В. В. Строкова, В. В. Нелюбова, А. И. Бондаренко, Е. В. Кобзев

РЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СУСПЕНЗИЙ МЕХАНОАКТИВИРОВАННЫХ КВАРЦЕВЫХ КОМПОНЕНТОВ И КОМПОЗИЦИОННЫХ ВЯЖУЩИХ НА ИХ ОСНОВЕ

Изучено влияние суперпластификаторов на суспензии механоактивированных кремнеземных компонентов и композиционных вяжущих на их основе с учетом генетического типа кварца и химической основы пластификатора. Показана эффективность раздельного способа получения композиционного вяжущего для получения системы с максимальной степенью подвижности.

К л ю ч е в ы е с л о в а: сухие строительные смеси, реология, пластификатор, композиционное вяжущее, кварц, генезис.

Superplasticizer influence on suspensions of mechanically active silica components and composites of binds on their basis taking into account genetic type of quartz and a chemical basis of plasticizer is studied. The effectiveness of use of separate way of producing composite binds for receiving system with the maximum degree of fluidity is proved.

K e y w o r d s: dry construction mixes, rheology, plasticizer, composite binds, quartz, genesis.

Сухие строительные смеси (ССС) имеют неоспоримые преимущества и высокую эффективность как в техническом, так и экономическом плане, заключающиеся в повышении качества строительных работ и производительности труда, облегчении доставки их на объекты, увеличении срока хранения на строительных площадках, что обеспечивает непрерывность цикла работ и достаточный запас их непосредственно в местах потребления. Однако доля востребованности качественных сухих смесей для самовыравнивающихся полов превышает объемы, поступающие на строительный рынок.

Свойства ССС напрямую зависят от сырьевых компонентов, входящих в их состав. При этом основным носителем прочностных свойств материала на основе смесей является вяжущее, расход которого определяет себестоимость продукции в первую очередь. Переход на композиционные вяжущие, одним из которых является вяжущее низкой водопотребности, позволит при снижении доли цемента получать высокоэффективные строительные композиты. В связи с этим в работе была выдвинута гипотеза о влиянии фазовой и размерной микро- и наногетерогенности кремнеземного сырья различных генетических типов, формируемой в процессе механоактивации, и химической основы поверхностно-активных добавок на взаимодействие в системах кремнезем — пластификатор и кремнезем — пластификатор — цемент на реотехнологические характеристики растворной смеси.

В ранее опубликованных работах [1, 2] было установлено, что при механоактивации кварцевого материала в нем происходят процессы аморфизации поверхностного слоя частиц и возникновение наноразмерных кристаллитов высокотемпературной модификации кварца. При этом можно утверждать, что эти процессы носят монотонный и однонаправленный характер. Кварцевое сырье различного генетического типа ранжировано по степени эффективности механоактивационного воздействия на изменение его фазово-размерной гетерогенности в следующем ряду: гидротермальный кварц → магматогенно-интрузивный → метаморфогенный (зеленосланцевой фации метаморфизма).

Для проверки рабочей гипотезы в части влияния химической основы добавки на конечные свойства материалов было рассмотрено несколько способов введения пластификатора на различных стадиях получения композиционного вяжущего. Работами, выполненными ранее [3, 4], была доказана эффективность раздельного помола при получении композиционного вяжущего. В связи с этим в работе применяли совместный и раздельный способы получения вяжущего. Совместный помол производился одностадийно до удельной поверхности 500…550 м^2/кг. Раздельный помол осуществляли в две стадии: на первой стадии осуществляли измельчение кварцевого компонента до удельной поверхности 300…350 м^2/кг, на второй производили домол с цементом. Для изучения влияния пластификатора на процессы помола пластификатор вводили на различных стадиях получения КВ.

Реологические свойства композиционного вяжущего являются одними из определяющих при проектировании сухих строительных смесей. Среди большого количества методов определения качества композиционных вяжущих реометрия является наиболее оперативной, так как позволяет получить первичные данные в короткие сроки, в том числе и формализовать многие технологические операции и оптимизировать их протекание, а также оценить в комплексе структуру систем. Реологические и структурно-механические свойства растворной смеси проявляются в процессе их деформации, течения и разрушения. Результаты этих испытаний помогают оценить возможности использования того или иного вяжущего и суперпластификатора для конкретного материала.

Для подтверждения данной гипотезы были изучены свойства суспензий кремнеземный компонент — вода, кремнеземный компонент — ПАВ — вода, вяжущее — вода.

Количество воды затворения принималось в соответствии с нормальной густотой композиционного вяжущего. В качестве ПАВ использовались модификаторы, имеющие сопоставимый пластифицирующий эффект, но на различных химических основах: 1) на меламиноформальдегидной (Melment F10); 2) поликарбоксилатной (FOX-8H).

Для определения оптимальной концентрации суперпластификатора, необходимой для получения ВНВ, определяли реологические свойства цементных паст из ТМЦ в зависимости от концентрации добавок. Исследования проводили по методу мини-конуса, рекомендованному НИИЖБ Госстроя РФ при проведении испытаний с химическими добавками в бетон (рис. 1).

Установлено влияние генетического типа кварца на подвижность системы цемент — песок — пластификатор — вода. При использовании вяжущего на основе кремнеземного компонента с высоким содержанием β-кварца (метаморфогенный кварц) максимальный расплыв конуса у составов на поликарбоксилатной добавке достигается при дозировке 0,3 %, что в 1,5 раза ниже по сравнению с дозировкой для вяжущего на основе кремнеземного компонента с высоким содержанием α-кварца (интрузивно-магматогенный кварц). При этом расплыв конуса для вяжущего на основе обоих видов кварца с использованием поликарбоксилатной добавки одинаков. При использовании меламинформальдегидной добавки оптимальная дозировка независимо от вида кварца составляет 0,6 %, однако расплыв конуса вяжущего на основе интрузивно-магматогенного кварца на 6,5 % выше.

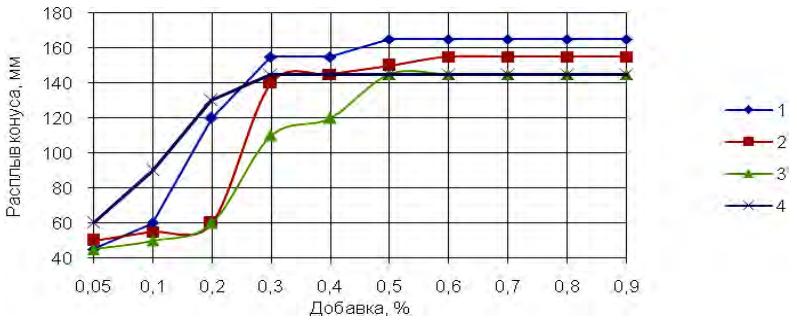


Рис. 1. Расплыв конуса ТМЦ-50 в зависимости от вида и количества пластификатора на различном кремнеземном сырье: интрузивно-магматогенный кварц с меламинформальдегидным (*1*) и поликарбоксилатным (*3*) пластификатором; метаморфогенный кварц с меламинформальдегидным (*2*) и поликарбоксилатным (*4*) пластификатором

Отмечено существенное влияние вида пластификатора на кинетику помола кварцевого компонента различного генетического типа. Кварц метаморфогенного происхождения измельчается на 30 % быстрее по сравнению с интрузивно-магматогенным кремнеземным компонентом. Помол кварцевого компонента в присутствии пластификатора характеризуется устойчивой тенденцией к сокращению времени диспергации независимо от вида кварца и типа добавки. При этом совместное измельчение кремнеземного компонента и добавки сокращает время помола на 10 % для интрузивно-магматогенного кварца с меламинформальдегидным пластификатором и на 30 % для метаморфогенного с поликарбоксилатным.

Для установления зависимости реотехнологических характеристик смесей от вида кремнеземного сырья, количества и химической основы ПАВ (поликарбоксилатной и меламинформальдегидной) были получены образцы диспергированного кварцевого компонента и композиционного вяжущего, которые в дальнейшем были суспендированы. Для каждой суспензии при помощи ротационного вискозиметра Rheotest RN4.1 были получены значения эффективной вязкости от градиента скорости сдвига. После обработки полученных результатов были построены кривые зависимости эффективной вязкости η от градиента скорости сдвига $\acute{\varepsilon}$.

Классически считается, что ПАВ в большей степени влияет на цемент, нежели на кварцевый компонент. Поэтому на первоначальном этапе были изучены реотехнологические характеристики суспензий на основе кварцевых компонентов.

Анализ реограмм кварцевых суспензий (рис. 2) позволяет сделать вывод о существенном влиянии стадии введения пластификатора на реологические свойства систем. Совместный помол кварцевого компонента и пластификатора приводит к повышению начальной вязкости системы по сравнению с суспензиями, полученными смешением молотого кварца и добавки. Механизм действия пластификатора аналогичен для кварцев обоих генетических типов и заключается в следующем: в первую очередь пластификатор выступает в роли диспергатора. При этом в процессе механоактивационного воздействия на поверхности кремнеземного компонента формируется аморфизованная оболочка и происходит возникновение высокотемпературной модификации

кварца, что, в совокупности, обеспечивает его высокую реакционную способность. Вследствие этого на ювенильной поверхности кварцевого компонента происходит хемосорбция молекул пластификатора во время их совместного измельчения, что приводит к их переориентации, за счет чего происходит гидрофобизация поверхности твердой фазы и, как следствие, увеличение вязкости системы. При этом в случае метаморфогенного кварца превалирующее влияние на вязкость системы оказывает хемосорбция, в случае интрузивно-магматогенного — диспергация.

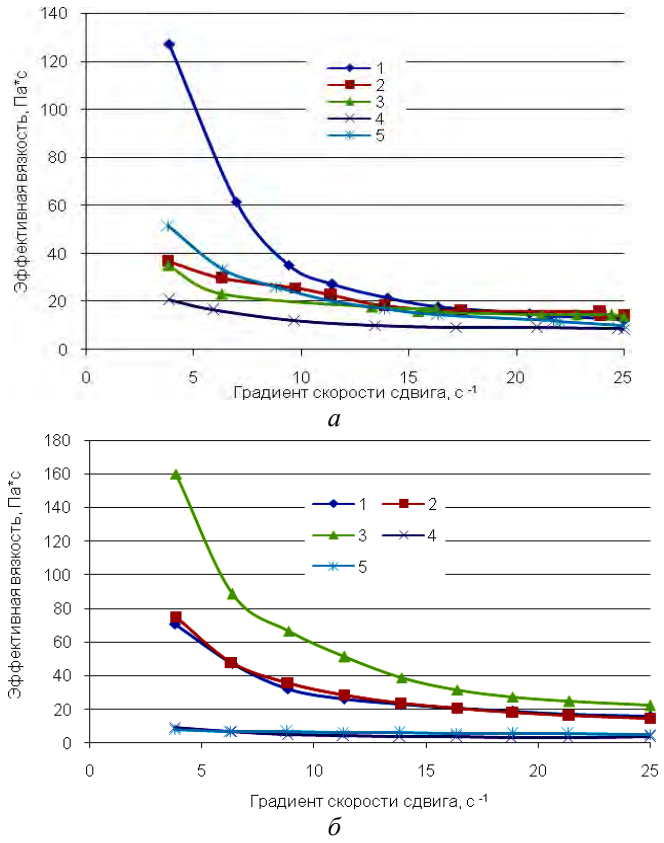


Рис. 2. Реограммы метаморфогенного (*а*) и интрузивно-магматогенного (*б*) кварца в зависимости от вида и способа введения пластификатора: *1* — молотый кварц; *2* — кварц молотый совместно с FOX-8H; *3* — кварц молотый совместно с Melment F10; *4* — молотый кварц, перемешанный с FOX-8H; *5* — молотый кварц, перемешанный с Melment F10

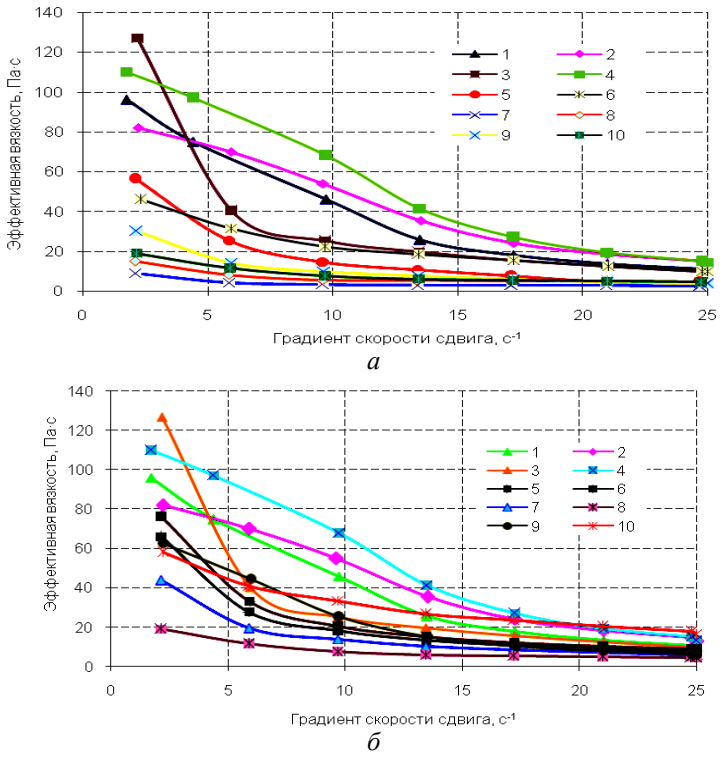
Предварительное измельчение кварца, смешение его с пластификатором и суспендирование системы приводит к формированию условий, в которых добавка взаимодействует с водой с образованием сольватной оболочки на поверхности частиц измельченного кварцевого компонента, разжижая таким образом систему.

Таким образом, изменение реологических характеристик зависит от генезиса кварцевого компонента и оказывает влияние на структурно-механические свойства растворных смесей. Показана целесообразность использования для метаморфогенного кварца пластификаторов на поликарбоксилатной основе; для интрузивно-магматогенного кварца — добавок на меламинформальдегидной основе.

Степень разжижения цементных систем суперпластификатором зависит от нескольких физико-химических факторов, таких как химический состав добавки и особенности строения молекул суперпластификатора, которые являются объектами повышенного интереса. Растворение суперпластификатора качественно можно объяснить как адсорбцию на частицах твердой фазы. Молекула суперпластификатора предупреждает агломерирование твердых частиц, а также связывание части воды, таким образом вода остается для разжижения пасты. Механизм растворения зависит от типа суперпластификатора.

Известно, что с увеличением содержания добавок в дисперсии предельное напряжение сдвига приближается к нулю, а вязкость принимает минимальное постоянное значение. Характерным для таких систем является также то, что при увеличении концентрации пластифицирующих добавок система последовательно переходит от бингамовского характера течения к ньютоновскому, а затем к дилатантному, что объясняется возникновением стесненных условий и преобладанием сил отталкивания над силами притяжения.

Суспензии композиционных вяжущих характеризуются типичным тиксотропным характером течения (рис. 3), однако кинетики снижения вязкости суспензий различного состава значительно отличаются друг от друга.



а

б

Рис. 3. Реограммы суспензий композиционного вяжущего в зависимости от состава и способа введения ПАВ: *а* — на основе поликарбоксилатного; *б* — на основе меламинформальдегидного пластификатора: *1* — ТМЦ-50 на КВП, полученный по одностадийной технологии; *2* — ТМЦ-50 на песке, полученный по одностадийной технологии; *3* — ТМЦ-50 на КВП, полученный по двухстадийной технологии; *4* — ТМЦ-50 на песке, полученный по двухстадийной технологии; *5* — совместный помол ВНВ-50 на КВП; *6* — совместный помол ВНВ-50 на песке; *7* — раздельный помол вяжущего на КВП, ПАВ вводится на первой стадии; *8* — раздельный помол вяжущего на песке, ПАВ вводится на первой стадии; *9* — раздельный помол вяжущего на КВП, ПАВ вводится на второй стадии; *10* — раздельный помол вяжущего на песке, ПАВ вводится на второй стадии

Все суспензии на основе метаморфогенного кварца характеризуются большей из всех указанных систем начальной вязкостью, что обусловлено высокой активностью кварцевого компонента, входящего в состав композиционного вяжущего, которая определяется фазово-размерной гетерогенностью кремнеземного компонента, формируемой при механоактивации.

Анализ реологических характеристик суспензий ВНВ-50, полученных совместным помолом всех компонентов на основе кварцевых компонентов различного генезиса с использованием меламинформальдегидного пластификатора, свидетельствует о схожести характера течения.

В области малых значений градиента скорости сдвига ($\dot{\varepsilon}$ = 2…5 $с^{-1}$) течение цементного теста происходит с неразрушенной коагуляционной структурой, обладающей максимальной пластической вязкостью. При дальнейшем увеличении градиента скорости сдвига ($\dot{\varepsilon}$ = 6…14 $с^{-1}$) наблюдается разрушение коагуляционной структуры теста, сопровождающееся снижением пластической вязкости, и далее течение происходит при полностью разрушенной структуре с практически постоянной минимальной вязкостью.

Анализ полученных экспериментальных данных позволяет сделать вывод, что оптимальным с точки зрения максимального разжижения системы, необходимого для получения самовыравнивающихся полов, является двустадийный способ получения вяжущего, при котором производится предварительное измельчение кремнеземного компонента совместно с ПАВ. При этом целесообразно использовать: метаморфогенный кварц — совместно с пластификаторами на поликарбоксилатной основе, а интрузивно-магматогенный кварц — с добавкой на меламиноформальдегидной основе.

Таким образом, выявлена зависимость реотехнологических характеристик в системе кварц — цемент — пластификатор — вода от генетического типа кремнеземсодержащего сырья, химической основы пластификатора и способа получения композиционного вяжущего. Показана целесообразность использования: метаморфогенного кварца — совместно с пластификаторами на поликарбоксилатной основе, а кварца интрузивно-магматогенного — с добавкой на меламинформальдегидной основе. При этом установлено снижение вязкости в ряду ТМЦ-50 → ВНВ-50 на основе интрузивно-магматогенного кварца и меламинформальдегидной ПАВ → ВНВ-50 на основе метаморфогенного кварца и поликарбоксилатной ПАВ. Кроме того, предварительное измельчение кварца с ПАВ до $S_{уд}$=300 $м^2/кг$ с последующим домолом с цементом (раздельный помол) позволяет снизить вязкость системы в 3,5 и 6 раз, а также время помола на 10 и 30 % интрузивно-магматогенного и метаморфогенного кварца соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Череватова А. В., Жерновский И. В., Нелюбова В. В.* Оценка фазовой и размерной гетерогенности кварцевой составляющей исходного сырья и ВКВС // Новые огнеупоры. 2010. № 8. С. 53—62.

2. Структурные преобразования кварцевого сырья при механоактивации / И. В. Жерновский, В. В. Строкова, А. И. Бондаренко, Н. И. Кожухова, К. Г. Соболев // Строительные материалы. 2012. № 10. С. 56—58.

3. *Вишневская Я. Ю., Лесовик В. С., Алфимова Н. И.* Энергоемкость процессов синтеза композиционных вяжущих в зависимости от генезиса кремнеземсодержащего компонента // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. № 3. С. 53—56.

4. Влияние способа помола на энергоемкость изготовления и качественные характеристики композиционных вяжущих / П. В. Трунов, Н. И. Алфимова, Я. Ю. Вишневская, Е. И. Евтушенко // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2012. № 4. С. 37—39.

1. *Cherevatova A. V., Zhernovskiy I. V., Nelyubova V. V.* Otsenka fazovoy i razmernoy geterogennosti kvartsevoy sostavlyayushchey iskhodnogo syr'ya i VKVS // Novye ogneupory. 2010. № 8. S. 53—62.

2. Strukturnye preobrazovaniya kvartsevogo syr'ya pri mekhanoaktivatsii / I. V. Zhernovskiy, V. V. Strokova, A. I. Bondarenko, N. I. Kozhukhova, K. G. Sobolev // Stroitel'nye materialy. 2012. № 10. S. 56—58.

3. *Vishnevskaya Ya. Yu., Lesovik V. S., Alfimova N. I.* Energoemkost' protsessov sinteza kompozitsionnykh vyazhushchikh v zavisimosti ot genezisa kremnezemsoderzhashchego komponenta // Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova. 2011. № 3. S. 53—56.

4. Vliyanie sposoba pomola na energoemkost' izgotovleniya i kachestvennye kharakteristiki kompozitsionnykh vyazhushchikh / P. V. Trunov, N. I. Alfimova, Ya. Yu. Vishnevskaya, E. I. Evtushenko // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova. 2012. № 4. S. 37—39.

© Строкова В. В., Нелюбова В. В., Бондаренко А. И., Кобзев Е. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Реотехнологические свойства суспензий механоактивированных кварцевых компонентов и композиционных вяжущих на их основе / В. В. Строкова, В. В. Нелюбова, А. И. Бондаренко, Е. В. Кобзев // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 179—185.

УДК 666.974.2

Б. Д. Тотурбиев, А. Б. Тотурбиев

КАРБИДКРЕМНИЕВЫЙ ЖАРОСТОЙКИЙ БЕТОН НА ПОЛИСИЛИКАТНАТРИЕВОМ КОМПОЗИЦИОННОМ ВЯЖУЩЕМ

Приведены результаты комплексных физико-химических, термомеханических и других исследований высокоогнеупорного карбидкремниевого бетона с низкой окисляемостью на карбидкремнийполисиликатнатриевом композиционном вяжущем. При этом формирование омоноличивающих новообразований в структуре карбидкремниевого бетона из полисиликатов натрия принципиально отличается от образования связующей пленки силиката натрия (силикат-глыбы) и характеризуется высокой водостойкостью, термостойкостью и температурой применения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: безводный силикат натрия, полисиликаты натрия, хромомагнезиты, магнезиты, растворение, композиционное вяжущее.

The authors descried the results of physical and chemical, thermo-mechanical and other investigations of highly refractory silicic-carbide concrete with low oxidation into the silicic-carbide-sodium polysilicate binder. Meanwhile the forming of solid new formations in the structure of silicic-carbide concrete made from sodium polysilicate differs from the formation of the combined cover of the sodium-silicate (silicate-block) and it is characterized with high water- and heat-resistance and used temperature.

K e y w o r d s: anhydrous sodium silicate, sodium polisilicates, chromomagnesites, magnesites, dissolution, composite binder.

Дальнейшее увеличение объема строительства и реконструкции высокоэффективных тепловых агрегатов в связи с модернизацией промышленного производства в России потребует увеличения количества и расширения ассортимента жаростойких и огнеупорных материалов.

В этой связи можно отметить, что как в отечественной практике, так и за рубежом разработаны составы жаростойких бетонов с температурой службы 200…1700 °С. Основными вяжущими при этом являются: гидравлические (портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистый и высокоглиноземистые цементы), водные (жидкое стекло) и безводные силикаты натрия (силикат-глыба) и фосфатосодержащие вещества.

Весьма эффективны жаростойкие бетоны на жидком стекле. Активное управление структурой и эксплуатационными свойствами этих бетонов путем изменения различных технологических факторов содержания в бетонной смеси жидкого стекла, вида и количества добавок-отвердителей и тонкомолотых огнеупорных добавок, гранулометрии, вида и природы крупного заполнителя, режимов и способов уплотнения бетонных и растворных смесей, их исходного водосодержания и т. п. позволило создать надежную технологию жаростойких бетонов различного назначения, обеспечивающую получение материала с заданными свойствами [1].

Однако анализ составов жаростойких бетонов на жидком стекле показал их многокомпонентность, что нельзя отнести к их достоинствам. Велик также расход жидкого стекла на 1 м бетона (от 300 до 500 кг), что сопряжено с достаточно высоким водосодержанием бетонной смеси (300 и более кг) и необходимостью введения в шихту значительного количества тонкомолотых

добавок отвердителей и огнеупорных добавок (более 500 кг на 1 м бетона). Это делает технологию весьма энергоемкой. А самое главное, составы, содержащие значительное количество щелочного компонента (Na_2O), не способны выдерживать действие высоких температур, их огнеупорность низка [2, 3].

Проведенные исследования показали возможность снижения содержания вяжущего (жидкого стекла), следовательно, щелочного компонента Na_2O в составе жаростойкого бетона при использовании в качестве связующего безводного силиката натрия (БСН) взамен жидкого стекла.

Разработаны эффективные виды жаростойких безводных силикат-натриевых композиционных вяжущих и на их основе жаростойкие бетоны повышенной термостойкости с температурой службы до 1700 °С по энергосберегающим и безотходным технологиям [2, 3].

Использование в качестве связки безводного силиката натрия сухого зернистого медленно гидратирующего материала позволяет добиться высокой степени гомогенизации в смеси даже при низкой дозировке его в составе массы. Концентрация связующего компонента в этом случае определяется условиями гомогенизации и уплотнения смеси, т. е. не технологическими, а только факторами эксплуатационной стойкости. Это открывает возможность значительного снижения концентрации силиката натрия в массе и, как следствие, снижение в бетоне содержания плавня, что, в конечном счете, приводит к повышению огнеупорности бетона на БСН и значительному улучшению его термомеханических свойств.

Обобщая результаты исследований по применению безводных силикатов натрия (силикат-глыба) в качестве связующего для производства жаростойких бетонов, можно отметить возможность дальнейшего снижения щелочного компонента Na_2O — легкоплавкого составляющего в них — путем повышения их силикатного модуля, что, в свою очередь, позволит повысить эксплуатационные свойства (термостойкость, температуру применения, коррозионную стойкость) жаростойких бетонов на их основе.

В этой связи можно отметить актуальность дальнейших исследований, направленных на расширение номенклатуры связующих из вышеуказанных силикатных систем путем получения жаростойких полисиликатнатриевых композиционных вяжущих на основе кремнезоля, тонкодисперсных БСН и огнеупорных веществ [4—11].

В данной статье приводятся результаты исследований получения жаростойкого карбидкремниевого бетона на полисикатнатриевом композиционном вяжущем с использованием нижеприведенных компонентов.

Полисиликат натрия с кремнеземистым модулем 6…6,5 (SiO_2:Na_2O) получали путем введения в 20…30 % водный раствор силиката натрия 10…16 % гидрозоля диоксида кремния в соотношении 1:(1…1,5) соответственно с последующей выдержкой не более 0,5 ч [12].

Карбид кремния марки 54С Лужского абразивного завода плотностью 3,2 г/см^3 следующего химического состава, %: SiC — 96,21; $Si_{св}$ — 0,4; $C_{св}$ — 0,13; Fe + Al — 1,05; CaO — 0,6; SiO_2 — 0,94.

Карбидкремниевую бетонную смесь оптимального состава, % мас.: 80 (карбидкремниевый заполнитель) : 18 (тонкомолотый карбид кремния) : 2 (водный раствор полисиликата натрия) изготавливали в следующей последовательности. Тонкоизмельченный карбид кремния до $S_{уд}$ = 2500…3000 см^2/г

смешивали с водным раствором полисиликата натрия в скоростной лабораторной мешалке до получения суспензии карбидкремниевого полисиликатнатриевого композиционного вяжущего. Затем в полученную суспензию вводили мелкозернистый карбидкремниевый заполнитель и перемешивали в течение 3…4 мин до получения однородной массы бетона. Твердение отформованных образцов происходило в сушильном шкафу при температуре 180…200 °С.

Основные сравнительные показатели свойств жаростойкого карбидкремниевого бетона на силикатнатриевом и полисиликатнатриевом композиционном вяжущем, приведенные в таблице, показывают, что карбидкремниевый жаростойкий бетон на полисиликатнатриевом композиционном вяжущем имеет значительно более высокие показатели термостойкости, температуры начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа и водостойкости. Это объясняется тем, что в карбидкремниевом жаростойком бетоне при использовании в качестве связующего полисиликата натрия взамен силиката натрия снижается содержание щелочного оксида (Na_2O) — легкоплавкого составляющего при одновременном повышении кремнеземистого составляющего (SiO_2), способствующего образованию силикатной пленки вокруг зерен карбида кремния, тем самым уменьшая процесс окисления. Это подтверждается также результатами рентгеноструктурного анализа полисиликатнатриевого композиционного вяжущего (рис. 1, 2).

Основные сравнительные показатели свойств карбидкремниевого жаростойкого бетона

Показатели свойств	Бетон на	
	силикатнатриевом композиционном вяжущем	полисиликатнатриевом композиционном вяжущем
Максимальная температура применения при одностороннем нагреве, °С	1600	1750
Предел прочности при сжатии после сушки при 200 °С, МПа	35…40	25…30
Средняя плотность после сушки при 200 °С, г/см^3	2,3…2,5	2,5…2,7
Открытая пористость после сушки при 200 °С, %	19…20	17…19
Линейная усадка после обжига до максимальной температуры применения, %	+0,24	+0,13
Теплопроводность при температуре 1200 °С, Вт/(м К)	12,5	11,9
Температура начала размягчения под нагрузкой 0,2 МПа, °С	1550	1680
Термостойкость, число водяных теплосмен после термообработки при 1300 °С	50	>70

В изучаемой композиции защитная пленка образуется на карбидкремниевых частицах уже до температур окисления, что подтверждается увеличением интенсивности линий dÅ (3.35) кварца. При этом интенсивность линий dÅ (4.09) кристобалита остается неизменной. На рентгенограмме образца вяжущего, нагретого до 1400 °С, содержание кристобалита растет, а интенсивность линий dÅ (3.35) кварца уменьшается.

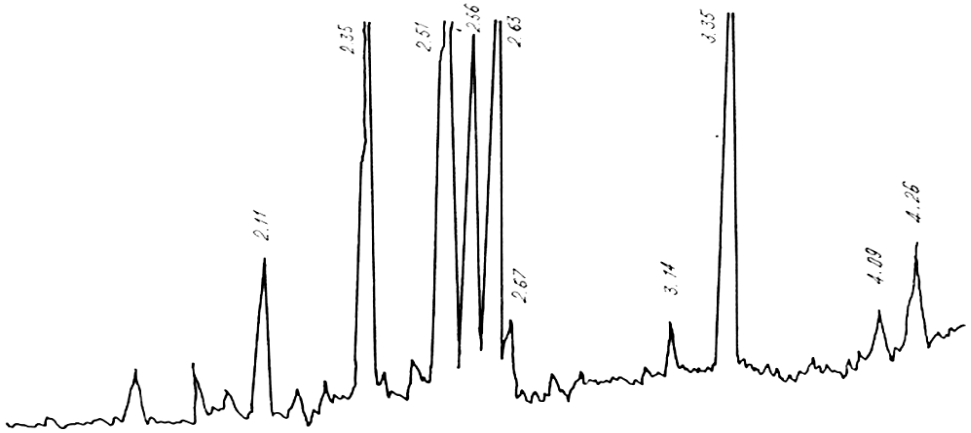


Рис. 1. Рентгенограмма карбидкремнийполисиликатнатриевого композиционного вяжущего после термообработки при 800 ºС

В данном случае возможность снижения окисления в карбидкремниевом бетоне при введении карбидкремнийполисиликатнатриевого композиционного вяжущего косвенно подтверждается изменением его прочностных свойств в нагретом состоянии. Например, образец карбидкремниевого жаростойкого бетона из карбидкремниевогосиликатнатриевого композиционного вяжущего аналогичного состава при 1450 °С (в нагретом состоянии) имел прочность 1…1,2 МПа, тогда как бетон на полисиликатнатриевом композиционном вяжущем при этой температуре характеризовался прочностью 5 МПа (рис. 3).

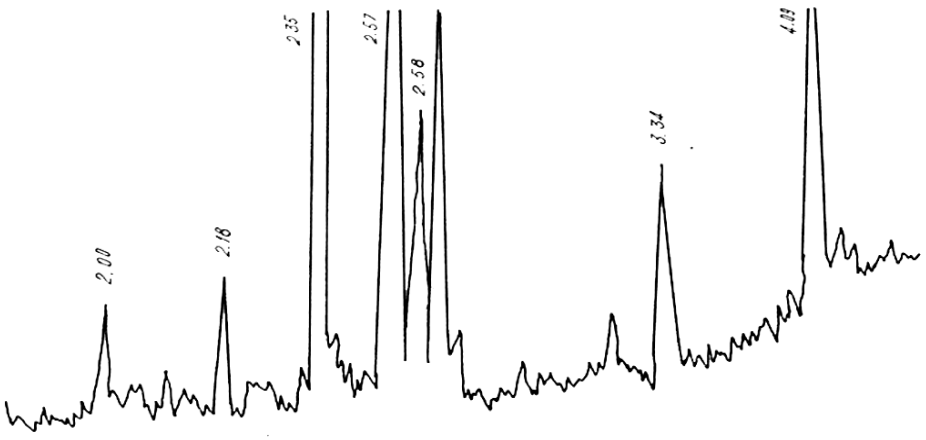


Рис. 2. Рентгенограмма карбидкремний-полисиликатнатриевого композиционного вяжущего после термообработки при 1400 ºС

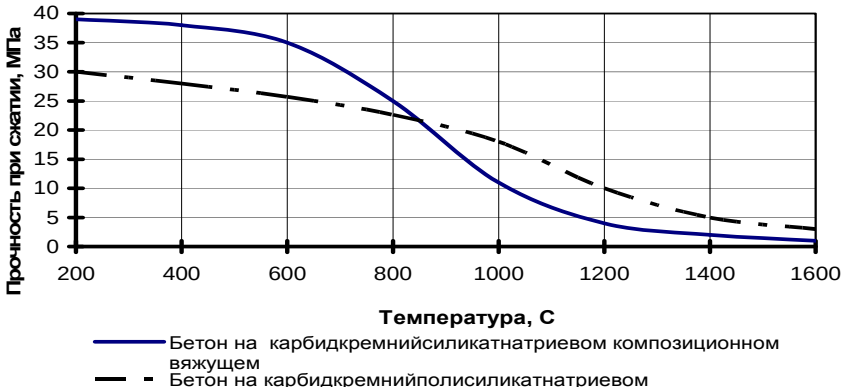


Рис. 3. Зависимость прочности нагретых образцов жаростойкого карбидкремниевого бетона от температуры

На рис. 4 показано влияние температуры на окисляемость карбидкремниевого бетона на карбидкремнийсиликатнатриевом и полисиликатнатриевом композиционных вяжущих. Так, бетон на карбидкремнийсиликатнатриевом вяжущем характеризует ранняя окисляемость, приметно с 800 °С, связанная с прибавлением массы, а при нагревании до 1600 °С увеличение достигает 8…9 %. А между тем окислительные свойства карбидкремниевого бетона на основе карбидкремнийполисиликатнатриевого композиционного вяжущего проявляется заметно позже — при температуре 1100…1200 °С, а прибавление массы идет плавно, достигая только 3 % при нагревании до 1600 °С.

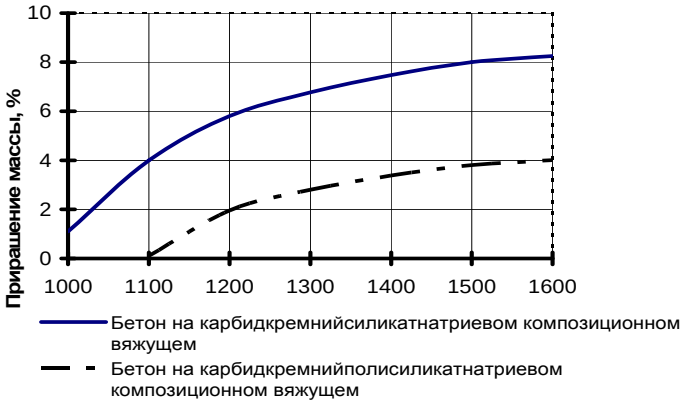


Рис. 4. Влияние температуры на окисляемость карбидкремниевого бетона

Таким образом, в результате проведенных исследований разработан высокоогнеупорный карбидкремниевый бетон с низкой окисляемостью на карбидкремнийполисиликатнатриевом композиционном вяжущем. Комплексные физико-химические, термомеханические и другие исследования подтвердили возможность образования защитной пленки с высоким содержанием SiO_2 вокруг зерен карбида кремния при использовании в качестве связующего водного раствора полисиликата натрия, способствующего уменьшению процесса окисления карбидкремниевого бетона.

Научно-практические основы этих исследований заключаются в том, что полисиликатные растворы содержат в своем составе, наряду с частицами золя, мономер, олигомеры и полимерные разновидности кремнезема, которые способствуют проявлению высокой реакционной способности кремнезема в составе различных композиций. Поэтому формирование омоноличивающих новообразований в структуре карбидкремниевого бетона из полисиликатов натрия принципиально отличается от образования связующей пленки силиката натрия (силикат-глыбы) и характеризуется высокой водостойкостью, термостойкостью и температурой применения из-за низкого содержания щелочного компонента — легкоплавкого составляющего в вяжущем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тарасова А. П.* Жаростойкие вяжущие на жидком стекле и бетоны на их основе. М. : Стройиздат, 1982. 130 с.

2. Жаростойкие бетоны на основе композиций из природных и техногенных стекол / Ю. П. Горлов, А. П. Меркин, М. И. Зейфман, Б. Д. Тотурбиев. М. : Стройиздат, 1986. 146 с.

3. *Тотурбив Б. Д.* Строительные материалы на основе силикат-натриевых композиций. М. : Стройиздат, 1988. 208 с.

4. *Тотурбиев Б. Д., Тотурбиев А. Б.* Карбидкремниевый жаростойкий бетон с низкой окисляемостью // Бетон и железобетон. 2010. № 6. С. 2—4.

5. *Тотурбиев Б. Д., Тотурбиев А. Б.* Исследование влияния поровой структуры на шлакоустойчивость жаростойкого цирконового бетона на полисиликатнатриевом композиционном вяжущем // Бетон и железобетон. 2011. № 4. С. 10—13.

6. *Тотурбиев Б. Д., Тотурбиев А. Б.* Формирование клеющей пленки и омоноличивание жаростойкого бетона на полисиликатах натрия // Бетон и железобетон. 2011. № 3. С. 5—7.

7. *Тотурбиев Б. Д., Тотурбиев А. Б.* Термостойкость жаростойких бетонов на полисикатнатриевых композициях // Бетон и железобетон. 2011. № 2. С. 16—19.

8. *Тотурбиев Б. Д., Тотурбиев А. Б.* Исследование термомеханических свойств жаростойкого бетона // Бетон и железобетон. 2011. № 1. С. 6—8.

9. *Тотурбиев Б. Д., Тотурбиев А. Б.* Жаростойкое полисиликат-натриевое композиционное вяжущее // Сборник РААСН. Орел, 2011.

10. *Тотурбиев Б. Д., Тотурбиев А. Б.* Теоретические принципы получения высокоогнеупорного жаростойкого бетона на полисиликат-натриевом композиционном вяжущем // Вестник РААСН. М., 2011.

11. *Тотурбиев А. Б.* Исследования клеящей способности композиционного связующего на полисиликатах натрия // Промышленное и гражданское строительство. 2012. № 3. С. 59—61.

12. Способ получения полисиликатов натрия (варианты) // Патент России № 2124475. 1999. Бюл. № 1 / Г. Н. Пестерников, А. С. Максютин, С. П. Пучков, В. Б. Обухова.

13. Исследование влияния технологических факторов на вяжущие свойства полисиликатнатриевых композиций / А. Б. Тотурбиев, Н. Б. Мусаджиев, Б. Д. Тотурбиев, В. С. Лесовик // Бетон и железобетон. 2012. № 4. С. 2—4.

1. *Tarasova A. P.* Zharostoykie vyazhushchie na zhidkom stekle i betony na ikh osnove. M. : Stroyizdat, 1982. 130 s.

2. Zharostoykie betony na osnove kompozitsiy iz prirodnykh i tekhnogennykh stekol / Yu. P. Gorlov, A. P. Merkin, M. I. Zeyfman, B. D. Toturbiev. M. : Stroyizdat, 1986. 146 s.

3. *Toturbiv B. D.* Stroitel'nye materialy na osnove silikat-natrievykh kompozitsiy. M. : Stroyizdat, 1988. 208 s.

4. *Toturbiev B. D., Toturbiev A. B.* Karbidkremnievyy zharostoykiy beton s nizkoy okislyaemost'yu // Beton i zhelezobeton. 2010. № 6. S. 2—4.

5. *Toturbiev B. D., Toturbiev A. B.* Issledovanie vliyaniya porovoy struktury na shlakoustoychivost' zharostoykogo tsirkonovogo betona na polisilikatnatrievom kompozitsionnom vyazhushchem // Beton i zhelezobeton. 2011. № 4. S. 10—13.

6. *Toturbiev B. D., Toturbiev A. B.* Formirovanie kleyushchey plenki i omonolichivanie zharostoykogo betona na polisilikatakh natriya // Beton i zhelezobeton. 2011. № 3. S. 5—7.

7. *Toturbiev B. D., Toturbiev A. B.* Termostoykost' zharostoykikh betonov na polisikatnatrievykh kompozitsiyakh // Beton i zhelezobeton. 2011. № 2. S. 16—19.

8. *Toturbiev B. D., Toturbiev A. B.* Issledovanie termomekhanicheskikh svoystv zharostoykogo betona // Beton i zhelezobeton. 2011. № 1. S. 6—8.

9. *Toturbiev B. D., Toturbiev A. B.* Zharostoykoe polisilikat-natrievoe kompozitsionnoe vyazhushchee // Sbornik RAASN. Orel, 2011.

10. *Toturbiev B. D., Toturbiev A. B.* Teoreticheskie printsipy polucheniya vysokoogneupornogo zharostoykogo betona na polisilikat-natrievom kompozitsionnom vyazhushchem // Vestnik RAASN. M., 2011.

11. *Toturbiev A. B.* Issledovaniya kleyashchey sposobnosti kompozitsionnogo svyazuyushchego na polisilikatakh natriya // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2012. № 3. S. 59—61.

12. Sposob polucheniya polisilikatov natriya (varianty) // Patent Rossii № 2124475. 1999. Byul. № 1 / G. N. Pesternikov, A. S. Maksyutin, S. P. Puchkov, V. B. Obukhova.

13. Issledovanie vliyaniya tekhnologicheskikh faktorov na vyazhushchie svoystva polisilikat-natrievykh kompozitsiy / A. B. Toturbiev, N. B. Musadzhiev, B. D. Toturbiev, V. S. Lesovik // Beton i zhelezobeton. 2012. № 4. S. 2—4.

© Тотурбиев Б. Д., Тотурбиев А. Б., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Тотурбиев Б. Д., Тотурбиев А. Б. Карбидкремниевый жаростойкий бетон на полисиликатнатриевом композиционном вяжущем // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 186—192.

УДК 666.972.162

В. Д. Тухарели, Т. К. Акчурин

УЛУЧШЕНИЕ КАЧЕСТВА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИЦИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННОГО ОРГАНИЧЕСКОГО СЫРЬЯ

Рассмотрена возможность использования техногенного органического сырья в качестве минеральной добавки в технологии цементных строительных растворов. Показано, что введение полимерных добавок не только обеспечивает ресурсосбережение и снижает экологическую нагрузку на окружающую среду, но и является одним из наиболее универсальных способов повышения долговечности цементных композитов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: строительные растворы, модифицирующие добавки, органическое техногенное сырье.

The authors consider the possibility of use of organic technogenic raw material as mineral additive to the technology of cement construction solutions. It is shown that usage of polymeric additives not only provides efficient use of resources and decreases environmental pressure, but it is one of the most universal ways to increase durability of cement composites.

K e y w o r d s: construction solutions, modified additives, organic technogenic raw material.

Важнейшей задачей развития строительной отрасли является создание эффективных ресурсо- и энергосберегающих технологий для производства современных материалов. Замена традиционного для технологии цементных бетонов сырья на более дешевое техногенное и производство на его основе изделий и конструкций стройиндустрии приобретает особую актуальность, способствуя решению вопросов оздоровления воздушного и водного бассейнов промышленных регионов.

Прочность, деформативность и трещиностойкость занимают особо важное место среди физико-механических характеристик, являясь основными показателями качества цементного бетона, которое непосредственно связано со структурными особенностями композиционного материала. Улучшение качества цементного бетона наиболее тесно связано с уменьшением дефектности исходных материалов, увеличением прочности сцепления в контактном слое цементного камня и заполнителя, упруго-пластических свойств, характеристик капиллярно-пористой структуры, что, в конечном счете, приводит к увеличению его долговечности.

Проблеме повышения качества и долговечности цементных бетонов посвящены многочисленные исследования [1—7]. Данная задача может быть успешно решена путем создания новых модифицированных строительных композиций. Роль добавок в качестве неотъемлемого компонента современного строительного раствора и бетона как средство технологического регулирования увеличивается пропорционально росту эффективности их влияния на структурообразование композиционного материала.

В новом строительстве широко используются сложные композиционные материалы. К таким материалам относятся полимерцементные композиции, спектр использования которых довольно широк: полимербетоны, цементные бетоны с добавками полимеров, специальные бетоны и растворы для заполнения стыков между панелями, полимерцементные краски, штукатурки, наливные полы, различные отделочные плиты и др.

Вяжущее вещество таких композитов состоит из минеральной и органической частей. Ввод органических полимерных добавок, как правило в виде дисперсий или сухих порошков, даже в незначительном количестве, изменяет свойства готовых материалов. В связи с этим в зависимости от процентного содержания добавки, вида полимера и целей модификации, возможно усиливать те или иные эксплуатационные характеристики полимерцементных композиций [4].

Одним из перспективных направлений модифицирования структуры цементного камня является применение органических соединений, таких как моно- или полимолекулярные поверхностно-активные вещества, мономеры, сополимеры, полимеры, действие которых определяется не только их природой, но и концентрацией в составе вяжущего, а также температурно-влажностным режимом твердения бетона.

В ходе работы в этом направлении были использованы отходы производства лакокрасочных материалов. При производстве лакокрасочных материалов в качестве возвратных отходов могут выступать как твердые, так и жидкие отходы. К первой группе относится пыль при загрузке сыпучего сырья в химические аппараты, химические продукты при зачистке оборудования, отработанные фильтровальные патроны, например с остатками краски и твердых частиц, различная тара из-под сыпучего сырья. Ко второй группе отходов относятся жидкие отходы в виде дисперсий, образующиеся при зачистке оборудования (1…5 % по данным сайта http://eco-profi), содержащие остатки пленкообразующего вещества и твердых частиц. Следует сказать, что все перечисленные виды отходов при производстве лакокрасочных материалов, как правило, подлежат утилизации — вывозятся на мусоросжигательные заводы.

Применение техногенных отходов в производстве строительных материалов и изделий значительно расширяет сырьевую базу строительной отрасли и существенно повышает эффективность капиталовложений. При этом следует учесть, что стоимость традиционных товарных химических добавок, как правило, выше тех, которые производятся на основе вторичного сырья. Настоящая работа посвящена улучшению качества цементных композиций с помощью техногенных отходов, позволяющих снизить стоимость их производства.

Состав строительных растворных образцов принят с соотношением цементного вяжущего и мелкого заполнителя 1:3 с В/Ц=0,44. Используется портландцемент марки 500 ОАО «Себряковцемент», природный песок с крупностью зерен до 0,63 мм, получаемый при разработке песчаного месторождения без использования специального обогатительного оборудования, ООО «Волгоградский карьерный союз» (p_0 — 1454 кг/м^3), органическая дисперсионная добавка техногенного сырья, содержащая низкомолекулярный акриловый мономер. Полимерную дисперсию добавляли к воде затворения, уменьшая ее количество на объем дисперсии, и на этом растворе готовили смесь с минеральным вяжущим.

Приготовление растворной смеси, определение ее основных характеристик, формование образцов (призм) и изучение основных физико-механических свойств проводилось согласно методикам и требованиям, указанным в ГОСТ 5802—86 «Растворы строительные. Методы испытаний», ГОСТ 24211—2008

«Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия», ГОСТ 30459-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Определение и оценка эффективности».

Влияние количества добавки на изменение прочности цементного раствора изучали на образцах-призмах размером 40×40×160 мм. Для этого готовили 6 серий каждого вида образцов с полимерными добавками, которые составили 0,3, 0,5, 1, 2, 5 и 7,5 % от массы вяжущего соответственно, а также 1 серию контрольных образцов без добавки. Испытания образцов проводили в возрасте 30 сут.

Закономерности изменения прочностных свойств цементных материалов при введении модифицирующей полимерной добавки связаны с особенностями их строения. Опыты показали (рис. 1), что прочность при сжатии растворных образцов постепенно увеличивается в среднем с 3,7 до 14,6 % с ростом концентрации модифицирующей добавки от 0,3 до 0,5 % от массы цементного вяжущего. Полученные данные подтверждают тот факт, что по мере набора прочности растворных смесей без модифицирующих полимерных добавок гель портландцементного камня теряет влагу различной формы связи с материалом, что приводит к постепенному разрушению коагуляционных контактов, которыми обусловлена деформативность материала. Цементный камень в меньшей степени способен в процессе приложения нагрузки перераспределить напряжения [5]. Таким образом, прочность цементного камня будет определяться предельной растяжимостью его кристаллического сростка при действии нагрузки в направлении, нормальном внешней силе.

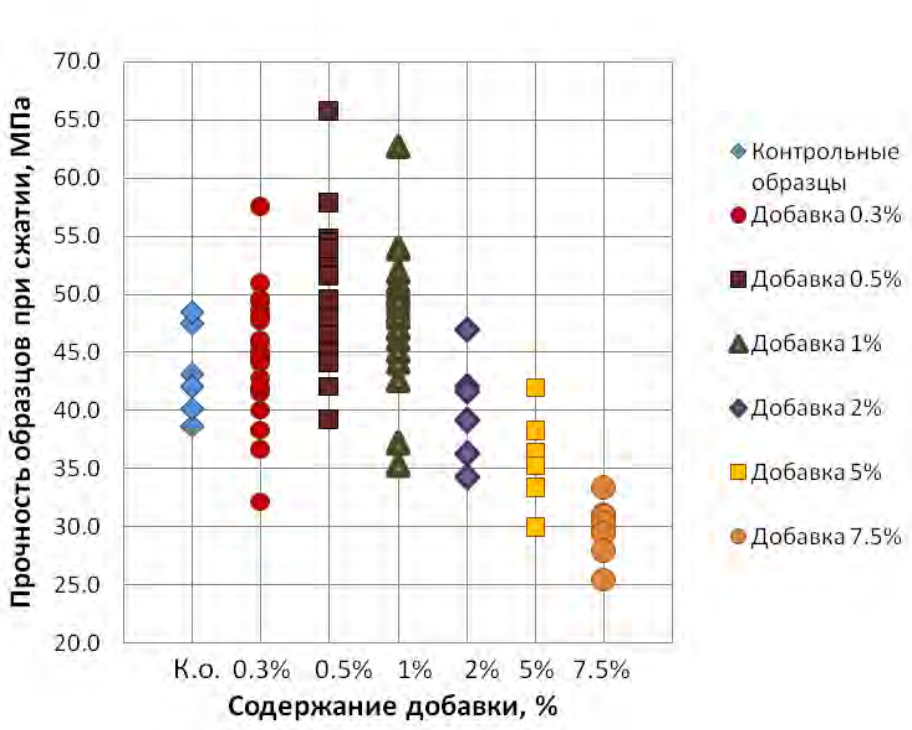


Рис. 1. Прочность растворных образцов в зависимости от % содержания полимерной добавки при В/Ц=0,44

Прочность строительного раствора будет обусловлена еще и силой сцепления цементного камня с зернами заполнителей. Деформативные свойства портландцементного камня зависят от степени гидратации вяжущего, так как при этом изменяется капиллярно-пористая структура материала, а также соотношение между продуктами гидратации и негидратированными частицами цементных зерен [6].

При затворении цементного раствора водной дисперсией мономера на первой стадии твердения цемент удерживает (сорбирует) воду на своей поверхности и в процессе гидратации связывает ее. Связывание воды цементом из водной дисперсии приводит к выделению полимера в отвержденном состоянии в виде сплошных пленок. В результате в цементирующем веществе образуются две структурные фазы: первая в виде поликристаллических сростков продуктов гидратации цемента; вторая — в виде пленок полимера между этими поликристаллическими сростками.

Мономерные связующие в процессе твердения переходят в высокомолекулярные полимерные вещества, получаемые из низкомолекулярных продуктов (мономеров) полимеризацией или поликонденсацией. Полимеры существенно отличаются от минеральных вяжущих. Адгезия полимерных связующих к другим материалам (в частности, к заполнителям) значительно выше, чем у минеральных вяжущих. В основном они твердеют значительно быстрее цементов [4].

Прочность полимерных связующих при сжатии, а особенно растяжении, выше, чем у минеральных вяжущих [7]. Поэтому не менее важным фактором, чем сжатие, влияющим на изменение прочности строительного раствора, является определение прочности материала на растяжение при изгибе. Для сопоставимости результатов испытаний различных цементных материалов результаты испытаний представлены (рис. 2) в относительных единицах прочности.

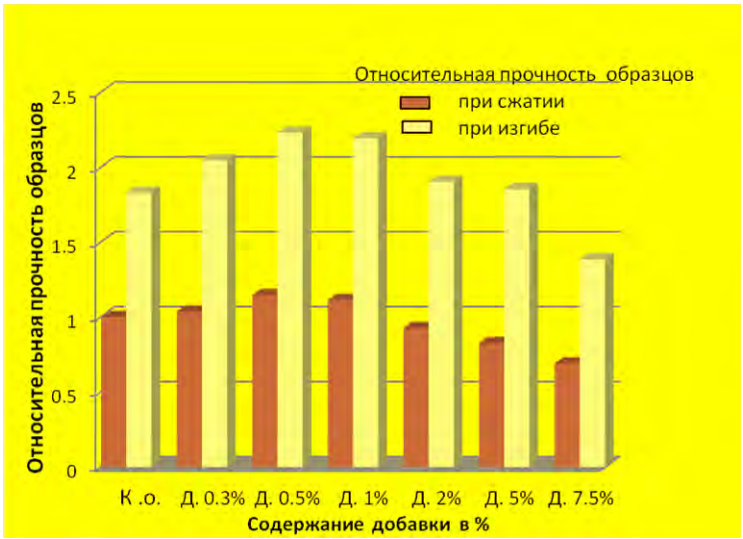


Рис. 2. Относительная средняя прочность растворных образцов при сжатии и растяжении при изгибе в зависимости от % содержания полимерной добавки (за 1 принята средняя прочность контрольных образцов при сжатии)

Наибольшее снижение прочности при сжатии (на 36 % от прочности контрольных образцов) выявлено у составов с добавкой 7,5 % от массы цемента. Это объясняется тем, что при увеличении содержания мономера в композиции цементирующие новообразования, возникающие при гидратации минерального вяжущего, в значительной мере разобщены пленками органического связующего и не образуют пространственной структурной матрицы. Испытания также показали, что величины предела прочности на растяжение при изгибе и сжатие отличаются до двух раз. При этом показатель предела прочности на растяжение при изгибе у образцов с добавкой 0,5 % показал рост прочности в среднем на 22 % по сравнению с контрольными образцами. На этом основании можно сделать вывод, что у образцов с добавкой увеличилась адгезия минерального связующего с заполнителем, в то же время композит приобрел большие упруго-пластические свойства, что послужило причиной значительного роста прочности материала.

Развитие строительной индустрии предусматривает значительное расширение производства растворных и бетонных смесей с использованием новых эффективных добавок на основе полимерных отходов, в частности нефтехимического производства. Активные минеральные добавки не только обеспечивают ресурсосбережение, но и существенно воздействуют на свойства композитов, повышая его эксплуатационные свойства, а также долговечность сооружений. Приведенное исследование показывает, что создание и применение новых модификаторов — один из реальных путей дальнейшего повышения эксплуатационных свойств строительных материалов и конструкций. А поскольку полимерные композиции включают значительную часть по массе отходов промышленности, их внедрение даст экономический эффект, позволит утилизировать многотоннажные отходы, улучшить экологическую обстановку Волгоградской области [8]. Каждое из направлений применения добавок интересно как с научной, так и технической стороны, и требует своего дальнейшего исследования и совершенствования.

Выводы. Результаты физико-механических исследований показали, что органическая техногенная добавка на основе акрилового мономера является эффективным модификатором структуры цементного композита. Использование данного модификатора уменьшает дефектность структуры строительного раствора, увеличивает адгезионные силы сцепления контактной зоны, что значительно улучшает структурно-механические характеристики строительного раствора.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Батраков В. Г.* Модифицированные бетоны. Теория и практика. М. : Стройиздат, 1998. 768 с.

2. Superplasticizers for Concrete. Fundamentals, Technology and Practice / N. Spiratos, M. Page, N. P. Mailvaganam, V. M. Malhotra, C. Jolicoeur. Ottawa, 2003. 322 p.

3. *Баженов Ю. М.*, *Демьянова В. С.*, *Калашников В. И.* Модифицированные высококачественные бетоны. М. : АСВ, 2006. 306 с.

4. *Попов К. Н.* Полимерные и полимерцементные бетоны, растворы и мастики. М. : Высш. шк., 1987. 72 с.

5. *Берг О. Я.*, *Щербаков Е. Н.*, *Писанко Г. Н.* Высокопрочный бетон. М. : Стройиздат, 1981. 208 с.

6. *Шейкин А. Е.*, *Чеховский Ю. В.*, *Бруссер М. И.* Структура и свойства цементных бетонов. М. : Стройиздат, 1979. 344 с.

7. Добавки в бетон : справ. пособие М. : Стройиздат, 1988. 575 с.

8. *Тухарели В. Д., Акчурин Т. К.* Состояние и перспективы использования модифицирующих добавок в повышении эксплуатационных свойств цементных бетонов : материалы III Международной науч.-техн. конф., 10—12 апреля 2012 г., Волгоград : ВолгГАСУ, 2012. С. 179—183.

1. *Batrakov V. G.* Modifitsirovannye betony. Teoriya i praktika. M. : Stroyizdat, 1998. 768 s.

2. Superplasticizers for Concrete. Fundamentals, Technology and Practice / N. Spiratos, M. Page, N. P. Mailvaganam, V. M. Malhotra, C. Jolicoeur. Ottawa, 2003. 322 p.

3. *Bazhenov Yu. M., Dem'yanova B. C., Kalashnikov V. I.* Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony. M. : ASV, 2006. 306 s.

4. *Popov K. N.* Polimernye i polimertsementnye betony, rastvory i mastiki. M. : Vyssh. shk., 1987. 72 s.

5. *Berg O. Ya., Shcherbakov E. N., Pisanko G. N.* Vysokoprochnyy beton. M. : Stroyizdat, 1981. 208 s.

6. *Sheykin A. E., Chekhovskiy Yu. V., Brusser M. I.* Struktura i svoystva tsementnykh betonov. M. : Stroyizdat, 1979. 344 s.

7. Dobavki v beton : sprav. posobie M. : Stroyizdat, 1988. 575 s.

8. *Tukhareli V. D., Akchurin T. K.* Sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya modifitsiruyushchikh dobavok v povyshenii ekspluatatsionnykh svoystv tsementnykh betonov : materialy III Mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf., 10—12 aprelya 2012 g., Volgograd : VolgGASU, 2012. S. 179—183.

© Тухарели В. Д., Акчурин Т. К., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Тухарели В. Д., Акчурин Т. К. Улучшение качества цементных композиций при использовании модифицирующих добавок на основе техногенного органического сырья // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 193—198.

УДК 666.97:691.322

С. В. Федосов, М. В. Акулова, Т. Е. Слизнева

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ В МЕЛКОЗЕРНИСТОМ БЕТОНЕ НА МЕХАНОАКТИВИРОВАННОМ ВОДНОМ РАСТВОРЕ СИЛИКАТА НАТРИЯ

Изучено влияние механоактивации водного раствора силиката натрия на свойства цементных и цементно-песчаных композиций. На основании дифференциально-термогравиметрического анализа установлено, что затворение портландцемента предварительно механоактивированным водным раствором жидкого стекла способствовало уплотнению структуры цементной матрицы, повышению прочности мелкозернистого бетона при сжатии и при изгибе, а также увеличению его термостойкости.

К л ю ч е в ы е с л о в а: мелкозернистый бетон, портландцемент, силикат натрия, механоактивация, дифференциально-термогравиметрический анализ.

The influence of mechanically active aqua solution of sodium silicate on concrete and areneceous composition is studied. On the basis of differential and thermographical analysis it was determined that portland cement tempering preliminary by mechanically active aqua solution of liquid glass promoted cement matrix compaction, fine grain concrete strengthening under pressure and bending, and thermal resistance increase.

K e y w o r d s: fine grain concrete, portland cement, sodium silicate, mechanical activation, differential and thermographical analysis.

Применение композиционных вяжущих с целью улучшения эксплуатационных характеристик мелкозернистых бетонов прочно вошло в практику современного строительства [1, 2]. Достаточно часто в качестве дополнения к портландцементу используется силикат натрия — жидкое стекло, придающее бетонным изделиям повышенную термостойкость.

Жидкое стекло взаимодействует с клинкерными материалами, образуя гидросиликат кальция и алюминат натрия согласно реакции [3]:

$$3Na_2O{\cdot}SiO_2+3CaO{\cdot}Al_2O_3{\cdot}nH_2O=3CaSiO_3{\cdot}nH_2O+Na_2O{\cdot}Al_2O_3. \quad (1)$$

Образующийся в составе цементного камня алюминат натрия является очень сильным ускорителем его схватывания. Кроме описанной выше реакции, происходит реакция между жидким стеклом и известью:

$$Na_2O\ SiO_2+CaO=Na_2O{\cdot}SiO_2+CaSiO_3 \quad (2)$$

с образованием очень плотного и прочного силиката кальция, который, отлагаясь в порах твердеющего цементного камня, кольматирует их, обеспечивая повышение плотности и водонепроницаемости бетонных изделий. Жидкое стекло является мощным ускорителем твердения, причем эффект проявляется тем сильнее, чем выше концентрация раствора силиката натрия. Разбавление растворов жидкого стекла сопровождается некоторой деполимеризацией содержащихся в них силикатных анионов. При затворении цемента разбавленным водным раствором жидкого стекла часть извести гасится с образованием гидрооксида кальция. Присутствие в растворе ионов Ca^{2+} приводит к образованию тонкодисперсных силикатов кальция. Затворение цемента водным

раствором силиката натрия вызывает изменение pH раствора и концентрацию в нем ионов кальция таким образом, что пересыщение по $Ca(OH)_2$ не наступает. Ионы Ca^{2+}, образующиеся в процессе гидратации клинкера, связываются силикат-анионами в C-S-H-гель, что приводит к ускоренному формированию структуры камня. При взаимодействии между жидким стеклом и гашеной известью образуются гидросиликаты кальция низкой основности [3]:

$$Na_2O\ 2SiO_2+Ca(OH)_2=Na_2O\cdot SiO_2+CaO\cdot SiO_2\cdot H_2O. \quad (3)$$

К недостаткам композиционного вяжущего, включающего портландцемент и жидкое стекло, можно отнести некоторое снижение прочности при сжатии и при изгибе, обусловленное неоднородностями в структуре цементного камня, возникающими вследствие неполной гидратации цементных зерен при ускоренном схватывании [4]. В связи с этим возникает необходимость уменьшения доли силиката натрия в смеси за счет применения технологических приемов, обеспечивающих лучший контакт силиката натрия с твердыми составляющими смеси.

Следовательно, для повышения равномерности взаимодействия водного раствора Na_2SiO_3 с цементным клинкером необходимо подвергнуть жидкое стекло некоторому воздействию, в результате которого коллоидный раствор стал бы более однородным, гомогенным. Одним из видов такого воздействия является механическая активация водного раствора в вихревом ударном роторно-импульсном аппарате [5]. Резкие локальные перепады давления, происходящие во время быстрого прохождения раствора через тонкие отверстия в роторе при совмещении их с отверстиями в статоре, вызывают не только деполимеризацию молекул $[Na_2SiO_3]_n$, но и разрыв части водородных связей между молекулами воды, вода обогащается гидроксил-ионами OH^-, в результате чего pH воды повышается [6]. В слабощелочной среде и в присутствии электролитов частицы SiO_2 коагулируют, образуя слабосвязанные между собой агрегаты нанодисперсного размера. Таким образом, возможно, что под действием кавитации размер относительно крупных частиц силиката натрия уменьшается, а сами частички распределяются в растворе более равномерно.

Качество мелкозернистого бетона определяется не только прочностью и плотностью цементного камня, но и хорошей адгезией с заполнителем. В процессе кристаллизации поверхность зерен кварца выполняет функцию активной подложки для образующихся зародышей твердой фазы, связанную со способностью кварца адсорбировать известь с образованием гидросиликатов кальция, на которые затем нарастают другие гидраты цемента. Известно, что одним из способов повышения прочности сцепления цементного камня с поверхностью заполнителя может служить обогащение контактного слоя веществами, обладающими химическим сродством с материалом заполнителя. Авторами [7] установлено, что в результате смачивания поверхности кварца жидким стеклом прочность сцепления цементного камня с заполнителем возрастает. При механоактивации раствора жидкого стекла в условиях развитой кавитации и последующем затворении этим раствором бетонной смеси происходит увеличение контактов равномерно распределенного диспергированного силиката натрия с заполнителем — кварцевым песком.

Известно также, что обработка растворов в роторно-пульсационном аппарате способствует изменению вязкости [8]. Изменяя структуру водных систем, можно регулировать их физико-химические свойства [9, 10]. Так, свежеталая (более структурированная) вода гораздо хуже смачивает кварц, чем обычная (менее структурированная). При затворении мелкозернистого бетона реструктурированной за счет механоактивации водой (или раствором) молекулы воды лучше смачивают твердые поверхности, в том числе кварц, активируя химические реакции, происходящие в смеси.

С целью определения степени влияния механоактивации водного раствора силиката натрия на свойства цементных композиций исследовали физико-механические свойства цементного камня и мелкозернистого бетона, затворенного активированными растворами Na_2SiO_3 различных концентраций, а также при различных водоцементных отношениях.

В экспериментах использовали следующие материалы: портландцемент марки М500 Д0 (ГОСТ 30515—97 «Техническое описание. Область применения»), кварцевый песок (ГОСТ 8736—85), дистиллированная вода (ГОСТ 6709—72* «Вода дистиллированная. Технические условия»), жидкое стекло (ГОСТ 13078—81 «Стекло натриевое жидкое. Технические условия»).

Прочность образцов на растяжение при изгибе и сжатии устанавливалась в соответствии с требованиями ГОСТ 310.4—92 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии», ГОСТ 10180—90 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Испытания образцов на термостойкость проводили в муфельной печи по ГОСТ 20910—90. «Бетоны жаростойкие. Технические условия». Водопоглощение — по ГОСТ 12730.3—78 «Бетоны. Метод определения водопоглощения».

Для изучения влияния механоактивации раствора жидкого стекла, используемого для затворения цемента, на структурообразующие процессы, происходящие в цементном камне, применили метод дифференциально-термогравиметрического анализа (ДТГА), который проводился на дериватографе «Derivatograth Q-1500D» (Венгрия). Скорость нагревания проб при опыте составляла 10 град/мин от комнатной температуры (28…32 ºС) до 1000 ºС. Фиксировалась температурная кривая и кривая потери веса. С помощью ДТГА определялось изменение кристаллической структуры цементного камня. В качестве объектов анализа использовались опытные образцы при различном отношении вода — портландцемент, выдержанные в нормальных условиях в течение 28 сут после затворения. Исследование продуктов гидратации проводилось на пробах, выбранных из внутреннего слоя разрушенных образцов после проведенных испытаний на прочность и измельченных до крупности частиц 0,8 мм.

Механоактивацию растворов жидкого стекла проводили на лабораторной установке, схема которой представлена на рис. Роторно-импульсный аппарат, ротор которого состоял из восьми лопастей и приводился в действие электромотором *5*, вращавшимся с частотой 3000 об/мин, соединялся с емкостью для воды *6* соединительными шлангами. Вода с жидким стеклом циркулировала по замкнутому контуру, количество циклов прохождения по которому определяло время активации — один цикл соответствовал 15 с.

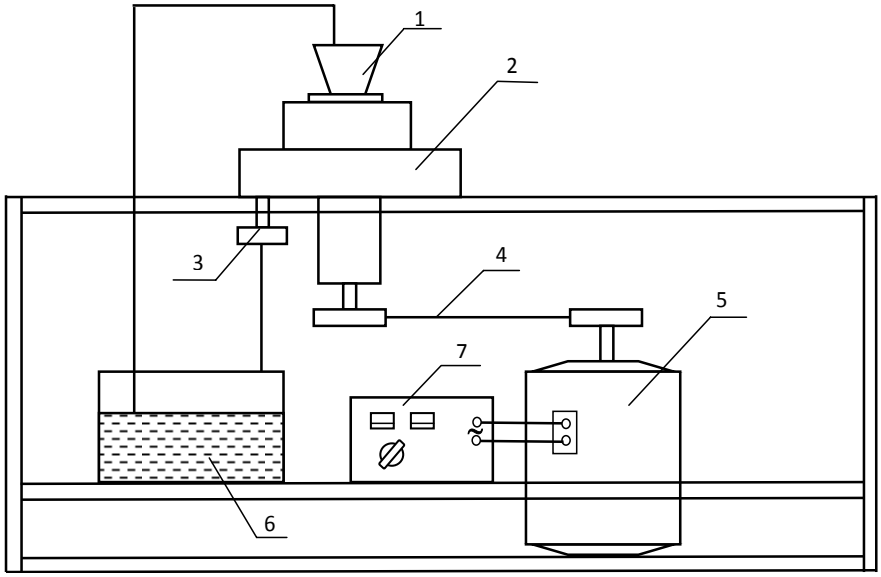


Схема лабораторной установки для проведения механоактивации жидкости: *1* — входной патрубок; *2* — активатор; *3* — выходной патрубок; *4* — ременная передача; *5* — электромотор; *6* — емкость для жидкости; *7* — блок регулировки скорости вращения ротора

Для сокращения количества опытов и систематизации опытных данных применяли метод планирования эксперимента. Факторное пространство составляли водоцементное отношение, время механоактивации и концентрация жидкого стекла в растворе. Условные обозначения и границы изменения факторов приведены в табл. 1. При построении математической модели был использован трехуровневый план второго порядка Бокса — Бенкена [11].

Таблица 1

Диапазон варьирования факторов регрессионной модели

	Факторы модели		
	В/Ц	Время активации, с	Концентрация силиката натрия, %
Минимальное значение	0,28	30	0,1
Максимальное значение	0,35	90	10
Условное обозначение	x_1	x_2	x_3

В результате статистической обработки экспериментальных данных были получены адекватные уравнения регрессии для следующих откликов:

1) прочность при сжатии:

$$y_{\text{псж}}=50{,}428-1{,}917x_1-4{,}64x_2-4{,}124x_1^2-6{,}354x_2^2-4{,}154x_3^2-3{,}5x_2x_3; \quad (4)$$

2) прочность при изгибе:

$$y_{\text{псж}} = 10{,}89-0{,}225x_1-0{,}87125x_2-1{,}4x_1^2-1{,}1175x_2^2-1{,}147x_3^2+0{,}21175x_1x_3-0{,}505x_2x_3; \quad (5)$$

3) начало схватывания:

$$y_{нс} = 82+29{,}375x_1-100x_3+52{,}75x_1^2+42{,}75x_2^2+31{,}5x_3^2+16{,}25x_1x_3+ \\ +16{,}25x_1x_3+23{,}75x_2x_3. \quad (6)$$

Полученные регрессионные уравнения легли в основу построения ряда поверхностей, отображающих зависимости откликов модели от двух факторов при фиксированном значении третьего фактора, что позволило определить наиболее рациональные значения технологических параметров. Было установлено, что наилучшими характеристиками обладали образцы, затворенные при В/Ц=0,29…0,31 водным раствором силиката натрия 5%-й концентрации, активированным в течение 45…60 с. По данным экспериментов, механоактивация водного раствора жидкого стекла не оказала существенного влияния на сроки схватывания цементного теста. В то же время образцы цементного камня, затворенные механоактивированными 4…6%-ми водными растворами силиката натрия при водоцементных отношениях 0,29…0,31, обладали повышенными прочностными характеристиками по сравнению с образцами, затворенными при других условиях.

Повышение прочности цементного камня при сжатии и при изгибе обусловлено уменьшением доли портландита за счет связывания кальция в гидросиликаты, что подтверждается данными ДТГА. В табл. 2 приведены потери массы образцами, рассчитанные по кривым ТГ. Термическое разложение всех образцов сопровождалось тремя эндотермическими эффектами, имеющими сложную форму, связанную с наложением отдельных термоэффектов. Первый эндоэффект при температурах до 350 ºС связан с потерей свободной воды и части воды, входящей в состав гидроалюмосиликатов и сульфогидроалюмината кальция. Второй эндоэффект, связанный с дегидратацией портландита, наблюдался при температурах от 450 до 520 ºС. Сложная форма пика, соответствующая данному эндотермическому эффекту, подтвердила взаимодействие силиката натрия как с CaO, так и с $Ca(OH)_2$. В форме третьего эндоэффекта присутствовали два максимума: при температурах 680…690 ºС и 820…825 ºС, образующихся при дегидратации гидросиликатов кальция различной основности и разложении кальцита соответственно.

Наименьшими потерями массы в температурном интервале 450—520 ºС, соответствующем дегидратации гидрооксида кальция, характеризовались цементные композиции, приготовленные на 5%-х растворах силиката натрия, однако увеличение времени обработки с 45 до 60 с привело к снижению количества образующихся кристаллогидратов с 9,7 до 6,8 %. Данный факт, а также уменьшение количества кристаллогидратов при одновременном увеличении количества портландита в цементном камне, затворенном на неактивированном растворе жидкого стекла такой же концентрации, указывает на обусловленность процесса структурообразования режимами активации. Снижение или повышение концентрации жидкого стекла (0,1 % или 10 %) так же, как и изменение времени активации, привело к более слабому связыванию кальция в гидросиликаты кальция. В результате предел прочности при сжатии цементного камня, затворенного активированным в течение 45…60 с. 5%-м раствором силиката натрия, увеличился до двух раз по сравнению с контрольным составом на неактивированной дистиллированной воде.

Таблица 2

Потери массы при термическом разложении цементного камня, затворенного водными растворами силиката натрия различных концентраций, активированными в течение различных периодов времени

Состав	Время активации, с	Концентрация жидкого стекла, %	Потери массы, % от общей массы			
			физически связанной воды	химически связанной воды	при дегидратации $Ca(OH)_2$	при разрушении $CaCO_3$ и дегидратации C-S-H
1	45	0,1	2,5	6,17	1,72	7,65
2	45	5	1,49	5,31	1,4	9,7
3	45	10	2,2	6,1	2,1	6,58
4	60	5	1,9	5,8	1,4	6,8
5	—	5	2,61	6,69	1,8	5,92
6	—	—	2,8	6,75	2,3	4,53

Влияние механоактивации воды затворения, содержащей жидкое стекло, на свойства мелкозернистого бетона изучали, используя следующие соотношения: Ц/П=0,4 и В/Ц=0,45. Результаты испытаний бетона на прочность, водопоглощение и термостойкость представлены в табл. 3.

Таблица 3

Эксплуатационные характеристики мелкозернистого бетона

Состав	Время активации, с	Концентрация жидкого стекла, %	Прочность при сжатии, МПа	Прочность на изгиб, МПа	Водопоглощение, %	Термостойкость, теплосмен
1	45	0,1	20,35	4,95	11, 05	5
2	45	5	23,16	5,7	9,65	7
3	45	10	19,76	4,58	10,25	5
4	60	5	21,18	4,61	10,24	6
5	—	5	14,05	3,82	12,01	4
6	—	—	13,8	3,5	12,14	3

Образцы бетона, затворенного на механоактивированном 5%-м растворе жидкого стекла, обладали лучшими показателями. Следует отметить, что в цементном камне композиций, полученных при аналогичных режимах, образовалось больше всего гидросиликатов кальция и меньше всего портландита. Кроме того, у данных композиций наблюдалась наименьшая потеря массы физически связанной воды, что, по нашему мнению, может указывать на меньшую по сравнению с другими составами пористость. Повышенное водопоглощение образцами бетона, приготовленного на механоактивированных 0,1%-м и 10%-м растворах силиката натрия, соответственно, может служить косвенным подтверждением образования в данных образцах большего объема незамкнутых пор и указывать на менее плотную структуру. Более высокое содержание химически связанной воды, на наш взгляд, может быть связано с образованием большего количества эттрингитоподобной фазы, игольчатое

дендрическое строение кристаллов которой уменьшает плотность бетона. Бетон на механоактивированных 0,1%-м и 10%-м растворах силиката натрия оказался менее прочным по сравнению с бетоном на 5%-х активированных растворах, но более прочным, чем контрольные образцы на неактивированном 5%-м растворе Na_2SiO_3 и на неактивированной дистиллированной воде.

При сопоставлении данных табл. 2 и 3 можно заметить наличие корреляции между потерей массы при термической деструкции образцов цементного камня и свойствами мелкозернистого бетона. Наиболее прочные и термостойкие образцы бетона получены при соблюдении режимных параметров, при которых соотношение кристаллогидратов в цементном камне к портландиту самое высокое. Следовательно, возможность управления структурообразованием в цементном камне бетона обусловлена не только выбором концентрации жидкого стекла в воде затворения, но и режимом механоактивации раствора в роторно-пульсационном аппарате. Кроме того, механоактивация раствора силиката натрия способствовала повышению адгезии цементного геля с заполнителем, что также улучшило эксплуатационные характеристики мелкозернистого бетона (см. табл. 3).

Таким образом, механоактивация водных растворов силиката натрия, используемых для затворения бетона, способствовала, во-первых, уплотнению структуры цементной матрицы, а, во-вторых, снижению количества жидкого стекла в составе смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жаростойкие бетоны на основе композиций из природных и техногенных стекол / Ю. П. Горлов, А. П., Меркин, М. И. Зейфман, Б. Д. Тотурбиев М. : Металлургия, 1974. 151 с.

2. Пат. 2389699 Рос. Федерации, МПК С 04 В 7/13. Вяжущее / В. С. Лесовик, В. В. Строкова, Ф. Е. Жерновой, А. Н. Кривенкова ; заявл. 25.11.08 ; опубл. 20.05.10, Бюл. № 14. 3 с.

3. *Корнеев В. И.*, *Данилов В. В.* Растворимое и жидкое стекло. СПб : Стройиздат, 1996. 216 с.

4. *Глекель Ф. Л.*, *Копп Р. З.*, *Ахмедов К. С.* Регулирование гидратационного структурообразования поверхностно-активными веществами. Ташкент : Фан, 1986. 224 с.

5. Механоимпульсная активация жидкофазных функциональных добавок в цементы и бетоны / М. В. Акулова, А. Н. Стрельников, Т. Е. Слизнева, В. А. Падохин, А. В. Базанов // Актуальные проблемы современного строительства : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Пенза : ПГУАС, 2011. С. 5—8.

6. Исследование влияния механической активации на свойства раствора жидкого стекла / С. В. Федосов, М. В. Акулова, Ю. С. Ахмадулина, Т. Е. Слизнева, В. А. Парохин, А. В. Базанов // Информационная среда вуза : материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. Иваново : ИГАСУ, 2010. С. 513—515.

7. *Rehm G.*, *Zimbelmann R.* Moglichkeiten zur Steigerung der Zugfestigkeit des Betons uber die Haftung Zwischen Zuschlagon und zementsteinmatrix // Dtsch. Ausschuss stahlbeton, 1977. № 283. P. 58—76.

8. *Байбаков О. В.* Вихревые гидравлические машины. М. : Машиностроение, 1987. 197 с.

9. *Зимон А. Д.* Адгезия жидкостей и смачивание. М. : Химия, 1974. 413 с.

10. *Зацепина Г. Н.* Физические свойства и структура воды. М. : МГУ, 1987. 170 с.

11. *Ивоботенко Б. А.*, *Ильинский Н. Ф.*, *Копылов И. П.* Планирование эксперимента в электромеханике. М. : Энергия, 1975. 184 с.

1. Zharostoykie betony na osnove kompozitsiy iz prirodnykh i tekhnogennykh stekol / Yu. P. Gorlov, A. P., Merkin, M. I. Zeyfman, B. D. Toturbiev M. : Metallurgiya, 1974. 151 s.

2. Pat. 2389699 Ros. Federatsii, MPK S 04 V 7/13. Vyazhushchee / B. C. Lesovik, V. V. Strokova, F. E. Zhernovoy, A. N. Krivenkova ; zayavl. 25.11.08 ; opubl. 20.05.10, Byul. № 14. 3 s.

3. *Korneev V. I., Danilov V. V.* Rastvorimoe i zhidkoe steklo. SPb : Stroyizdat, 1996. 216 s.

4. *Glekel' F. L., Kopp R. Z., Akhmedov K. S.* Regulirovanie gidratatsionnogo strukturoobrazovaniya poverkhnostno-aktivnymi veshchestvami. Tashkent : Fan, 1986. 224 s.

5. Mekhanoimpul'snaya aktivatsiya zhidkofaznykh funktsional'nykh dobavok v tsementy i betony / M. V Akulova, A. N. Strel'nikov, T. E. Slizneva, V. A. Padokhin, A. V. Bazanov // Aktual'nye problemy sovremennogo stroitel'stva : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Pen-za : PGUAS, 2011. S. 5—8.

6. Issledovanie vliyaniya mekhanicheskoy aktivatsii na svoystva rastvora zhidkogo stekla / S. V. Fedosov, M. V. Akulova, Yu. S. Akhmadulina, T. E. Slizneva, V. A. Parokhin, A. V. Bazanov // Informatsionnaya sreda vuza : materialy XVII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. Ivanovo : IGASU, 2010. S. 513—515.

7. *Rehm G., Zimbelmann R.* Moglichkeiten zur Steigerung der Zugfestigkeit des Betons uber die Haftung Zwischen Zuschlagon und zementsteinmatrix // Dtsch. Ausschuss stahlbeton, 1977. № 283. P. 58—76.

8. *Baybakov O. V.* Vikhrevye gidravlicheskie mashiny. M. : Mashinostroenie, 1987. 197 s.

9. *Zimon A. D.* Adgeziya zhidkostey i smachivanie. M. : Khimiya, 1974. 413 s.

10. *Zatsepina G. N.* Fizicheskie svoystva i struktura vody. M. : MGU, 1987. 170 s.

11. *Ivobotenko B. A., Il'inskiy N. F., Kopylov I. P.* Planirovanie eksperimenta v elektromekhanike. M. : Energiya, 1975. 184 s.

© Федосов С. В., Акулова М. В., Слизнева Т. Е., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Федосов С. В., Акулова М. В., Слизнева Т. Е. Особенности структурообразования в мелкозернистом бетоне на механоактивированном водном растворе силиката натрия // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки . С. 199—206.

УДК 666.951

В. Д. Черкасов, В. И. Бузулуков, А. И. Емельянов, Д. В. Черкасов

О ХИМИЧЕСКОМ МОДИФИЦИРОВАНИИ ДИАТОМИТА И ВОЗМОЖНОСТИ ЕГО ДАЛЬНЕЙШЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В КАЧЕСТВЕ АКТИВНОЙ МИНЕРАЛЬНОЙ ДОБАВКИ В ЦЕМЕНТЫ

Разработан химический способ активации поверхности частиц диатомита. Изучена возможность использования химически модифицированного диатомита в качестве активной минеральной добавки в цементы.

К л ю ч е в ы е с л о в а: диатомит, минеральные кислоты, химическое модифицирование, активная минеральная добавка, цемент, предел прочности при сжатии.

The chemical method of diatomite particles activation is elaborated. Possible use of chemically modified diatomite as active mineral additive to concrete is studied.

K e y w o r d s: diatomite, mineral acids, chemical modification, active mineral additive, concrete, pressure resistance.

В настоящее время одним из способов повышения качества бетона при одновременном понижении расхода вяжущего является применение различных добавок. Как правило, введение их в малых количествах позволяет направленно регулировать конечные свойства цементных растворов или бетона [1].

Весьма перспективными могут быть добавки, полученные на основе дешевого природного минерального сырья, в частности диатомита.

Эффективность использования природного диатомита в качестве активной добавки в цементные композиты зависит в основном от возможности химического связывания продуктов гидратации цемента с силанольными и частично силоксановыми группами поверхности частиц минералов. Диатомиты имеют очень развитую поверхность с преимущественно макропористой структурой, где преобладают поры одинакового размера, равномерно распределенные в массе частиц [2, 3].

Для химического взаимодействия продуктов гидратации цемента (главным образом, гидроксида кальция) доступна только небольшая часть поверхности частиц, поскольку пористость диатомита в основном замкнутая и на долю этих пор приходится 90 % и более всей удельной поверхности [4].

В отличие от истинных кремнеземов, в природных диатомитах часть ионов водорода поверхностных силанольных групп заменена на катионы металлов, таких как натрий, кальций, магний, железо и др. Указанные свойства обусловливают малую активность немодифицированного диатомита в цементных системах.

Повысить активность частиц диатомита, по нашему мнению, можно путем увеличения доли свободных силанольных групп на их поверхности в результате химического модифицирования. Указанное модифицирование можно осуществить, например, путем обработки поверхности частиц минеральными кислотами. В этом случае будет происходить локальное изменение

природы поверхности, поскольку, как известно [3], структура поверхности кремнезема в любой его форме не имеет регулярного строения. Образовавшиеся силанольные группы, наряду с имеющимися, а также частично силоксановые группы, находящиеся в наиболее доступной части межпоровой поверхности, будут взаимодействовать с продуктами гидратации цемента, гидроксидом кальция образованием групп гидросиликата кальция. Благодаря образовавшимся группам гидросиликата кальция распределенные частицы диатомита в затворенной цементной системе играют роль активных центров кристаллизации новых фаз и тем самым улучшают структуру цементного камня на микроуровне, повышая прочность материала.

С целью подтверждения вышеизложенного предположения было исследовано изменение природы поверхности частиц диатомита после кислотного модифицирования, а также влияние условий модифицирования и состава цементной системы на прочностные свойства затвердевшего цемента.

В качестве сырьевых материалов использовались: диатомит Инзенского месторождения, предварительно размолотый на шаровых мельницах и высушенный до постоянства массы при 105 °С; портландцемент бездобавочный производства ОАО «Мордовцемент» марки М500; серная и соляная кислоты квалификации «ЧДА».

Обработку диатомита кислотами проводили в стеклянном реакторе, который находился в термостате и был снабжен термометром и перемешивающим устройством. В реактор помещали определенное количество водного раствора кислоты и при перемешивании добавляли расчетное количество диатомита. Полученную смесь нагревали до заданной температуры и, не прекращая процесс перемешивания, выдерживали в течение определенного времени. После завершения химических превращений смесь охлаждали, осадок отфильтровывали, промывали водой и сушили при температуре 105…107 °С. Полученный продукт в дальнейшем использовался в качестве добавки в цемент. После затворения образцы цементного камня размером 4×4×4 см твердели в нормальных условиях в течение 28 сут.

Эффективность модифицирования диатомита оценивали по его влиянию на предел прочности при изгибе и сжатии затвердевшего цемента. При модифицировании диатомита изменялись: температура среды (50…98 °С); массовое соотношение твердой и жидкой фаз ($m_{тв}$ / $m_{ж}$= 1 / 3…5); концентрация кислоты в растворе (соляная кислота 2…14 %, серная кислота 1…15 %); продолжительность модифицирования (1…5 ч). Количество добавляемого диатомита в цемент изменялось в пределах 1…8 % от массы цемента.

Установлено, что независимо от природы использованной кислоты оптимальное соотношение объема кислоты к массе диатомита составило 3 / 1, температура среды 93…95 °С, а продолжительность процесса модифицирования — 3 ч.

Для подтверждения химического взаимодействия кислот с отдельными компонентами диатомита при модифицировании был проведен химический анализ исходного и модифицированного диатомита. Выявлено, что в модифицированных диатомитах наблюдается значительное увеличение содержания оксида кремния по сравнению с природным диатомитом (табл.).

Это объясняется тем, что в ходе модифицирования диатомита образуются водорастворимые соединения, которые удаляются в процессе фильтрования конечного продукта. Поэтому в образцах, полученных посредством модифицирования минеральными кислотами, возрастает относительное содержание оксида кремния за счет уменьшения массовой доли других оксидов.

Химический состав и общая пористость модифицированного диатомита

Модифицирующий компонент	Содержание оксидов, масс. %						Пористость, %
	SiO2	Al2O3	Fe2O3	CaO	MgO	п.п.п.	
Диатомит немодифицированный	76,2	11,9	4,7	1,5	1,1	4,6	70
Соляная кислота	87,2	6,1	1,1	0,6	0,5	4,5	66
Серная кислота	85,9	8,1	1,4	0,5	0,5	3,6	67

Как и предполагалось, при кислотной активации диатомита происходит увеличение количества силанольных и силоксановых групп. Качественный анализ методом ИК-спектроскопии показал, что интенсивность полос поглощения при 474 $см^{1}$ и в области 1000...1500 $см^{1}$, относящихся соответственно к деформационным δ (≡Si — OH) и валентным асимметричным νas(≡Si — O — — Si≡) колебаниям группы кремний — кислород, значительно возрастает после обработки диатомита кислотами.

Изучение образцов немодифицированного и модифицированного диатомита с использованием дифференциально-термического анализа показало, что в образцах кислотнообработанного диатомита имеется большее количество силанольной фазы, о чем свидетельствует увеличение эндотермического пика при 242 °С. Небольшое понижение пористости диатомита (см. табл.) может быть связано с процессами массопереноса самого кремнезема, которые возникают в пористых телах при их химическом модифицировании в водных средах [3, 4].

Испытания по влиянию условий модифицирования диатомита на прочность затвердевшего цемента (рис. 1, 2) показали, что максимальное увеличение прочности цемента при сжатии (до 35%) и изгибе (до 75%) достигается при введении относительно небольшого количества диатомита (около 2% от массы цемента), модифицированного либо 8%-м раствором соляной кислоты, либо 5%-м раствором серной кислоты. Отличие в количествах кислот, необходимых для эффективного модифицирования диатомита, объясняется различием их основности.

Полученные экспериментальные данные согласуются с вышеизложенным предположением о возможности активного участия модифицированного кислотами диатомита в структурообразующих процессах, протекающих в затворенных цементных системах.

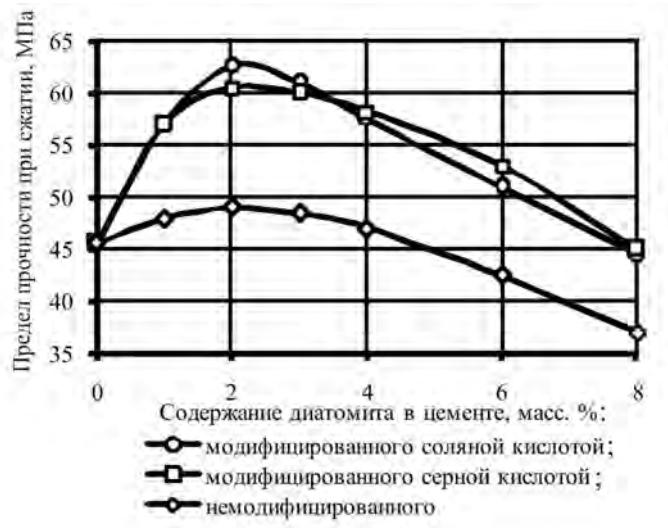


Рис. 1. Влияние модифицированного минеральными кислотами диатомита на предел прочности при сжатии цементных композитов

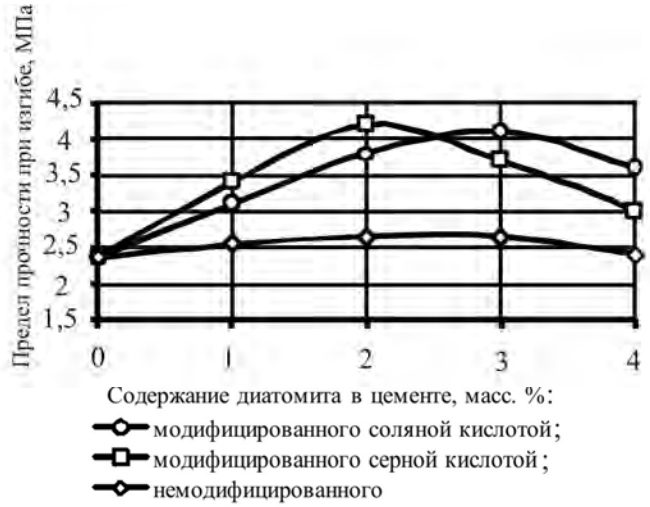


Рис. 2. Влияние модифицированного минеральными кислотами диатомита на предел прочности при изгибе цементных композитов

Таким образом, химическое модифицирование диатомита минеральными кислотами позволяет получить активную минеральную добавку в цементы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Батраков В. Г.* Модифицированные бетоны. Теория и практика. М. : Технопроект, 1998. 768 с.

2. *Дистанов У. Г., Михайлов А. С.* Природные собенты СССР. М. : Наука, 1990. 168 с.

3. Исследование адсорбционно-структурных свойств природных и обработанных диатомитов / Г. Г. Мартиросян, А. Г. Манукян, Э. Б. Овсепян, К. А. Костанян // Прикладная химия. 2003. Т. 76. № 4. С. 551—555.

4. Модифицированные кремнеземы в сорбции, катализе, хроматографии. М. : Химия, 1986. 248 с.

1. *Batrakov V. G.* Modifitsirovannye betony. Teoriya i praktika. M. : Tekhnoproekt, 1998. 768 s.

2. *Distanov U. G.*, *Mikhaylov A. S.* Prirodnye sobenty SSSR. M. : Nauka, 1990. 168 s.

3. Issledovanie adsorbtsionno-strukturnykh svoystv prirodnykh i obrabotannykh diatomitov / G. G. Martirosyan, A. G. Manukyan, E. B. Ovsepyan, K. A. Kostanyan // Prikladnaya khimiya. 2003. T. 76. № 4. S. 551—555.

4. Modifitsirovannye kremnezemy v sorbtsii, katalize, khromatografii M. : Khimiya, 1986. 248 s.

© Черкасов В. Д., Бузулуков В. И., Емельянов А. И., Черкасов Д. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

О химическом модифицировании диатомита и возможности его дальнейшего использования в качестве активной минеральной добавки в цементы / В. Д. Черкасов, В. И. Бузулуков, А. И. Емельянов, Д. В. Черкасов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 207—211.

УДК 691:539.4

Е. М. Чернышов, Д. Н. Коротких

ФЕНОМЕНОЛОГИЯ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ ЗОН АКТИВНОЙ ДИССИПАЦИИ ЭНЕРГИИ ПРИ ДЕФОРМИРОВАНИИ И РАЗРУШЕНИИ СОВРЕМЕННЫХ БЕТОНОВ*

Рассматриваются диссипация, локализация и концентрация напряжений при образовании трещин в структуре бетона в условиях силового нагружения. Разрабатывается методика анализа локализованных зон активной диссипации энергии при трещинообразовании бетонов на основе данных метода лазерной голографической интерферометрии. Приводятся качественные и количественные оценки параметров диссипации энергии, локализации и концентрации напряжений для 5 групп современных бетонов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: диссипация энергии, локализация, концентрация напряжений, структура бетонов, деформирование, разрушение.

The authors consider the issues of dissipation, location and stress concentration in cracks that appear in the concrete structure under power loading. The technique how to analyze localized areas of active energy dissipation in cracking concrete on the basis of the method of laser holographic interferometry is developed. The authors provide qualitative and quantitative assessments of the parameters of energy dissipation, localization and stress concentration for the 5 groups of modern concrete.

K e y w o r d s: energy dissipation, localization, stress concentration, the structure of concrete, strain, cracking.

Введение. Анализ потенциала сопротивления хрупкому разрушению высокопрочных цементных бетонов и выявление ключевых закономерностей механики проявления ими конструкционных свойств является определяющим условием развития теории и прикладных принципов синтеза и конструирования оптимальных структур цементных бетонов.

В физике диссипация энергии трактуется как переход части энергии упорядоченных процессов (например, кинетической энергии) в энергию неупорядоченных процессов в системах. Если иметь в виду энергию упорядоченного процесса силового воздействия на строительную конструкцию, образованную композитом с определенной структурой, то такой переход будет определяться рассеянием энергии внешнего воздействия по связям структурных элементов композита. Композит с его структурой будет выполнять роль трансформатора, то есть преобразователя упорядоченного потока энергии в рассеянный (фрактальный по типу) поток. И в этом смысле композит можно безусловно квалифицировать как диссипативную систему.

Преобразование потока в структуре композита как диссипативной системе не может считаться неупорядоченным, поскольку его рассеяние (фрактализация) будет детерминировано структурой с соответствующими ее силовыми связями, которые будут «усваивать» диссипативную энергию, претерпевая нарастание напряжений или, напротив, ослабление в них напряжений и соответствующее деформирование до предельных или не достигающих предела состояний.

Диссипация энергии внешнего силового воздействия в структуре композита является средством адаптации состояния (в данном случае напряженно-деформированного состояния) материала к условиям эксплуатационной среды.

* В рамках исследований НИР РААСН, тема 2.4.2.

Следствием внешнего силового воздействия и соответствующего развития диссипации энергии в структуре композита может стать установление равновесного (точнее, квазиравновесного) напряженно-деформированного его состояния с определенными локализацией и концентрацией напряжений в структурных связях. Внешним выражением этого на макроуровне окажется формоизменение тела композита; выражением же этого на микроуровне структуры композита будет взаимное смещение элементов структуры, начиная с движения дислокаций в кристаллах, относительного сдвига в контактах дисперсных частиц и кончая образованием (в зависимости от величины внешнего силового воздействия) микро-, мезо- и макротрещин.

При изменении, например повышении внешнего силового воздействия до нового уровня, установившееся до того равновесие напряженно-деформированного состояния уже не будет когерентным, поэтому и конструкция, и композит должны будут перейти в другое состояние. Такой переход будет заключаться в новом этапе диссипации энергии, локализации и концентрации напряжений, макро-, мезо- и микродеформировании, соответствующем этому дефектообразованию. Внешние и внутренние смещения, деформации в итоге оказываются по определению критериальными для оценки потенциала силового сопротивления композита как структурированной диссипативной системы.

Совершенно очевидно, что с изменением (целенаправленным, управляемым изменением) структуры связаны возможности повышения качества строительных композитов. Поэтому изучение закономерных соотношений параметров процессов диссипации энергии (их феноменологии) со структурой композитов, рассмотрение возможностей использования этого для оптимизации структур по показателям сопротивления разрушению, в первую очередь по их трещиностойкости, представляется актуальным. Важным при этом оказывается разработка и применение соответствующего эффективного экспресс-метода и инструментария визуализации процессов предразрушения и разрушения.

Именно этим вопросам посвящена данная публикация, являющаяся фрагментом и одновременно составной частью работ, выполняемых в целом по теме НИР РААСН «Исследование механики проявления строительно-технических свойств высокотехнологичных бетонов и развитие теории синтеза и конструирования их структур».

Объекты исследований. Методика выделения зон активной диссипации энергии при нагружении. Объектом исследований в работе приняты пять различающихся по типу структуры и пределу прочности при сжатии групп бетонов: I — группа рядовых бетонов (с прочностью до 40 МПа), имеющих самый массовый спрос и потребление на строительном рынке; II — группа высокопрочных бетонов (40…80 МПа), широко применяемых в строительстве высотных зданий и сооружений; III — группа особо высокопрочных бетонов (80…120 МПа) целевого применения для конструкций зданий и сооружений повышенной ответственности и большого ресурса эксплуатации; IV — группа сверхвысокопрочных бетонов (более 120 МПа) специального назначения; V — группа сверхвысокопрочных (более 120 МПа) высокотрещиностойких бетонов уникального назначения [1].

Для рассматриваемых в работе групп бетонов методами полных равновесных диаграмм деформирования, определения коэффициента интенсивности напряжений при нормальном отрыве, акустической эмиссии, лазерной голографической интерферометрии определяется совокупность характеристик процесса деформирования и разрушения бетонов в соотношении с их структурой [2—11]. При этом каждый из названных методов обеспечивает свой вклад в системный комплекс показателей сопротивления разрушению бетонов. В составе этого комплекса: модуль упругости, коэффициент хрупкости, предельная растяжимость, полная энергия разрушения и ее составляющие (работа упругого деформирования, работа микро- и макротрещинообразования), вязкость разрушения, пределы прочности при изгибе и сжатии, кинетика накопления повреждений и др.

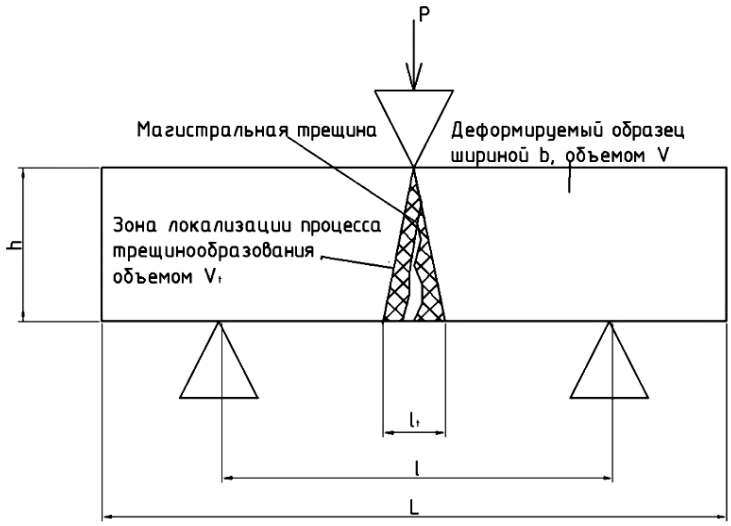
Актуальным в проблеме изучения феноменологии локализации зон активной диссипации энергии является экспериментальное определение таких зон с последующей качественной и количественной интерпретацией. Наиболее информативным и наглядным методом визуализации процесса диссипации энергии, локализации и концентрации напряжений является метод лазерной голографической интреферометрии (ЛГИ) [7, 10].

Для описанной на рисунке схемы нагружения образцов с равными для всех серий бетонов групп I—V геометрическими характеристиками (например, размеры образцов, расстояние между опорами, глубина искусственной трещины) в ходе эксперимента определяются параметры, непосредственно или косвенно характеризующие уровень сопротивления разрушению материала (например, прогиб, поверхностные деформации), с учетом величин которых рассчитываются показатели сопротивления разрушению бетонов и параметры зон активной диссипации энергии при трещинообразовании.

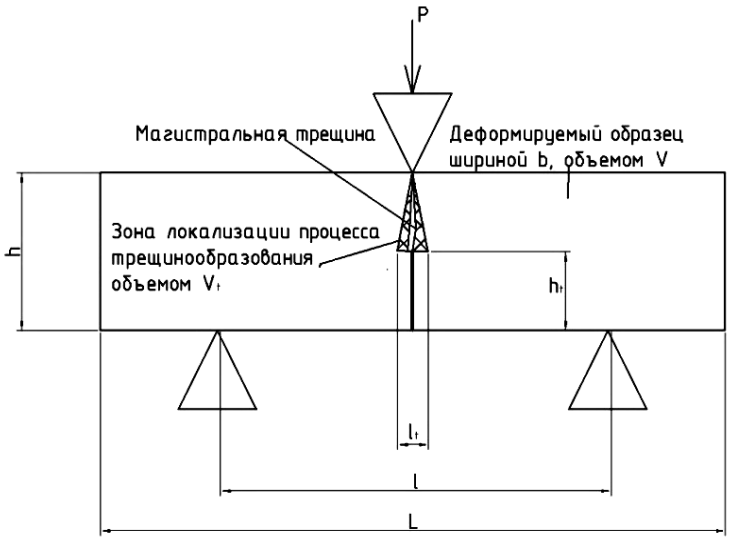
Совокупность таких задаваемых, измеряемых и расчетных показателей и параметров процессов деформирования и трещинообразования представлена в табл. 1.

Для оценки локализованных зон активной диссипации энергии нами приняты следующие начальные условия эксперимента. Для бетона характерно хрупкое разрушение, то есть разрушение путем развития и распространения в его структуре трещин, и поэтому методом, позволяющим наиболее точно характеризовать процесс деформирования и разрушения бетона с точки зрения анализа локализованных зон активной диссипации энергии при силовом воздействии, является метод испытания на изгиб.

Образцы для каждой из групп бетонов изготавливались двумя сериями, отличающимися отсутствием или наличием искусственной трещины (надреза), играющей роль концентратора напряжений. Положение искусственной трещины выбиралось по месту наибольших деформаций образца — по центру пролета между опорами. Глубина надреза обусловливалась двумя факторами: с одной стороны, она должна быть достаточной для заметного отличия в характере зон активной диссипации энергии, а, с другой стороны, нужно было учитывать, что трещина может иметь слишком большую длину, при которой возможным оказывается самопроизвольное разрушение образца еще до момента его испытания.



а



б

Выявление зон активной диссипации энергии: *а* — вариант без искусственной трещины; *б* — вариант с искусственной трещиной: *L* — длина образца; *h* — высота образца; *b* — ширина образца; *V* — объем образца; *l* — база испытаний; *P* — нагрузка; l_t — протяженность зоны локализации псевдопластических деформаций; h_t — глубина искусственной трещины; V_t — объем материала в зоне локализации псевдопластических деформаций

В процессе испытаний бетона уровень разрушающей нагрузки на каждом шаге увеличивался на 5…7 % (относительно разрушающей нагрузки). На каждом из шагов осуществлялся контроль прогиба (индикатором часового типа) и визуализированный контроль полей перемещений точек поверхности образца (фронтальной и нижней) методом двойной экспозиции голограмм [11]. На основе анализа поверхностных полей перемещений определялись протяженность и объем локализованной зоны активной диссипации энергии.

Таблица 1

Задаваемые, измеряемые и расчетные показатели и параметры процессов деформирования и трещинообразования

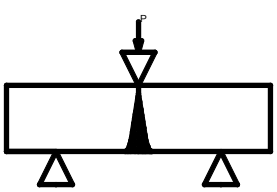
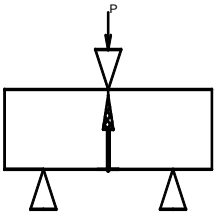
Наименование параметров	Способ определения
Задаваемые величины	
Размеры образца (L, h, b)	Управляемая величина при изготовлении образцов. В экспериментальных исследованиях применялись образцы-балочки размером 40×40×160 и 40×80×340 мм
Объем образца V	Расчетная величина $V = Lhb$
База испытаний l	Расстояние между опор образца; фиксированная величина: для образцов 40×40×160 мм — 100 мм; для образцов 40×80×340 мм — 300 мм
Глубина искусственной трещины h_t	Управляемая величина. В экспериментальных исследованиях глубина искусственной трещины составляла 25…40 мм
Нагрузка P	Управляемая величина
Измеряемые величины	
Прогиб δ	Измеряемая величина (непосредственные измерения индикатором)
Протяженность зоны локализации псевдопластических деформаций l_t	Измеряемая величина. Определяется картиной интерференционных полос лазерного излучения при двойной экспозиции
Поперечные деформации δ′	Измеряемая величина. Определяется картиной и количеством интерференционных полос лазерного излучения при двойной экспозиции
Предел начала трещинообразования	Измеряемая величина. Характеризует относительный уровень напряжений в момент образования первой трещины, размером более 300 нм
Расчетные величины	
Относительные продольные деформации ε	Расчетная величина $\varepsilon = \frac{\delta}{l}$
Относительные поперечные деформации деформации ε′	Расчетная величина $\varepsilon' = \frac{\sigma'}{b}$
Коэффициент Пуассона μ	Расчетная величина $\mu = \left\|\frac{\varepsilon'}{e}\right\|$
Напряжения σ	Расчетная величина $\delta = \frac{3\Delta P \Delta l}{2bh^z}$
Модуль упругости E	Расчетная величина $E = \frac{\delta}{\varepsilon}$ (значения напряжений и деформаций только для упругого деформирования)
Объем материала в зоне локализации псевдопластических деформаций V_t	Расчетная величина $V_t = \frac{kl_t\left(h - h_t\right)b}{2}$ (справедлива для бетонов групп I—IV, для бетонов V группы без искусственной трещины
Удельный объем материала в зоне локализации псевдопластических деформаций V'_t	Расчетная величина $V'_t = \frac{V_t}{V}$
Предел прочности при изгибе $R_{изг}$	Расчетная величина $R_{изг} = \frac{3Pl}{2bh^z}$
Относительный уровень напряжений $\sigma/R_{изг}$	Расчетная величина

Расчетными характеристиками являлись: относительные продольные и поперечные деформации, начальный модуль упругости, коэффициент Пуассона (расчеты производились для стадии упругого деформирования образца), осредненные величины напряжений, удельный объем локализованной зоны активной диссипации энергии на стадии предразрушения материала. Удельный объем количественно характеризует долю объема материала, вовлеченного в процесс разрушения. Чем больше этот относительный объем, тем «легче» бетону при последующем шаге нагрузки и деформирования адаптироваться к новым условиям диссипации энергии, локализации и концентрации напряжений [12—15].

Результаты исследований. Показатели и параметры процесса деформирования и разрушения бетонов I—V групп на основе анализа интерферограмм представлены в табл. 2—6 соответственно.

Таблица 2

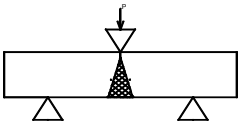
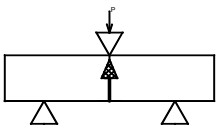
Показатели и параметры процесса деформирования и разрушения бетонов I группы на основе анализа интерферограмм

Наименование показателей и параметров	Значение для образцов	
	без искусственной трещины	с искусственной трещиной
Картина зоны локализации псевдопластических деформаций под нагрузкой		
Протяженность активной зоны локализации l_t	15 мм	8 мм
Объем материала в активной зоне локализации V_t	12 см^3	3,2 см^3
Удельный объем материала в активной зоне локализации V'_t	0,047	0,012
Предел начала трещинообразования	$\sigma/R_{изг}$=0,5…0,6	$\sigma/R_{изг}$= 0,4…0,5

Для бетонов I группы (см. табл. 2) удельный объем области псевдлопластических деформаций составляет 0,047 м^3/м^3. Искусственно инициированная трещина понижает порог начала процесса трещинообразования с $\sigma/R_{изг}$ = 0,5…0,6 до уровня $\sigma/R_{изг}$ =0,4…0,5 и приводит к существенному (в 4 раза) сокращению объема области псевдопластических деформаций — до 0,012 м^3/м^3.

Таблица 3

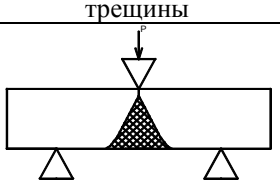
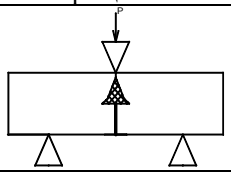
Показатели и параметры процесса деформирования и разрушения бетонов II группы на основе анализа интерферограмм

Наименование показателей и параметров	Значение для образцов	
	без искусственной трещины	с искусственной трещиной
Картина зоны локализации псевдопластических деформаций под нагрузкой		
Протяженность активной зоны локализации l_t	18 мм	12 мм
Объем материала в активной зоне локализации V_t	14,4 см^3	4,8 см^3
Удельный объем материала в активной зоне локализации V'_t	0,056	0,019
Предел начала трещинообразования	$\sigma/R_{изг}$ = 0,5…0,6	$\sigma/R_{изг}$ = 0,4…0,5

Для бетонов II группы (табл. 3) удельный объем области псевдопластических деформаций возрастает и составляет 0,056 м^3/м^3. Искусственно инициированная трещина также понижает порог начала процесса трещинообразования с $\sigma/R_{изг}$ = 0,5…0,6 до 0,4…0,5 и приводит к существенному сокращению объема области псевдопластических деформаций — до 0,019 м^3/м^3.

Таблица 4

Показатели и параметры процесса деформирования и разрушения бетонов III группы на основе анализа интерферограмм

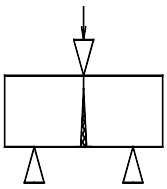
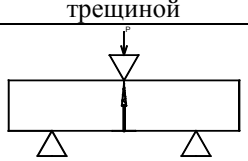
Наименование показателей и параметров	Значение для образцов	
	без искусственной трещины	с искусственной трещиной
Картина зоны локализации псевдопластических деформаций под нагрузкой		
Протяженность активной зоны локализации l_t	40 мм	20 мм
Объем материала в активной зоне локализации V_t	32 см^3	8 см^3
Удельный объем материала в активной зоне локализации V'_t	0,125	0,031
Предел начала трещинообразования	$\sigma/R_{изг}$ = 0,6…0,7	$\sigma/R_{изг}$ = 0,5…0,6

Для бетонов III группы (табл. 4) характерно заметное увеличение протяженности зоны псевдопластических деформаций и соответственно рост удельного объема области псевдопластических деформаций, который достигает величины 0,125 м^3/м^3, то есть в процесс хрупкого разрушения вовлекается восьмая часть объема материала. Искусственно инициированная трещина понижает порог начала процесса трещинообразования с $\sigma/R_{изг}$ = 0,6…0,7 до уровня $\sigma/R_{изг}$ = 0,5…0,6 и приводит к сокращению удельного объема области псевдопластических деформаций — с 0,125 до 0,031 м^3/м^3.

В целом переход от структур бетонов I группы к структурам бетонов II и III групп общую картину, феноменологию диссипации и деформирования принципиально не меняет. Крупноконгломератная структура этих групп бетонов с ростом их прочности при сжатии обеспечивает также и рост их трещиностойкости, что как раз и объясняется заметным увеличением удельного объема зон активной диссипации энергии. Так, переход от I к III группе структур бетонов сопровождается увеличением вовлеченных в работу хрупкого разрушения силовых связей материала более чем в 2,5 раза.

Таблица 5

Показатели и параметры процесса деформирования и разрушения бетонов IV группы на основе анализа интерферограмм

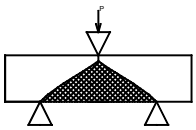
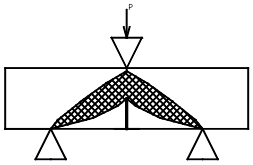
Наименование показателей и параметров	Значение для образцов	
	без искусственной трещины	с искусственной трещиной
Картина зоны локализации псевдопластических деформаций под нагрузкой		
Протяженность активной зоны локализации l_t	6 мм	3 мм
Объем материала в активной зоне локализации V_t	4,8 см^3	1,2 см^3
Удельный объем материала в активной зоне локализации V'_t	0,019	0,005
Предел начала трещинообразования	$\sigma/R_{изг}$ = 0,87…0,94	$\sigma/R_{изг}$ = 0,8…0,9

Для бетонов IV группы (табл. 5) визуально наблюдаемая картина поверхностных деформаций принципиально меняется. Дело в том, что переход к мелко- и микроконгломератной структуре приводит не только к росту величин предела прочности, но и к повышению степени хрупкости бетона. Так, удельный объем области псевдопластических деформаций составляет всего 0,019 м^3/м^3 и оказывается меньше в 15 раз в сравнении с показателями для бетонов III группы! Искусственно инициированная трещина понижает порог начала процесса трещинообразования с $\sigma/R_{изг}$ = 0,87…0,94 до уровня

$\sigma/R_{изг}$ = 0,8…0,9 и приводит к четырехкратному уменьшению объема области псевдопластических деформаций — до 0,005 м^3/м^3. То есть переход от структур бетонов III группы к структурам бетонов IV группы картину деформирования принципиально меняет. При этом целесообразно отметить, что потенциал прочности структурных связей бетонов IV группы реализуется весьма слабо, составляя всего не более пятой части от потенциала работы структурных связей бетона III группы. Это следует из сопоставления объемов зон псевдопластических деформаций.

Таблица 6

Показатели и параметры процесса деформирования и разрушения бетонов V группы на основе анализа интерферограмм

Наименование показателей и параметров	Значение для образцов	
	без искусственной трещины	с искусственной трещиной
Картина зоны локализации псевдопластических деформаций под нагрузкой		
Протяженность активной зоны локализации l_t	100 мм	100 мм
Объем материала в активной зоне локализации V_t	80 см^3	40 см^3
Удельный объем материала в активной зоне локализации V'_t	0,31	0,16
Предел начала трещинообразования	$\sigma/R_{изг}$ = 0,40…0,43	$\sigma/R_{изг}$ = 0,32…0,35

Для бетонов V группы (табл. 6) характерно увеличение протяженности зоны псевдопластических деформаций и соответственно рост удельного объема области псевдопластических деформаций, который достигает величины 0,31 м^3/м^3. В процесс сопротивления разрушению вовлекается уже почти треть объема материала. Искусственно инициированная трещина понижает порог начала процесса трещинообразования с $\sigma/R_{изг}$ = 0,40…0,43 до уровня $\sigma/R_{изг}$ = 0,32…0,35 и уже не приводит к существенному сокращению объема области псевдопластических деформаций. Величина такого снижения составляет 0,16 м^3/м^3, что вдвое ниже, чем для бетонов других групп. При этом и геометрия области предразрушения оказывается принципиально другой. Главным фактором таких существенных изменений в характере деформирования и разрушения является примененное многоуровневое дисперсное армирование структуры материала [3], которое и обеспечивает для бетонов V группы переход от хрупкого типа разрушения к типу разрушения с заметным вкладом вязко-пластического механизма.

Заключение. Анализ локализованных зон активной диссипации энергии при трещинообразовании бетонов позволил показать возможности влияния структур материала на механизмы и параметры сопротивления разрушению материала.

Переход к структурам бетонов V группы обеспечивает значительный рост всех показателей сопротивления разрушению: при сопоставимом уровне показателей прочности при сжатии (на уровне 140 МПа) может быть обеспечен рост трещиностойкости (вязкости разрушения) в три-четыре раза, предельной растяжимости — на порядок, а полной работы разрушения — более чем в 30 раз. И это все является следствием изменения условий диссипации энергии внешнего воздействия в целенаправленно созданной структуре композита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Чернышов Е. М., Коротких Д. Н.* Высокотехнологичные высокопрочные бетоны: вопросы управления их структурой. Современные проблемы строительного материаловедения и технологии : материалы международного конгресса «Наука и инновации в строительстве». Т. 1. 2008. Кн. 2. С. 616—620.

2. *Коротких Д. Н., Чернышов Е. М.* Наноармирование структуры цементного камня кристаллами эттрингита как средство повышения трещиностойкости бетонов // Научный вестник Воронежского гос. архит.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. 2008. № 1. С. 67—75.

3. *Коротких Д. Н.* Многоуровневое дисперсное армирование структуры бетонов для повышения их вязкости разрушения // Вестник гражданских инженеров. 2009. № 3. С. 126—128.

4. Иерархия трещинообразования и многоуровневое дисперсное армирование структуры бетона / Д. Н. Коротких, И. И. Ушаков, С. И. Ушаков, Е. М. Чернышов // Вестник ОГАСА. Вып. 39. Т. 2. Одесса, 2010. С. 4—13.

5. *Коротких Д. Н., Миляев И. Н.* Опыт разработки технологии высокопрочных бетонов на сырьевых материалах рядового качества // Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии. Казань, 2010. Т. 1. С. 312—316.

6. *Коротких Д. Н., Ушаков А. В.* Характеристика показателей разрушения высокопрочных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования // Вестник Центрального регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. Воронеж : РААСН, ВГАСУ, 2011. С. 76—89.

7. *Коротких Д. Н., Кесарийский А. Г.* Исследование методом лазерной голографической интерферометрии процесса трещинообразования при разрушении высокопрочных бетонов // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2011. Вып. № 4. С. 32—39.

8. *Коротких Д. Н.* Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 1) // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 26(45). С. 56—67.

9. *Коротких Д. Н.* Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 2) // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 27(46). С. 54—62.

10. *Чернышов Е. М., Коротких Д. Н., Кесарийский А. Г.* Оценка параметров процесса трещинообразования в структуре современных бетонов методом лазерной голографической интерферометрии // Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов : сб. докл. 6-й Международной конф. СПб., 2012. С. 65—71.

11. *Коротких Д. Н., Кесарийский А. Г., Чернышов Е. М.* Особенности процесса деформирования высокотрещиностойких бетонов с многоуровневым дисперсным армированием // Вісник Одеськоі Державноі Академіі Будивництва та архітектури. Вып. № 47. Ч. 1. Одесса, 2012. С.193—200.

12. *Акчурин Т. К., Ушаков А. В.* Теоретические и методологические вопросы определения характеристик трещиностойкости бетона при статическом нагружении. Волгоград, 2005. 407 с.

13. *Зайцев Ю. В., Леонович С. Н.* Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной. Минск, 2010. 362 с.

14. *Шевченко В. И.* Применение методов механики разрушения для оценки трещиностойкости и долговечности бетона. Волгоград, 1988. 110 с.

15. *Чернышов Е. М., Дьяченко Е. И., Макеев А. И.* Неоднородность структуры и сопротивление разрушению конгломератных строительных композитов: вопросы материаловедческого обобщения и развития теории. Воронеж, 2012. 98 с.

1. *Chernyshov E. M., Korotkikh D. N.* Vysokotekhnologichnye vysokoprochnye betony: voprosy upravleniya ikh strukturoy. Sovremennye problemy stroitel'nogo materialovedeniya i tekhnologii : materialy mezhdunarodnogo kongressa «Nauka i innovatsii v stroitel'stve». T. 1. 2008. Kn. 2. S. 616—620.

2. *Korotkikh D. N., Chernyshov E. M.* Nanoarmirovanie struktury tsementnogo kamnya kristallami ettringita kak sredstvo povysheniya treshchinostoykosti betonov // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gos. arkhit.-stroit. un-ta. Stroitel'stvo i arkhitektura. 2008. № 1. S. 67—75.

3. *Korotkikh D. N.* Mnogourovnevoe dispersnoe armirovanie struktury betonov dlya povysheniya ikh vyazkosti razrusheniya // Vestnik grazhdanskikh inzhenerov. 2009. № 3. S. 126—128.

4. Ierarkhiya treshchinoobrazovaniya i mnogourovnevoe dispersnoe armirovanie struktury betona / D. N. Korotkikh, I. I. Ushakov, S. I. Ushakov, E. M. Chernyshov // Vestnik OGASA. Vyp. 39. T. 2. Odessa, 2010. S. 4—13.

5. *Korotkikh D. N., Milyaev I. N.* Opyt razrabotki tekhnologii vysokoprochnykh betonov na syr'evykh materialakh ryadovogo kachestva // Dostizheniya i problemy materialovedeniya i modernizatsii stroitel'noy industrii. Kazan', 2010. T. 1. S. 312—316.

6. *Korotkikh D. N., Ushakov A. V.* Kharakteristika pokazateley razrusheniya vysokoprochnykh betonov na osnove analiza polnykh ravnovesnykh diagramm ikh deformirovaniya // Vestnik Tsentral'nogo regional'nogo otdeleniya Rossiyskoy akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk. Voronezh : RAASN, VGASU, 2011. S. 76—89.

7. *Korotkikh D. N., Kesariyskiy A. G.* Issledovanie metodom lazernoy golograficheskoy interferometrii protsessa treshchinoobrazovaniya pri razrushenii vysokoprochnykh betonov // Vestnik Donbasskoy natsional'noy akademii stroitel'stva i arkhitektury. 2011. Vyp. № 4. S. 32—39.

8. *Korotkikh D. N.* Zakonomernosti razrusheniya struktury vysokoprochnykh tsementnykh betonov na osnove analiza polnykh ravnovesnykh diagramm ikh deformirovaniya (chast' 1) // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2012. Vyp. 26(45). S. 56—67.

9. *Korotkikh D. N.* Zakonomernosti razrusheniya struktury vysokoprochnykh tsementnykh betonov na osnove analiza polnykh ravnovesnykh diagramm ikh deformirovaniya (chast' 2) // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2012. Vyp. 27(46). S. 54—62.

10. *Chernyshov E. M., Korotkikh D. N., Kesariyskiy A. G.* Otsenka parametrov protsessa treshchinoobrazovaniya v strukture sovremennykh betonov metodom lazernoy golograficheskoy interferometrii // Mekhanika razrusheniya betona, zhelezobetona i drugikh stroitel'nykh materialov : sb. dokl. 6-y Mezhdunarodnoy konf. SPb., 2012. S. 65—71.

11. *Korotkikh D. N., Kesariyskiy A. G., Chernyshov E. M.* Osobennosti protsessa deformirovaniya vysokotreshchinostoykikh betonov s mnogourovnevym dispersnym armirovaniem // Vicnik Odes'koi Derzhavnoi Akademii Budivnitstva ta arkhitekturi. Vyp. № 47. Ch. 1. Odessa, 2012. S.193—200.

12. *Akchurin T. K., Ushakov A. V.* Teoreticheskie i metodologicheskie voprosy opredeleniya kharakteristik treshchinostoykosti betona pri staticheskom nagruzhenii. Volgograd, 2005. 407 s.

13. *Zaytsev Yu. V., Leonovich S. N.* Prochnost' i dolgovechnost' konstruktsionnykh materialov s treshchinoy. Minsk, 2010. 362 s.

14. *Shevchenko V. I.* Primenenie metodov mekhaniki razrusheniya dlya otsenki treshchinostoykosti i dolgovechnosti betona. Volgograd, 1988. 110 s.

15. *Chernyshov E. M., D'yachenko E. I., Makeev A. I.* Neodnorodnost' struktury i soprotivlenie razrusheniyu konglomeratnykh stroitel'nykh kompozitov: voprosy materialovedcheskogo obobshcheniya i razvitiya teorii. Voronezh, 2012. 98 s.

© Чернышов Е. М., Коротких Д. Н., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Чернышов Е. М., Коротких Д. Н. Феноменология локализованных зон активной диссипации энергии при деформировании и разрушении современных бетонов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 212—222.

УДК 691

В. П. Ярцев, А. Г. Воронков

О ВЛИЯНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ВЕЛИЧИНУ ЭНЕРГИИ АКТИВАЦИИ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗРУШЕНИИ И ДЕФОРМИРОВАНИИ

На основании кинетической концепции прочности твердых тел показано, что процессы деформирования и разрушения материалов имеют одинаковую термоактивационную природу, а действие внешних факторов (нагрузки, температуры) — катализирующий характер. Описаны физические процессы в материале при совместном действии нагрузок и температур. Проанализировано влияние температуры на поведение энергии активации полимерных материалов при деформировании и разрушении.

К л ю ч е в ы е с л о в а: разрушение, деформирование, полимер, энергия активации.

On the basis of kinetic conception of solid bodies resistibility it is shown that material strain and destruction processes have the same thermo-active nature and external factors (load, temperature) are of catalyzing character. Physical processes in material under joint impact of load and temperature are described. The influence of temperature on energy of polymeric material activation under destruction and strain are analyzed.

K e y w o r d s: destruction, strain, polymeric material, activation energy.

Современные представления о физике и механике разрушения и деформирования твердых тел основываются на положениях кинетической концепции прочности, касающихся термофлуктуационного характера процессов, которые протекают в материалах во времени. Согласно кинетической концепции разрушение и деформирование материалов имеют одинаковую энергетическую природу и обусловлены термофлуктуационным характером разрыва межатомных или межмолекулярных связей в материале [1]. Процесс разрушения материалов происходит вследствие разрыва связей с сопутствующим образованием микротрещин и их дальнейшим накоплением и раскрытия под действием нагрузки, а процесс деформирования — вследствие разрыва (проскальзывания) межмолекулярных связей и их восстановления в других положениях. Разрыв связей в материале вызывается совместным действием энергии теплового движения атомов и работы внешней силы, преодолевающих энергию связей. При этом внешняя сила вызывает напряжение в связях, облегчая их разрыв, а сам разрыв напряженных связей происходит в результате теплового движения, действующего посредством флуктуаций кинетической энергии, возникающих при колебании атомов (молекул) твердого тела или их групп [1].

В твердом теле, находящемся под нагрузкой, процессы деформирования и разрушения развиваются во времени непрерывно и происходят одновременно, но с разной скоростью. Визуально наблюдается тот процесс, для реализации которого требуется меньше времени. Стоит отметить, что прочностные и деформационные свойства материала определяются не только величиной приложенной нагрузки, но и временем ее воздействия, а также температурой окружающей среды [2].

Предельные значения величины внешних воздействий, при которых наблюдается реализация одного из процессов, — разрушения (разделение тела

на части) или достижения предельных деформаций — принято называть границами работоспособности материала. Можно выделить три основных параметра, характеризующих работоспособность материала: силовой (нагрузка σ), временной (время действия нагрузки τ) и температурный (температура эксплуатации T). При превышении предельной величины любого из трех параметров отмечается предельное состояние материала, связанное или с потерей несущей способности и разрушением, или с потерей устойчивости, или с предельным деформированием.

Взаимосвязь параметров работоспособности материалов (долговечности, нагрузки и температуры) может быть описана следующими уравнениями долговечности [3]:

прочностная долговечность (время до разрушения):

$$\tau = \tau_m \exp\left[\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\left(1 - \frac{T}{T_m}\right)\right], \quad (1)$$

где U_0 — энергия активации (разрыва) связей между кинетическими единицами; γ — структурно-механический коэффициент, характеризующий эффективность механического поля при действии нагрузки; τ_m — минимальное время существования материала при температуре T_m; T_m — предельная температура существования материала; σ — приложенное напряжение; R — универсальная газовая постоянная; T — температура эксплуатации.

Деформационная долговечность:

$$\theta = \theta_m \exp\left[\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\left(1 - \frac{T}{T_m}\right)\right], \quad (2)$$

где θ — время достижения критической деформации (деформационная долговечность); T_m — предельная температура размягчения, выше которой полимер не может вести себя как твердое тело; θ_m — период колебания кинетических единиц (сегментов); U_0 — максимальная энергия активации процесса размягчения.

Формулы (1) и (2) выражают зависимость временной границы работоспособности от действующего напряжения и температуры. Из них могут быть выведены выражения зависимостей для других границ работоспособности материала: предельного напряжения, зависящего от температуры и времени ее действия, и предельной температуры, зависящей от напряжения и времени его действия.

Данные формулы и описывают правило температурно-силовой временной эквивалентности: интенсивность разрушения связей, обеспечивающих работоспособность тела, в равной степени качественно зависит от напряжения, температуры и времени их действия, т. е. повышение или понижение любого из этих параметров можно компенсировать изменением любого параметра из двух других [3].

Отсюда следует, что параметры работоспособности определяются четырьмя термофлуктуационными константами материала, входящими в уравнение долговечности: U_0, τ_m, T_m и γ.

Экспериментальные исследования показывают, что значения термофлуктуационных констант при деформировании и разрушении значительно разли-

чаются (табл.) [4].

Термофлуктуационные константы пластмасс при растяжении

Материал		U_0, кДж/моль	γ, кДж/(моль·МПа)	$10^3/T_m$, $К^{-1}$	$\lg\tau_m$
ПС	Р	234	4,23	1,3	–12
	Д	790	20,1	2,7	–2
ПММА	Р	218	2,26	1,5	–12
	Д	620	8,4	2,4	–5

В таблице приняты следующие обозначения: Р — разрушение; Д — деформирование. Меньшие значения энергии активации при разрушении объясняются тем, что разрушение образца вызвано развитием магистральной трещины, т. е. последовательным разрывом межатомных (химических) связей в основной цепи полимера. Деформирование же связано с одновременным перемещением многих звеньев, образующих сегмент цепи и являющихся его кинетическими единицами, т. е. за одну тепловую флуктуацию должен происходить параллельный разрыв многих физических связей ряда соседних звеньев [4].

Таким образом, можно выделить два типа границ работоспособности материала — прочностный и деформационный.

Однако, как было сказано выше, процессы разрушения и деформирования протекают в твердом теле одновременно, соответственно, под нагрузкой в материале разрыв межатомных и межмолекулярных связей может происходить одновременно. Это дает основание предположить, что при хрупком разрушении определяющим фактором будет разрыв межатомных связей в материале при ограниченных перемещениях сегментов молекул полимера. И наоборот, удельная доля разрывов межмолекулярных связей, участвующих в процессе деформирования, будет значительно превалировать над числом разрывов атомов в молекулярных цепях.

С другой стороны, структурное состояние полимерных материалов резко зависит от температуры окружающей среды. Даже при сравнительно небольших изменениях температуры в диапазоне от +20 до +60 °С прочность и жесткость большинства полимерных материалов значительно снижаются. При этом характер разрушения может меняться от хрупкого до высокоэластического — в процессах разрушения возрастает роль деформационной составляющей.

Можно сделать вывод, что значения энергии активации, полученные при хрупком разрушении и деформировании, выступают как граничные (максимальные) константы материала, определяющего работоспособность в хрупком и высокоэластическом состояниях при соответствующих процессах в чистом виде. В квазихрупком состоянии материала величина U_0 в уравнении долговечности будет иметь промежуточное значение.

Таким образом, значение энергии активации в уравнениях долговечности (1) и (2) есть функция $U = U(T)$, характеризующая влияние температуры на

изменение величины энергии активации процессов разрушения и деформирования при действии нагрузки. При этом сами процессы разрушения и деформирования следует рассматривать как единый кинетический механизм, имеющий термофлуктуационную природу. Качественное различие процессов разрушения и деформирования выражается в том, какие типы связей (молекулярные или химические) имеют определяющее значение в их развитии; количественное (визуально обнаруживаемый результат) — в процентном соотношении сил удельной энергии, приходящейся на разрыв молекулярных и химических связей, которые в конечном итоге приводят к разрушению или предельному деформированию образца.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Регель В. Р., Слуцкер А. И., Томашевский Э. Е.* Кинетическая природа прочности твердых тел. М. : Наука, 1974. 560 с.

2. *Ратнер С. Б., Ярцев В. П.* Физическая механика пластмасс. Как прогнозировать работоспособность? М. : Химия, 1992. 320 с.

3. *Ярцев В. П.* Физико-технические основы работоспособности органических материалов в деталях и конструкциях : дис… д-ра техн. наук. Воронеж, 1998. 350 с.

4. *Ратнер С. Б.* Физические закономерности прогнозирования работоспособности конструкционных пластических масс // Пластические массы. 1990. № 6. С. 35—48.

1. *Regel' V. R., Slutsker A. I., Tomashevskiy E. E.* Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel. M. : Nauka, 1974. 560 s.

2. *Ratner S. B., Yartsev V. P.* Fizicheskaya mekhanika plastmass. Kak prognozirovat' rabotosposobnost'? M. : Khimiya, 1992. 320 s.

3. *Yartsev V. P.* Fiziko-tekhnicheskie osnovy rabotosposobnosti organicheskikh materialov v detalyakh i konstruktsiyakh : dis… d-ra tekhn. nauk. Voronezh, 1998. 350 s.

4. *Ratner S. B.* Fizicheskie zakonomernosti prognozirovaniya rabotosposobnosti konstruktsionnykh plasticheskikh mass // Plasticheskie massy. 1990. № 6. S. 35—48.

© Ярцев В. П., Воронков А. Г., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Ярцев В. П., Воронков А. Г. О влиянии температуры на величину энергии активации полимерных материалов при разрушении и деформировании // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 223—226.

ОСНОВАНИЯ, ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

УДК 624.154

Б. В. Бахолдин, Е. В. Труфанова

ОБОБЩЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРЕДЛОЖЕНИЯ ПО РАСЧЕТУ СВАЙ НА ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ НАГРУЗКИ С УЧЕТОМ ИХ ГИБКОСТИ

Наблюдаемая в настоящее время тенденция повышения этажности строящихся зданий вызывает необходимость совершенствования методов расчета их конструкций на горизонтальные нагрузки в связи с неизбежным возрастанием интенсивности передаваемых на них ветровых воздействий. В статье приведены результаты обобщения экспериментальных исследований горизонтально нагруженных свай, согласно которым установлен факт развития ярко выраженных сдвиговых деформаций околосвайного грунта в результате его выжимания стволом свай при изгибе сваи и ее повороте. На основании этого разработана методика расчета горизонтально нагруженных свай, учитывающая деформации ствола сваи от ее изгиба и перемещения нижней ее части от уплотнения грунта свайного основания.

К л ю ч е в ы е с л о в а: свая, горизонтальная нагрузка, изгиб сваи, сдвиг, уплотнение грунта.

Currently observed tendency of increase in the number of storeys in constructed buildings generates a need to improve calculation methods of constructions on the lateral load due because of the inevitable increase in the intensity of wind loadings transferred to them. The article presents the results of summery of experimental research of laterally loaded piles, according to which the fact was established that the development of strong shear strains of the surrounding soil due to its pile squeezing at pile bending and its rotation. On this basis, was developed the calculation method of laterally loaded piles taking into account the deformation of the piles of their bending and displacement of the bottom part of the pile due to the soil consolidation of a pile footing.

K e y w o r d s: pile, lateral load, pile bending, shear, soil consolidation.

На основании экспериментальных исследований [1—3] установлено, что деформации горизонтально нагруженных свай происходят за счет уплотнения околосвайного грунта в результате выжимания его стволом сваи при ее изгибе и повороте вокруг так называемой нулевой точки. Общая картина, наблюдаемая при экспериментальном исследовании деформационных процессов, происходящих в верхней зоне грунта при нагружении сваи горизонтальной нагрузкой, представлена на рис. 1.

Деформации окружающего сваю грунта происходят с развитием в нем пассивного предельного напряженного состояния с возникновением сдвигов и образованием перед сваей локального вала выпора грунта, а также трещин, и как следствие — остаточных деформаций. Из-за относительно большого заглубления свай предельное напряженное состояние при их горизонтальном нагружении, как правило, оказывалось не полным. Поэтому существующие

в настоящее время положения теории предельного равновесия, предусматривающие несжимаемость грунтов, в рассматриваемом случае к описанию пассивного напряженного состояния следует применять с внесением соответствующих корректировок.

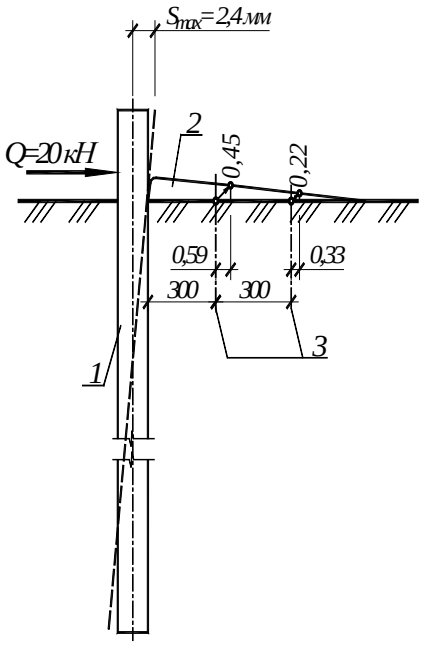


Рис. 1. Деформации верхней зоны околосвайного грунта при действии на сваю горизонтальной нагрузки согласно экспериментальным данным [1]: *1* — свая; *2* — зона выпора грунта; *3* — оси стержневых элементов до нагружения

В связи с изложенным для случая горизонтально нагруженной сваи расчетную модель ее основания предложено описать следующим образом.

В грунтовом полупространстве с находящейся в нем гибкой сваей, погруженной до глубины *H*, в случае горизонтального ее нагружения можно выделить характерную точку *A* (см. рис. 2). При некоторой нагрузке *Q* эта точка соответствует крайней точке призмы отпора грунта. Проводя из этой точки кулоновскую линию под углом $\left(45°-\frac{\varphi}{2}\right)$ к поверхности массива до оси сваи, получим нижнюю точку *B* призмы отпора. При этом можно считать, что на участке боковой поверхности сваи *OB* до глубины *h* будет действовать максимальное напряженное состояние, соответствующее значению напряжений $\gamma z\frac{1+\sin\varphi}{1-\sin\varphi}=\gamma z\cdot \mathrm{tg}^2\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right)$, а сдвиг в грунте будет происходить под действием силы

$$F=\frac{1}{2}\gamma h^2\left[\mathrm{tg}^2\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right)-\mathrm{tg}^2\left(45°-\frac{\varphi}{2}\right)\right]=\frac{1}{2}\gamma h^2 4\frac{t\mathrm{g}\,\varphi}{\cos\varphi}=2\gamma h^2\frac{\mathrm{tg}\,\varphi}{\cos\varphi}. \qquad (1)$$

В соответствии с классическим решением Ренкина в грунтовом массиве при его нагружении всегда возможно одновременное как появление максимального, так и сохранение на некотором расстоянии минимального напряженного состояния. В рассматриваемом случае минимальное напряженное состояние соответствует действию вертикальной нагрузки от собственного веса грунта. Поэтому можно считать, что при неполном предельном состоянии в вертикальной плоскости *AC* будут сохраняться эти минимальные напряжения, соответствующие $\gamma z \operatorname{tg}^2\left(45° - \frac{\varphi}{2}\right) = \gamma z \cdot \operatorname{tg}^2 \frac{1-\sin\varphi}{1+\sin\varphi}$, а в переходной зоне от максимального напряженного состояния к минимальному, как это показано ранее в работе [4], в соответствии с теоретическими положениями Мора напряженное состояние может быть описано условием

$$\sigma = \gamma z \frac{1-\omega \sin\varphi}{1+\omega \sin\varphi}, \qquad (2)$$

где ω — коэффициент пластичности, изменяемый во всем диапазоне чисел от –1 до 1.

Поскольку в точке *A* имеет место максимальное напряженное состояние, а в так называемой нулевой точке, относительно которой происходит поворот сваи, дополнительные напряжения равны нулю, картину напряженно-деформированного состояния на участке *BD* можно считать обратной напряженному состоянию на участке *OB*. Поэтому равнодействующую сил на участке *BD* можно приближенно считать равной удвоенному значению силы *F*, определяемой по формуле (1), а место приложения этой силы совпадающим с плоскостью *OB*.

Ниже точки *D* на боковой поверхности сваи отпор грунта меняет свое направление по отношению к отпору на верхнем участке сваи. Можно утверждать, что величина отпора на нижнем участке сваи с глубиной увеличивается от нулевого его значения в точке *D* до наибольшего значения в нижнем конце сваи, поскольку возрастание отпора предопределяется как возрастанием сопротивления грунта с глубиной, так и увеличением рычага действия сил отпора. Принимая рост сопротивления отпора с глубиной линейно возрастающим, можно считать, что равнодействующая сил отпора на этом участке боковой поверхности сваи F_0 будет находиться в пределах горизонтальной плоскости, расположенной на удалении от точки *D* на расстояние

$$h_{\text{н}} = \frac{2}{3}(H - 2h). \qquad (3)$$

Зная (в соответствии с изложенным выше) уровни расположения равнодействующих сил отпора и величину отпора грунта 2*F* на верхнем участке боковой поверхности сваи как функции глубины ее расположения в соответствии с условием (1), на основании уравнения предельного равновесия нетрудно определить неизвестные значения *F*, F_0 и *h* в зависимости от действующей силы *Q*, используя методы последовательной смены равновесных состояний. Отпор грунта в нижнем конце сваи, как было обосновано ранее в опубликованной работе [4], может быть принят линейно возрастающим

от нуля в точке *B* до максимального его значения в нижнем конце сваи. Качественно такая зависимость близка к опытным данным [3, 4]. В связи с этим равнодействующую отпора в пределах нижней части боковой поверхности сваи можно принять равной значению F_0.

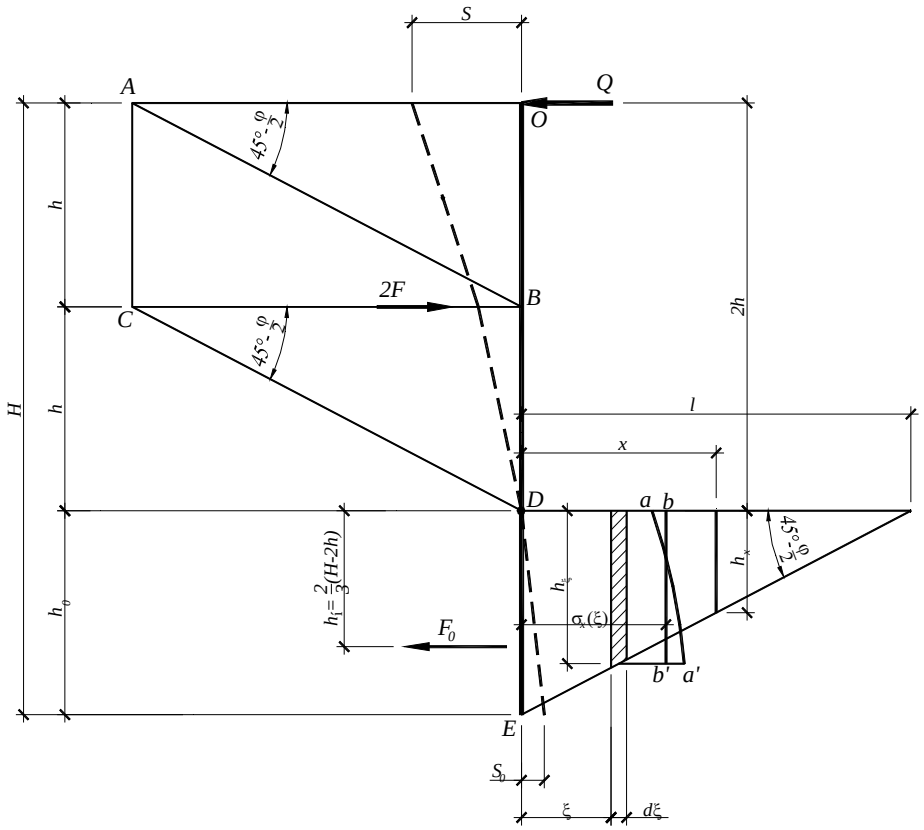


Рис. 2. Предлагаемая расчетная схема основания горизонтально нагруженной сваи

При описанной расчетной модели основания горизонтально нагруженной сваи задача об определении перемещений сваи в результате ее изгиба при разных передаваемых на нее горизонтальных нагрузках *Q* легко решается при установленных зависимостях (1) и (2) согласно методике последовательной смены равновесных состояний с использованием простых уравнений равновесия. При этом решения обычно сводятся к кубическим зависимостям.

Определение искомых величин этих зависимостей может быть произведено итерационным методом или методом Кардана.

При известных значениях *Q*, *H* и определенных расчетом величин *F* и F_0 определение возникающих в свае изгибающих моментов и величин перемещений сваи при изгибе S_u ствола сваи может быть произведено с использованием общепринятых зависимостей расчета статически определимой балочной системы [5].

Однако общее перемещение верхнего конца сваи *S* при этом должно быть определено с учетом возможного перемещения от уплотнения грунта в пределах нижней части сваи $S_E = f(S_0)$.

$$S = S_u + S_E. \tag{4}$$

Величина этого перемещения может быть оценена с использованием предложенного Флориным метода определения зависимости между горизонтальным смещением сооружения и степенью использования отпора грунта [6].

Согласно этому методу, отпор грунта на нижней поверхности сваи в пределах участка $h_н$ (см. рис. 2) развивается постепенно по мере увеличения ширины уплотнения полосой x в процессе образования поверхностей скольжения. Определение величины x при этом производится по величине $F_0=\alpha F_{отп}(0)$ на основании решения, полученного при разработке этого метода ниже приводимого уравнения, связующего указанные величины

$$h_x^2+\frac{2}{\gamma}\left(p+\operatorname{ctg}\varphi\right)h_x-\frac{1}{2\gamma}(1-\alpha)F_{отп}(0)\cos\varphi\operatorname{ctg}\varphi=0. \tag{5}$$

Решение этого уравнения относительно x производится, с учетом того, что в соответствии с обозначениями на рис. 2 $l=\operatorname{tg}\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right)$ $h_x=h_0\left(1-\frac{x}{l}\right)$ $\alpha=\frac{F_0}{F_{отп}(0)}$, а функция $F_{отп}(0)$ определяется по формуле

$$F_{отп}=\frac{1}{2}\gamma h_0^2\ \operatorname{tg}^2\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right)+ph_0\operatorname{tg}^2\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right)+2ch_0\operatorname{tg}\left(45°+\frac{\varphi}{2}\right), \tag{6}$$

где p — нагрузка на поверхности грунта.

При определении величины объемного сжатия грунта от горизонтального смещения свай, соответствующего приложенной силе F_0, сначала вычисляют среднюю по высоте h_ξ величину сжимающих напряжений, возникающих при уплотнении грунта под влиянием этой силы F_0. При определении средних по высоте h_ξ величин напряжений σ_x, σ_y, и σ_z, возникающих от смещения сваи, как показано на рис. 2, заменяют эпюру напряжений σ_x, обозначенную буквами *a*—*a'*, эпюрой *b*—*b'*. Тогда средняя ордината эпюры напряжений σ_x в сечении ξ призмы выпора может быть получена из выражения

$$\sigma_x(\xi)=\sigma(\xi)=\frac{F(\xi)}{h_\xi}. \tag{7}$$

Полную величину сжатия в уплотненной зоне, а затем среднюю величину горизонтального смещения конструкции Флорин рекомендует определять с использованием данных компрессионных испытаний образцов грунта при напряжениях, которые будут развиваться в призме выпора. Однако для практических расчетов возможно также использовать обобщенные данные об общем модуле деформации этих грунтов. При этом оценку величины смещения нижнего конца сваи S_0 при горизонтальном ее нагружении можно осуществлять по условию

$$\frac{1}{2}h_0S_0b=\frac{1}{2}\beta\frac{xb}{Eh_o}\left[F_{отп}(0)-F_{рас}(0)\right], \tag{8}$$

где S_0 — смещение нижнего конца сваи; b — поперечный размер сваи; β — безразмерный коэффициент, принимаемый равным 0,8; E — модуль деформации грунта в призме отпора; $F_{отп}(0)$ — сила отпора грунта, определяемая по формуле (6); $F_{рас}(0)$ — сила распора от собственного веса грунта; x — ширина полосы уплотнения грунта (см. рис. 2) в призме отпора.

Величина дополнительного смещения верхнего конца сваи S_E при приложении горизонтальной силы Q может быть определена как функция величины смещения нижнего конца сваи S_0 по условию

$$S_E = S_0 \frac{2h}{H - 2h}. \qquad (9)$$

При сваях большой длины величиной S_E можно пренебречь, поскольку $2h$ в этом случае существенно меньше (H–$2h$). При оценке же перемещений коротких свай эта величина будет иметь решающее значение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Труфанова Е. В., Ястребов П. И.* Экспериментальное исследование воздействия горизонтально нагруженных свай на окружающий массив грунта // Инженерные изыскания. 2012. № 10.

2. *Бахолдин Б. В., Труфанова Е. В.* Некоторые сравнительные сопоставления расчета свай на горизонтальную нагрузку с экспериментальными данными // Труды Международной науч.-техн. конф. «Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях». Т. 1. Свайные фундаменты. Экспериментально-теоретические исследования и практика проектирования. Уфа, 2006. С. 18— 22.

3. *Буданов В. Г.* Исследование взаимодействия подземной части одностоечных свободностоящих опор ЛЭП с грунтом основания : автореф. дис… канд. техн. наук. М. : Госстрой СССР, НИИОСП им. Н. М. Герсеванова, 1976. 26 с.

4. *Бахолдин Б. В., Труфанова Е. В., Ястребов П. И.* Методика расчета фундаментов из буросекущихся и буросоприкасающихся свай на горизонтальные нагрузки // Вестник Отделения строительных наук. Вып. 16. В 2 т. М. : МГСУ, 2012. Т. 1. С. 34—40.

5. *Беляев Н. М.* Сопротивление материалов. М. : Глав. ред. физ.-мат. лит-ры изд-ва «Наука», 1976. 608 с.

6. *Флорин В. А.* Основы механики грунтов. Т. 2. М. : Госстройиздат, 1961. 544 с.

1. *Trufanova E. V., Yastrebov P. I.* Eksperimental'noe issledovanie vozdeystviya gorizontal'no nagruzhennykh svay na okruzhayushchiy massiv grunta // Inzhenernye izyskaniya. 2012. № 10.

2. *Bakholdin B. V., Trufanova E. V.* Nekotorye sravnitel'nye sopostavleniya rascheta svay na gorizontal'nuyu nagruzku s eksperimental'nymi dannymi // Trudy Mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf. «Problemy mekhaniki gruntov i fundamentostroeniya v slozhnykh gruntovykh usloviyakh». T. 1. Svaynye fundamenty. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya i praktika proektirovaniya. Ufa, 2006. S. 18— 22.

3. *Budanov V. G.* Issledovanie vzaimodeystviya podzemnoy chasti odnostoechnykh svobodnostoyashchikh opor LEP s gruntom osnovaniya : avtoref. dis… kand. tekhn. nauk. M. : Gosstroy SSSR, NIIOSP im. N. M. Gersevanova, 1976. 26 s.

4. *Bakholdin B. V., Trufanova E. V., Yastrebov P. I.* Metodika rascheta fundamentov iz burosekushchikhsya i burosoprikasayushchikhsya svay na gorizontal'nye nagruzki // Vestnik Otdeleniya stroitel'nykh nauk. Vyp. 16. V 2 t. M. : MGSU, 2012. T. 1. S. 34—40.

5. *Belyaev N. M.* Soprotivlenie materialov. M. : Glav. red. fiz.-mat. lit-ry izd-va «Nauka», 1976. 608 s.

6. *Florin V. A.* Osnovy mekhaniki gruntov. T. 2. M. : Gosstroyizdat, 1961. 544 s.

© Бахолдин Б. В., Труфанова Е. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Бахолдин Б. В., Труфанова Е. В. Обобщение результатов экспериментальных исследований и предложения по расчету свай на горизонтальные нагрузки с учетом их гибкости // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 227—232.

УДК 624.154+624.131

А. Н. Богомолов, О. В. Ермаков, А. С. Иванов, О. А. Богомолова, А. В. Прокопенко, А. Н. Ушаков

ДВА ПОДХОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ СИЛ ОПОЛЗНЕВОГО ДАВЛЕНИЯ

Приведено сравнение результатов построения наиболее опасных линий скольжения, расчета коэффициента запаса устойчивости однородного откоса и вычисления сил оползневого давления, выполненных методом, использующим вариационные принципы при построении НОЛС, и методом, базирующемся на анализе напряженного состояния грунтового массива. Установлено, что величина коэффициента бокового давления грунта оказывает существенное влияние на распределение горизонтальных напряжений в приоткосной области, что в итоге определяет положение и форму наиболее опасной линии скольжения, величину коэффициента запаса устойчивости и сил оползневого давления. Показано, что для условий рассмотренного примера величина коэффициента запаса устойчивости, вычисленная вариационным методом, соответствует результату, полученному на основе анализа напряженного состояния приоткосной области, при условии, что величина коэффициента бокового давления грунта равна 0,01.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вариационные методы, анализ напряженного состояния грунтового массива, коэффициент бокового давления грунта, положение и форма наиболее опасной линии скольжения, коэффициент запаса устойчивости, оползневое давление.

The present article contains comparison of the results of the construction of the most dangerous slip lines, safety factor of the homogeneous slope calculation and landslide pressure strength computing made by the method that uses variational principles while NOLS construction and the method based on the stress state analysis of the soil mass. It is determined that the coefficient value of lateral earth pressure has a significant influence on the distribution of horizontal stresses in the near slope area, that as a result determines position and shape of the most dangerous slip line, safety factor value and pressure forces landslide. It is shown that for the conditions of the considered example safety factor coefficient value calculated by the variational method corresponds to the result obtained by analyzing the stress state of near the slope area under condition that the coefficient of lateral earth pressure is equal to 0,01.

K e y w o r d s: variational methods, the analysis of the soil mass stress state, coefficient of lateral earth pressure, position and shape of the most dangerous slip line, safety factor, landslide pressure.

Определение величины оползневого давления $E_{оп}$ является одной из важных задач прикладной геомеханики.

Для ее решения необходимо предварительно найти наиболее опасную линию скольжения (НОЛС) в грунтовом откосе и соответствующее ей значение коэффициента запаса устойчивости K.

Подавляющее большинство методов расчета устойчивости откосов и, базирующихся на их основе, методов расчета сил оползневого давления не свободны от целого ряда не всегда корректных допущений и упрощений, основными из которых являются:

а) призма скольжения произвольным образом расчленяется на вертикальные блоки (не указывается их предпочтительное количество или толщина), которые считаются абсолютно твердыми телами;

б) равнодействующая сил взаимодействия между блоками прикладывается в некоторой точке, положение которой и ориентация равнодействующей определяются на основе принятия ряда условий, делающих статически неопределимую задачу о равновесии блоков статистически определимой;

в) положение и форма наиболее опасной линии скольжения принимаются известными, определяются путем «перебора» результатов множества расчетов для различных линий скольжения или на основе вариационных методов [1—4];

г) приблизительно учитывается лишь одна вертикальная σ_z составляющая полного напряжения в каждой точке наиболее опасной линии скольжения (вернее сила P_i (вес блока), приложенная к основанию блока, раскладывается на нормальную и касательную к этому основанию составляющие);

д) в расчете не участвует величина коэффициента бокового давления грунта ξ_o, которая в значительной степени определяет напряженное состояние грунтового массива;

е) рассматривается бесконечно простирающийся вниз откос (подошва откоса отсутствует), что предопределяет исключение из рассмотрения при решении задач факта концентрации напряжений в области перехода откоса в подошву;

ж) внешняя нагрузка, даже если она находится в непосредственной близости от призмы скольжения, но попадает в ее границы, не принимается во внимание;

з) величина оползневого давления определяется значением разности между сдвигающими и удерживающими силами, действующими вдоль НОЛС, что по физическому смыслу соответствует перерезывающей силе, т. к. векторы удерживающих и сдвигающих сил направлены вдоль отрезка прямой линии — основания соответствующего отсека и т. д.

Исключить большинство перечисленных выше недостатков позволяют методы, основанные на анализе напряженного состояния грунтового массива.

Определение полей напряжений в однородных криволинейных откосах может быть осуществлено на основе аналитических решений первой основной задачи теории упругости для весомой однородной и изотропной полуплоскости с криволинейной границей [5; 6], полученных на основе использования методов теории функций комплексного переменного.

Для этих же целей, в случае прямолинейных и неоднородных откосов, может быть применен метод конечных элементов [7].

Если напряжения в приоткосной области известны, то коэффициент запаса устойчивости K_T в каждой ее точке при отсутствии областей пластических деформаций определяется выражением [5]:

$$K_T = \frac{\left[\frac{1}{2}(\sigma_z - \sigma_x)\cos 2\alpha + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z) + \tau_{xz}\sin 2\alpha + \sigma_{CB}\right]\mathrm{tg}\varphi}{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_z)\sin 2\alpha + \tau_{xz}\cos 2\alpha}, \qquad (1)$$

где σ_z, σ_x, τ_{xz} — безразмерные (в долях γH) напряжения в рассматриваемой точке; $\sigma_{св} = C(\gamma H \mathrm{tg}\varphi)^{-1}$— приведенное давление связности; C, φ, γ и H — соответственно удельное сцепление, угол внутреннего трения, объемный вес грунта и высота откоса, α — угол наклона касательной к горизонтальной оси ox в рассматриваемой точке линии скольжения, найденный из соотношений

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial K_T}{\partial \alpha} &= 0\,; \\ \frac{\partial^2 K_T}{\partial \alpha^2} &> 0, \end{aligned}\right\}, \qquad (2)$$

которые предопределяют выполнение условия $K_T = K_{T\min}$.

Значение глобального коэффициента устойчивости откоса вычисляется по формуле

$$K = \frac{\int_0^l F_{\text{уд}}(s)ds}{\int_0^l F_{\text{сд}}(s)ds}, \tag{3}$$

где $F_{\text{уд}}$ и $F_{\text{сд}}$ — удерживающие и сдвигающие силы, действующие в каждой точке линии скольжения, и соответственно равные числителю и знаменателю формулы (1).

Если точка «перешла» в предельное состояние, то формула (1) принимает вид [6]:

$$K'_T = \frac{(\sigma_z + \sigma_{CB})\sin\varphi(\cos 2\alpha + b\sin 2\alpha) + \sigma_z l + \sigma_{CB} b}{(\sigma_z + \sigma_{CB})(b\cos 2\alpha - 2)\cos\varphi}, \tag{4}$$

где $b = \text{tg}2\alpha^*$; $l = (1+b)^{\frac{1}{2}}$; $\alpha^* = \alpha - \left(45° + \frac{\varphi}{2}\right)$.

Естественно, что K'_T =1, т. к. внутри областей предельного состояния грунта строго выполняется условие пластичности.

Величина глобального коэффициента устойчивости при условии, что некоторая часть или части линии скольжения находятся внутри областей предельного состояния, определяется выражением

$$K' = \frac{S'_{\text{уд}} + S_{\text{уд}}}{S'_{\text{сд}} + S_{\text{сд}}}, \tag{5}$$

где $S'_{\text{сд}}$ и $S'_{\text{уд}}$ — площади эпюр удерживающих и сдвигающих сил, действующих вдоль участка НВПР, находящегося в зоне пластических деформаций; $S_{\text{сд}}$ и $S_{\text{уд}}$ — площади эпюр сдвигающих и удерживающих сил, построенные для участка наиболее вероятной поверхности разрушения, находящегося вне границ областей предельного состояния.

Отметим, что в обеих работах излагается методика построения такой линии скольжения, что в каждой ее точке выполняется условие минимальности величины коэффициента запаса, т. е. $K_T = K_{T\min}$.

В работе [6] изложен метод нахождения сил оползневого давления на основе анализа напряженного состояния грунтового массива, а в работе [8] приводится пример определения величины оползневого давления в однородном грунтовом откосе, предложенным авторами методом расчета $E_{\text{оп}}$, базирующимся на вариационных принципах. Рассмотрен однородный откос высотой H = 12,5 м с углом заложения β = 24°, физико-механические свойства грунта имеют значения: C = 20 кН/м, φ = 10°, γ = 18 кН/м^3, динамический коэффициент μ = 0,05. Данные о величине коэффициента бокового давления ξ_o отсутствуют. Однако, судя по значениям ФМСГ, откос сложен глинистым грунтом, для которого коэффициент бокового давления имеет среднее значение ξ = 0,75 [9].

В работе [8] установлено, что наиболее опасной является линия скольжения IV, которой соответствует величина коэффициента запаса устойчивости K = 0,98. Эпюра оползневого давления приведена на рис. 1 (цит. по [8]), однако не указано, какому проектному значению коэффициента запаса она

соответствует, и непонятно, каков закон распределения оползневого давления вдоль гипотетической оси удерживающего сооружения, совпадающей с сечением откоса (x = 18 м), в котором величина оползневого давления имеет максимальное значение.

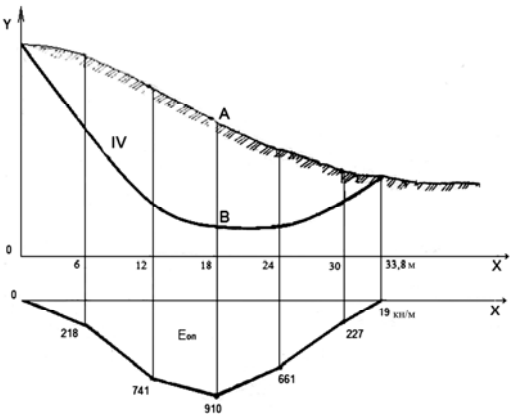


Рис. 1. Контур грунтового массива, наиболее опасная линия скольжения IV и эпюра оползневого давления, по данным работы [8]

Сравним с этими данными результаты наших вычислений, предварительно отметив, что все вычисления и графические построения выполнены при помощи компьютерной программы [10], разработанной в ВолгГАСУ. В этой программе для анализа НДС грунтового массива формализованы аналитические решения граничных задач теории упругости [6] и метод конечных элементов, для построения наиболее опасных линий скольжения и определения величин коэффициентов запаса устойчивости — методики [5, 6].

Сначала определим значение коэффициента бокового давления грунта ξ_o, соответствующее численному значению коэффициента запаса устойчивости, приведенному в работе [8].

Известно [5], что для однородного откоса при условии, что $\sigma_c \geq 0{,}05$ (согласно условиям примера, рассмотренного в работе [8], $\sigma_{св} = 0{,}505$), величина коэффициента устойчивости К связана с величиной коэффициента бокового давления соотношением

$$K = \frac{4}{7}(1+\xi_o)(2a\sigma_{св}+b)\mathrm{tg}\varphi\,, \qquad (6)$$

где a и b — коэффициенты, определяемые в зависимости от угла откоса β по графикам, приведенным в [5].

Если подставить в формулу (6) значения a и b, соответствующие углу $\beta = 24°$, и $K = 0{,}98$, приведенные в работе [8], то получим, что $\xi_o^{[8]} = 0{,}013$. Это значит, что рассматривается грунтовый массив, в котором практически отсутствуют нормальные горизонтальные напряжения, т. к. $\sigma_x = \xi_o \gamma z = 0{,}013\gamma z$, что соответствует скальным породам, для которых $\xi = 0...0{,}1$ [11].

На рис. 2 изображены картины изолиний безразмерных (в долях γH) горизонтальных σ_x и касательных τ_{xz} напряжений при четырех значениях коэффициента бокового давления грунта ξ = 0,75, 0,3, 0,1, 0,01, возникающих в рассматриваемом однородном откосе.

На рис. 2 показано, что поле горизонтальных σ_x напряжений претерпевает существенную трансформацию при уменьшении величины ξ: численные значения σ_x в точках приоткосной области резко уменьшаются, возникают зоны растягивающих напряжений, часть грунтового массива, расположенная выше подошвы откоса, становится более напряженной, чем нижерасположенный массив грунта. При этом поле касательных τ_{xz} напряжений трансформируется весьма незначительно, а на поле вертикальных напряжений σ_z величина ξ_o и вовсе не оказывает воздействия.

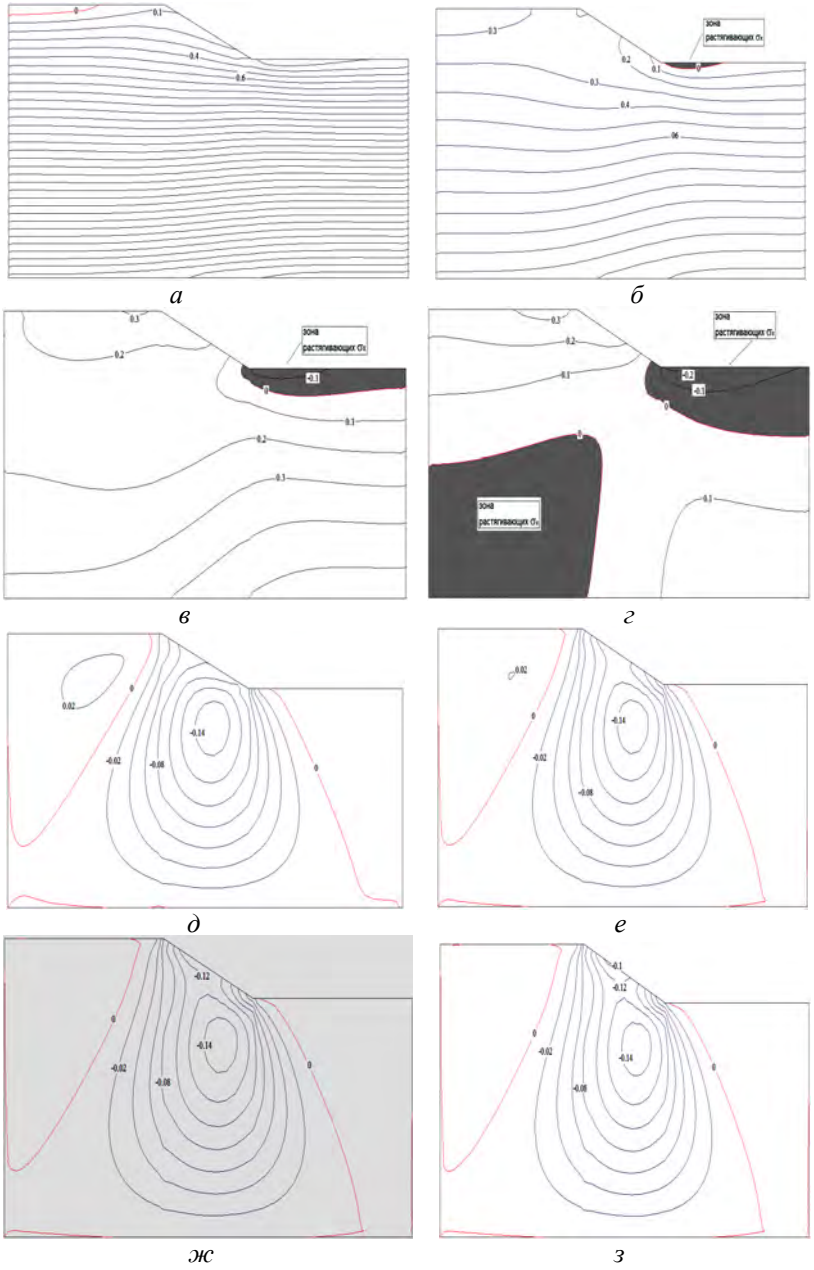
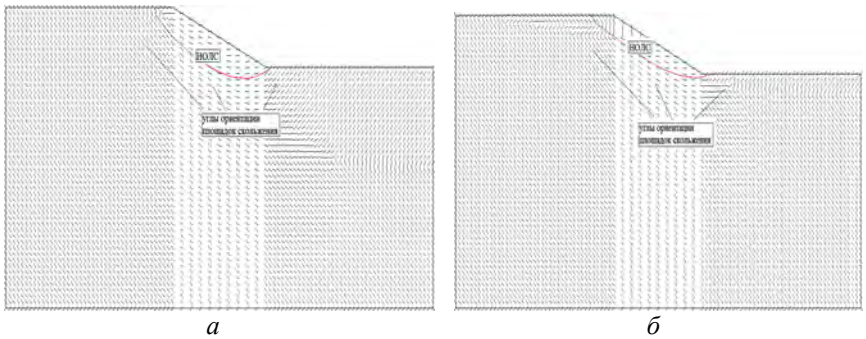


Рис. 2. Картины изолиний горизонтальных σ_x (*а*—*г*) и касательных τ_{xz} (*д*—*з*) напряжений при ξ_o= 0,75; 0,3; 0,1; 0,01

Данный результат еще раз подтверждает положение о том, что при использовании расчетных методов [1—4, 8] нормальные горизонтальные напряжения в точках грунтового массива не учитываются при расчете.



а *б*

Рис. 3. Наиболее опасные линии скольжения в рассматриваемом откосе при ξ= 0,75 (*а*) и $\xi_o^{[9]}$ = 0,013 (*б*)

На рис. 3 изображены наиболее опасные линии скольжения, построенные при помощи компьютерной программы [10] в грунтовом откосе, рассмотренном в работе [8], для двух значений коэффициента бокового давления ξ_o = 0,75 и $\xi_o^{[9]}$ = 0,013. При этом значения соответствующих коэффициентов запаса устойчивости вычислены равными $K_{0,75}$ = 1,36 и $K_{0,01}$ = 0,98.

Расчет величины оползневого давления методом, приведенным в [6], по наиболее опасной линии скольжения IV, изображенной на рис. 3, *б*, показывает, что для вертикального сечения, совпадающего с сечением *AB*, его величина равна $E_{оп}$= 527,8 кН/м, что составляет 58 % от значения, приведенного в работе [9].

Это результат легко объяснить, даже не говоря об отличиях используемых методов, тем, что объем, а значит, и вес наиболее опасной призмы скольжения, изображенной на рис. 1, при всех прочих равных условиях приблизительно в 2 раза больше объема и веса соответствующей призмы, показанной на рис. 3, *б*.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. При уменьшении величины ξ_o от 0,75 до 0,01 численные значения горизонтальных σ_x напряжений в точках приоткосной области резко уменьшаются, возникают растянутые в горизонтальном направлении зоны, часть грунтового массива, расположенная выше подошвы откоса, становится перенапряженной по отношению к нижележащему массиву. При этом поля касательных τ_{xz} и вертикальных нормальных напряжений σ_z не реагируют на изменение ξ_o.

2. Перераспределение горизонтальных σ_x напряжений влечет за собой изменение положения и формы наиболее опасной линии скольжения, уменьшается ее кривизна, НОЛС приближается к поверхности откоса, располагаясь практически параллельно ей, уменьшая при этом мощность сползающей толщи грунта.

3. Для условий рассмотренного в работе примера, уменьшение величины ξ_o от 0,75 до 0,01 влечет за собой уменьшение величины коэффициента запаса устойчивости однородного откоса, определенного на основе анализа напряженного состояния грунтового массива, с $K_{0,75}$ =1,36 до $K_{0,01}$ = 0,98, т. е.

на 28 %. Величина $K_{0,01}$ точно совпадает с величиной коэффициента запаса устойчивости, приведенного в работе [8], который вычислен с учетом лишь вертикальной σ_z (одной из трех) составляющей компоненты напряжения в точке грунтового массива.

4. Уменьшение почти вдвое значений величины оползневого давления и толщины призмы скольжения, полученных при расчете методом [6], предполагает получение существенного экономического эффекта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гольдштейн М. Н.* О применении вариационного исчисления к исследованию оснований и откосов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1969. № 1. С. 2—6.

2. *Дорфман А. Г.* Обобщение вариационных принципов механики на линейно-деформируемые массивы грунта // Земляное полотно и геотехника на железнодорожном транспорте : межвузовский сб. науч. тр. Днепропетровск, 1984. С. 3—9.

3. *Дорфман А. Г., Дудинцева И. Л.* Применение вариационных методов к расчету оползневого давления на подпорные стены // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1971. № 2. С. 36—38.

4. *Магдеев У. Х.* Исследование устойчивости откосов вариационным методом в условиях пространственной задачи // Вопросы геотехники. № 20. Днепропетровск, 1972. С. 120—129.

5. *Цветков В. К.* Расчет устойчивости откосов и склонов. Волгоград : Нижневолжское кн. изд-во, 1974. 238 с.

6. *Богомолов А. Н.* Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. Пермь : ППИ, 1996. 150 с.

7. *Фадеев А. Б.* Метод конечных элементов в геомеханике. М. : Недра, 1987. 221 с.

8. *Гинзбург Л. К., Раздольский А. Г.* Определение максимального оползневого давления // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1992. № 5. С. 11—14.

9. *Вялов С. С.* Реологические основы механики грунтов. М. : Высш. школа, 1978. 447 с.

10. *Богомолов А. Н.* Устойчивость, напряженно-деформированное состояние: свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2009613499; заявл. 19.05.2009, зарег. в Реестре программ для ЭВМ 30.06.2009.

11. Геологический словарь : в 2-х т. // под ред. К. Н. Паффенгольца. М. : Недра, 1978. 456 с.

1. *Gol'dshteyn M. N.* O primenenii variatsionnogo ischisleniya k issledovaniyu osnovaniy i otkosov // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 1969. № 1. S. 2—6.

2. *Dorfman A. G.* Obobshchenie variatsionnykh printsipov mekhaniki na lineyno-deformiruemye massivy grunta // Zemlyanoe polotno i geotekhnika na zheleznodorozhnom transporte : mezhvuzovskiy sb. nauch. tr. Dnepropetrovsk, 1984. C. 3—9.

3. *Dorfman A. G., Dudintseva I. L.* Primenenie variatsionnykh metodov k raschetu opolznevogo davleniya na podpornye steny // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 1971. № 2. S. 36—38.

4. *Magdeev U. Kh.* Issledovanie ustoychivosti otkosov variatsionnym metodom v usloviyakh prostranstvennoy zadachi // Voprosy geotekhniki. № 20. Dnepropetrovsk, 1972. S. 120—129.

5. *Tsvetkov V. K.* Raschet ustoychivosti otkosov i sklonov. Volgograd : Nizhnevolzhskoe kn. izd-vo, 1974. 238 s.

6. *Bogomolov A. N.* Raschet nesushchey sposobnosti osnovaniy sooruzheniy i ustoychivosti gruntovykh massivov v uprugoplasticheskoy postanovke. Perm' : PPI, 1996. 150 s.

7. *Fadeev A. B.* Metod konechnykh elementov v geomekhanike. M. : Nedra, 1987. 221 s.

8. *Ginzburg L. K., Razdol'skiy A. G.* Opredelenie maksimal'nogo opolznevogo davleniya // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 1992. № 5. S. 11—14.

9. *Vyalov S. S.* Reologicheskie osnovy mekhaniki gruntov. M. : Vyssh. shkola, 1978. 447 s.

10. *Bogomolov A. N.* Ustoychivost', napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie: svidetel'stvo o gos. registratsii programm dlya EVM № 2009613499; zayavl. 19.05.2009, zareg. v Reestre programm dlya EVM 30.06.2009.

11. Geologicheskiy slovar' : v 2-kh t. // pod red. K. N. Paffengol'tsa. M. : Nedra, 1978. 456 s.

© Богомолов А. Н., Ермаков О. В., Иванов А. С., Богомолова О. А., Прокопенко А. В., Ушаков А. Н., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Два подхода к определению сил оползневого давления / А. Н. Богомолов, О. В. Ермаков, А. С. Иванов, О. А. Богомолова, А. В. Прокопенко, А. Н. Ушаков // Вестник Волгогр. гос. архит-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 233—239.

УДК 624.131

А. Н. Богомолов, А. С. Иванов, О. А. Богомолова, А. В. Прокопенко

СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА ВЕЛИЧИНЫ АКТИВНОГО ДАВЛЕНИЯ НА ОГРАЖДЕНИЕ КОТЛОВАНА, ВЫЗВАННОГО СОБСТВЕННЫМ ВЕСОМ ГРУНТА И РАВНОМЕРНО РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ПО ЕГО ПОВЕРХНОСТИ ПОЛОСОВОЙ НАГРУЗКОЙ

Рассматриваются результаты вычислений сил горизонтального давления на ограждение котлована, выполненных тремя разными способами. Первый способ основан на результатах анализа напряженного состояния грунтового массива. При этом форма поверхностей сдвига не задается заранее, а определяется исходя из величин напряжений, возникающих в грунтовом массиве от действия его собственного веса и внешней нагрузки, физико-механических свойств грунтов, в том числе коэффициента бокового давления. Второй способ — классический, основанный на использовании теории предельного равновесия. При реализации третьего способа считается, что поверхности скольжения представляют собой плоскости, и в расчет принимается только вертикальная составляющая напряжения. Показано, что результаты, полученные первым и третьим способами, отличаются незначительно. Их использование при расчете и проектировании ограждений котлованов позволяет получить (для рассмотренных в настоящей работе условий) от 10 до 14 % экономии прокатного профиля.

К л ю ч е в ы е с л о в а: подпорная стена, ограждение котлована, поверхность скольжения, боковое давление, напряженное состояние, коэффициент бокового давления, физико-механические свойства грунта, методы расчета давления на ограждение, сопоставление результатов.

This article deals with the results of calculations of forces of horizontal pressure on the pit fence, made in three different ways. The first method is based on an analysis of the stress state of the soil mass. The shape of the surfaces shift is not set in advance, but is determined from the stress arising in the soil mass due to the action of its own weight and external loads, physical and mechanical soil properties, including the coefficient of lateral pressure. The second way is a classic method based on the theory of limiting equilibrium. When implementing the third method it is thought that the surface sliding is a plane and only the vertical component of the voltage is taken into account. It is shown that the results obtained by the first and the third way do not differ significantly. Their use in the calculation and design of pit fences can save (for consideration in the present work conditions) from 10 to 14 % of rolled sections.

K e y w o r d s: retaining wall, pit fence, surface sliding, lateral pressure, stress state, coefficient of lateral pressure, physical and mechanical soil properties, the methods of calculating the pressure on the fence, comparison of the results.

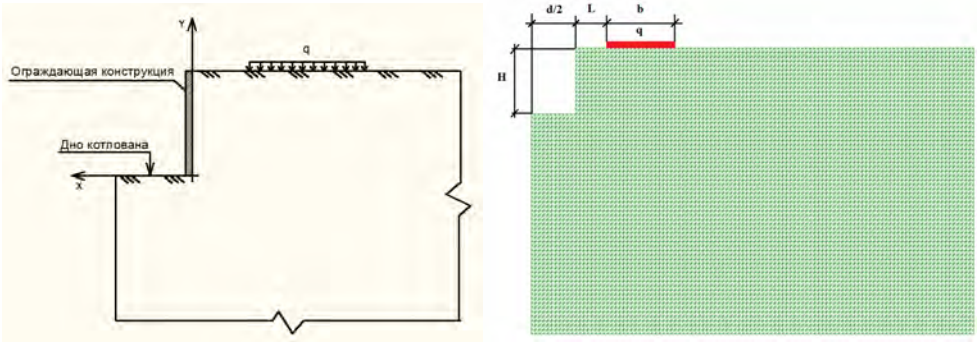
В работах [1—4] излагаются методы, которые могут быть использованы для расчета величины бокового давления грунта на ограждающие конструкции котлована.

Первый из этих методов основан на предложениях, сделанных в работах [5—7]; в основу второго и третьего положена теория предельного равновесия грунтовых масс [8].

В качестве примера рассмотрим строительный котлован, вертикальный откос которого имеет высоту H=15 м, сложен однородным связным грунтом, имеющие следующие физико-механические характеристики: объемный вес γ=2 т/м^3, угол внутреннего трения φ=20^o, удельное сцепление c=68 кПа, модуль деформации E_o=24 МПа (ИГЭ-1). Величина коэффициента бокового давления принята равной ξ_o=0,75 [9—11].

На горизонтальной дневной поверхности откоса расположена равномерно распределенная полосовая нагрузка шириной B=15 м, интенсивность которой поочередно принимает значения q=(0,75; 1,50; 3,0)γH. Нагрузка поочередно прикладывается на расстоянии L=0,0; 7,50; 15,0 м от его бровки.

I. Расчетный метод [1]. Для решения задачи составлена механико-математическая модель метода конечных элементов и расчетная схема МКЭ, которая состоит из 14100 конечных элементов, сопряженных в 7227 узлах, при этом матрица жесткости системы имеет ширину 136 (рис. 1). Все вычисления проводятся при помощи компьютерной программы [12], разработанной в ВолгГАСУ.



а *б*

Рис. 1. Фрагменты механико-математической модели (*а*) и расчетной конечно-элементной схемы (*б*) для решения задачи о давлении грунта на ограждение глубокого котлована

На рис. 2 изображены области пластических деформаций и наиболее вероятная поверхность скольжения, наиболее вероятные площадки сдвига и картины изолиний безразмерных (в долях γh) вертикальных σ_z, горизонтальных σ_x и касательных τ_{zx} напряжений в грунтовом массиве, которые построены при помощи компьютерной программы [12].

Из рис. 2 видно, что практически вся приоткосная область верхнего слоя грунта (ИГЭ-1, менее прочного, чем подстилающий слой, верхняя граница которого совпадает с дном котлована) находится в пластическом состоянии. Если не учитывать этого обстоятельства и определить величину коэффициента запаса устойчивости вертикального откоса K, руководствуясь условием упругого распределения напряжений, как это делается при использовании традиционных методов расчета устойчивости, то получим K=0,55.

Используя известный прием повышения расчетных значений величин удельного сцепления и тангенса угла внутреннего трения в $K/K_{\text{пр}}$ раз, определим такие значения c и φ, при которых расчетное значение будет равно K=1,01. Гипотетически устойчивое состояние откоса в этих случаях будут обеспечивать «фиктивные» удерживающие силы, соответствующие увеличенным в $K/K_{\text{пр}}$ прочностным характеристикам грунта.

Отметим, что картины изолиний горизонтальных σ_x напряжений существенно отличаются при изменении величины коэффициента бокового давления грунта ξ_o от 0,75 до 0,3.

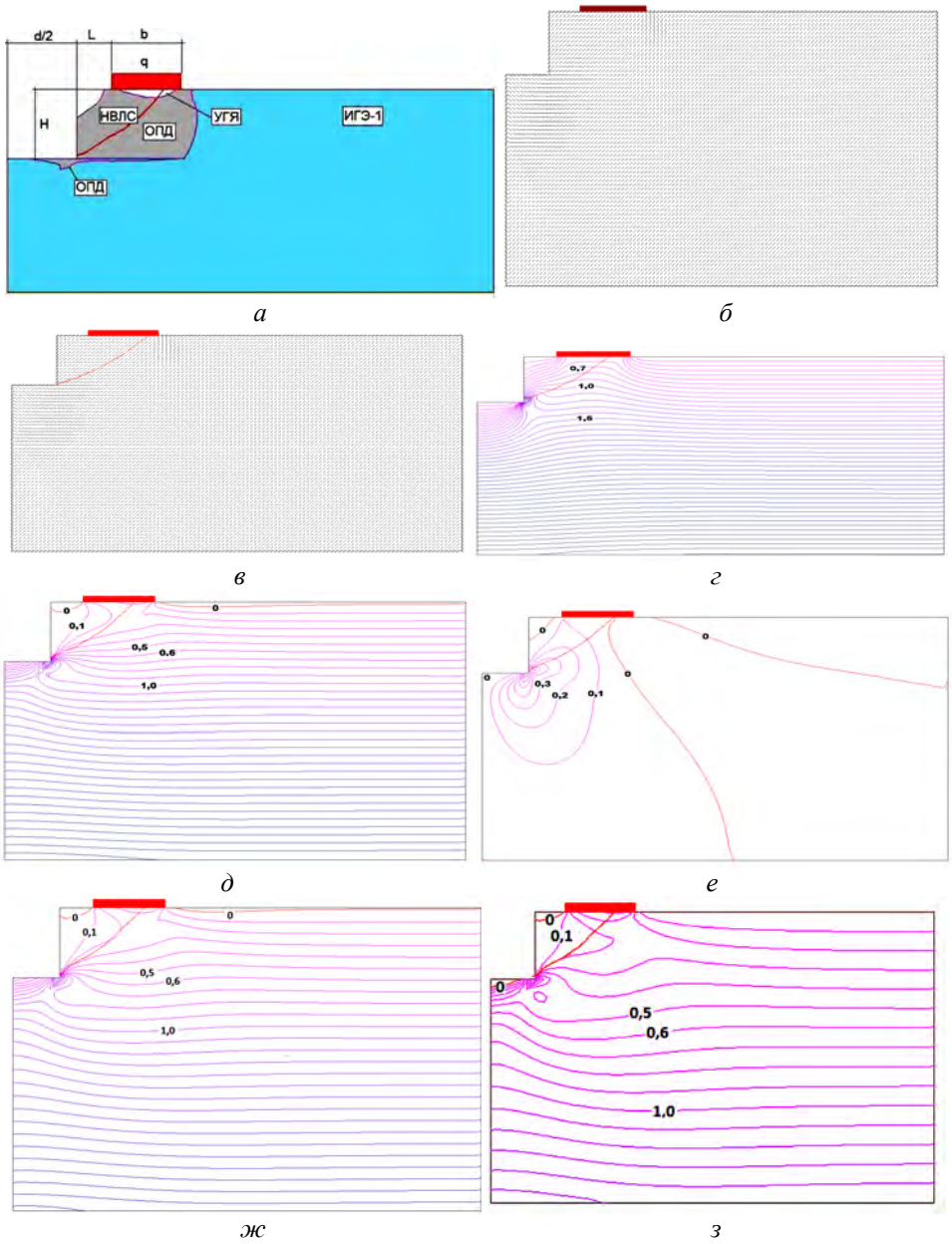


Рис. 2. Области пластических деформаций и наиболее вероятная линия скольжения (*а*), наиболее вероятные площадки сдвига (*б*), след наиболее вероятной поверхности скольжения (*в*) и картины изолиний безразмерных (в долях γh) вертикальных σ_z (*г*), горизонтальных σ_x (*д*) и касательных τ_{zx} (*е*) напряжений в грунтовом массиве при ξ_o=0,75 и изолинии горизонтальных напряжений σ_x при ξ_o=0,60 (*ж*) и при ξ_o=0,35 (*з*), построенные при помощи компьютерной программы [12]

Элементы ограждения котлована рассчитываются на величины «фиктивных» сдвигающих сил, которые равны разности величин «фиктивной» удерживающей силы и реальной удерживающей силы, вычисленных для одной и той же поверхности скольжения.

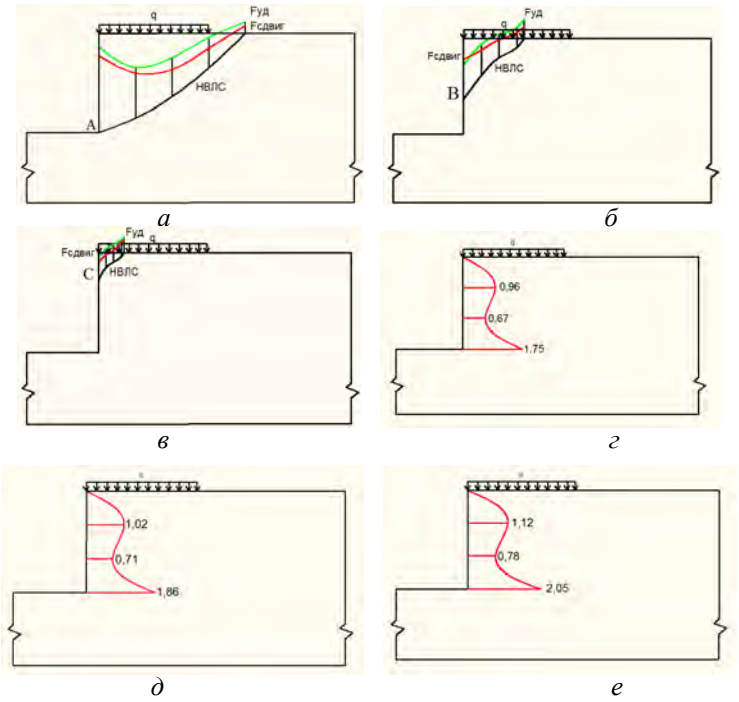


Рис. 3. Наиболее вероятные скольжения, построенные из точек *A* (*а*); *B* (*б*); *C* (*в*), соответствующие эпюры удерживающих и сдвигающих сил и эпюра сил бокового давления грунта при условии, что *L*=0 м при $q = 0,75\gamma H$ (*г*); $q = 1,5\gamma H$ (*д*); $q = 3\gamma H$ (*е*)

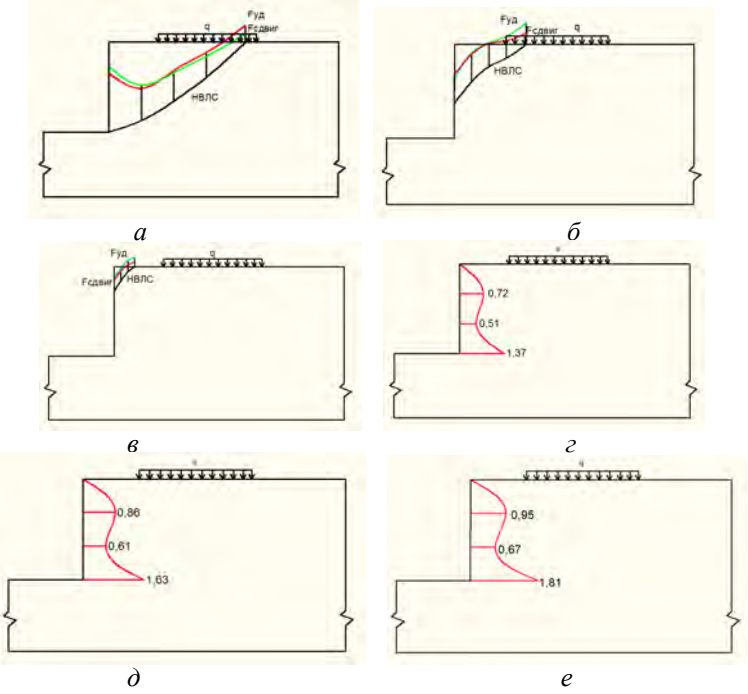


Рис. 4. Наиболее вероятные линии скольжения, построенные из точек *A* (*а*); *B* (*б*); *C* (*в*), соответствующие эпюры удерживающих и сдвигающих сил и эпюра сил бокового давления грунта (*г*) при условии, что *L*=7,5 м при $q = 0,75\gamma H$ (*г*); $q = 1,5\gamma H$ (*д*); $q = 3\gamma H$ (*е*)

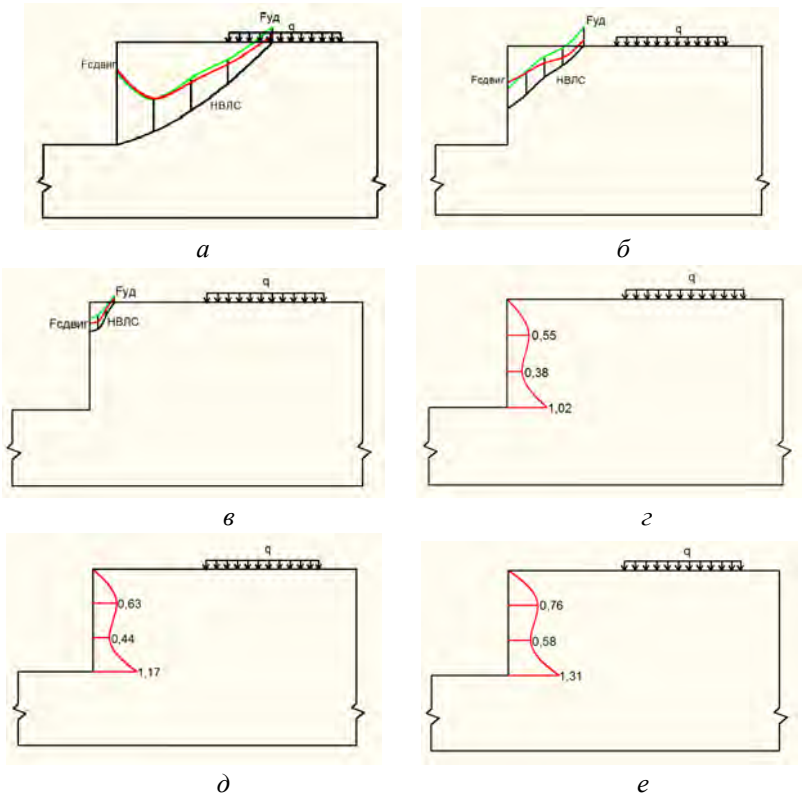


Рис. 5. Наиболее вероятные линии скольжения, построенные из точек *A* (*а*); *B* (*б*); *C* (*в*), соответствующие эпюры удерживающих и сдвигающих сил и эпюра сил бокового давления грунта (*г*) при условии, что *L*=15 м при $q = 0,75\gamma H$ (*г*); $q = 1,5\gamma H$ (*д*); $q = 3\gamma H$ (*е*)

На рис. 3—5, *а—в* изображены наиболее вероятные линии скольжения и соответствующие им эпюры удерживающих и сдвигающих сил, построенные для вертикального борта котлована, параметры которого описаны выше, *K*=1,01.

В результате проведения вычислений построены эпюры горизонтального давления на гипотетическую вертикальную подпорную стенку, которые приведены на рис. 3—5, *г—е*. Отметим, что ординаты эпюры приведены в долях γh и имеют размерность [кг/м^2].

Далее, считая, что шпунтовое ограждение работает как вертикальная жестко защемленная балка, определяем максимальную величину изгибающего момента $M_{\max}$. Соответствующее условие прочности будет выполнено, если подбор сечений стальных элементов шпунтового ограждения выполнить в соответствии с ГОСТ 8239—72; 8240—72 и 8509—72, учитывая при этом, что модуль упругости для стали марки С38/23 равен $E = 20,6 \cdot 10^{10}$ Н/м^2, величина ее расчетного сопротивления $R = 210$ МПа, а коэффициент условий работы $\gamma_C = 1,1$ [9; 10]. Полученные при расчете сортаменты стальных балок [13] приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчета по предлагаемому методу [1]

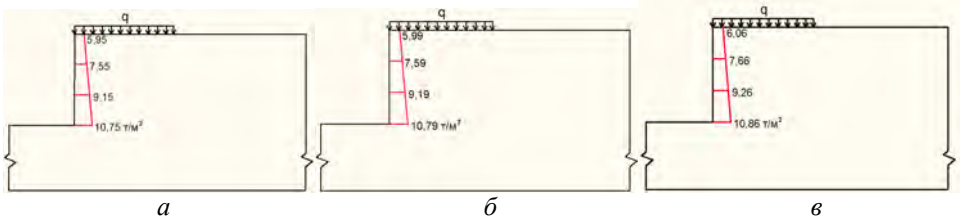
L, м	*q*/γ*H*		
	0,75	1,5	3,0
0	Швеллер № 16 *H*=160 мм; *B*=64 мм	Швеллер № 16 *H*=160 мм; *B*=64 мм	Швеллер № 16а *H*=160 мм; *B*=68 мм
	Двутавр № 14 *H*=140 мм; *B*=73 мм	Двутавр № 16 *H*=160 мм; *B*=81 мм	Двутавр № 16 *H*=160 мм; *B*=81 мм
7,5	Швеллер № 14 *H*=140 мм; *B*=58 мм	Швеллер № 14а *H*=140 мм; *B*=62 мм	Швеллер № 16 *H*=160 мм; *B*=64 мм
	Двутавр № 14 *H*=140 мм; *B*=73 мм	Двутавр № 14 *H*=140 мм; *B*=73 мм	Двутавр № 14 *H*=140 мм; *B*=73 мм
15	Швеллер № 12 *H*=120 мм; *B*=52 мм	Швеллер № 14 *H*=140 мм; *B*=58 мм	Швеллер № 14 *H*=140 мм; *B*=58 мм
	Двутавр № 12 *H*=120 мм; *B*=64 мм	Двутавр № 12 *H*=120 мм; *B*=64 мм	Двутавр № 14 *H*=140 мм; *B*=58 мм

II. Расчетный метод [2]. Согласно теории В. В. Соколовского [8], величина активного горизонтального давления на вертикальную заднюю грань подпорной стены определяется в зависимости от глубины *H* выражением

$$q = (\gamma H + qp)\,\mathrm{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right) - 2c\,\mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right), \qquad (1)$$

где H — высота котлована; φ и *c* соответственно угол внутреннего трения грунта и удельное сцепление; q_p — расчетная нагрузка на дневной поверхности котлована.

В результате построены эпюры горизонтального давления грунта (рис. 6).



а *б* *в*

Рис. 6. Эпюра бокового давления грунта при условии, что *L*=0 м и $q = 0,75\gamma H$ (*а*); $q = 1,5\gamma H$ (б); $q = 3\gamma H$ (*в*)

Повторяя процедуру подбора стального прокатного профиля, описанную выше, получим результаты, которые сведены в табл. 2. Следует отметить, что используя данный метод, можно определить искомые значения давления только при *L*=0.

Таблица 2

Результаты расчета по методу Г. К. Клейна [2]

L, м	*q*/γ*H*		
	0,75	1,5	3,0
0	Швеллер № 18 *H*=180 мм; *B*=70 мм	Швеллер № 18 *H*=180 мм; *B*=70 мм	Швеллер № 18 *H*=180 мм; *B*=70 мм
	Двутавр № 16 *H*=160 мм; *B*=81 мм	Двутавр № 16 *H*=160 мм; *B*=81 мм	Двутавр № 16 *H*=160 мм; *B*=81 мм

III. Расчет на основании предложений И. Я. Лучковского, А. М. Данько и Д. А. Чепурного [3; 4]. Расчет проводится в следующей последовательности:

1. Подпорная стенка по глубине разбивается на малые участки *z*, на границах которых z_i задаются произвольные значения угла наклона плоскостей скольжения θ_i к горизонту (с шагом $\Delta\theta_i$): при этом $\varphi < \theta_i < 90°$.

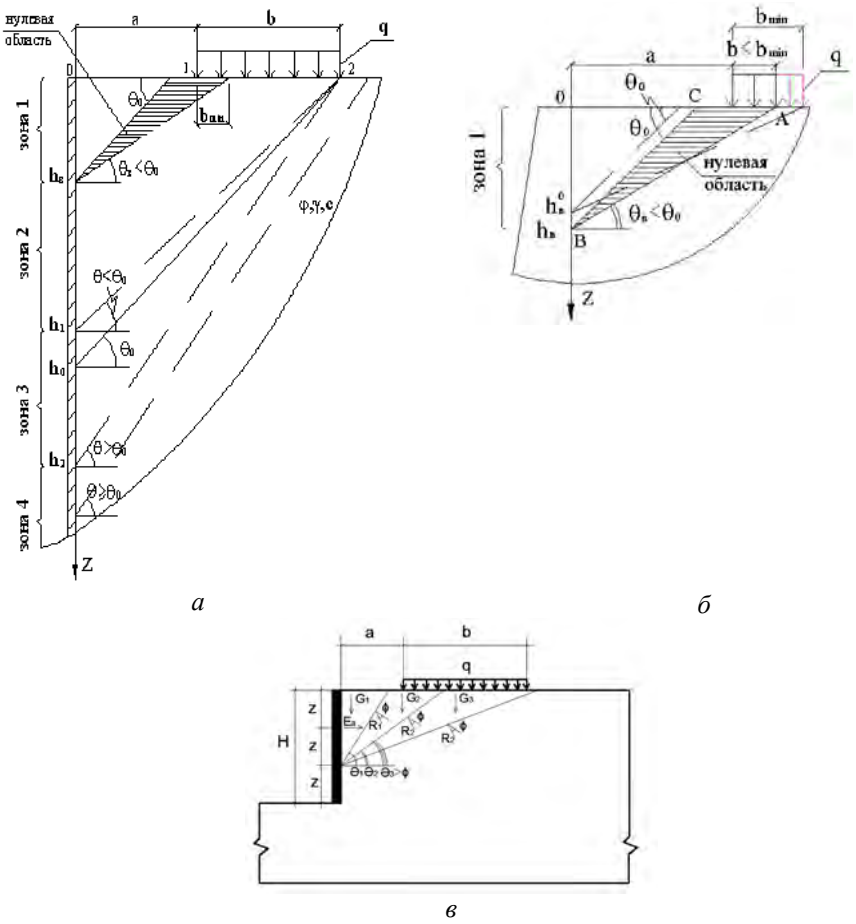


Рис. 7. Четыре зоны распределения активного давления σ_a при наличии полосовой нагрузки *q* (*а*); расположение плоскостей скольжения при $b \le b_{min}$ (*б*); характерные случаи расположения плоскостей скольжения в верхней зоне при слоистой засыпке (*в*) (цит. по [3; 4])

2. Вычисляются величины сил G_i с учетом внешней нагрузки, соответствующие каждому углу θ_i, и величины равнодействующих горизонтального бокового давления E_{ai}, по которым устанавливается максимальная величина E_{ai}^{max}.

3. После нахождения на всех глубинах z_i величин E_{ai}^{max} отыскиваются значения горизонтального активного давления по формуле

$$\sigma_{ai} = \frac{E_{ai}^{max} - E_{a(i-1)}^{max}}{\Delta z}. \qquad (2)$$

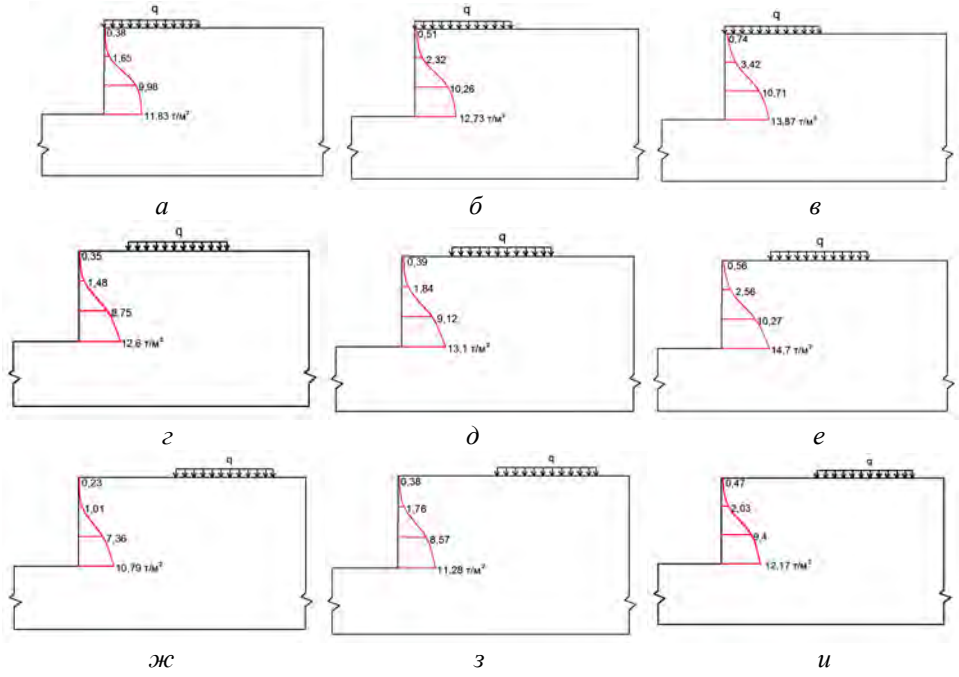
4. В связи с тем, что на дневной поверхности находится полосовая нагрузка q, положение расчетных плоскостей скольжения может соответствовать одному из вариантов, изображенных на рис. 7, *в*. Каждому из них соответствуют определенные формулы для отыскания G_i и E_{ai}:

Случай 1:

$$G_1 = \frac{\gamma z^2}{2}\operatorname{ctg}\theta_1;\ E_{a1} = \frac{\gamma z^2}{2}\operatorname{ctg}\theta_1\operatorname{tg}(\theta_1 - \varphi_1). \tag{3}$$

Случай 2:

$$G_2 = z\operatorname{ctg}\theta_2\left(q + \frac{\gamma z}{2}\right) - qa;\ E_{ai} = z\left(q + \frac{\gamma z}{2}\right)\operatorname{ctg}\theta_2\operatorname{tg}(\theta_2 - \varphi_1). \tag{4}$$



а *б* *в*

г *д* *е*

ж *з* *и*

Рис. 8. Эпюра горизонтального активного давления грунта при условии, что L=0; L=7,5 м и L=15 м при величине интенсивности внешней нагрузки $q = 0,75\gamma H$ (*а*—*в*); $q = 1,5\gamma H$ (*г*—*е*) и $q = 3\gamma H$ (*ж*—*и*)

Случай 3:

$$G_3 = \frac{\gamma z^2}{2}\operatorname{ctg}\theta_3 + qb;\ E_{a3} = \frac{\gamma z^2}{2}\operatorname{ctg}\theta_3\operatorname{tg}(\theta_3 - \varphi_3) + qb\operatorname{tg}(\theta_3 - \varphi_1). \tag{5}$$

В результате проведения вычислений построены эпюры бокового давления грунта, изображения которых для всех рассмотренных вариантов приведены на рис. 8.

Повторяя, как и ранее, процедуру подбора прокатных профилей, составили табл. 3, в которую и помещены полученные данные.

Если сравнить данные, приведенные в табл. 1—3, с точки зрения материалоемкости (являющейся одним из важнейших экономических показателей) ограждающих элементов, то увидим, что результаты расчетов, выполненных по методике [1], дают выигрыш по данному оценочному критерию от

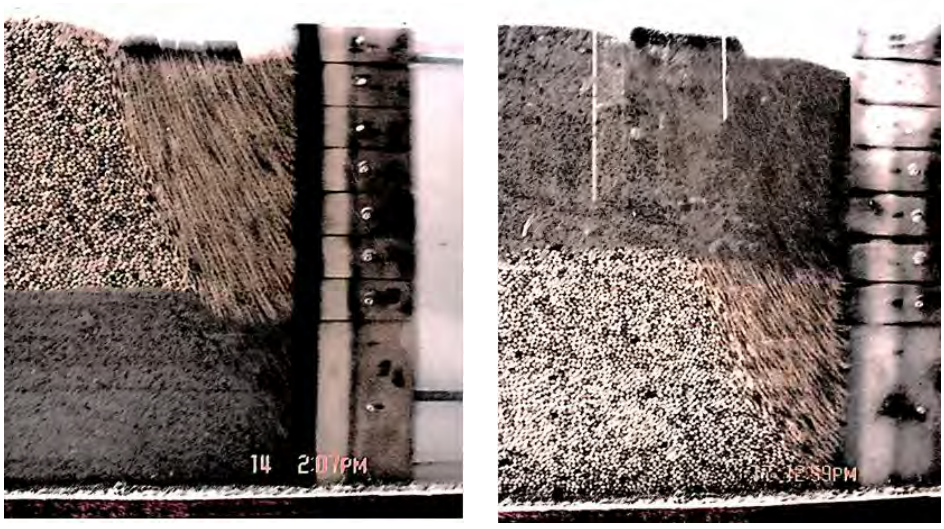
10 до 14 % по сравнению с результатами, полученными при использовании расчетного метода [2]. И, напротив, проигрывают результатам расчетов, выполненных на основании [3, 4], от 7 до 10 %.

Таблица 3

Результаты расчета по И. Я. Лучковскому, А. М. Данько и Д. А. Чепурнову [3, 4]

L, м	$q/\gamma H$		
	0,75	1,5	3
0	Швеллер № 14 *H*=140 мм; *B*=58 мм	Швеллер № 14 *H*=140 мм; *B*=58 мм	Швеллер № 16 *H*=160 мм; *B*=64 мм
	Двутавр № 12 *H*=120 мм; *B*=64 мм	Двутавр № 14 *H*=140 мм; *B*=73 мм	Двутавр № 14 *H*=140 мм; *B*=73 мм
7,5	Швеллер № 12 *H*=120 мм; *B*=52 мм	Швеллер № 12 *H*=120 мм; *B*=52 мм	Швеллер № 14 *H*=140 мм; *B*=58 мм
	Двутавр № 10 *H*=100 мм; *B*=55 мм	Двутавр № 12 *H*=120 мм; *B*=64 мм	Двутавр № 12 *H*=120 мм; *B*=64 мм
15	Швеллер № 10 *H*=100 мм; *B*=46 мм	Швеллер № 12 *H*=120 мм; *B*=52 мм	Швеллер № 12 *H*=120 мм; *B*=52 мм
	Двутавр № 10 *H*=100 мм; *B*=55 мм	Двутавр № 10 *H*=100 мм; *B*=55 мм	Двутавр № 10 *H*=100 мм; *B*=55 мм

Одним из возможных объяснений последнего расхождения может служить то обстоятельство, что в нашем случае [2] поверхность скольжения не является плоской, как в сопоставляемом варианте. Кстати, на фотографиях, приводимых И. Я. Лучковским и Д. А. Чепурным в публикации [3] и полученных ими при фотофиксации результатов экспериментов, видно, что след поверхности скольжения явно криволинеен (рис. 9).



а *б*

Рис. 9. Фотография образования плоскости обрушения в двухслойной засыпке с полосовой нагрузкой при горизонтальном смещении всей подпорной стенки: *а* — просо-песок, *б* — песок-просо (цит. по [3])

Таким образом, можно сделать вывод о том, что предлагаемый нами способ расчета сил бокового давления на ограждающие конструкции дает результаты, весьма незначительно отличающиеся от результатов, получаемых методом, разработанным независимо от нас другими исследователями, и после соответствующей апробации и проведения экспериментов может быть рекомендован для практического применения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Два новых подхода к вопросу об определении горизонтального давления грунта на ограждающие конструкции котлована // А. Н. Богомолов, А. С. Иванов, О. А. Богомолова, А. Н. Ушаков // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 29 (48). С. 26—35.

2. *Клейн Г. К.* Строительная механика сыпучих тел. М. : Госстройиздат, 1956. 252 с.

3. *Лучковский И. Я., Данько А. М.* Распределение давления грунта на подпорные стены при «узких» площадках нагружения поверхности полосовой нагрузкой // Коммунальное хозяйство городов. Научно-технический сборник. Харьков, 2010. № 93. С. 471—479.

4. *Лучковский И. Я., Чепурной Д. А.* Распределение горизонтального давления грунта на подпорные стены при многослойном основании // Науковий вісник будівництва : зб. наук праць. Вип. 54-Х. 2009. № 54. С. 281—285.

5. Evaluating the stress-strain state, the stability factor magnitude and the landslide pressure forces in order to manage the landslide processes / A. N. Bogomolov, O. A. Vikhareva, A. N. Ushakov , S. I. Shiyan // Geotechnical Engineering for Disaster Prevention & Reduction : Proceedings of the International Geotechnical Symposium (IGSS, 2007). Yuzhno-Sakhalinsk : [Kazakhstan Geotechnical Society], 2007. P. 281—285.

6. *Tsvetkov V. K., Bogomolov A. N.* Open pit mining: stability of multilevel terrace of inhomogeneous rock // Journal of Mining Science. 1996. Т. 32. № 3. P. 192—196.

7. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A. A. Bartolomey, V. I. Kleveko, V. G. Ofrikhter, A. B. Ponomaryov, A. N. Bogomolov // Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Amsterdam, June 1999. Vol. 2. Proceedings of the 1999 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Netherlands : Amsterdam, 1999. P. 1197—1202.

8. *Соколовский В. В.* Статика сыпучей среды. М. : Гостехиздат, 1954. 275 с.

9. Строительные нормы и правила. Основания зданий и сооружений. СНиП 2.02.01—83. М. : Стройиздат, 1985. 40 с.

10. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01—83*. М. : Минрегионразвития РФ, 2001. 155 с.

11. *Каган А. А.* Расчетные характеристики грунтов. М. : Стройиздат, 1985. 247 с.

12. *Богомолов А. Н.* Устойчивость (Напряженно-деформированное состояние) // Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2009613499 от 30 июня 2009 г.

13. ГОСТ 19425—74. Балки двутавровые и швеллеры стальные специальные (сортамент). М. : Издательство стандартов, 1986. 7 с.

1. Dva novykh podkhoda k voprosu ob opredelenii gorizontal'nogo davleniya grunta na ograzhdayushchie konstruktsii kotlovana // A. N. Bogomolov, A. S. Ivanov, O. A. Bogomolova, A. N. Ushakov // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2012. Vyp. 29 (48). S. 26—35.

2. *Kleyn G. K.* Stroitel'naya mekhanika sypuchikh tel. M. : Gosstroyizdat, 1956. 252 s.

3. *Luchkovskiy I. Ya., Dan'ko A. M.* Raspredelenie davleniya grunta na podpornye steny pri «uzkikh» ploshchadkakh nagruzheniya poverkhnosti polosovoy nagruzkoy // Kommunal'noe khozyaystvo gorodov. Nauchno-tekhnicheskiy sbornik. Khar'kov, 2010. № 93. S. 471—479.

4. *Luchkovskiy I. Ya., Chepurnoy D. A.* Raspredelenie gorizontal'nogo davleniya grunta na podpornye steny pri mnogosloynom osnovanii // Naukoviy visnik budivnitstva : zb. nauk prats'. Vip. 54-Kh. 2009. № 54. S. 281—285.

5. Evaluating the stress-strain state, the stability factor magnitude and the landslide pressure forces in order to manage the landslide processes / A. N. Bogomolov, O. A. Vikhareva, A. N. Ushakov , S. I. Shiyan // Geotechnical Engineering for Disaster Prevention & Reduction : Proceedings of the International Geotechnical Symposium (IGSS, 2007). Yuzhno-Sakhalinsk : [Kazakhstan Geotechnical Society], 2007. P. 281—285.

6. *Tsvetkov V. K., Bogomolov A. N.* Open pit mining: stability of multilevel terrace of inhomogeneous rock // Journal of Mining Science. 1996. T. 32. № 3. P. 192—196.

7. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A. A. Bartolomey, V. I. Kleveko, V. G. Ofrikhter, A. B. Ponomaryov, A. N. Bogomolov // Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Amsterdam, June 1999. Vol. 2. Proceedings of the 1999 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Netherlands : Amsterdam, 1999. P. 1197—1202.

8. *Sokolovskiy V. V.* Statika sypuchey sredy. M. : Gostekhizdat, 1954. 275 s.

9. Stroitel'nye normy i pravila. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. SNiP 2.02.01—83. M. : Stroyizdat, 1985. 40 s.

10. SP 22.13330.2011. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. Aktualizirovannaya redaktsiya SNiP 2.02.01—83*. M. : Minregionrazvitiya RF, 2001. 155 c.

11. *Kagan A. A.* Raschetnye kharakteristiki gruntov. M. : Stroyizdat, 1985. 247 s.

12. *Bogomolov A. N.* Ustoychivost' (Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie) // Svid. o gos. reg. programmy dlya EVM № 2009613499 ot 30 iyunya 2009 g.

13. GOST 19425—74. Balki dvutavrovye i shvellery stal'nye spetsial'nye (sortament). M. : Izdatel'stvo standartov, 1986. 7 s.

© Богомолов А. Н., Иванов А. С., Богомолова О. А., Прокопенко А. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Сравнение результатов расчета величины активного давления на ограждение котлована, вызванного собственным весом грунта и равномерно распределенной по его поверхности полосовой нагрузкой / А. Н. Богомолов, А. С. Иванов, О. А. Богомолова, А. В. Прокопенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 240—250.

УДК 624.131

А. Н. Богомолов, С. А. Калиновский, О. А. Богомолова, А. В. Прокопенко

КОЭФФИЦИЕНТ БОКОВОГО ДАВЛЕНИЯ ГРУНТА КАК ОДНА ИЗ ВЕЛИЧИН, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ОДНОРОДНОГО ОСНОВАНИЯ ЛЕНТОЧНОГО ФУНДАМАМЕНТА

На конкретном примере показано, что при расчете несущей способности основания заглубленного ленточного фундамента методами, основанными на анализе напряженного состояния активной зоны грунтового массива, следует учитывать в качестве одного из расчетных параметров, определяющих устойчивость оснований фундаментов, величину коэффициента бокового давления грунта ξ_o. Установлено, что коэффициент бокового давления грунта оказывает существенное влияние на процесс зарождения и развития областей пластических деформаций в основании фундамента и, как следствие, на величины расчетного сопротивления и предельно допустимой нагрузки. Уменьшение величины расчетного значения коэффициента бокового давления с 0,75 до 0,55, т. е. на 26,7 %, влечет за собой при всех прочих равных условиях, рассмотренных в работе, уменьшение величины расчетного сопротивления основания на 13,2…22,4 %, а величины предельно допустимой нагрузки — на 25,8…34 %.

К л ю ч е в ы е с л о в а: расчетное сопротивление, предельно допустимая нагрузка на основание, коэффициент бокового давления, физико-механические свойства грунта.

By a specific example it is shown that the calculation of the bearing capacity of the base recessed strip foundation methods, based on the analysis of the stress condition of core soil mass should be considered as one of the design parameters that determine the stability of the foundation base, the coefficient of lateral earth pressure ξ_o. It is determined that the coefficient of lateral earth influences significantly the formation and development of plastic deformations areas in the base of the foundation and, as a consequence, the estimated value of resistance and maximum permissible load. Decrease in the estimated value of the coefficient of lateral pressure of 0.75 to 0.55, that is by 26.7 %, results under equal conditions, considered in the paper, the estimated decrease in the resistance base by 13,2…22,4 %, and the value of maximum permissible load — by 25,8…34 %.

K e y w o r d s: calculation of resistance, maximum permissible load on the ground, coefficient of lateral pressure, physical and mechanical properties of soil.

Вертикальную составляющую силы предельного сопротивления основания, сложенного дисперсными грунтами в стабилизированном состоянии, допускается определять по формуле (1), если фундамент имеет плоскую подошву, а грунты основания, лежащие ниже его подошвы, однородны до глубины не менее, чем ее ширина [1]:

$$N_u = b'l'(N_\gamma \xi_\gamma b'\gamma_{\mathrm{I}} + N_q \xi_q \gamma'_{\mathrm{I}} d + N_c \xi_c c_{\mathrm{I}}), \qquad (1)$$

где $b'u\,l'$ — приведенные ширина и длина подошвы фундамента; N_γ, N_q, N_c — табличные безразмерные коэффициенты несущей способности, зависящие от расчетного значения угла внутреннего трения грунта φ_L и угла наклона к вертикали δ равнодействующей внешне нагрузки на основание F в уровне подошвы; γ_{I}, γ_{I}', c_{I} — расчетные значения удельного веса грунта и удельного сцепления; d — глубина заложения фундамента; ξ_γ, ξ_q, ξ_c — коэффициенты формы фундамента.

Как видно, в формуле (1) коэффициент бокового давления грунта ξ_o даже не упоминается. При этом известно, что коэффициент бокового давления грунта оказывает влияние на распределение горизонтальной составляющей σ_x

напряжения в грунтовом массиве и его величину следует учитывать при расчете устойчивости откосов, склонов, отвалов горных пород, сил оползневого давления, напряженного состояния основания вокруг конических свай и т. д. [2—8]. Кроме того, в работах [8, 9] показано, что и осадки однородных оснований зависят от величины ξ_o.

В настоящей публикации на конкретном примере показано, что при расчете несущей способности основания заглубленного ленточного фундамента методами, основанными на анализе напряженного состояния активной зоны грунтового массива, следует учитывать в качестве одного из расчетных параметров, определяющих устойчивость оснований фундаментов, величину коэффициента бокового давления грунта ξ_o.

Пусть однородное грунтовое основание заглубленного ленточного фундамента сложено глинистым грунтом со следующими физико-механическими свойствами: удельное сцепление c=41 кПа; угол внутреннего трения $\varphi=16^o$; $0< I_L \le 0{,}25$; e=0,95 (табл. 2, приложение 1 [11]). Значение удельного веса грунта условно примем γ=2 т/м^3, при этом величина приведенного давления связности $\sigma_{св}=c(\gamma H\,\mathrm{tg}\varphi)^{-1}=3{,}53$.

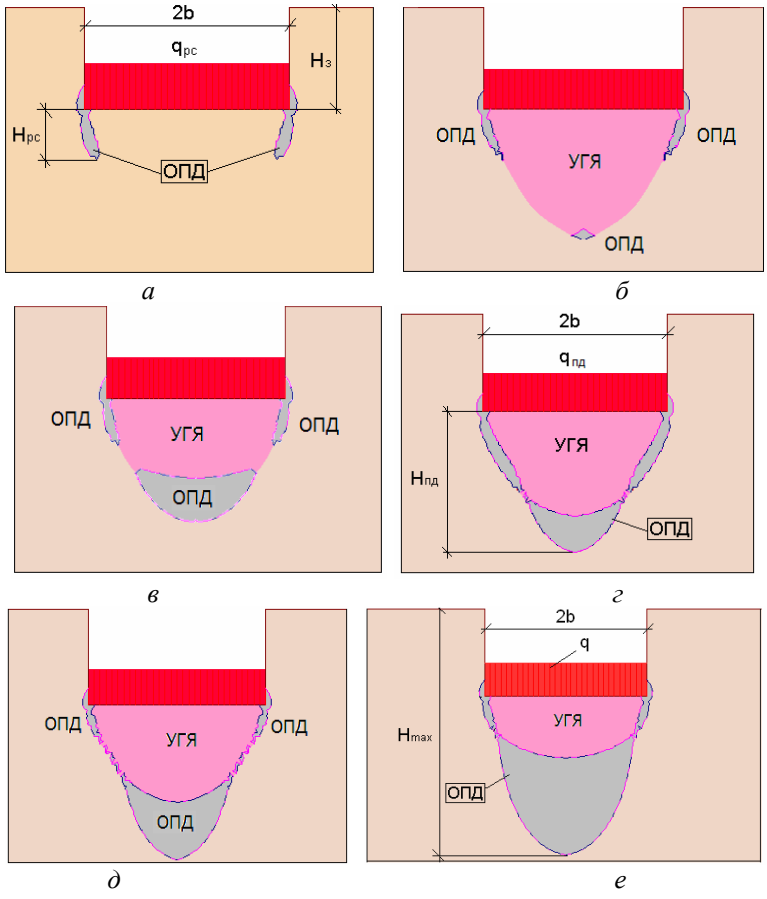


Рис. 1. Области пластических деформаций для связных оснований заглубленных ленточных фундаментов ($2b/H_3$=2) при интенсивности внешнего воздействия q, соответствующей величине расчетного сопротивления R: ξ_o=0,75 (*а*); ξ_o=0,6 (*б*); ξ_o=0,55 (*в*), и величине предельно допустимой нагрузки $P_{пд}$: ξ_o=0,75 (г); ξ_o=0,6 (*д*); ξ_o=0,55 (*е*)

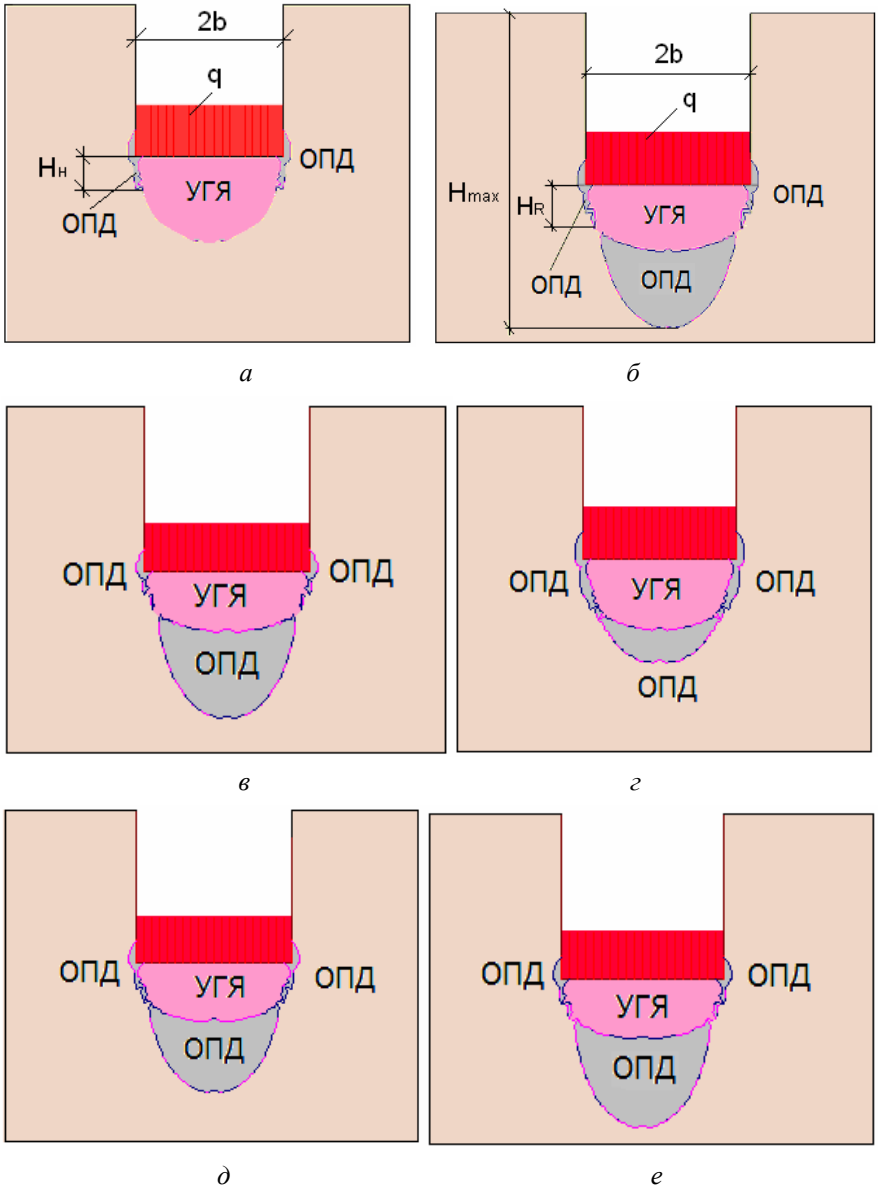


Рис. 2. Области пластических деформаций для связных оснований заглубленных ленточных фундаментов ($2b/H_3$=1) при интенсивности внешнего воздействия q, соответствующей величине расчетного сопротивления R: ξ_o=0,75 (*а*); ξ_o=0,6 (*б*); ξ_o=0,55 (*в*), и величине предельно допустимой нагрузки $P_{пд}$: ξ_o=0,75 (*г*); ξ_o=0,6 (*д*); ξ_o=0,55 (*е*)

Величина расчетного сопротивления основания определена из условия развития областей пластических деформаций (ОПД), сформировавшихся под краями фундамента, на глубину, равную четверти ширины фундамента ниже его подошвы.

Величина предельно допустимой нагрузки на основание соответствует такому значению равномерно распределенной вертикальной нагрузки $q_{пд}$, при котором происходит смыкание ОПД под подошвой фундамента.

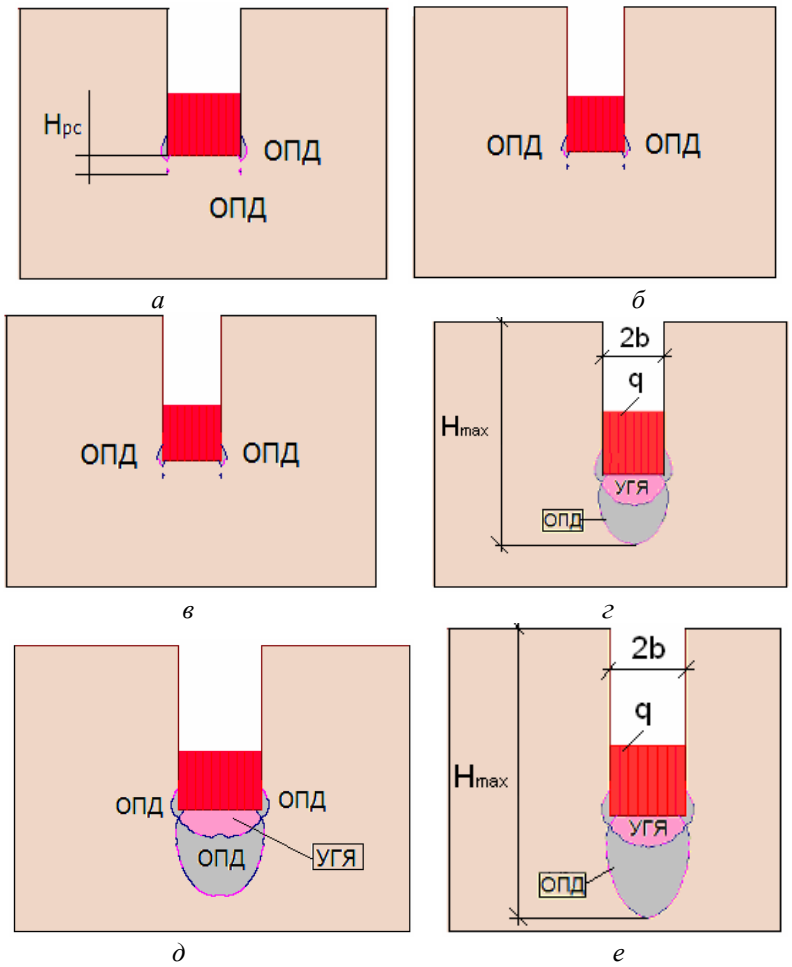


Рис. 3. Области пластических деформаций для связных оснований заглубленных ленточных фундаментов ($2b/H_3$=0,5) при интенсивности внешнего воздействия q, соответствующей величине расчетного сопротивления R: ξ_o=0,75 (*а*); ξ_o=0,6 (*б*); ξ_o=0,55 (*в*), и величине предельно допустимой нагрузки $P_{пд}$: ξ_o=0,75 (*г*); ξ_o=0,6 (*д*); ξ_o=0,55 (*е*)

Величина коэффициента бокового давления грунта при проведении исследования последовательно принимала значения ξ_o=0,75; 0,6; 0,55, которые характерны для глинистых грунтов [12, 13], а отношение ширины фундамента к его глубине $2b/H_3$=2,0; 1,0; 0,5.

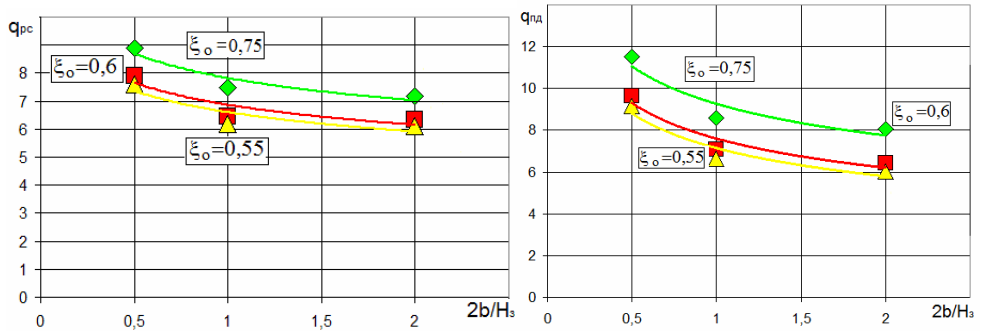
Все вычисления выполнены при помощи компьютерной программы [14], разработанной в ВолгГАСУ. В этой программе для определения численных значений напряжений в точках грунтового массива формализован метод конечных элементов (МКЭ), а для построения областей пластических деформаций используются предложения, сделанные в работах [15, 16].

В результате проведения вычислений получены численные значения величины интенсивности вертикальной равномерно распределенной нагрузки, эквивалентные величинам расчетного сопротивления R и предельно допустимой нагрузки на основание для всех значений переменных расчетных параметров, оговоренных выше. Для удобства проведения анализа результатов все они сведены в приводимой ниже табл.

Предельные значения интенсивности внешней нагрузки

2*b*/H	ξ_o=0,75				ξ_o=0,60				ξ_o=0,55			
	$q_{рс}$	$q_{пс}$	$H_{рс}$	$H_{пд}$	$q_{рс}$	$q_{пд}$	$H_{рс}$	$H_{пд}$	$q_{рс}$	$q_{пд}$	$H_{рс}$	$H_{пд}$
2	7,37	8,06	0,5	0,27	6,335	6,436	0,89	0,47	6,02	6,02	0,54	0,64
1	7,48	8,58	0,43	0,73	6,45	7,07	0,5	0,68	6,20	6,631	0,62	0,71
0,5	8,70	11,5	0,49	0,4	7,9	9,65	0,45	0,44	7,60	9,14	0,53	0,43

Для удобства анализа данных, приведенных в табл., построены графические зависимости величин интенсивности внешнего силового воздействия, эквивалентных величинам расчетного сопротивления R и предельно допустимой нагрузки, которые приведены на рис. 4.



а *б*

Рис. 4. Графические зависимости вида $q_{рс} = f(2b/H_3)$ (*а*) и $q_{пд} = f(2b/H_{пд})$ (*б*)

Анализ данных, приведенных в табл. и представленных на рис. 4, показывает, что уменьшение величины коэффициента бокового давления ξ_o от 0,75 до 0,55 (т. е. на 26,7 %), уменьшение величины расчетного сопротивления основания на 13,2…22,4 %, а величины предельно допустимой нагрузки на 25,8…34 %. В абсолютных числах величина $q_{рс}$ при ξ_o=0,75 снижается на 54 кПа при $2b/H_3$=2, на 51 кПа при $2b/H_3$=1 и на 44 кПа при $2b/H_3$=0,5, а величина $q_{пд}$ соответственно на 81,6; 78 и 74,4 кПа.

Кроме того, сопоставление данных, приведенных в табл., говорит о том, что при всех прочих равных условиях увеличение ширины фундамента влечет за собой снижение численных значений расчетного сопротивления *R* и предельно допустимой нагрузки на основание $P_{пд}$, что наблюдается и в том случае, когда фундамент не заглублен.

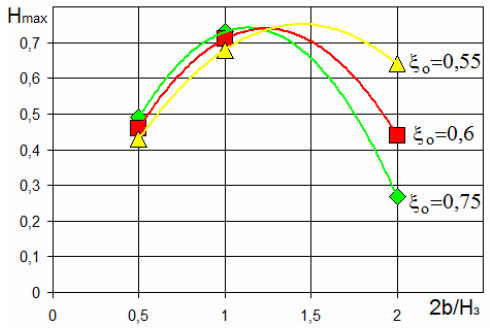


Рис. 5. Графические зависимости вида $H_{max} = f(2b/H_3)$

На рис. 5 приведены графические зависимости величины H_{max} (см. рис. 1—3), которая определяет глубину развития областей пластических деформаций в момент их смыкания под подошвой фундамента, от величины отношения $2b/H_3$.

Анализ этих кривых показывает, что при всех рассмотренных в работе значениях коэффициента бокового давления грунта ξ_o величины H_{max} незначительно отличаются друг от друга, если относительная ширина фундамента $2b/H_3 \in [0{,}5;\ 1{,}25]$. Если $2b/H_3 \approx 1{,}25$, то при всех значениях ξ_o величина H_{max} достигает своего наибольшего значения, но при $2b/H_3 \to 2$ глубина смыкания областей пластических деформаций при $\xi_o=0{,}55$ уже более чем в два раза больше соответствующей глубины при $\xi_o=0{,}75$.

Все вышесказанное убедительно свидетельствует о том, что при расчете оснований фундаментов по первой группе предельных состояний не следует оставлять без внимания коэффициент бокового давления грунта. Это может привести к недооценке или переоценке величин расчетного сопротивления основания R и предельно допустимой нагрузки $P_{пд}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 50-101—2004. Свод правил по проектированию и строительству. Проектирование и устройство оснований и фундаментов зданий и сооружений. М. : ФГУП ЦПП, 2005. 175 с.

2. *Шиян В. И., Богомолов А. Н., Вихарева О. А.* К вопросу о минимальных значениях коэффициента бокового давления грунтов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Естественные науки. 2007. Вып. 6 (23). С. 110—114.

3. *Богомолов А. Н.* Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. Пермь : ПГТУ, 1996. 150 с.

4. *Tsvetkov V. K., Bogomolov A. N.* Open pit mining: stability of multilevel terrace of inhomogeneous rock // Journal of Mining Science. 1996. Т. 32. № 3. P. 192—196.

5. Сопоставление результатов расчета устойчивости откосов, выполненных различными методами, для реальных объектов / А. Н. Богомолов, Б. С. Бабаханов, С. А. Калиновский, А. Н. Ушаков, А. В. Прокопенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2012. Вып. 29 (48). С. 43—54.

6. *Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Шиян С. И.* Расчет устойчивости откосов и склонов на основе анализа их напряженного состояния // Известия вузов. Сер.: Строительство. Новосибирск : Изд-во НГАСУ, 2009. № 5. С. 115—120.

7. *Bartolomei A. A., Ponomarev A. B.* Experimental investigations and prediction of settlements of conical pile foundations // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2001. Т. 38. № 2. P. 42—50.

8. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A. A. Bartolomey, V. I. Kleveko, V. G. Ofrikhter, A. B. Ponomaryov, A. N. Bogomolov // Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Amsterdam, June 1999. Vol. 2. Proceedings of the 1999 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Netherlands. Amsterdam, 1999. P. 1197—1202.

9. *Богомолов А. Н., Ушаков А. Н.* Задача о вычислении осадок ленточного фундамента // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2011. № 6. С. 2.

10. *Богомолов А. Н., Калашников С. Ю., Ушаков А. Н.* Определение осадок точек упругой полуплоскости от действия наклонной равномерно распределенной нагрузки // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2011. № 24. С. 4—11.

11. Строительные нормы и правила. Основания зданий и сооружений. СНиП 2.02.01—83. М. : Стройиздат, 1985. 40 с.

12. *Богомолов А. Н.* Анализ методов определения коэффициента бокового давления грунта (экспериментальные методы) // Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства : материалы III Международной науч.-техн. конф. Волгоград : ВолгГАСУ, 2012. С. 33—57.

13. *Богомолов А. Н.* Анализ методов определения коэффициента бокового давления грунта (аналитические методы) // Инженерные проблемы строительного материаловедения, геотехнического и дорожного строительства : материалы III Международной науч.-техн. конф. Волгоград : ВолгГАСУ, 2012. С. 58—85.

14. *Богомолов А. Н.* Устойчивость (напряженно-деформированное состояние) // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009613499 от 30 июня 2009 г.

15. *Богомолов А. Н., Никитин И. И.* О некоторых допущениях и их последствиях при решении задачи об определении областей предельного состояния в основании заглубленного фундамента // Вестник Волггр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Технические науки. 2003. Вып. 2/3 (8). С. 22—27.

16. *Богомолов А. Н.* Определение напряженного состояния основания сваи-стойки // Вестник ВолгГАСА. Сер. : Стр-во и архит. 1999. № 1. С. 29—34.

1. SP 50-101—2004. Svod pravil po proektirovaniyu i stroitel'stvu. Proektirovanie i ustroystvo osnovaniy i fundamentov zdaniy i sooruzheniy. M. : FGUP TsPP, 2005. 175 c.

2. *Shiyan V. I., Bogomolov A. N., Vikhareva O. A.* K voprosu o minimal'nykh znacheniyakh koeffitsienta bokovogo davleniya gruntov // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Estestvennye nauki. 2007. Vyp. 6 (23). S. 110—114.

3. *Bogomolov A. N.* Raschet nesushchey sposobnosti osnovaniy sooruzheniy i ustoychivosti gruntovykh massivov v uprugoplasticheskoy postanovke. Perm' : PGTU, 1996. 150 s.

4. *Tsvetkov V. K., Bogomolov A. N.* Open pit mining: stability of multilevel terrace of inhomogeneous rock // Journal of Mining Science. 1996. T. 32. № 3. P. 192—196.

5. Sopostavlenie rezul'tatov rascheta ustoychivosti otkosov, vypolnennykh razlichnymi metodami, dlya real'nykh ob"ektov / A. N. Bogomolov, B. S. Babakhanov, S. A. Kalinovskiy, A. N. Ushakov, A. V. Prokopenko // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2012. Vyp. 29 (48). S. 43—54.

6. *Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Shiyan S. I.* Raschet ustoychivosti otkosov i sklonov na osnove analiza ikh napryazhennogo sostoyaniya // Izvestiya vuzov. Ser.: Stroitel'stvo. Novosibirsk : Izd-vo NGASU, 2009. № 5. S. 115—120.

7. *Bartolomei A. A., Ponomarev A. B.* Experimental investigations and prediction of settlements of conicalpile foundations // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2001. T. 38. № 2. P. 42—50.

8. The use of synthetic materials in the highway engineering in the Urals / A. A. Bartolomey, V. I. Kleveko, V. G. Ofrikhter, A. B. Ponomaryov, A. N. Bogomolov // Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Proceedings of the 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Amsterdam, June 1999. Vol. 2. Proceedings of the 1999 12th European conference on soil mechanics and geotechnical engineering. Geotechnical engineering for transportation infrastructure. Netherlands. Amsterdam, 1999. P. 1197—1202.

9. *Bogomolov A. N., Ushakov A. N.* Zadacha o vychislenii osadok lentochnogo fundamenta // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 2011. № 6. S. 2.

10. *Bogomolov A. N., Kalashnikov S. Yu., Ushakov A. N.* Opredelenie osadok tochek uprugoy poluploskosti ot deystviya naklonnoy ravnomerno raspredelennoy nagruzki // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2011. № 24. S. 4—11.

11. Stroitel'nye normy i pravila. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. SNiP 2.02.01—83. M. : Stroyizdat, 1985. 40 s.

12. *Bogomolov A. N.* Analiz metodov opredeleniya koeffitsienta bokovogo davleniya grunta (eksperimental'nye metody) // Inzhenernye problemy stroitel'nogo materialovedeniya, geotekhnicheskogo i dorozhnogo stroitel'stva : materialy III Mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf. Volgograd : VolgGASU, 2012. S. 33—57.

13. *Bogomolov A. N.* Analiz metodov opredeleniya koeffitsienta bokovogo davleniya grunta (analiticheskie metody) // Inzhenernye problemy stroitel'nogo materialovedeniya, geotekhnicheskogo i dorozhnogo stroitel'stva : materialy III Mezhdunarodnoy nauch.-tekhn. konf. Volgograd : VolgGASU, 2012. S. 58—85.

14. *Bogomolov A. N.* Ustoychivost' (napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie) // Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2009613499 ot 30 iyunya 2009 g.

15. *Bogomolov A. N., Nikitin I. I.* O nekotorykh dopushcheniyakh i ikh posledstviyakh pri reshenii zadachi ob opredelenii oblastey predel'nogo sostoyaniya v osnovanii zaglublennogo fundamenta // Vestnik Volggr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Tekhnicheskie nauki. 2003. Vyp. 2/3 (8). S. 22—27.

16. *Bogomolov A. N.* Opredelenie napryazhennogo sostoyaniya osnovaniya svai-stoyki // Vestnik VolgGASA. Ser. : Str-vo i arkhit. 1999. № 1. S. 29—34.

© Богомолов А. Н., Калиновский С. А., Богомолова О. А., Прокопенко А. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Коэффициент бокового давления грунта как одна из величин, определяющих несущую способность однородного основания ленточного фундамамента / А. Н. Богомолов, С. А. Калиновский, О. А. Богомолова, А. В. Прокопенко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 251—257.

УДК 624.1 (075.8)

Г. Г. Кашеварова, И. И. Хусаинов, О. А. Маковецкий

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СТРУЙНОЙ ЦЕМЕНТАЦИИ ДЛЯ УСТРОЙСТВА ПОДЗЕМНЫХ ЧАСТЕЙ КОМПЛЕКСОВ

Целью данной работы является получение и анализ опытных данных при закреплении грунтов основания с помощью струйной цементации.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Jet grouting, предел прочности на сжатие грунтоцементного элемента.

This paper is aimed at obtaining and analysis of experimental data of soil densification with the help of jet grouting.

K e y w o r d s: Jet grouting, pressure resistance of soil-cement element.

Струйная геотехнология, известная как Jet-grouting method, является перспективным направлением в современной геотехнике. Применение струйной цементации грунта позволяет создавать однородное грунтовое основание с заданными физико-механическими характеристиками, обеспечивающее высокую эксплуатационную надежность [1]. При этом по сравнению с традиционными проектными решениями, например применением буронабивных свай, сокращаются сроки проведения работ и снижается стоимость подготовки основания. Технология производства работ по струйной цементации грунта позволяет контролировать зоны уплотнения основания и модифицировать его свойства на оптимальную глубину.

Эта технология применялась и применяется в России и Европе при строительстве таких крупных спортивных сооружений, как стадионы, которые относятся к объектам повышенной ответственности.

Одним из примеров является строительство нового стадиона футбольного клуба «Краснодар», площадка которого расположена в г. Краснодаре (Прикубанский внутригородской округ). Рельеф участка строительства относительно ровный. Абсолютные отметки поверхности земли колеблются от 27,2 до 28,4 м.

В пределах изученной в ходе инженерно-геологических изысканий толщи грунтов (до глубины 40 м) было выделено 7 инженерно-геологических элементов: ИГЭ-1 — суглинок твердый, просадочный (E = 12,4 МПа); ИГЭ-2 — суглинок полутвердый (E = 16,5 МПа); ИГЭ-3 — песок пылеватый, плотный (E = 28 МПа); ИГЭ-4 — глина полутвердая (E = 14,9 МПа); ИГЭ-5 — суглинок тугопластичный (E = 12 МПа); ИГЭ-6 — песок средней крупности, плотный (E = 34 МПа); ИГЭ-7 — песок гравелистый, плотный (E = 41 МПа).

Сейсмичность площадки по карте ОСР-97В в соответствии с грунтовыми условиями составляет 8 баллов.

На этапе анализа документации по возведению стадиона были выявлены следующие основные особенности его конструктивной схемы: существенная неоднородность нагрузок, передаваемых на основание, в связи с чем допустимая разница осадок между блоками стадиона должна составлять не более 2,5 см.

Анализ инженерно-геологических условий площадки с учетом сейсмичности участка показал, что основными ее проблемами являются возможность виброразжижения и виброползучести слоя плотных пылеватых песков ИГЭ-3, а

также высокая пористость слоя бурых глин ИГЭ-4 при землетрясении силой 8 баллов.

Таким образом, необходимость закрепления основания обусловлена необходимостью обеспечения жесткостных характеристик основания, отвечающих требованиям, предъявляемым к конструкциям стадиона по относительной разности осадок, и потенциальной угрозой виброразжижения и виброползучести слоев ИГЭ-3 и ИГЭ-4.

Возможны два варианта обеспечения эксплуатационной надежности основания фундаментной плиты в условиях сейсмических воздействий: 1) устройство свайного основания из буронабивных элементов длиной 15…20 м; 2) закрепление слоев ИГЭ-3 (водонасыщенные пески) и ИГЭ-4 (полутвердые глины) по технологии струйной цементации. На основании сравнения по критерию стоимости и срока производства работ был выбран второй вариант.

Мероприятия по уменьшению деформаций оснований и влияния их на сооружения регламентируются нормативными требованиями [2]. В них указано, что проектом закрепления грунтов должны быть предусмотрены опытно-производственные работы, а рецептуры растворов для инъекционных способов закрепления грунтов и физико-механические характеристики закрепленных грунтов должны уточняться по результатам их закрепления в лабораторных или полевых условиях.

Была составлена программа контроля качества jet-элементов при усилении основания, которая включала: определение оптимальных параметров технологического процесса для обеспечения гарантированного диаметра jet-элемента во всех инженерно-геологических элементах, а также определение физико-механических характеристик получаемого при этом материала (грунтоцемента).

При производстве работ на объекте были приняты следующие обязательные контролируемые параметры: диаметр элементов не менее 1200 мм; предел прочности при сжатии на 28 сут — не менее 4 МПа. Элементы выполнялись с расходом 600, 650, 800 и 900 кг цемента на один погонный метр закрепляемого грунта соответственно. Технологические параметры цементации приведены в табл., а схема расположения этих элементов показана на рис. 2. В соответствии с программой на участке строящегося объекта были выполнены четыре грунтоцементных элемента по технологии «Jet-2» с поверхности грунта (абсолютная отметка 26,6 м) на глубину 13,0 м (рис. 1). Глубина проходки определялась исходя из инженерно-геологических условий площадки строительства.

Рис. 1. Опытная площадка с откопанными элементами

Технологические параметры цементации

Наименование	Ед. изм.	Ø 1200
Расход цемента на 1 пог. м	кг/пог. м	600, 650, 800, 900
Расход воды на 1 пог. м	л/пог. м	600, 650, 800, 900
Давление нагнетания раствора	атм	450
Давление нагнетания воздуха	атм	8
Количество/диаметр форсунок	шт/мм	2/3,0
Скорость вращения буровой штанги	об/мин	32
Количество шагов при подъеме	шаг/пог. м	25
Длина шага	см	4
Время инъектирования	с/шаг	4,8

После набора прочности грунтоцемента (возраст 7 сут) было выполнено обуривание со всех сторон выполненных элементов для определения их фактического диаметра. При расходе 600 кг/м диаметр составил 1000…1200 мм, что недостаточно полно обеспечивает требуемые параметры элемента, необходимые для армирования грунта. При выполнении работ с расходом цемента 650, 800, 900 кг/м фактический диаметр элементов во всех инженерно-геологических элементах гарантированно превышает 1200 мм.

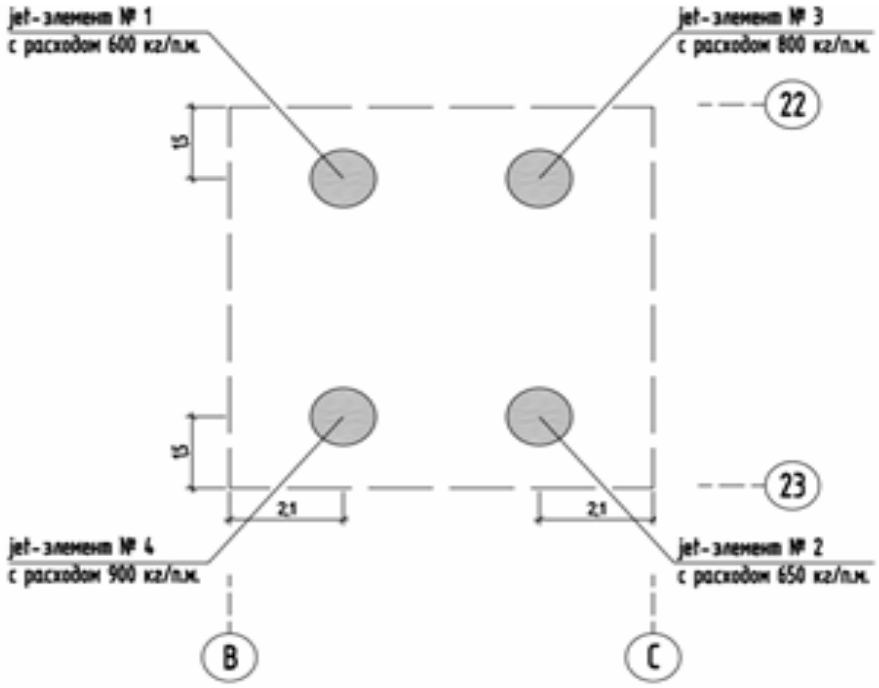


Рис. 2. Схема расположения jet-элементов

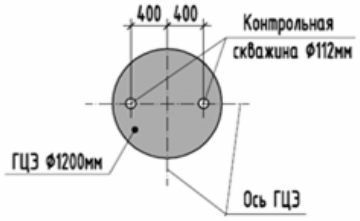


Рис. 3. Схема отборов кернов при контрольном бурении скважин

Затем было выполнено контрольное бурение опытных грунтоцементных элементов с отбором кернов для последующих лабораторных испытаний. Отбор образцов, транспортировка и хранение выполнялись в соответствии с требованиями ГОСТ 12071—84. С каждого элемента было отобрано по 12 проб грунтоцемента с глубин 2,0; 3,0; 4,0; 6,0; 7,0; 8,0; 9,0; 10,5; 12,0; 12,5 м от поверхности грунта (рис. 3, 4).

Отобранные образцы закрепленного грунта (грунтоцемента) были испытаны в возрасте твердения 7 и 14 сут. Определение предела прочности на сжатие $R_{сж}$ и модуля общих деформаций E выполнялось на универсальной испытательной машине Zwick 2-250 согласно требованиями ГОСТ 21153.2—84 и ГОСТ 28985—91. Статистическая обработка результатов испытаний позволила определить средние величины предела прочности на сжатие и модуля деформации грунтоцемента, реализуемые в каждом инженерно-геологическом элементе при различных расходах цемента на погонный метр. Предел прочности на сжатие грунтоцемента $R_{сж}$ находится в диапазоне 3,2…5,3 МПа для ИГЭ-2 (суглинок); 8,0…9,0 МПа для ИГЭ-3 (песок); 3,4…3,8 МПа для ИГЭ-4 (глина). Модуль деформации грунтоцемента E находится в диапазоне 1,5…2,0 ГПа для ИГЭ-2 (суглинок); 4,0…4,4 ГПа для ИГЭ-3 (песок); 1,5…2,0 ГПа для ИГЭ-4 (глина).

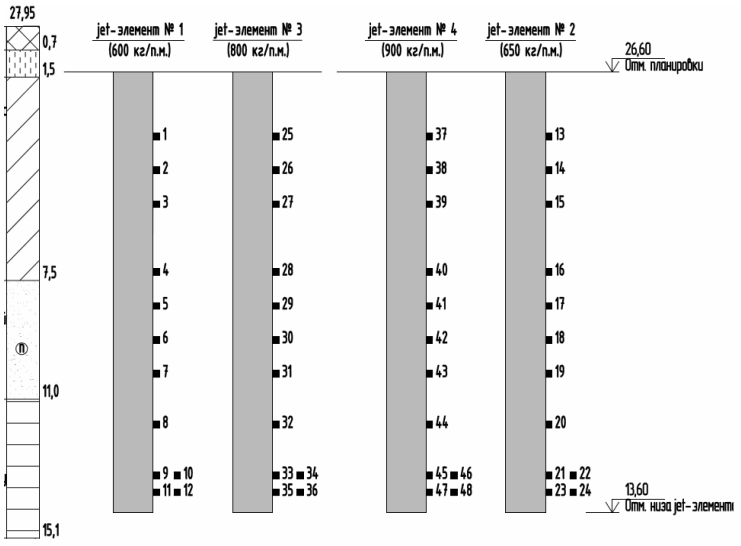


Рис. 4. Расположение отбора кернов по глубине скважины

Полученные в ходе исследований на опытной площадке характеристики грунта были использованы для разработки проектного решения строительства нового стадиона. Они позволили контролировать зоны уплотнения основания и модифицировать его свойства на оптимальную глубину.

Улучшение физико-механических характеристик грунта основания было достигнуто устройством в основании плиты «геомассива» — грунтоцементных армирующих элементов диаметром 1,3…1,5 м с шагом осей 2,5…2,8 м. В этом случае грунтоцементные элементы работают в едином массиве с окружающим грунтом под всей поверхностью плиты и не рассматриваются как свайный элемент, передающий острием нагрузку на нижележащие слои [3].

Определены физико-механические характеристики отдельного грунтоцементного элемента: плотность материала составляет 23…25 кН/м^3; расчетное сопротивление сжатию R = 3,5…4,0 МПа; модуль деформации E равен 350…400 МПа.

Приведенные деформативные характеристики такого геомассива значительно повысились. Так, модуль общих деформаций увеличился до значений E = 60,0…80,0 МПа по сравнению со значениями модуля деформаций природного грунта E = 15,0…25,0 МПа.

Устройство армирования основания, как показали расчеты по методике [4], приводит к снижению сейсмического воздействия на сооружение. Наличие регулярной сетки из армирующих элементов с более высокой, по отношению к естественному грунту, скоростью прохождения поперечной сейсмической волны приводит к тому, что в них (в элементах) рассеивается значительная часть энергии и воздействие волны на грунт, защищенный элементами, становится минимальным.

Вместе с тем, устройство таких вертикальных армирующих элементов приводит к эффекту обжатия грунта и ограничению возможности и абсолютной величины его объемных деформаций при воздействии сейсмической волны. В этих условиях не возникают явления виброразжижения и виброползучести.

После выполнения работ по закреплению ГРУ на восьми участках пятна застройки был выполнен контроль геометрических характеристик армирующих элементов и отбор более 90 проб материала (грунтобетона). Результаты анализа подтвердили правильность проектного решения.

Таким образом, устройство грунтоцементных армирующих элементов значительно повышает эксплуатационную надежность основания за счет повышения его деформационных характеристик и активной защиты грунтов от воздействия сейсмических колебаний, обеспечивая безопасную эксплуатацию спортивного сооружения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бройд И. И.* Струйная геотехнология. М., 2004. 448 с.

2. СП 22.13330—2011. Основания зданий и сооружений. М., 2010. 162 с.

3. *Хусаинов И. И., Кашеварова Г. Г., Маковецкий О. А.* Сравнительный анализ опытных и расчетных деформаций грунтового массива, закрепленного струйной цементацией // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. Т. 8. № 2. С. 126—132.

4. *Назаров Г. Н., Шемшурин В. А.* Использование инженерно-геологических характеристик при сейсмическом микрорайонировании. Сейсмическое микрорайонирование. М. : Наука, 1977.

1. *Broyd I. I.* Struynaya geotekhnologiya. M., 2004. 448 s.
2. SP 22.13330—2011. Osnovaniya zdaniy i sooruzheniy. M., 2010. 162 s.
3. *Khusainov I. I., Kashevarova G. G., Makovetskiy O. A.* Sravnitel'nyy analiz opytnykh i raschetnykh deformatsiy gruntovogo massiva, zakreplennogo struynoy tsementatsiey // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2012. T. 8. № 2. S. 126—132.
4. *Nazarov G. N., Shemshurin V. A.* Ispol'zovanie inzhenerno-geologicheskikh kharakteristik pri seysmicheskom mikrorayonirovanii. Seysmicheskoe mikrorayonirovanie. M. : Nauka, 1977.

© Кашеварова Г. Г., Хусаинов И. И., Маковецкий О. А., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Кашеварова Г. Г., Хусаинов И. И., Маковецкий О. А. Опыт применения струйной цементации для устройства подземных частей комплексов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 258—263.

УДК 624.131

Р. А. Мангушев

БУРОНАБИВНЫЕ СВАИ «ФУНДЕКС»: ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ

Приведены сведения о конструкции, технологии изготовления буронабивных свай «Фундекс». На основе десятилетнего опыта использования таких свай в условиях слабых водонасыщенных грунтов Санкт-Петербурга анализируются их основные достоинства и недостатки. Даются рекомендации по безопасному выполнению свай для окружающей застройки в условиях плотной городской застройки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: технология «Фундекс», буронабивные сваи, методы изготовления, дефекты свай.

The article provides information about construction and production technology of “Fundex” bored piles. The main advantages and drawbacks of these piles are analyzed on basis of 10 years experience of using these piles in water saturated soil of St. Petersburg. The recommendations how to use the piles safely in terms of dense city construction are given.

K e y w o r d s: «Fundex» technology, bored piles, production methods, pile defects.

Технология «Фундекс», разработанная в Нидерландах, получила распространение в мире с 1960-х гг., а в России крупномасштабно стала использоваться в Санкт-Петербурге с 2001 г.

Такая технология изготовления свай показалась способной решить все острые вопросы фундаментостроения центральной части города, для грунтов которой характерны значительные мощности слабых глинистых надморенных отложений, залегающих ниже насыпных и песчаных грунтов в верхней части основания. За 10 прошедших лет почти 60 % всех свай, изготавливаемых в грунте, выполнялись по технологии «Фундекс».

Сейчас, когда накоплен достаточный опыт применения таких свай в различных инженерно-геологических условиях города, необходимо объективно проанализировать их реальные достоинства и недостатки.

Сваи «Фундекс» относятся к сваям, изготавливаемым с вытеснением грунта, а технология их устройства заключается в образовании скважины за счет его уплотнения ввинчиваемой инвентарной стальной трубой, нижний конец которой закрыт оставляемым в грунте режущим наконечником [1].

Такие сваи изготавливаются установками вращательно-вдавливающего (извлекающего) действия. Пятой будущей сваи служит «теряемый» чугунный винтовой наконечник (рис. 1), который выставляется на заданную точку поверхности грунтового основания.

Рис. 1. «Теряемый» чугунный винтовой наконечник

К наконечнику штыковым соединением через тройную гидроизолирующую мягкую прокладку крепится нижний конец штатной буровой толстостенной трубы, верхний конец которой зажат в силовом рабочем органе бурового ствола, перемещающегося по направляющей стреле (рис. 2).

Рис. 2. Нижняя часть штатной буровой трубы

Скважина для будущей сваи создается путем вращательно-вдавливающего погружения системы «наконечник — буровая труба» до заданной отметки (рис. 3).

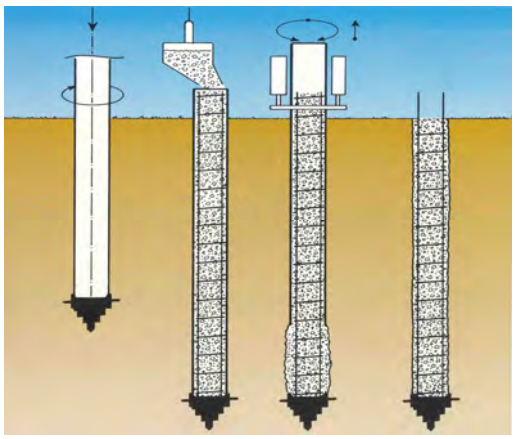


Рис. 3. Схема устройства свай «Фундекс»

В процессе внедрения системы в основание грунт раздвигается в радиальном направлении от оси скважины и одновременно уплотняется. При достижении наконечником проектной отметки труба проверяется на отсутствие воды.

В сухую инвентарную трубу через открытый верхний конец опускается арматурный каркас. Перед подачей бетонной смеси для предотвращения ее расслоения в трубу подается порция праймера, состоящего из одной части цемента, одной части песка и одной части воды. Затем производится порционное заполнение полости пластичным бетоном на мелком (5…20 мм) заполнителе с осадкой конуса 12…14 см.

Извлечение буровой трубы из грунта производится возвратным вращением с одновременным вытягиванием. В процессе выемки обсадной трубы производится формирование ствола сваи.

После извлечения инвентарной обсадной трубы металлический буровой наконечник остается в грунте и служит уширенным основанием сваи (теряемый башмак). Считается, что наличие уширения в основании сваи совместно с уплотнением грунтов в процессе устройства скважины обеспечивают высокую несущую способность буронабивных свай «Фундекс».

Диаметр ствола изготовленной сваи может быть 380, 450, 520, а в ряде случаев 620 мм при длине сваи до 45 м.

Основными преимуществами данной технологии считаются:

1) отсутствие значительных динамических воздействий на грунтовый массив основания в процессе изготовления свай, что особенно важно при производстве работ в стесненных условиях существующей застройки;

2) отсутствие работ по удалению грунта из полости буровой трубы и необходимости его вывоза со стройплощадки;

3) возможность измерять крутящий момент и усилие вдавливания буровой трубы, что позволяет косвенно произвести оценку ожидаемой несущей способности будущей сваи;

4) довольно высокая производительность (до 380 пог. м в сут).

Буронабивные сваи по технологии «Фундекс» изготавливаются без вибрационного и ударного воздействия на грунты, а также без выемки грунта на поверхность. Это во многом определило использование данной технологии в условиях плотной городской застройки, и такие сваи быстро завоевали популярность среди строителей и проектировщиков. Некоторые специалисты поспешили назвать эту свайную технологию безосадочной и безопасной для зданий окружающей застройки.

Однако, как показали результаты мониторингов, при устройстве свай с вытеснением на площадках, сложенных водонасыщенными пылеватоглинистыми грунтами, наблюдается первоначальное поднятие части зданий, построенных на фундаментах мелкого заложения и расположенных вблизи производства работ, а в дальнейшем их неравномерное опускание.

При устройстве свай на расстоянии до 2 м от стен сооружений такой подъем может достигать 30 мм. В [2] отмечается случай, когда тяжелый пятиэтажный дом получил подъем 40 мм при погружении 153 свай за 19 дней. При этом фронт работ двигался в сторону соседнего здания, нагоняя тем самым на него волну выпора. В последующие 3 года это здание село на 10 см.

Для зданий старой постройки, относящихся к 3 категории по техническому состоянию их конструкций [3], такой неравномерный подъем может привести к дальнейшему раскрытию трещин в несущих конструкциях сооружения. Последующая осадка зданий во времени может быть объяснена релаксацией вытесненного грунта, а также обжатием ствола сваи из незатвердевшего бетона боковым давлением. Этим может объясняться и наблюдающийся в ряде случаев эффект засасывания изготовленной сваи в водонасыщенных связных грунтах (рис. 4).

Рис. 4. Эффект засасывания сваи в глинистых грунтах

Кроме этого, при устройстве кустов свай в связных грунтах возможен выпор грунта на расстоянии до 80 см от изготовляемой сваи, что может привести к поднятию ранее изготовленных. Указанные достоинства и недостатки при изготовлении свай «Фундекс» в свое время были отмечены нами в работе [4].

Другим серьезным недостатком данной технологии является то, что бетонная смесь подается через открытый верхний конец трубы и, по сути дела, сбрасывается с высоты на дно забоя, закрытого теряемым наконечником. В этом случае при больших длинах свай (более 12 м) возможно расслоение свежего бетона: в нижней зоне оказываются более тяжелые фракции (щебень), а верхняя часть будет представлять собой цементный раствор без крупного заполнителя. Этот эффект был неоднократно отмечен при опытном выбуривании кернов по всей длине свай. Следствием этого может явиться то, что в верхней части разреза, при наличии слоев слабых водонасыщенных грунтов, незатвердевший раствор ствола сваи получит значительное обжатие при извлечении обсадной трубы, что, в свою очередь, приведет к образованию шейки ствола в зоне таких прослойков в основании (рис. 5).

Рис. 5. Образование шейки ствола сваи в зоне слабых ленточных глин ниже насыпного слоя

Этот эффект усиливается при увеличении скорости подъема трубы: цементная смесь не успевает отлипать от трубы и вытягивается вслед за ней, образуя локальные уменьшения диаметра. Кроме этого, дополнительно при погружении обсадной трубы соседней сваи вытесняемый грунт дообжимает еще не затвердевший цементный раствор (рис. 6).

Рис. 6. Поле свай с дефектами ствола в верхней части грунтового основания

Для уменьшения факторов, приводящих к уменьшению диаметра свай, при работе на площадках, сложенных слабыми водонасыщенными глинистыми грунтами, рекомендуется снизить вибродинамические воздействия на эти грунты путем уменьшения скорости бурения и подъема инвентарных труб на горизонтах их залегания. Устройство свай следует производить с расстоянием между недавно выполненными соседними сваями не менее 8 диаметров в осях по всему периметру.

При более близком расстоянии перед устройством новой сваи рекомендуется дождаться набора прочности бетона соседней сваи до 50 % от проектной величины, что, как правило, составляет 10…12 суток при надлежащем качестве бетонной смеси и соблюдении технологического регламента при бетонировании свай.

Поскольку технология свай «Фундекс» подразумевает устройство свай без выемки грунта путем вдавливающе-вкручивающего погружения буровой трубы до заданной отметки, то в процессе ее погружения меняется напряженно-деформированное состояние грунтового массива. В совокупности с невозможностью быстрой фильтрации воды в стороны или вниз в слабопроницаемых грунтах (суглинках и глинах) это приводит к вытеснению поровой воды, содержащейся в них, вверх. Причем процесс подъема воды происходит по боковой поверхности соседних свай и даже через тело свай по арматурным каркасам. Совокупность этих факторов в определенных инженерно-геологических и гидрогеологических условиях площадки, особенности технологии устройства набивных свай вытеснения приводят к эффекту появления «плачущих» свай — фильтрации воды через голову сваи и вверх вдоль ее боковой поверхности (рис. 7).

Эффект фильтрации воды через тело сваи не является результатом нарушения технологии устройства свай «Фундекс». Он отмечен в руководстве [5], работе [6] и, как правило, не влияет на несущую способность сваи по грунту, определяемую по результатам статических испытаний после ее отдыха.

Рис. 7. Фильтрация воды к голове сваи

Вместе с тем, с учетом расструктуривания бетона это может привести к значительному ослаблению прочности тела ствола в верхней части свай как раз в тех зонах, где может действовать наибольший изгибающий момент при приложении постоянных и временных нагрузок в процессе эксплуатации здания. При обнаружении таких дефектов необходимо проверить неразрушающими методами возможное изменение диаметра поперечного сечения, наличие трещин или прослойков грунта вдоль ствола, а также прочность бетона сваи. Эти данные позволят расчетными методами, с учетом предполагаемых нагрузок, обосновать возможность использования или отказа от выполненной сваи.

Так, на одном из объектов жилищного строительства на Правом берегу Невы по технологии «Фундекс» было выполнено более 900 свай с проектным диаметром 45 см и длиной 30 м. Откопка котлована до проектной отметки низа ростверков показала, что для большинства свай в верхней части основания — слое четвертичных ленточных текучепластичных глин — поперечные диаметры стволов имели уменьшение до 30 см, т. е. на почти 34 % меньше проектного размера (рис. 8).

Рис. 8. Измерение реального диаметра ствола сваи в ее верхней части

Дополнительное исследование неразрушающим сейсмоакустическим методом с использованием прибора ИДС-1 (ультразвуковой измеритель длины свай) позволило дополнительно установить уменьшение диаметров стволов для 12 из 15 тестируемых свай с глубин от 2,2 до 6,5 м от поверхности дна котлована[*].

[*] Измерения проводились сотрудниками НПК Центра Геотехнологий Санкт-Петербургского государственного архитектурно строительного университета.

Сопоставление расчетных моментных усилий, приходящихся на ослабленные поперечные сечения свай, с величинами предельных моментов, воспринимаемыми ими, показали, что для 18 % рассмотренных свай условия проверки прочности по материалу не удовлетворяются. Это потребовало конструктивных мер по усилению ослабленных стволов свай с помощью бетонных бандажей, а некоторые сваи были заменены сваями-дублерами.

В табл. на основе анализа опыта применения буробетонных свай, выполненных методом вытеснения грунта, представлены возможные проблемы и рекомендации по минимизации возможных ущербов при устройстве свай уплотнения «Фундекс».

Возможные проблемы	Предложение по минимизации возможного ущерба
1. Изменение поперечного диаметра сваи или ее разрыв при проходе через слабые грунты или ниже уровня поверхностных грунтовых вод, в том числе напорных	1) использование кондукторов; 2) уменьшение скорости подъема обсадной трубы; 3) откачка воды из скважины; 4) проверка сплошности и дефектности ствола сваи неразрушающими методами; 5) дополнительные статические испытания проблемных свай; 6) дополнительные работы по наращиванию головы либо дополнительное бетонирование «шейки сваи»; 7) устройство свай дублеров
2. Повышенный расход бетона при изготовлении сваи	1) устройство буровых свай в неизвлекаемой металлической трубе; 2) дополнительные испытания проблемных свай
3. Отклонение ствола сваи от проектного положения или остановка бурения и разрушение бурового наконечника при наличии в основании плотных грунтов с галечниковыми или валунными включениями	1) уширение ростверка либо устройство дополнительных балок с учетом фактического расположения свай; 2) устройство плитного ростверка; 3) назначение дублирующих свай с включением или с исключением свай, несоответствующих проекту
4. Оседание грунта ниже проектной отметки голов свай при изготовлении свай в слабых грунтах	1) проверка сплошности и дефектности ствола сваи неразрушающими методами; 2) дополнительные статические испытания проблемных свай; 3) работы по дозаливке голов свай вручную
5. Выпор грунта и подъем ранее изготовленных свай при устройстве кустов свай в связных грунтах	1) изменение технологии и скорости выполнения работ при изготовлении свай; 2) дополнительные статические испытания поднятых свай; 3) контроль качества ствола сваи неразрушающими методами; 4) снятие излишков грунта либо его дополнительное перераспределение по дну котлована
6. Дополнительный подъем и неравномерная осадка соседних зданий и сооружений при устройстве свай вблизи них	1) изготовление за смену не более 3—4 свай в 5-метровой зоне примыкания к соседним зданиям; 2) изготовление новой сваи рядом с выполненной не ранее чем через 5 суток; 3) проведением мониторинга деформаций сооружений и их основания

Таким образом, более чем 10-летний опыт использования в Санкт-Петербурге свай уплотнения «Фундекс» показывает, что эта технология, несмотря на ее высокую производительность, является далеко не универсальной и ее следует применять, тщательно оценив инженерно-геологические и градостроительные условия площадки. В ряде случаев она может оказаться малоэффективной, а иногда и опасной при длительной эксплуатации сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мангушев Р. А.*, *Ершов А. В.*, *Осокин А. И.* Современные свайные технологии. Изд. 2-е, доп. М. : АСВ, 2010. 235 с.

2. *Улицкий В. М.*, *Шашкин А. Г.*, *Шашкин К. Г.* Гид по геотехнике. Изд. 2-е, доп. СПб, 2012. 284 с.

3. ТСН 50-302—2004. Проектирование фундаментов зданий и сооружений в Санкт-Петербурге. СПб, 2004.

4. *Мангушев Р. А.*, *Ершов С. В.* Сваи «Фундекс» и CFA — новые технологии устройства буронабивных свай // Научно-практические и теоретические проблемы геотехники. СПб.: СПбГАСУ, 2007. С. 143—152.

5. Руководство по сваям Fundex проф. А. Ф. ван Виила. Нидерланды. 1982.

6. Инженерно-геотехнический отчет № 8. Проектирование и устройство свай с помощью проходного шнека CFA (включая исследование свай DDS и свай Fundex) / проф. Дан А. Браун, проф. Стивен Д. Дапп, проф. В. Роберт Томпсон, проф. Карлос А. Лазарте. Федеральная дорожная администрация США. Департамент по транспорту. Вашингтон, 2007.

1. *Mangushev R. A.*, *Ershov A. V.*, *Osokin A. I.* Sovremennye svaynye tekhnologii. Izd. 2-e, dop. M. : ASV, 2010. 235 s.

2. *Ulitskiy V. M.*, *Shashkin A. G.*, *Shashkin K. G.* Gid po geotekhnike. Izd. 2-e, dop. SPb, 2012. 284 s.

3. TSN 50-302—2004. Proektirovanie fundamentov zdaniy i sooruzheniy v Sankt-Peterburge. SPb, 2004.

4. *Mangushev R. A.*, *Ershov S. V.* Svai «Fundeks» i CFA — novye tekhnologii ustroystva buronabivnykh svay // Nauchno-prakticheskie i teoreticheskie problemy geotekhniki. SPb.: SPbGASU, 2007. S. 143—152.

5. Rukovodstvo po svayam Fundex prof. A. F. van Viila. Niderlandy. 1982.

6. Inzhenerno-geotekhnicheskiy otchet № 8. Proektirovanie i ustroystvo svay s pomoshch'yu prokhodnogo shneka CFA (vklyuchaya issledovanie svay DDS i svay Fundex) / prof. Dan A. Braun, prof. Stiven D. Dapp, prof. V. Robert Tompson, prof. Karlos A. Lazarte. Federal'naya dorozhnaya administratsiya SShA. Departament po transportu. Vashington, 2007.

© Мангушев Р. А., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Мангушев Р. А. Буронабивные сваи «фундекс»: достоинства и недостатки // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 264—271.

УДК 624.159.2

А. Б. Пономарев, А. В. Захаров

АНАЛИЗ СТРОИТЕЛЬСТВА НА ТЕХНОГЕННЫХ ГРУНТАХ В г. ПЕРМИ

Представлены результаты исследований инженерно-геологических условий на участке старого пруда, прогнозных геотехнических расчетов и моделирования для строительства жилого комплекса.

К л ю ч е в ы е с л о в а: техногенные грунты, насыпные грунты, мониторинг температурных полей, численное моделирование.

The results of researches of engineering and geological conditions on the territory of an old pond, predictive geotechnical calculations and modeling for the construction of housing development are provided in the article.

K e y w o r d s: industrial soil, filled soil, monitoring of temperature fields, numerical modeling.

Переход от типового строительства на свободной территории на реконструкцию и новое строительство в сложных условиях плотной городской застройки — это актуальная задача всех участников современного строительного комплекса. В настоящее время интенсивное жилищное строительство в Перми ведется на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями (14 опасных геологических процессов по СНиП 2.01.15—90) и с высокой плотностью застройки.

Рассматриваемая в данной статье площадка строительства относится к району, где в конце XVIII — начале XIX вв. проводились разработки мелистых песчаников из подземных выработок. Со временем рудоносные пласты песчаников были выработаны, добыча их прекратилась. Участок расположен на делювиальном склоне IV левобережной надпойменной террасы долины р. Камы. Склон долины реки осложнен логом. Глубина лога по архивным материалам ранее достигала до 7…10 м. В тальвеге лога существовал пруд, который пользовался популярностью у местных жителей и получил название Гагаринского пруда по причине близости Дворца культуры им. Ю. Гагарина. В связи с массовой застройкой окружающей территории лог к 1981 г. был почти полностью спланирован, незасыпанная часть лога осталась заполненной водой. В августе 1992 г. производилось частичное осушение водоема и его чистка. Строительное освоение территории привело к ухудшению питания водоема, что вызвало его деградацию. Зимой 2011 г. была осуществлена окончательная засыпка водоема для строительства жилого комплекса на данном участке. Засыпка пруда осуществлялась неорганизованным способом, в основном из привозного грунта с примесью различного строительного мусора, с включением льда водоема и снегового покрова с окружающей территории. Контроль качества отсыпки техногенного грунта, его степень уплотнения, гранулометрический состав, физические и механические свойства в процессе работ не осуществлялись.

Ввиду сложности инженерно-геологических условий площадки строительства в процессе выполнения исследовательских работ были поставлены следующие задачи:

провести анализ и уточнение геологической ситуации массива насыпного грунта на территории бывшего пруда;

выполнить прогнозные геотехнические расчеты и моделирование для определения возможных деформаций массива насыпного грунта при устройстве наружных инженерных сетей и благоустройства территории;

разработать рекомендации по осуществлению технических решений с учетом возможных деформаций массива грунта при выполнении СМР по наружным сетям и благоустройству.

Для решения поставленных задач были выполнены следующие основные работы:

проведены дополнительные инженерно-геологические изыскания на площадке строительства;

осуществлен мониторинг температурных полей массива грунта;

выполнены численные и аналитические расчеты по прогнозу осадок грунтового массива;

осуществлено численное моделирование процесса оттаивания грунтов;

разработаны рекомендации по принятию технических решений с целью инженерного освоения данной территории.

С целью уточнения состояния и свойств насыпных грунтов, условий их залегания, выявления мерзлых прослоек проведены дополнительные изыскания. Схема расположения выработок приведена на рис. 1.

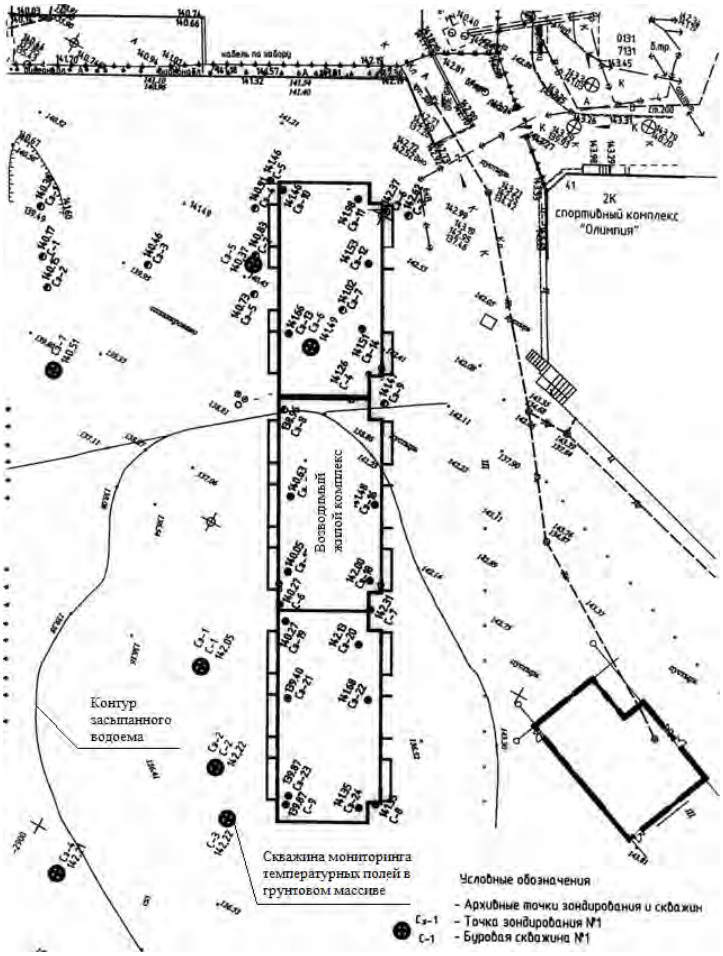


Рис. 1. Ситуационная схема

По результатам анализа архивных данных и проведенных дополнительных изысканий установлено фактическое инженерно-геологическое строение площадки. Установлено, что с поверхности залегают насыпные грунты, представленные суглинками коричного цвета, от текучепластичной до тугопластичной консистенции, с примесью органического вещества, прослоями и линзами льда до 10 см, включениями строительного мусора и щебня. Техногенные отложения подстилаются четвертичными аллювиальными грунтами. Вся толща четвертичных отложений представлена глинистыми грунтами. Коренные породы — аргиллиты — по данным архивных изысканий залегают на глубинах 9,6…13,0 м. Породы сильнотрещиноватые, сильно и неравномерно выветрелые. Показатели свойств ИГЭ приведены в табл. 1. Установившийся уровень грунтовых вод по данным изысканий августа 2012 г. зафиксирован на глубине 1,7 м.

На основе анализа имеющихся архивных данных и выполненных дополнительных инженерно-геологических изысканий установлено, что основными особенностями данного геологического массива являются:

развитие осадки за счет самоуплотнения насыпного грунта от собственного веса, а также внешней нагрузки, в том числе динамической;

развитие дополнительной осадки за счет уплотнения подстилающих грунтов от веса насыпи;

развитие осадок слоя частично промороженного грунта в результате его оттаивания.

Таблица 1

Показатели физических свойств грунтов

№ ИГЭ	Наименование грунта	w, д.е.	ρ, г/см^3	ρ_s, г/см^3	n, д.е.	e, д.е.	S_r, д.е.	c, МПа	φ, град.	k_{com}
1	Суглинок тугопластичный насыпной	0,18	1,83	1,55	0,43	0,74	0,66	0,019	21,87	0,87
2	Суглинок текучепластичный	0,25	1,97	1,58	0,42	0,72	0,94	0,046	8,58	—
3	Суглинок текучий с прослоями льда	0,24	1,96	1,58	0,41	0,69	0,90	0,008 0,022	8,21 8,9	—
4	Глина заторфованная, текучепластичная	0,30	1,96	1,51	0,45	0,82	1,00	0,007	12,69	—
5	Глина текучая	0,26	1,94	1,54	0,44	0,78	0,91	0,006	8,7	—

Для оценки степени промороженности грунтов и прогнозирования времени их оттаивания были выполнены следующие работы:

установка температурных датчиков в грунтовом массиве;

мониторинг распределения температурных полей в грунтовом массиве;

численное моделирование процесса оттаивания грунтов во времени;

прогноз времени оттаивания грунтов.

Мониторинг распределения температурных полей проведен путем установки датчиков температуры в грунтовом массиве до глубины 10 м с шагом 1,5 м. Установка датчиков произведена в августе 2012 г. Результаты мониторинга на конец августа представлены на рис. 2 и 3.

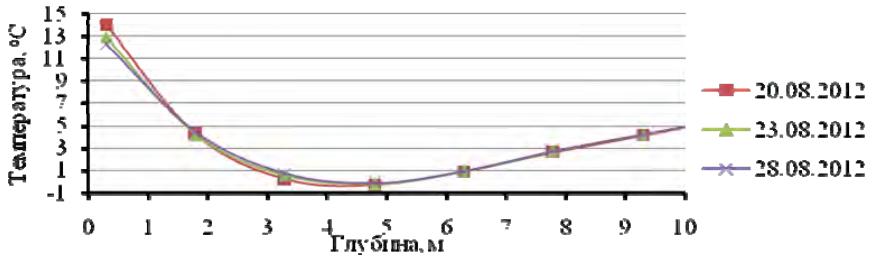


Рис. 2. График распределения температурных полей в грунтовом массиве

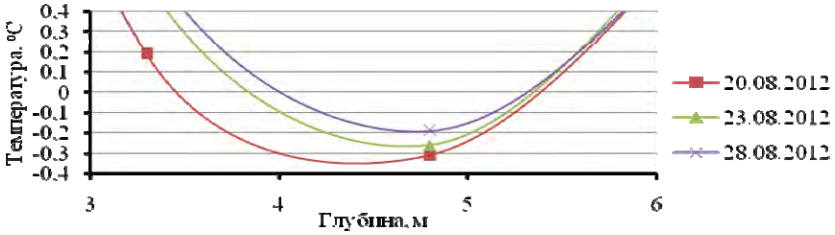


Рис. 3. График распределения температурных полей в грунтовом массиве на глубинах 3…6 м

Анализ графиков позволяет сделать вывод о том, что происходит постепенное оттаивание грунтов. Скорость изменения температуры на глубине 4,8 м составляет ≈0,015 °С/сут. Принимая допущение, что скорость на протяжении всего периода оттаивания грунтов будет постоянной, можно определить общую продолжительность оттаивания ≈ 20 дней.

Численное моделирование процесса оттаивания грунтов во времени было проведено в программном комплексе «GeoStudio». Рассматривалось решение плоской нестационарной задачи. Для создания модели были использованы физические характеристики грунтов по результатам выполненных изысканий в августе 2012 г. Граничные условия модели приняты по аналогии с [1]. Результаты численного моделирования представлены в виде графика изменения температуры во времени на глубине 4,8 м (рис. 4). Анализ графика показал, что переход грунтов в талое состояние происходит на 13 день численного моделирования.

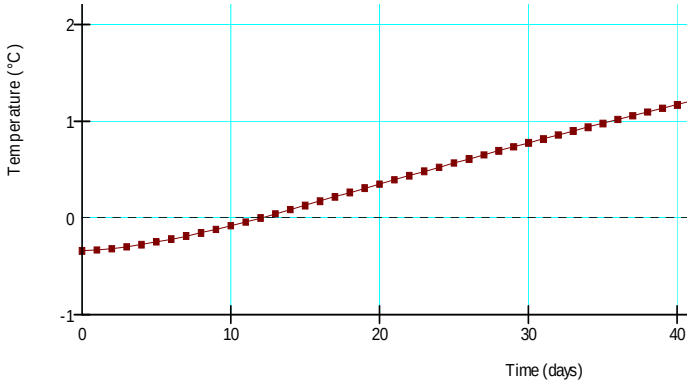


Рис. 4. График изменения температуры на глубине 4,8 м

На основании дополнительных исследований выявлена неравномерность и переслоение промороженного грунта, поэтому был высказано предположение, что продолжительность оттаивания составит не менее 2 месяцев.

Для определения возможных деформаций массива насыпного грунта при устройстве наружных инженерных сетей и благоустройстве территории было проведено численное моделирование процесса развития деформации и выполнены соответствующие аналитические расчеты методом, описанным в [2, 3]. Численное моделирование проведено с использованием программного комплекса PLAXIS 2D. Вариантное моделирование осуществлялось в зависимости от грунтовых условий (для максимальной 10 м и минимальной 5 м толщи насыпного грунта), а также глубины заложения инженерных коммуникаций (1,4 и 5,8 м). Согласно полученным результатам, максимальная осадка поверхности от собственного веса и от транспортной нагрузки составила 20,4 см, причем основная доля осадки массива — 12,8 см — приходится на насыпной техногенный грунт мощностью до 10 м. Также по результатам расчетов сделан вывод, что наличие и глубина заложения инженерных коммуникаций не оказали существенного влияния на величину осадок во всех вариантах расчета ввиду их незначительных размеров относительно сжимаемой толщи грунтов.

Следующим этапом анализа геотехнической ситуации был осуществлен подбор варианта улучшения грунтовых условий на основе численного моделирования. Рассмотрены следующие варианты технологических решений:

устройство легкосжимаемых компенсаторов в толще насыпного грунта;

устройство под коммуникациями вытрамбованной щебеночной подушки, усиленной геосеткой, и слоя армогрунта из геотекстиля в толще насыпного грунта.

Анализ результатов выполненных расчетов показал, что наиболее эффективным является второй вариант предлагаемых решений. В этом случае максимальная осадка составит S = 9,7 см, причем осадка насыпного грунта S = 7,6 см, а осадка подстилающего слоя глины S = 2,1 см.

На завершающем этапе работ были выполнены расчеты осадок насыпного грунта. Учитывалось самоуплотнение толщи насыпных грунтов, а также дополнительные осадки за счет уплотнения подстилающих грунтов от веса насыпи, которые определяются толщиной слоя насыпных грунтов, а также сжимаемостью и условиями консолидации подстилающих насыпь грунтов. В качестве толщи насыпного грунта была принята максимальная — 10 м, а толща подстилающих грунтов (глины текучие и текучепластичные) — 3,7 м. Для учета самоуплотнения неслежавшихся насыпных грунтов к значениям дополнительного вертикального напряжения от внешней нагрузки в пределах насыпного слоя было добавлено вертикальное напряжение от собственного веса грунта. При расчете осадок основания была учтена осадка подстилающих грунтов от веса насыпи путем добавления к значениям напряжения от внешней нагрузки ниже кровли подстилающих грунтов вертикального напряжения от веса вышележащих слоев.

Расчет осадки основания выполнялся с учетом полезной транспортной нагрузки с использованием расчетной схемы в виде линейно деформируемого полупространства методом послойного суммирования. В результате была получена суммарная величина осадки слоя насыпного грунта и дополнительной осадки подстилающего слоя из глины, равная S = 8,8 см.

Для проверки полученных расчетных значений осадки толщи насыпных грунтов была использована методика проф. В. И. Крутова [4]. Величина дополнительной осадки за счет уплотнения подстилающих грунтов от собственного веса насыпного грунта составила S_f =1,47 см. Суммарная величина осадки слоя насыпного грунта и дополнительной осадки подстилающего слоя составила S = 8,47 см.

Полученные результаты расчетов осадки двумя изложенными выше аналитическими методами хорошо коррелируют между собой, разница полученных значений не превышает 4 %. Разница с численными расчетами не превысила 14 %.

Для оценки развития осадок во времени выполнялся расчет по методу эквивалентного слоя с использованием теории фильтрационной консолидации насыпного грунта (первичной консолидации). За величину конечной стабилизированной осадки принималось максимальное полученное значение при численном моделировании S_∞ = 9,7 см.

Получены следующие значения: $S_{1год}$= 4,04 см (41 % стабилизированной конечной осадки); $S_{3год}$ = 5,83 см (60 %); $S_{10год}$= 8,14 см (83 %).

В дальнейшем была использована модель компрессии мерзлых грунтов при оттаивании [5]. Тогда осадка с учетом процесса оттаивания грунта составит: $S_{1tгод}$ = 1,8 см (19 % стабилизированной конечной осадки);$S_{2tгод}$= 4,58 см (47 %); $S_{3tгод}$= 5,78 см (60 %); $S_{5tгод}$= 6,88 см (71 %); $S_{10tгод}$= 8,14 см (83 %).

Сравнение выполненных расчетов представлено на рис. 5.

Основные выводы:

1. Исследуемая площадка строительства представлена недоуплотненными насыпными грунтами мощностью 5…10 м, в пределах глубины от 3 до 8 м находящихся в частично промороженно-оттаивающем состоянии.

2. Полное оттаивание массива насыпного грунта (переход в 0 °С) произойдет не менее чем через 60 суток.

3. Конечная суммарная стабилизированная осадка слоя насыпного грунта с учетом его самоуплотнения и дополнительной осадки подстилающего слоя, согласно выполненных расчетов, составит S_∞ = 9,7 см и завершится через 21 год.

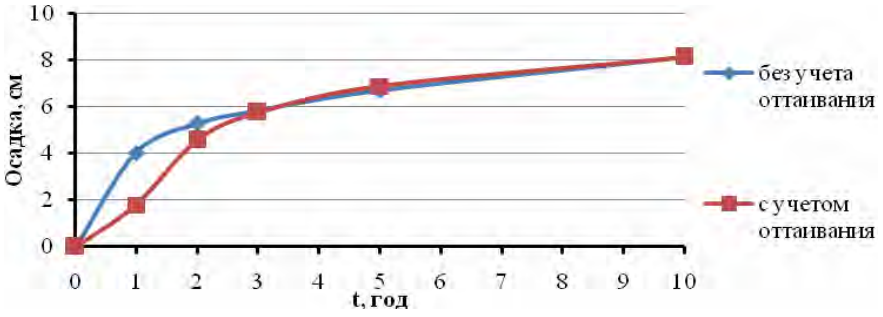


Рис. 5. График изменения осадки насыпного грунта во времени

4. На основании выполненного комплекса работ с учетом сроков строительства сделан вывод, что на момент выполнения работ по благоустройству территории (3-й год самоуплотнения грунта) остаточная стабилизация осадок составит 3,92 см, которая будет развиваться в течение остальных 18 лет.

5. Рекомендуется выполнить устройство под коммуникации вытрамбованной щебеночной подушки, усиленной геосеткой.

6. С целью недопущения неравномерных деформаций поверхности и провалов благоустройство территории выполнять с применением геотекстиля с укладкой его на глубину не менее 1 м от поверхности.

7. Для оценки геотермальной ситуации массива оттаивающего насыпного грунта осуществлять в период строительства геотермальный мониторинг.

Учитывая, что первоначальным решением, предлагаемым проектной организацией, была полная экскавация насыпных грунтов с последующей отсыпкой с контролируемым уплотнением, предложенные решения позволили снизить стоимость выполнения земляных работ на 70 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пономарев А. Б., Захаров А. В.* Использование геотермальной энергии для отопления и кондиционирования зданий // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер. Стр-во и архит. 2010. Вып. 17 (36). С. 119—122.

2. Определение полей напряжений в однородных грунтовых массивах сложного поперечного сечения / А. Н. Богомолов, О. А. Вихарева, А. В. Редин, Д. П. Торшин // Известия вузов. Строительство. 2001. № 4. С. 135—137.

3. *Tsvetkov V. K., Bogomolov A. N.* Open pit mining: stability of multilevel terrace of inhomgeneous rock // Journal of mining science. 1996. Т. 32. № 3. P. 192—196.

4. *Крутов В. И.* Основания и фундаменты на насыпных грунтах. М. : Стройиздат, 1988. 223 с.

5. *Цытович Н. А.* Механика мерзлых грунтов : учеб. пособие. М. : Высш. шк., 1973. 448 с.

1. *Ponomarev A. B., Zakharov A. V.* Ispol'zovanie geotermal'noy energii dlya otopleniya i konditsionirovaniya zdaniy // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser. Str-vo i arkhit. 2010. Vyp. 17 (36). S. 119—122.

2. Opredelenie poley napryazheniy v odnorodnykh gruntovykh massivakh slozhnogo poperechnogo secheniya / A. N. Bogomolov, O. A. Vikhareva, A. V. Redin, D. P. Torshin // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2001. № 4. S. 135—137.

3. *Tsvetkov V. K., Bogomolov A. N.* Open pit mining: stability of multilevel terrace of inhomgeneous rock // Journal of mining science. 1996. T. 32. № 3. P. 192—196.

4. *Krutov V. I.* Osnovaniya i fundamenty na nasypnykh gruntakh. M. : Stroyiz-dat, 1988. 223 s.

5. *Tsytovich N. A.* Mekhanika merzlykh gruntov : ucheb. posobie. M. : Vyssh. shk., 1973. 448 s.

© Пономарев А. Б., Захаров А. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Пономарев А. Б., Захаров А. В. Анализ строительства на техногенных грунтах в г. Перми // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 272—278.

УДК 624.131.5

А. К. Рябухин, С. И. Маций, Е. В. Безуглова

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАПАЗОНА ДОПУСТИМЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ БУРОНАБИВНЫХ СВАЙ ПРОТИВООПОЛЗНЕВЫХ СООРУЖЕНИЙ

Представлены результаты расчетов предельно допустимых горизонтальных перемещений буронабивных свай. Предложены рекомендации по определению ограничения деформаций буронабивных свай при проектировании противооползневых сооружений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: буронабивные сваи, трещины, горизонтальные перемещения, противооползневые сооружения, оползни.

The results of calculation of maximum allowable horizontal displacements o bored piles are represented. The recommendations for the determination of limit deformations of bored piles in the design of landslide stability constructions are given.

K e y w o r d s: bored piles, cracks, horizontal displacement, landslide stability constructions, landslides.

Введение. В последние годы для стабилизации опасных инженерно-геологических процессов (оползней) в подавляющем большинстве случаев применяются противооползневые сооружения из буронабивных свай [1]. В настоящее время в соответствии с российской нормативной документацией [2, 3] предельно допустимое значение горизонтального перемещения сваи должно устанавливаться в техническом задании на проектирование, т. е. проектировщик для определения горизонтальных перемещений свай должен руководствоваться техническим заданием заказчика, в котором должны быть указаны эти значения. Но зачастую заказчиком выступает лицо с юридическим, экономическим или другим образованием, но никак не специальным инженерно-техническим, в связи с чем он просто не в состоянии правильно оценить и указать необходимые пункты технического задания, касающиеся технических параметров (предельных перемещений) сооружения. При отсутствии данного пункта в техническом задании предельные значения перемещений в соответствии с [4—7] принимают равным 10 мм.

Однако при проектировании объектов в г. Сочи расчетные перемещения свай в свайных сооружениях, полученные с применением известных методик и использованием программного комплекса конечно-элементного анализа Plaxis, составили от 5 до 120 мм. При этом запас прочности конструкции не исчерпался, конструкция удовлетворяла требованиям безопасности и надежности как в процессе строительства, так и в процессе эксплуатации. Также вызывает сомнение идентичное ограничение по горизонтальным перемещениям (10 мм) для свай различной длины (с разными величинами консольной части и заделки) и различного диаметра (с разными значениями жесткости).

На основании вышеизложенного, учитывая неоднозначную интерпретацию данного вопроса в нормативной документации, очевидно, что заказчик в подавляющем большинстве случаев просто не в состоянии указать в техническом задании значения предельных горизонтальных перемещений конструкции, тем более противооползневых. Основным критерием для определения максимальных перемещений как свай, так и всей конструкции в данном случае является обеспечение нормальной эксплуатации и работоспособности.

Это достигается в случае, если, несмотря на возникающие перемещения, свайный фундамент и сама конструкция остаются в нормальном состоянии и удовлетворяют требованиям безопасности и надежности. Таким образом, целью работы является исследование диапазона горизонтальных перемещений буронабивных свай (различного диаметра, длины, консольной части и пр.) противооползневых сооружений исходя из условий обеспечения достаточных прочностных параметров свай.

Методика исследования диапазона предельно допустимых горизонтальных перемещений свай. Учитывая, что несущая способность сваи, воспринимающей оползневую нагрузку, должна быть обеспечена, определить максимальные перемещения можно по расчетам второй группы предельных состояний (по деформациям). Так, в соответствии с [8] расчет должен производиться по прогибам (в нашем случае по горизонтальным перемещениям) и на раскрытие трещин. При этом технологические и конструктивные критерии определения деформаций по прогибам удовлетворяются. Требования назначены исходя из физиологических и эстетико-психологических критериев. При данных ограничениях конструкция имеет значительный запас прочности, что снижает ее эффективность и повышает стоимость сооружений. Следовательно, расчет максимальных деформаций свай должен определяться исходя из расчета свай на максимально допустимое раскрытие трещин. В соответствии с [8] (для нашего случая) максимальное раскрытие трещин железобетонной конструкции составляет 3 мм. Эта величина обусловлена обратимыми химическими процессами, происходящими в бетоне при раскрытии трещин менее 3 мм. При большем раскрытии процесс становится необратимым, что приводит к разрушению бетона, коррозии арматуры и, как результат, деформациям сооружения.

Таким образом, определить максимальные горизонтальные перемещения свай возможно решением обратной задачи (при условии, что максимальное раскрытие трещин составляет 3 мм) по формуле для определения раскрытия трещин. Ширину раскрытия нормальных трещин a_{crc} определяют по формуле:

$$a_{crc} = \varphi_1 \, \varphi_2 \, \varphi_3 \, \psi \, \frac{\sigma_s}{E_s} \, l_s, \qquad (1)$$

где σ_s — напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от соответствующей внешней нагрузки; l_s — базовое (без учета влияния вида поверхности арматуры) расстояние между смежными нормальными трещинами; ψ — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами; φ_1 — коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки; φ_2 — коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры; φ_3 — коэффициент, учитывающий характер нагружения; E_s — модуль упругости стали.

При этом в расчетах, в соответствии с исследованиями Л. К. Гинзбурга [9], высота сжатой зоны бетона принята равной половине сечения сваи. Необходимо уточнить, что обратная задача по раскрытию трещин решается для определения величины изгибающего момента, при которой образуются трещины шириной раскрытия 0,03 мм. Полученное значение необходимо в дальнейшем для определения кривизны железобетонных элементов при расчете перемещений свай.

Далее, определив момент, при котором образуются трещины шириной раскрытия 0,03 мм, возможно на основании расчета железобетонных элементов по прогибам определить деформации для свай различного диаметра и длины. В рассматриваемом случае для свободно опертых и консольных элементов максимальный прогиб *f* определяют по формуле:

$$f = S\, l^2 \left(\frac{1}{r}\right)_{\max}, \qquad (2)$$

где $\left(\frac{1}{r}\right)_{\max}$ — полная кривизна в сечении с наибольшим изгибающим моментом от нагрузки, при которой определяется прогиб; l — длина консольной части сваи (изменяемый параметр); S — коэффициент, принимаемый по таблице из [8].

Кривизну изгибаемого железобетонного элемента на участках с трещинами в растянутой зоне $\left(\frac{1}{r}\right)_{\max}$ определяют по формуле

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{\max} = \frac{M}{E_{b,red}\, I_{red}}, \qquad (3)$$

где I_{red} — момент инерции приведенного сечения относительно его центра тяжести; $E_{b,red}$ — приведенный модуль деформации сжатого бетона; M — момент при величине раскрытия трещин 0,03 мм.

Результаты выполненных исследований. Расчеты выполнены для типовых каркасов буронабивных свай, наиболее часто применяемых при проектировании противооползневых сооружений на Черноморском побережье Северного Кавказа. Для расчетов были выбраны сваи диаметром 630, 820, 1000 и 1200 мм (рис. 1). Бетон свай принят класса В25. Армирование свай — 16 стержней арматуры класса АIII диаметром 25...32 мм. Величина защитного слоя бетона a = 65...100 мм.

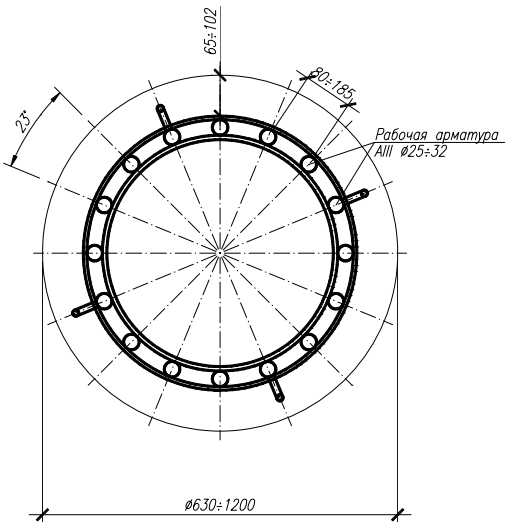


Рис. 1. Типовой каркас буронабивных свай

Далее представлен график (рис. 2) перемещений оголовков буронабивных свай различного диаметра и величины консольной части. На графике отображены результаты расчетов, на основании которых установлено, что характер увеличения допустимых деформаций свай имеет вид возрастающей параболы.

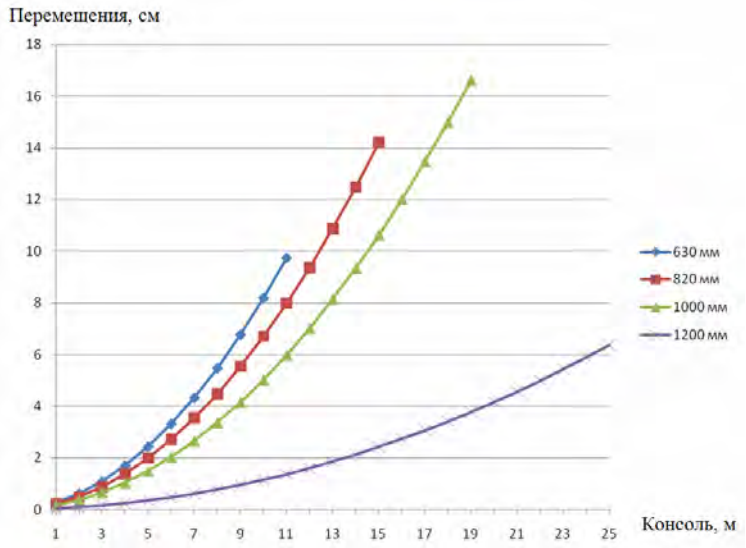


Рис. 2. Перемещения оголовков буронабивных свай различного диаметра и величины консольной части

Таким образом, установлено, что максимально допустимые значения перемещений оголовков буронабивных свай значительно различаются для свай различного диаметра, а также величины консольной части. Необходимо отметить, что чем больше диаметр сваи (больше жесткость), тем более пологую форму на графике принимает парабола. Также с увеличением величины консольной части (увеличением гибкости) возрастают и предельно допустимые значения деформаций. Для исследуемого диапазона минимальные перемещения оголовков буронабивных свай составили 0,04 см (для сваи диаметром 1200 мм и величиной консольной части 2 м), а максимальные — 16,62 см (для сваи диаметром 1000 мм и величиной консольной части 20 м).

При аппроксимации табличных значений представленных графиков были получены следующие функции зависимости значений перемещений свай f от их диаметра и величины консольной части l:

для свай диаметром 630 мм: $f(l)=\frac{1}{14{,}78}l^2+\frac{1}{6217{,}39}l-\frac{1}{916{,}67}$;

для свай диаметром 820 мм: $f(l)=\frac{1}{18{,}02}l^2+\frac{1}{2967{,}87}l-\frac{1}{1533{,}23}$;

для свай диаметром 1000 мм: $f(l)=\frac{1}{24{,}08}l^2+\frac{1}{2485{,}53}l-\frac{1}{1533{,}23}$;

для свай диаметром 1200 мм: $f(l)=\frac{1}{105{,}68}l^2+\frac{1}{2419{,}31}l-\frac{1}{333{,}04}$.

Заключение. На основании выполненных расчетов определен диапазон предельно допустимых горизонтальных перемещений буронабивных свай исходя из условий обеспечения несущей способности конструкций по второй группе предельных состояний. Выявлены зависимости значений перемещений свай от их диаметра и величины консольной части. Установлены закономерности изменения обозначенных значений от параметров гибкости и жесткости конструкции. Получены полиномные функции зависимости допустимых деформаций свай от их диаметра и величины консольной части. Таким образом, при проектировании противооползневых сооружений, в случае отсутствия в техническом задании ограничений по предельно допустимым перемещениям конструкций, рекомендуется руководствоваться графиком и полученными его аппроксимацией функциями, представленными в данной работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 22-02—2003. Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения / ГОССТРОЙ России. М., 2003.

2. СП 24.13330.2011. Свайные фундаменты / Минрегион России. М., 2011.

3. СП 50-102—2003. Проектирование и устройство свайных фундаментов / ГОССТРОЙ России. М., 2004.

4. *Зурнаджи В. А., Николаев В. В.* Механика грунтов, основания и фундаменты. М., 1967. С. 322—323.

5. *Сорочан Е. А.* Основания, фундаменты и подземные сооружения. М. : Стройиздат, 1985. С. 169—170.

6. *Balakrishnan E. G., Balasubramaniam A. S., Noppadol Phien-wej.* Load Deformation Analysis of Bored Piles in Residual Weathered Formation // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. USA. 1999. P. 122—131.

7. *Randolph Mark F., Wroth C. Peter.* Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. USA. 1978. P. 1465—1488.

8. СП 52-101—2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры / ГОССТРОЙ России. М., 2004.

9. *Гинзбург Л. К.* Противооползневые удерживающие конструкции. М. : Стройиздат, 1979. С. 49—50.

1. SNiP 22-02—2003. Inzhenernaya zashchita territoriy, zdaniy i sooruzheniy ot opasnykh geologicheskikh protsessov. Osnovnye polozheniya / GOSSTROY Rossii. M., 2003.

2. SP 24.13330.2011. Svaynye fundamenty / Minregion Rossii. M., 2011.

3. SP 50-102—2003. Proektirovanie i ustroystvo svaynykh fundamentov / GOSSTROY Rossii. M., 2004.

4. *Zurnadzhi V. A., Nikolaev V. V.* Mekhanika gruntov, osnovaniya i fundamenty. M., 1967. S. 322—323.

5. *Sorochan E. A.* Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya. M. : Stroyizdat, 1985. S. 169—170.

6. *Balakrishnan E. G., Balasubramaniam A. S., Noppadol Phien-wej.* Load Deformation Analysis of Bored Piles in Residual Weathered Formation // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. USA. 1999. P. 122—131.

7. *Randolph Mark F., Wroth C. Peter.* Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles // Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. USA. 1978. P. 1465—1488.

8. SP 52-101—2003. Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii bez predvaritel'nogo napryazheniya armatury / GOSSTROY Rossii. M., 2004.

9. *Ginzburg L. K.* Protivoopolznevye uderzhivayushchie konstruktsii. M. : Stroyizdat, 1979. S. 49—50.

© Рябухин А. К., Маций С. И., Безуглова Е. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Рябухин А. К., Маций С. И., Безуглова Е. В. Исследование диапазона допустимых горизонтальных перемещений буронабивных свай противооползневых сооружений // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 279—283.

УДК 624.15

А. Н. Саурин, А. И. Корпач

О НЕКОТОРЫХ ПРОБЛЕМАХ ПРИМЕНЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ НЕТИПОВЫХ ВИДОВ ИСКУССТВЕННЫХ ОСНОВАНИЙ

Предложена классификация искусственных оснований в системе основание — фундамент, показана эффективность применения нетиповых видов искусственных оснований фундаментов, обращено внимание на некоторые проблемы их применения в практике проектирования и строительства объектов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: геотехническая задача, геотехнический анализ, искусственное основание, система основание — фундамент.

In the article suggested is the classification of artificial beds in the bed — foundation system. The authors prove the effectiveness of use of non-typical artificial beds and pay attention to some problems connected with their usage in practice of design and construction of some objects.

K e y w o r d s: geo-technical task, geo-technical analysis, artificial bed, bed — foundation system.

Успешное решение геотехнических задач по обеспечению надежности и экономической эффективности систем основание — фундамент при проектировании и строительстве объектов промышленного и гражданского назначения невозможно без вариантного проектирования систем в существующих инженерно-геологических, природно-климатических, построечных и экологических условиях строительства объектов. Применяемые в системах основание — фундамент типовые и нетиповые виды искусственных оснований отличаются большим разнообразием по способу устройства, используемым материалам, расположению в плане и глубине сжимаемой зоны, воздействию на окружающий грунтовый массив, влиянию на окружающую среду и другим параметрам. Различные виды искусственных оснований можно классифицировать по характеру совместной работы с фундаментом (ростверком) и разделить на четыре типа (рис. 1).

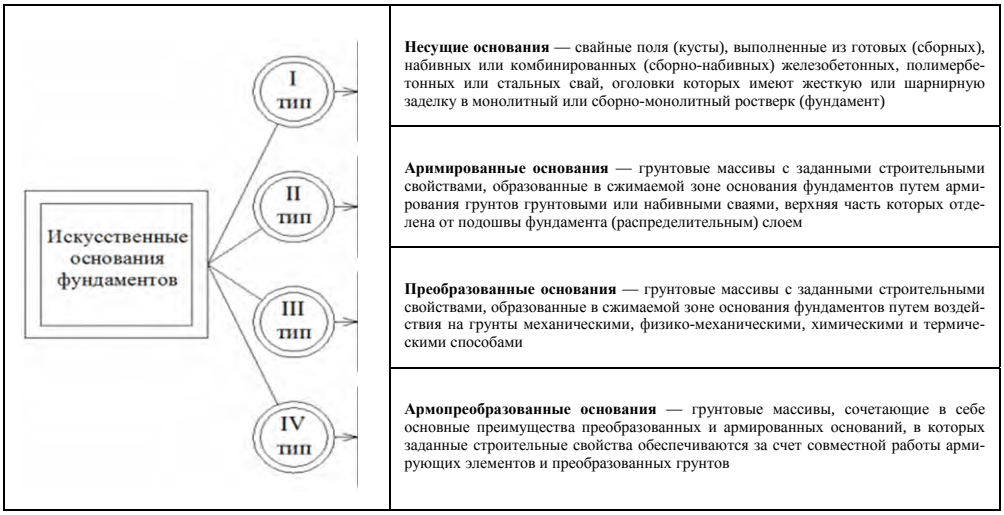


Рис. 1. Классификация искусственных оснований фундаментов

Важными преимуществами использования в строительном производстве только типовых видов искусственных оснований и способов их устройства являются:

облегчение проектирования систем основание — фундамент, организации и производства работ нулевого цикла;

значительный накопленный опыт применения типовых видов оснований проектными и строительными организациями;

промышленные предприятия для устройства типовых видов оснований предлагают большой выбор серийно выпускаемого технологического оборудования и специализированных установок;

налаженная система обучения и подготовки рабочих по эксплуатации технологического оборудования и установок для устройства типовых видов оснований;

практически полное нормативное обеспечение организации входного, пооперационного и приемочного контроля качества выполненных оснований;

достаточно полное представление заказчиков о надежности оснований фундаментов и технологии их устройства.

Рассмотрение в проектах вариантов из типовых оснований, с одной стороны, упрощает проектирование за счет практически 100 % нормативного обеспечения, а с другой — ограничивает возможность выбора оптимального варианта системы основание — фундамент.

Несмотря на большое разнообразие существующих видов искусственных оснований на практике применяются не более 15, а несколько сотен нетиповых видов оснований имеют крайне малые (не более 2 %) объемы применения. При этом из общего количества применяемых в строительном производстве типовых искусственных оснований на долю оснований, выполняемых из обычных забивных (рис. 2) и буронабивных свай, приходится не менее 94 %.

Рис. 2. Общий вид типового основания из забивных свай (в данном случае применены составные сваи сечением 45×45 см длиной 16 м)

Выбор оптимального варианта системы осуществляется по результатам геотехнического анализа [1]:

материалов инженерно-геологических изысканий;

нагрузок и воздействий на систему;

возможных вариантов устройства систем из типовых и нетиповых видов искусственных оснований;

влияния рассматриваемых вариантов систем на близко расположенные здания и сооружения, гидрогеологические условия и окружающую среду;

основных технико-экономических показателей возможных вариантов устройства систем.

В табл. приведены примеры фактического снижения расхода арматурной стали и бетона по некоторым из 134 выполненных объектов за счет замены [2, 3] типовых видов искусственных оснований на эффективные нетиповые, выполненные (рис. 3) из несущих набивных свай в раскатанных скважинах (НРС).

Наименование объекта	Вид фундамента, основания	Кол-во свай, шт.	Расход		Экономия	
			стали, т	бетона, $м^3$	стали, т	бетона, $м^3$
Цех обеспыливания клинкерного холодильника СМЛ-88	*Ростверк, буронабивные сваи d = 600 мм, L = 7 м	48	3,5	95	2,5	67
	Ростверк, НРС d = 250 мм, L = 4 м	144	1,0	28		
Механосборочный цех № 5 ПО «ЛТЗ»	*Столбчатый, на естественном основании	—	2,6	44	0,8	21
	Столбчатый, НРС d = 250 мм, L = 4 м	88	1,8	23		
10-этажный ж/д по ул. Индустриальной в г. Липецке	*Ростверк, забивные сваи С10-30, С12-30	127	15,2	114	12,8	58
	Ростверк, НРС d = 250 мм, L = 5 м	229	2,4	56		
5-секционный ж/д с магазином по ул. Коммунальная, в г. Липецке	*Ростверк, забивные сваи С6-30	1 100	36,8	594	36,8	366
	Ленточный, НРС d = 250 мм, L = 3 м	3 800	0	228		
15-этажный ж/д с пристройкой в г. Липецке	*Плита на естественном основании	—	30,8	1 082	12,6	496
	Ленточный, НРС d = 250 мм, L = 3 м	609	18,2	586		
Производственный корпус ПТП «Липецкгазэнергоремонт»	*Столбчатый, забивные сваи С10-30	242	19,3	218	18,0	147
	Столбчатый, НРС d = 250 мм, L = 3 м	484	1,3	71		
Ж/д со встроенными помещениями по ул. Коммунальной в г. Липецке	*Ростверк, буронабивные сваи d = =1200 мм, L = 10 м	78	31,0	882	24,1	756
	Ростверк, НРС d = 250 мм, L = 3 м	632	5,9	126		

* Типовое проектное решение устройства системы основание — фундамент.

Рис. 3. Общий вид искусственного основания из несущих НРС диаметром 25 см длиной 5 м

Проблемы проектирования и более широкого применения в строительном производстве нетиповых видов искусственных оснований и способов их устройства взаимосвязаны и являются следствием нескольких причин:

недостаточное нормативное обеспечение проектирования и устройства нетиповых видов оснований, а зачастую его полное отсутствие;

низкое качество материалов инженерно-геологических изысканий [4], не позволяющее проектировать нетиповые виды оснований с гарантированным обеспечением требований надежности, несущей способности и экономической эффективности;

недостаточная квалификация специалистов проектных и строительных организаций, требующая проведения их специального обучения особенностям проектирования нетиповых видов оснований и способам их устройства;

высокая стоимость специализированной техники и технологического оборудования для устройства нетиповых видов оснований, в том числе вызванная отсутствием ее серийного выпуска;

отсутствие материальной заинтересованности специалистов научно-исследовательских, проектных и строительных организаций в разработке и внедрении в строительное производство нетиповых видов искусственных оснований, так как доля от фактической прибыли, полученной за счет их применения, разработчикам практически не выделяется и нормативным законодательством не предусмотрена;

в большинстве случаев нетиповые виды искусственных оснований и способы их устройства разработаны за счет собственных средств авторов и не могут иметь достаточного распространения в массовом проектировании и производстве без целевого, прежде всего государственного финансирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Саурин А. Н., Корпач А. И.* О необходимости геотехнического сопровождения проектирования и строительства объектов // Вестник Центрального регионального отделения РААСН : сб. науч. ст. Вып. 9. Воронеж : ВГАСУ, 2010. С. 126—132.

2. *Саурин А. Н., Редькина Ю. В., Якушев В. И.* О замене забивных свай на набивные сваи в раскатанных скважинах // Труды междунар. науч.-технич. конф. «Проблемы механики грунтов и фундаментостроения в сложных грунтовых условиях. Свайные фундаменты. Экспериментально-теоретические исследования и практика проектирования». Уфа, 2006.

3. *Саурин А. Н., Жадановский Б. В., Багдасаров Ю. А.* Применение набивных свай в раскатанных скважинах на объектах гражданского строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2005. № 10.

4. *Саурин А. Н., Рябинкин Н. Ф., Редькина Ю. В.* Влияние качества инженерно-геологических изысканий на выбор оптимального варианта системы «основание — фундамент» // Инженерная геология. М., 2007.

1. *Saurin A. N., Korpach A. I.* O neobkhodimosti geotekhnicheskogo soprovozhdeniya proektirovaniya i stroitel'stva ob"ektov // Vestnik Tsentral'nogo regional'nogo otdeleniya RAASN : sb. nauch. st. Vyp. 9. Voronezh : VGASU, 2010. S. 126—132.

2. *Saurin A. N., Red'kina Yu. V., Yakushev V. I.* O zamene zabivnykh svay na nabivnye svai v raskatannykh skvazhinakh // Trudy mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. «Problemy mekhaniki gruntov i fundamentostroeniya v slozhnykh gruntovykh usloviyakh. Svaynye fundamenty. Eksperimental'no-teoreticheskie issledovaniya i praktika proektirovaniya». Ufa, 2006.

3. *Saurin A. N., Zhadanovskiy B. V., Bagdasarov Yu. A.* Primenenie nabivnykh svay v raskatannykh skvazhinakh na ob"ektakh grazhdanskogo stroitel'stva // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2005. № 10.

4. *Saurin A. N., Ryabinkin N. F., Red'kina Yu. V.* Vliyanie kachestva inzhenerno-geologicheskikh izyskaniy na vybor optimal'nogo varianta sistemy «osnovanie — fundament» // Inzhenernaya geologiya. M., 2007.

© Саурин А. Н., Корпач А. И., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Саурин А. Н., Корпач А. И. О некоторых проблемах применения в строительном производстве нетиповых видов искусственных оснований // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 284—288.

УДК 624.154.001.4

Г. И. Швецов, В. Н. Лебзак

ВЛИЯНИЕ ОСМОТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ НА ПРОЦЕСС СИНЕРЕЗИСА

Рассмотрены вопросы изменения осмотического давления в статически нагруженных лессовых грунтах. Проведен опыт изменения концентрации солей в двух различных точках.

К л ю ч е в ы е с л о в а: осмотическое давление, лессовые грунты, синерезис.

Issues of change of osmotic pressure in statically loaded loessial soils are considered in the present article. The experiment of change of salt concentration in two different points is carried out.

K e y w o r d s: osmotic pressure, loessial soil, weep.

Вопрос о сжимаемости грунтов представляет интерес в связи с осадкой сооружения в процессе строительства и эксплуатации. Стремление строителя сводится к сокращению значений деформации грунтового основания или полному ее исключению. Недопустимые деформации могут стать причиной ограничения нагрузки, передаваемой зданием на основание, что влечет за собой конструктивные мероприятия при проектировании наземной части.

Другие мероприятия со стороны проектировщиков сводятся или к улучшению грунтового основания (трамбование, химическое закрепление грунтов, замена грунтов и т. д.), или к применению таких конструкций фундаментов, которые позволят избежать недопустимых и неравномерных деформаций. При строительстве сооружения и на начальной стадии эксплуатации осадка, вызванная проектной нагрузкой на основание, вероятно, не будет превышать допустимых пределов, что обеспечивается существующими методами расчета оснований и фундаментов. В инженерном грунтоведении поведение грунтовой толщи под влиянием статической нагрузки (консолидация грунта) изучено не в полной мере. У исследователей нет четкого представления о процессах, протекающих в грунтах при деформациях, растянутых во времени.

При сжатии грунта происходит более плотная упаковка частиц, в то время как при его расширении расстояние между частицами и объем заключенных в нем пор должны в той или иной мере увеличиваться. Факторы, обусловливающие неизменное положение частиц в грунте относительно к его способности к сжатию, имеют первостепенное значение. Среди других сил, которые воздействуют на каждую изолированную частицу грунта, можно назвать следующие: силы, вызывающие тенденцию к дальнейшему уплотнению грунта и увеличению его объемного веса; силы, стремящиеся удержать частицы в занимаемом ими положении (к ним относятся реактивные силы и силы сопротивления трения, действующие в точках контактов частиц и препятствующие их перемещению).

Силы трения носят пассивный характер и оказывают сопротивление перемещению частиц лишь тогда, когда такое перемещение возникает при сжатии грунта и не может явиться причиной его расширения. Расширение в глинистых грунтах объясняется результатом проявления арочного эффекта. Этот эффект, как предполагают, объясняется некоторой способностью твердых

частиц к упругим деформациям. В тех случаях, когда контакты между частицами отсутствуют в грунтах с дисперсной структурой, существующее положение частиц поддерживается осмотическим давлением в поровой воде между пластиночками глинистых минералов.

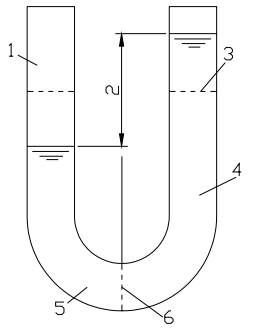
В специальной литературе [1, 2] отмечается возможность поддержания существующего расположения частиц сил молекулярного притяжения. Авторы, развивающие эту теорию, указывают, что при определенных условиях две частицы могут настолько сблизиться, что расстояние между молекулами этих частиц окажется не больше, чем расстояние между молекулами в самой частице. Можно предположить, что данное обстоятельство является причиной возникновения между частицами связи величиной того же порядка, как в кристаллической решетке твердого вещества. В настоящее время очевидно: чтобы привести две частицы в такое тесное соприкосновение, требуются очень большие силы. Поэтому молекулярное притяжение не оказывает влияния на существующее в грунте положение частиц.

Арочный эффект проявляется при наличии в толще грунта определенного количества твердых частиц, образующих подобие сводов, перекрывающих пространство между элементами твердого скелета. Под влиянием приложенной нагрузки частицы в сводах или арках подвергаются упругой деформации в большей степени, чем объемному перемещению. При уменьшении нагрузки деформированные частицы снова принимают свою первоначальную форму или выравниваются. При этом условии возникает расширение грунта. Очевидно, что арочный эффект возможен лишь при наличии в грунте многочисленных контактов между твердыми частицами. Кроме того, данная теория объясняет поведение тонкозернистых грунтов с хлопьевидной структурой.

Арочный эффект не наблюдается в жирных глинистых грунтах с дисперсной структурой при полном отсутствии взаимного контакта твердых частиц. Очевидно, что арочный эффект объясняет причины различной сжимаемости глин с обменными ионами и различной концентрации солевых растворов. Однако для объяснения всех этих явлений в глинистых грунтах с дисперсной структурой может быть использована теория осмотического давления.

Если концентрация солей в растворе в двух его точках различна, то возникает тенденция перемещения вследствие диффузии менее насыщенной жидкости в зону повышенной концентрации. Как правило, в результате такого перемещения концентрации в обеих точках быстро выравниваются. Если же различие концентрации солей тем или иным путем поддерживается, то это обстоятельство порождает ряд особых явлений.

Классический опыт с демонстрацией явления осмоса проведен в U-образной трубке (рис.), в которой для разделения ее колен располагается полупроницаемая мембрана. Заполним одно колено по одну сторону мембраны раствором солей, а другое — чистой водой. В данном случае чистая вода пройдет через мембрану и дополнит раствор в правом колене. Движению раствора в другое колено препятствует мембрана. Такое одностороннее движение жидкости становится очевидным по отчетливому снижению уровня чистой воды в левом колене и подъему уровня раствора в правом. Разница концентрации создается в приборе искусственно и после этого поддерживается в нем мембраной. Такое положение может быть и в грунтах при условиях, которые будут рассмотрены ниже.



Осмос: *1* — U-образная трубка; *2* — напор, вызываемый осмотическим давлением; *3* — первоначальный уровень; *4* — солевой раствор; *5* — чистая вода; *6* — полупроницаемая мембрана

Вследствие неоднородности и прерывистости кристаллической структуры частицы, как правило, несут на своей поверхности отрицательный электрический заряд. Будучи вовлеченным в процесс адсорбции, этот заряд становится причиной притяжения к поверхности частицы некоторого числа положительно заряженных атомов (ионов) элементов, диссоциированных в поровой воде, окружающей частицу. Для обеспечения электрического равновесия некоторое определенное количество зарядов (как следствие наличия здесь ионов) всегда должно находиться вблизи рассматриваемой частицы глины.

Вместе с тем, каждый из этих ионов, взятый в отдельности, может меняться местами с другими ионами. В этих случаях, когда поровая вода, за исключением обменных ионов, относительно свободна от растворенных в ней веществ, концентрация ионов обычно заметно уменьшается с увеличением расстояния рассматриваемой точки от поверхности частицы. В подобных условиях возникает сильная тенденция к перемещению в процессе диффузии менее насыщенной воды в больших порах в зоны повышенной концентрации в ближайшем окружении частиц. Такое перемещение приводит к выравниванию содержания растворенного вещества в рассматриваемой системе.

В противовес данной тенденции вблизи поверхности частиц электрическими силами поддерживается местная повышенная концентрация жидкости. Перечисленные условия благоприятствуют проявлению процесса осмоса. Как осмотические, так и другие явления, связанные с наличием в системе обменных ионов, представляют практический интерес.

Для более детального изучения вышеописанного процесса был произведен химический анализ водной вытяжки глинистых грунтов, который показал следующие результаты:

водородный показатель в нагруженной зоне для супеси 7,22 ± 0,41;
водородный показатель в ненагруженной зоне для супеси 7,38 ± 0,42;
водородный показатель в нагруженной зоне для суглинка 7,74 ± 0,44;
водородный показатель в ненагруженной зоне для суглинка 7,89 ± 0,45;
ион кальция в нагруженной зоне для супеси 20,4 ± 1,02;
ион кальция в ненагруженной зоне для супеси 14,2 ± 0,71;
ион кальция в нагруженной зоне для суглинка 24,0 ± 1,20;
ион кальция в ненагруженной зоне для суглинка 22,8 ± 1,14;

ион натрия в нагруженной зоне для супеси 21,0 ± 3,1;
ион натрия в ненагруженной зоне для супеси 26,0 ± 3,9;
ион натрия в нагруженной зоне для суглинка 24,0 ± 3,6;
ион натрия в ненагруженной зоне для суглинка 30,0 ± 4,5.

Для оценки величины осмотического давления, при помощи которого может быть выявлена зависимость осмотического давления от наиболее важных влияющих на него переменных, согласно [1, 2] используется формула

$$P_o = RT(C_d - C_o), \quad (1)$$

где P_o — осмотическое давление между двумя параллельными пластинками; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура; C_d — концентрация обменных ионов в срединной точке между двумя пластинками; C_o — концентрация ионов в воде, заполняющей большие поры за пределами двух рассматриваемых пластинок.

На величину C_d влияет большое количество условий, свойственных данной системе:

$$C_d = \frac{\pi^2}{\nu^2 \beta \left(d + k'\right)^2}, \quad (2)$$

где ν — показатель, определяющий вид и валентность обменных ионов; β — коэффициент, постоянный для всех глин; d — половина расстояния между частицами; k' — некоторая величина, зависящая от минералогического состава грунта (для монтмориллонита $k' = 1…4$).

Становится очевидным, что для заданной системы величина C_d и величина осмотического давления обратно пропорциональны квадрату расстояния между пластинками. При постоянной величине этого расстояния осмотическое давление является функцией концентрации ионов в окружающей частицы воде, а также некоторых свойств самой глины. Для глинистых минералов основными изменяющимися свойствами являются вид и валентность обменных ионов. Теория и опыт свидетельствуют о том, что при заданном расстоянии между частицами более высокое осмотическое давление развивается в глинах с обменными ионами, характеризующимися низкой валентностью, с ионами Na. При более высокой валентности, например при ионах Ca, осмотическое давление слабее.

При приложении рассмотренной выше теории к процессу компрессии грунтов предполагается, что равновесное состояние в грунте при заданной нагрузке достигается в том случае, когда внешняя нагрузка оказывается приблизительно равной осмотическому давлению в воде в пространстве между прилегающими друг к другу частицами.

Таким образом, в натриевых глинах равновесное состояние при заданной нагрузке соответствует грунту с высокой пористостью (с большими расстояниями между частицами). Однако при сниженном осмотическом давлении глина может оказаться сильно сжимаемой.

Согласно проведенному эксперименту, при статической нагрузке 0,25…0,3 МПа наблюдается следующее:

концентрация ионов натрия в зоне, подвергшейся техногенным воздействиям, уменьшилась на 20 % по сравнению с зоной, не подвергшейся нагрузкам;

концентрация ионов кальция в зоне, подвергшейся техногенным воздействиям, увеличилась на 30 % по сравнению с зоной, не подвергшейся техногенным воздействиям;

водородный показатель pH в зоне, подвергшейся техногенным воздействиям, уменьшился на 2 % по сравнению с зоной, не подвергшейся нагрузкам.

Таким образом, под влиянием длительного техногенного воздействия (давление от фундамента) в массиве грунта наблюдается перемещение ионов кальция из ненагруженной в нагруженную зону и перемещение ионов натрия из нагруженной в ненагруженную зону. В результате между частицами исследуемых пылевато-глинистых грунтов в нагруженной зоне возникает кристаллизационная связь с удалением ионов натрия и привнесением ионов кальция за счет осмотического давления и, как следствие, наблюдается уменьшение электропроводности и, соответственно, водородного показателя pH. Миграция ионов натрия и кальция приводит к увеличению прочности индивидуальных контактов между частицами и в совокупности удельного сцепления грунта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bolt G. H.* Physico-Chemical Properties of the Electric Double Layer on Planar Surfaces. Cornell University, 1954.

2. *Hough B. K.* Basig soils engineering. 1966.

1. *Bolt G. H.* Physico-Chemical Properties of the Electric Double Layer on Planar Surfaces. Cornell University, 1954.

2. *Hough B. K.* Basig soils engineering. 1966.

© *Г. И. Швецов, В. Н. Лебзак,* 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Швецов Г. И., Лебзак В. Н. Влияние осмотического давления на процесс синерезиса // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 289—293.

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

УДК 539.3

В. И. Андреев, А. В. Матвеева, Е. В. Барменкова

РАСЧЕТ ДВУХСЛОЙНОЙ БАЛКИ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ПОСТЕЛИ

Приводится расчет моделей двухслойной и однослойной балок на упругом основании с переменным коэффициентом постели. Двухслойная балка является балкой переменной по длине жесткости, нижний слой которой моделирует фундамент, а верхний — надфундаментную конструкцию, при этом учитывается собственный вес каждого слоя. Расчеты приводятся с учетом наращивания надфундаментной конструкции.

К л ю ч е в ы е с л о в а: теория упругости, многослойные конструкции, балка на упругом основании, совместный расчет здания, фундамента и основания, модели основания.

Calculations of the model of double- and single-layer beam on elastic foundation with variable coefficient of soil reaction are given in the article. Double-layer beam is a beam with variable rigidity in its length, whose bottom layer shapes the foundation, and the upper layer is an overfoundation construction, but the weight of each layer is taken into account. Calculations are given in the context of growth of overfoundation construction.

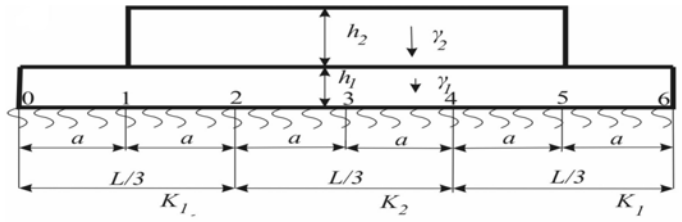
K e y w o r d s: theory of elasticity, multilayer construction, beam on elastic foundation, joint calculation of a building, foundation and base, models of base.

Рассматриваемая задача имеет отношение к расчету фундаментных плит, нагруженных весом конструкции и контактирующих с основанием. В работе рассматривается плоская задача, когда фундаментная плита и конструкция представляют собой балки единичной ширины, деформирующиеся совместно, что, по сути, соответствует задаче изгиба двухслойной балки на упругом основании.

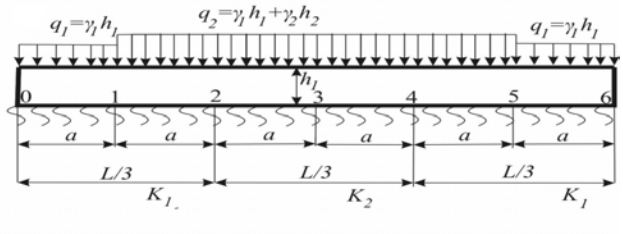
В традиционной постановке рассматривается однослойная балка, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой, при этом вес конструкции и вес самой плиты приводятся к верхней грани (рис. 1, *б, г*). В данной работе приводится расчет двухслойной балки, нижний слой которой (h_1, E_1) моделирует фундамент, а верхний (h_2, E_2) — конструкцию, при этом учитывается собственный вес каждого слоя (γ_1, γ_2) (рис. 1, *а, в*). Характеристики верхнего слоя являются переменными по длине балки величинами.

Рассмотрим изгиб двухслойной балки с переменным по длине поперечным сечением, свободно лежащей на упругом Винклеровском основании, со следующими характеристиками: L = 30 м, b = 1 м; h_1 = 1 м, $E_1 = 10^7$ кПа, γ_1 = 25 кН/м^3; при $x\in(0,5)$м и при $x\in(25,30)$м h_2 = 0, E_2 = 0, γ_2 = 0; при $x\in(5,25)$м h_2 = 0, 3, 6, 9, 12 м, $E_2 = 10^6$ кПа, γ_2 = 2,5 кН/м^3; при $x\in(0,10)$м и $x\in(20,30)$м K_1 = 50000 кН/м^3, $x\in(10,20)$м K_2 =0,5K_1 (рис. 1, *а*). Для сравнения рассматривается вариант, когда по всей длине контакта $x\in(0,30)$м K_1 = const= = 50 000 кН/м^3 (рис. 1, *в*).

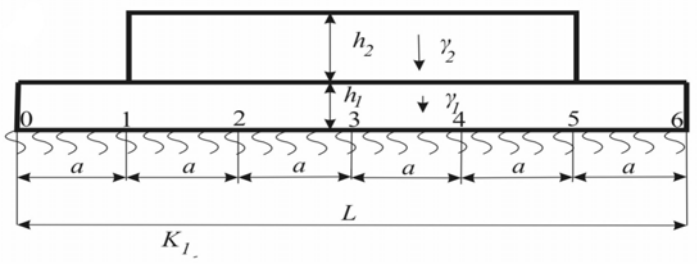
Решение задачи получено с помощью метода начальных параметров [1]. Разобьем длину балки на 6 участков равной длины a = 5 м. Вследствие симметрии неизвестными будут только четыре значения погонных интенсивностей реакций в точках 0, 1, 2 и 3 ($p_0 = p_6$, $p_1 = p_5$, $p_2 = p_4$, p_3). Методика расчета двухслойной балки переменной по длине жесткости на упругом основании изложена в [2], при этом в данной статье учитывается изменение коэффициента жесткости основания. Приведенная изгибная жесткость двухслойной балки определяется по формуле, приведенной в [3]. Изменение жесткости по длине каждого участка предполагается постоянным, т. е. рассматривается балка кусочно-постоянной жесткости. После определения погонных интенсивностей реакций находятся внутренние усилия согласно формулам, приведенным в [1].



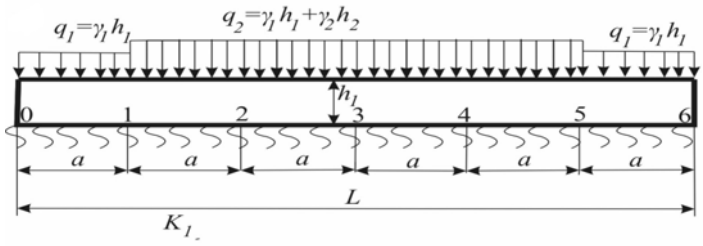
а



б



в



г

Рис. 1. Расчетные схемы изгиба двухслойной (*а*, *в*) и однослойной (*б*, *г*) балок на упругом основании с переменным (*а*, *б*) и постоянным (*в*, *г*) коэффициентом постели

Также рассмотрим исходную задачу в традиционной постановке, то есть решим задачу изгиба однослойной балки с постоянным по длине поперечным сечением, свободно лежащей на упругом Винклеровском основании, с характеристиками, приведенными выше, за одним исключением. На участке $x \in (5,25)$м модуль упругости верхнего слоя не задается, поскольку он в данной расчетной схеме отсутствует (рис. 1, *б*). Так же, как и в двухслойной балке рассматривается случай, когда при $x \in (0,30)$м K_1 = const = 50 000 кН/м^3 (рис. 1, *г*). Задача в такой постановке решается аналогично предыдущей, только изгибная жесткость балки является постоянной по всей длине.

С целью сравнения результатов расчетов изгиба двухслойной и однослойной балок на упругом основании с переменным и постоянным коэффициентами постели в табл. приведены значения максимальных изгибающих моментов и поперечных сил, а также максимальные значения вертикальных перемещений.

Расчетная схема	Коэффициент жесткости упругого основания, кН/м^3	Максимальное значение вертикальных перемещений, см	Максимальное значение изгибающих моментов, кНм	Максимальное значение поперечных сил, кН
Однослойная балка (традиционная постановка задачи)	Постоянный	0,114	10,5	22,1
	Переменный	0,235	32,2	23,6
Двухслойная балка (совместный расчет)	Постоянный	0,119	1368,9	160
	Переменный	0,139	2015,6	218,5

На рис. 2 представлены эпюры нормальных (σ_x) и касательных (τ_{xy}) напряжений (цифры на рис. соответствуют: *1* — h_2 = 0 м; *2* — h_2 = 3 м; *3* — h_2 =6 м; *4* — h_2 = 9 м; *5* — h_2 = 12 м). Напряжения определяются, используя полученные значения внутренних усилий, согласно формулам, приведенным в [3].

На основании выполненных расчетов отметим следующие отличия в результатах между постановками задачи (традиционная постановка задачи — однослойная балка и совместный расчет — двухслойная балка с переменным и постоянным коэффициентами постели).

При сравнении результатов расчетов балок, как двухслойных, так и однослойных, значения внутренних усилий и напряжений больше с переменным коэффициентом жесткости упругого основания, чем с постоянным коэффициентом. При сравнении же двухслойных и однослойных балок с одинаковыми характеристиками основания значения внутренних усилий, возникающих в двухслойных балках, существенно больше. При этом касательные напряжения, несмотря на увеличение внутренних усилий в двухслойных балках по сравнению с напряжениями в однослойных балках, уменьшаются, поскольку поперечные сечения двухслойных балок существенно увеличиваются.

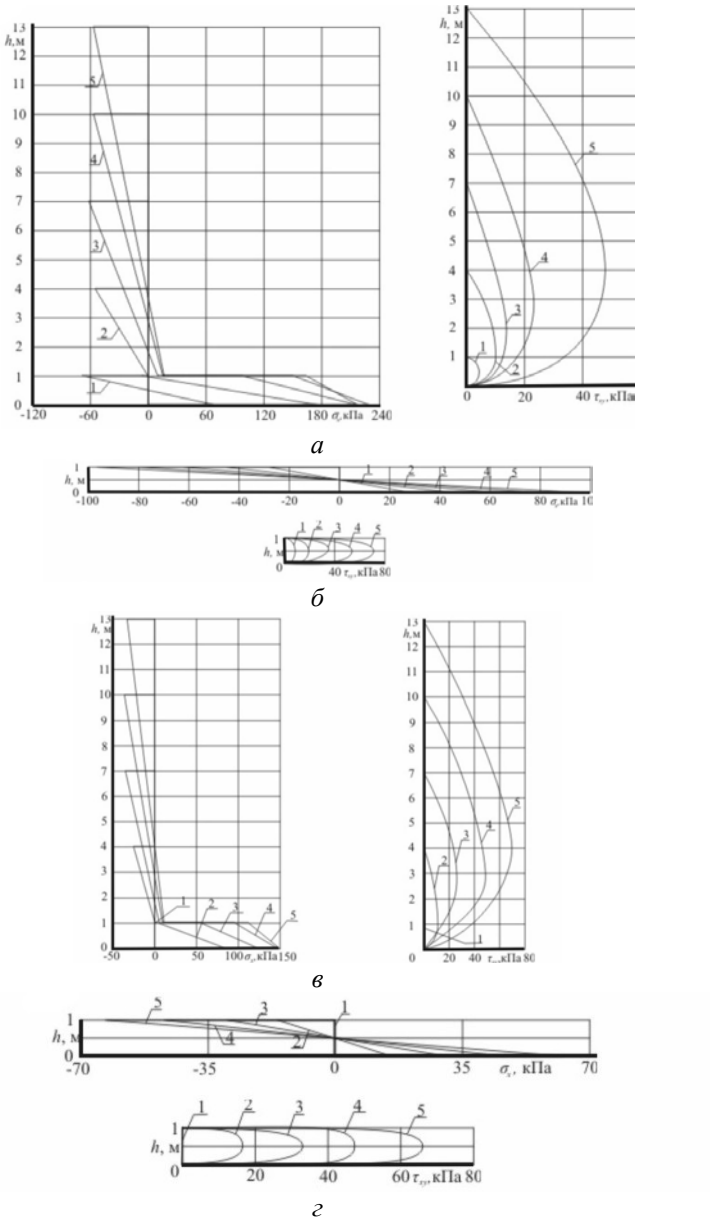


Рис. 2. Эпюры нормальных (σ_x) и касательных (τ_{xy}) напряжений, возникающих в двухслойных (*а*, *в*) и однослойных (*б*, *г*) балках на упругом основании с переменным (*а*, *б*) и постоянным (*в*, *г*) коэффициентом постели

Таким образом, для получения более достоверного прогноза НДС системы здание — фундамент на упругом основании целесообразно проводить расчеты с использованием контактной модели в виде двухслойной балки на упругом основании Винклеровского типа с переменным коэффициентом постели, которая позволяет учесть такие факторы, как изменение жесткости основания и учет жесткости надфундаментной конструкции, а формулы для напряжений, приведенные в [3], могут служить основанием для определения напряженно-деформированного состояния системы здание — фундамент.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Клепиков С. Н.* Расчет конструкций на упругом основании. Киев : Будівельник, 1967. 184 с.

2. *Барменкова Е. В.*, *Андреев В. И.* Изгиб двухслойной балки на упругом основании с учетом изменения жесткости балки по длине // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. Volume 7, Issue 3. P. 50 — 54.

3. *Андреев В. И.*, *Барменкова Е. В.* Изгиб двухслойной балки на упругом основании с учетом массовых сил // XVIII Polish-Russian-Slovak Seminar «Theoretical Foundation of Civil Engineering». Warszawa, 2009. P. 51—56.

1. *Klepikov S. N.* Raschet konstruktsiy na uprugom osnovanii. Kiev : Budivel'nik, 1967. 184 s.

2. *Barmenkova E. V.*, *Andreev V. I.* Izgib dvukhsloynoy balki na uprugom osnovanii s uchetom izmeneniya zhestkosti balki po dline // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2011. Volume 7, Issue 3. P. 50 — 54.

3. *Andreev V. I.*, *Barmenkova E. V.* Izgib dvukhsloynoy balki na uprugom osnovanii s uchetom massovykh sil // XVIII Polish-Russian-Slovak Seminar «Theoretical Foundation of Civil Engineering». Warszawa, 2009. P. 51—56.

© Андреев В. И., Матвеева А. В., Барменкова Е. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Андреев В. И., Матвеева А. В., Барменкова Е. В. Расчет двухслойной балки на упругом основании с переменным коэффициентом постели // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки . С. 294—298.

УДК 624 ББК 34.41

Р. О. Бакиров

РАЗВИТИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА И ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В статье рассматриваются методы расчета динамики и оптимального дизайна железобетонных конструкций подземных сооружений.

К л ю ч е в ы е с л о в а: расчет динамики, подземные сооружения, оптимальный дизайн, волна сжатия.

The article looks at the methods of dynamic calculations and optimum design of ferroconcrete constructions of subterranean facilities.

K e y w o r d s: dynamic calculations, subterranean facilities, optimum design, compression.

В статье рассматриваются методы динамического расчета и оптимального проектирования железобетонных конструкций подземных сооружений.

За последние 10 лет в этой области автором опубликовано большое число работ. Сошлемся лишь на основные из них [1—9]. В книге [8] освещены разработанные автором методы динамического расчета конструкций подземных сооружений при воздействии волн сжатия и автоматизированные методы оптимального проектирования железобетонных конструкций минимальной стоимости при совместном действии статических нагрузок и динамических воздействий волн сжатия от мощных взрывов. В первой главе книги рассматриваются методы определения статических нагрузок и особенности определения динамических нагрузок от взрывных волн, распространяющихся в массиве породы.

Во второй главе пособия изложен динамический расчет кольцевой обделки без учета и с учетом податливости преграды. В результате проведенного исследования собственных колебаний получена аналитическая зависимость для определения частот собственных колебаний конструкции с учетом присоединенной массы грунта. В результате исследования вынужденных колебаний при принятых закономерностях изменений динамической нагрузки во времени по периметру конструкции выведены расчетные формулы, определяющие динамические перемещения и внутренние усилия в различных сечениях обделки. В этой же главе пособия разработан метод динамического расчета кольцевой обделки с учетом податливости преграды. Показано, что при действии на конструкцию волн сжатия большой длительности и постепенном нарастании нагрузки обделки можно рассчитывать как систему с одной степенью свободы на квазистатические нагрузки. Приведены закономерности распределения эквивалентных нагрузок по периметру кольца, получены расчетные формулы для определения внутренних усилий.

Третья глава пособия посвящена расчету обделок в виде замкнутых рам, обделок так называемого практического очертания. Разработаны методы расчета одноэтажных и двухэтажных обделок на произвольные статические нагрузки, исследованы их собственные колебания, составлены таблицы для оп-

ределения частот собственных колебаний при различных возможных размерах конструкции и характеристиках грунтовой среды; разработан метод прямого динамического расчета конструкции на действие волны сжатия, достоверность которого продемонстрирована графиками изменения внутренних усилий и кинематических параметров во времени. Все перечисленные методы расчета реализованы на ПК в виде стандартных программ, с использованием которых проведены численные эксперименты. Особый интерес представляет глава пособия, в которой разработаны матричные методы расчета одноэтажной обделки практического очертания с учетом различного сочетания изгибных, продольных и поперечных деформаций: математические формулировки задач, алгоритмы и указания по использованию программ, с помощью которых проведены численные эксперименты по статическому расчету, исследованию собственных и вынужденных колебаний.

В пятой главе пособия [8] впервые разработан метод расчета обделки произвольного очертания на основе метода конечных элементов с учетом воздействия волн сжатия. Приведена математическая формулировка задач по статическому и динамическому расчету, а также по расчету конструкции на совместное действие статических и динамических нагрузок. Последняя глава рассматриваемого пособия посвящена разработке полностью автоматизированного метода оптимального проектирования железобетонной конструкции на примере обделки кругового очертания с учетом совместного действия статических нагрузок и эквивалентных нагрузок от волны сжатия. В таком подробном изложении этот метод публикуется впервые. Аналогов в открытой печати не имеется. Приведены постановка и математическая формулировка задачи, перечень исходных данных и выходных результатов, подробный алгоритм и характеристика компьютерной программы. Приведен пример использования названной программы, с помощью которой получены параметры оптимальной по стоимости конструкции. В этой же главе приведена также математическая формулировка комбинированного метода оптимального проектирования обделки подземного сооружения практического очертания. При этом осуществлено комбинированное использование эвристического метода и метода конечных элементов.

В рассматриваемом издании [8], сравнительно небольшом по объему, приведены разработанные автором методы статического и динамического расчета, а также автоматизированного проектирования железобетонных обделок различного очертания по критерию минимальной стоимости. Для всех методов расчета и проектирования приведены математические формулировки, алгоритмы решения задач и результаты численных экспериментов с применением ПК, что позволяет, при необходимости, составить программы для современных вычислительных машин на любых алгоритмических языках. В этой связи рассматриваемая книга полезна для научных работников, интересующихся проблемой автоматизированного расчета и проектирования бетонных и железобетонных конструкций подземных сооружений с применением ПК. Отдельные из указанных методов расчета и проектирования включены в учебник [10] под редакцией академика РААСН В. М. Бондаренко.

Можно утверждать, что в настоящее время разработаны достаточно теоретически обоснованные методы исследования собственных и вынужденных колебаний обделок подземных сооружений различного очертания в матрич-

ной формулировке. В ближайшей перспективе предполагается проведение модельных экспериментов в различных грунтовых средах, в том числе и в крепких горных породах, моделируемых с использованием быстротвердеющих цементно-грунтовых смесей, подобранных по составу на специально поставленных экспериментах. Статью [9] можно рассматривать как теоретическую подготовку к этим экспериментам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бондаренко В. М, Бакиров Р. О.* Расчет податливых железобетонных конструкций подземных сооружений кругового очертания на действие динамических нагрузок // Промышленное и гражданское строительство. 2000. № 3.

2. *Бакиров Р. О.* Матричный метод статического расчета обделки практического очертания на ЭВМ // Вестник ОСН РААСН. 1999. № 2.

3. *Бакиров Р. О.* Собственные колебания обделки практического очертания с учетом влияния M N, P на деформации элементов конструкций : материалы Междунар. науч.-практ. конф. Ростов н/Д, 2000.

4. *Бакиров Р. О., Лой Ф. В.* Машинные методы расчета проектирования обделки подземных сооружений практического очертания. Ч. 2. Расчет конструкций на произвольную динамическую нагрузку. М., 1979.

5. *Бакиров Р. О.* Собственные колебания подземных конструкций кругового очертания // Промышленное и гражданское строительство. 1996. № 9.

6. *Бакиров Р. О.* Матричный метод динамического расчета замкнутой обделки практического очертания с учетом взаимодействия волн сжатия с действующей преградой // Известия вузов. Строительство. 2000. № 9. С. 121—127.

7. *Бакиров Р. О.* Оптимальное проектирование железобетонных обделок минимальной стоимости при действии сочетания статических и динамических нагрузок // Новые энергосберегающие архитектурно-конструктивные решения жилых и общественных зданий. Орел, 2003. С. 150—154.

8. *Бакиров Р. О., Лой Ф. В.* Динамический расчет и оптимальное проектирование подземных сооружений. М., 2002.

9. *Бакиров Р. О., Тарасов Д. А.* Модельные экспериментальные исследования обделок подземных сооружений // Бетон и железобетон в третьем тысячелетии. Геленджик, 2004.

10. Железобетонные и каменнные конструкции. / В. М. Бондаренко, Р. О. Бакиров, В. Г. Назаренко, В. И. Римшин. М., 2002.

1. *Bondarenko V. M, Bakirov R. O.* Raschet podatlivykh zhelezobetonnykh konstruktsiy podzemnykh sooruzheniy krugovogo ochertaniya na deystvie dinamicheskikh nagruzok // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2000. № 3.

2. *Bakirov R. O.* Matrichnyy metod staticheskogo rascheta obdelki prakticheskogo ochertaniya na EVM // Vestnik OSN RAASN. 1999. № 2.

3. *Bakirov P. O.* Sobstvennye kolebaniya obdelki prakticheskogo ochertaniya s uchetom vliyaniya M N, P na deformatsii elementov konstruktsiy : materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Rostov n/D, 2000.

4. *Bakirov P. O., Loy F. V.* Mashinnye metody rascheta proektirovaniya obdelki podzemnykh sooruzheniy prakticheskogo ochertaniya. Ch. 2. Raschet konstruktsiy na proizvol'nuyu dinamicheskuyu nagruzku. M., 1979.

5. *Bakirov R. O.* Sobstvennye kolebaniya podzemnykh konstruktsiy krugovogo ochertaniya // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 1996. № 9.

6. *Bakirov R. O.* Matrichnyy metod dinamicheskogo rascheta zamknutoy obdelki prakticheskogo ochertaniya s uchetom vzaimodeystviya voln szhatiya s deystvuyushchey pregradoy // Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo. 2000. № 9. S. 121—127.

7. *Bakirov P. O.* Optimal'noe proektirovanie zhelezobetonnykh obdelok minimal'noy stoimosti pri deystvii sochetaniya staticheskikh i dinamicheskikh nagruzok // Novye energosberegayushchie arkhitekturno-konstruktivnye resheniya zhilykh i obshchestvennykh zdaniy. Orel, 2003. S. 150—154.

8. *Bakirov P. O., Loy F. V.* Dinamicheskiy raschet i optimal'noe proektirovanie podzemnykh sooruzheniy. M., 2002.

9. *Bakirov P. O., Tarasov D. A.* Model'nye eksperimental'nye issledovaniya obdelok podzemnykh sooruzheniy // Beton i zhelezobeton v tret'em tysyacheletii. Gelendzhik, 2004.

10. Zhelezobetonnye i kamennnye konstruktsii. / V. M. Bondarenko, R. O. Bakirov, V. G. Nazarenko, V. I. Rimshin. M., 2002.

© *Бакиров Р. О., 2013*

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Бакиров Р. О. Развитие теоретических и экспериментальных методов динамического расчета и оптимального проектирования железобетонных конструкций подземных сооружений // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки . С. 299—302.

УДК 642.074.4.042.7

В. А. Гордон, Э. А. Кравцова

ПЕРЕРАСПРЕДЕЛЕНИЕ НОРМАЛЬНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПО ВЫСОТЕ СЕЧЕНИЯ БАЛКИ ПРИ РАЗНОУРОВНЕВОМ РАССЛОЕНИИ*

Рассматривается трансформация напряженно-деформированного состояния, инициируемая квазистатическим расслоением (трещинообразованием) статически неопределимой двухопорной балки, нагруженной распределенной нагрузкой заданной интенсивности. Расслоение образуется в результате прогрессирующего разрыва сдвиговых связей между слоями. Исследуется величина наибольших растягивающих и сжимающих напряжений в зависимости от уровня продольного расслоения.

Кл ю ч е в ы е с л о в а: составной стержень, конструктивно нелинейные системы, связи сдвига, деградация связей сдвига, расслоение, трещинообразование, напряжение, деформация.

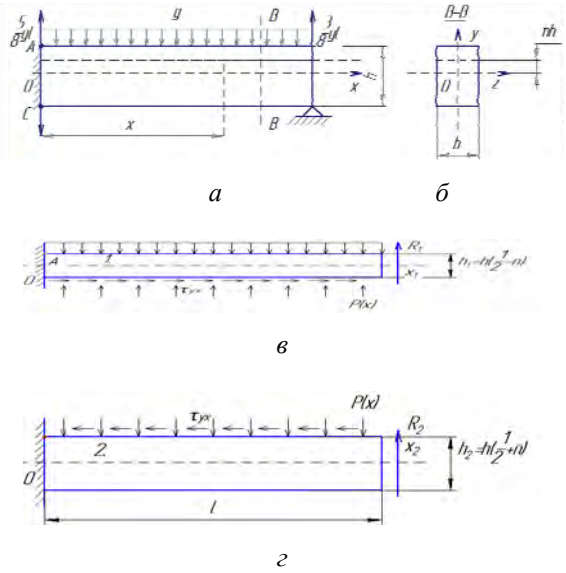
The authors consider the transformation of stress-strain state when triggered by a quasi-static segregation (cracking) of statically indeterminate double-seat beam loaded with distributed load of given intensity. Segregation is formed as the result of progressive rupture of the shear connections between layers. Magnitude of the largest tensile and compressive stresses depending on the level of the longitudinal segregation is studied.

K e y w o r d s: compound rod, structurally nonlinear systems, shear connection, degradation of shear connections, segregation, crack formation, stress, strain.

В настоящей работе изучается напряженно-деформированное состояние составного (по А. Р. Ржаницыну) стержня, две части которого определенным образом соединены достаточно жестко, чтобы считать стержень цельным при расчете на рабочие нагрузки. Предполагается, что при изгибе в нагруженном стержне возник дефект в виде продольного расслоения по определенной поверхности, параллельной среднему слою. Под продольным расслоением подразумевается разрушение связей сдвига при сохранении жестких поперечных связей между частями стержня. Для цельного стержня и его частей после образования дефекта считаются справедливыми гипотезы и допущения механической теории стержней Эйлера — Бернулли. Напряженное состояние каждой части считается известным, если определены значения изгибающих моментов, нормальных и перерезывающих сил в поперечных сечениях стержней.

Ниже рассматривается балка, жестко заделанная одним концом и шарнирно опертая другим, нагруженная равномерно распределенной нагрузкой интенсивности q, расслоившаяся по слою, параллельному нейтральному и отстоящему от него на расстоянии nh, где h — высота прямоугольного поперечного сечения цельной балки; n — параметр, характеризующий положение плоскости раздела частей балки $\left(-\frac{1}{2} \le n \le \frac{1}{2}\right)$. На рис. 1 интенсивность распределенной контактной нагрузки между частями балки, обусловленной поперечными связями между частями, обозначена $p = p(x)$.

* Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 12-08-97587/12.



а *б*

в

г

Рис. 1. Нагрузки, действующие на балку и ее части: *а* — цельная балка; *б* — поперечное сечение *B*—*B*; *в* — верхняя часть; *г* — нижняя часть

Предполагается, что связи, соединяющие образующиеся части балки, равномерно распределены вдоль балки, а касательные напряжения τ_{xy}, возникающие в произвольных слоях, распределены равномерно по ширине сечения

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = \frac{Q(x)}{2I_z}\left(\frac{h^2}{4} - y_1^2\right), \qquad (1)$$

где $Q(x) = q\left(\frac{5}{8}l - x\right)$ — перерезывающая сила в сечении x, $I_z = \frac{bh^3}{12}$ — осевой момент инерции сечения, $y_1 = nh$ — расстояние расслоения от срединного слоя.

Разрушение связей сдвига в расслоении означает исчезновение из расчетной схемы (см. рис. 1) касательных напряжений $\tau_{xy}(x, y_1) = \tau_{yx}(x, y_1)$ при сохранении остальных нагрузок на каждую из частей.

Для описания напряженно-деформированного состояния каждой части до образования дефекта рассмотрим их равновесие при действии на них заданных усилий, включая опорные реакции и усилия, действующие со стороны прилегающей части.

Статическое равновесие верхней части балки 1 имеет место при действии на нее распределенной нагрузки интенсивности q, продольной силы $N(x)$, моментов $M_1(x)$ и $M_p(x)$, действующих со стороны нижней части 2, и части опорной реакции R_1.

$$N(x) = b\int_x^l \tau_{yx}\, d\xi = \frac{3}{4}\frac{q\left(4n^2 - 1\right)}{h}\left[\frac{9}{64}l^2 - \left(\frac{5}{8}l - x\right)^2\right];$$

$$M_1(x) = N(x)\frac{h_1}{2} = N(x)\frac{h}{2}\left(\frac{1}{2} - n\right);$$

$M_p(x) = \int_x^l (\xi - x)p(\xi)d\xi$ — момент, создаваемый контактной нагрузкой $p(x)$;

$$R_1 = -b\int_{nh}^{h/2} \tau_{xy}dy_1 = \frac{3}{16}ql(4n_3 - 3n + 1).$$

На нижнюю часть 2 действуют следующие нагрузки: часть опорной реакции R_2, продольная сила $N(x)$, моменты $M_2(x)$ и $M_p(x)$.

$$R_2 = -b\int_{nh}^{h/2} \tau_{xy}dy_1 = \frac{3}{16}ql(-4n_3 + 3n + 1);$$

$$M_2(x) = N(x)\frac{h_2}{2} = N(x)\frac{h}{2}\left(\frac{1}{2} + n\right);$$

(заметим, что $R_1 + R_2 = \frac{3}{8}ql$ — реакция в правой опоре).

Тогда изгибающие моменты μ_i (i=1, 2) в сечении x соответствующей части балки определяются следующими выражениями

$$\mu_1(x) = \frac{q(l-x)^2}{2} - N(x)\frac{h}{2}\left(\frac{1}{2} - n\right) - M_p(x) - R_1(l-x); \quad (2)$$

$$\mu_1(x) = M_2(x) - N(x)\frac{h}{2}\left(\frac{1}{2} + n\right) - R_2(l-x). \quad (3)$$

Принимая допущение о недеформируемости поперечных связей, получаем условие

$$w_1 = w_2 = w_0, \quad (4)$$

где $w_i = w_i(x), (i = 0, 1, 2)$ — прогиб соответственно цельной балки, 1-й и 2-й частей под действием соответствующих нагрузок.

Уравнения равновесия балок 1 и 2 имеют вид

$$\frac{d^2w_i}{dx^2} = \frac{\mu_i(x)}{EI_i}, (i = 1, 2), \quad (5)$$

где I_1 и I_2 — осевые моменты инерции;

$$I_1 = \frac{bh_1^3}{12} = \frac{bh_1^3}{12}\left(\frac{1}{2} - n\right)^3,$$

$$I_2 = \frac{bh_2^3}{12} = \frac{bh^3}{12}\left(\frac{1}{2} + n\right)^3.$$

Учитывая условие (4), из уравнений (5) получим формулу для вычисления момента M_p:

$$M_p(x)=\frac{I_1I_2}{I_1+I_2}=\left\{\frac{1}{I_1}\frac{q(l-x)^2}{2}+N(x)\frac{h}{2}\left(\frac{\frac{1}{2}+n}{I_2}-\frac{\frac{1}{2}-n}{I_1}\right)+\frac{R_2}{I_2}-\frac{R_1}{I_1}(l-x)\right\}. \quad (6)$$

Таким образом, изгибающие моменты $\mu_i(x)$ (2) и (3) в частях балки полностью определены.

Проверочные вычисления деформаций и напряжений в произвольной точке частей 1 и 2 балки показывают статическую эквивалентность расчетных схем цельной балки (см. рис. 1) и совокупности двух балок 1 и 2 (рис. 1, *в*, *г*) при произвольном уровне расслоения *n*.

В частном случае расслоения по нейтральному слою ($n = 0$) из формулы (6) получаем

$$M_p(x)=\frac{q(l-x)^2}{4}.$$

В этом случае из условия $M_p(x)=\int_x^l(\xi-x)p(\xi)d\xi$ следует, что действие соседних одинаковых частей друг на друга через поперечные связи сводится к равномерно распределенной нагрузке интенсивности $p=\frac{q}{2}$.

Этот случай расслоения подробно рассмотрен в работах [1, 2].

При полном расслоении балки на две части изгибающие моменты (2) и (3) определяются зависимостями

$$\mu_1(x)=\frac{q(l-x)^2}{2}-M_p(x)-R_1(l-x); \quad (7)$$

$$\mu_2(x)=M_p(x)-R_2(l-x). \quad (8)$$

Рассмотрим напряженно-деформированное состояние в сечение с заделкой $x = 0$. Изгибающие моменты в этом сечении после расслоения определяются соотношениями

$$\mu_i(0)=\frac{I_iql^2}{8(I_1+I_2)},\ (i=1,\ 2), \quad (9)$$

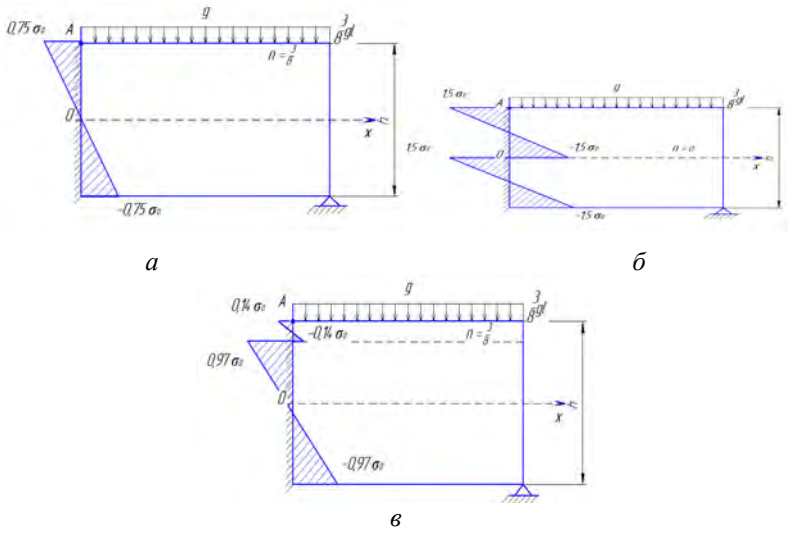
а распределение нормальных напряжений характеризуется зависимостями

$$\sigma_i(0,y_i)=\frac{\mu_i(0)}{I_i}y_i; \quad (10)$$

$$\sigma_{1\max}=\sigma_A=\frac{3}{2}\frac{ql^2}{bh^2}\frac{1-2n}{1+12n^2};\quad \sigma_{2\max}=\sigma_A=\frac{3}{2}\frac{ql^2}{bh^2}\frac{1+2n}{1+12n^2};$$

$$\sigma_{1\min} = -\frac{3}{2}\frac{ql^2}{bh^2}\frac{1-2n}{1+12n^2};\ \ \sigma_{2\min} = \sigma_C = -\frac{3}{2}\frac{ql^2}{bh^2}\frac{1+2n}{1+12n^2}.$$

На рис. 2 показаны эпюры нормальных напряжений в сечении $x = 0$ при различных уровнях расслоения.



а *б* *в*

Рис. 2. Эпюры нормальных напряжений в сечении x = 0 при различных уровнях расслоения: *а* — цельный стержень; *б* — расслоение по нейтральному слою n = 0; *в* — расслоение на уровне $n = \frac{3}{8}$

Таким образом, наличие рассмотренного дефекта (расслоения) приводит к перераспределению нормального напряжения по высоте сечения. В этом случае следует рассмотреть эпюры нормальных напряжений в каждой части стержня отдельно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гордон В. А.*, *Кравцова Э. А.* Перераспределение напряжений в нагруженной составной балке при деградации связей сдвига // Строительная механика и расчет сооружений. 2010. № 5.

2. *Гордон В. А.*, *Кравцова Э. А.* Влияние прогрессирующего расслоения на напряженное состояние составного стержня // Вестник отделения строительных наук РААСН. Вып. 5. М., 2011. С. 60—64.

1. *Gordon V. A.*, *Kravtsova E. A.* Pereraspredelenie napryazheniy v nagruzhennoy sostavnoy bal-ke pri degradatsii svyazey sdviga // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 2010. № 5.

2. *Gordon V. A.*, *Kravtsova E. A.* Vliyanie progressiruyushchego rassloeniya na napryazhennoe sostoyanie sostavnogo sterzhnya // Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk RAASN. Vyp. 5. M., 2011. S. 60—64.

© Гордон В. А., Кравцова Э. А., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Гордон В. А., *Кравцова Э. А.* Перераспределение нормальных напряжений по высоте сечения балки при разноуровневом расслоении // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 303—307.

УДК 620.193.2:691.32

Б. В. Гусев, А. С. Файвусович

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССОВ АТМОСФЕРНОЙ КОРРОЗИИ БЕТОНОВ С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Разработана математическая модель процессов атмосферной коррозии бетонов, представленная в виде соответствующей краевой задачи (3D) типа Стефана с подвижной границей фазового перехода. В предположении о квазистационарности процесса и некоторых других упрощений исходная система сведена к одному обобщенному уравнению. Получено аналитическое решение, в котором характеристики сгруппированы в несколько обобщенных параметров, достаточно просто определяемых экспериментально. Выполнены численные расчеты и сопоставление с результатами, полученными по другим моделям.

К л ю ч е в ы е с л о в а: модель, фазовые переходы, атмосферная коррозия, аналитическое решение.

The authors develop the mathematical model of concrete atmospheric corrosion processes that it provided in the form of corresponding boundary problem (BP) of Stefan type with movable boundary of phase transfer. In suggestions concerning quasistationary processes and some other simplifications the original system is restricted to generalized equation. The analytical solution was developed in which characteristics are grouped into several generalized parameters which can be easily determined experimentally. Numerical calculations are carried out and a correlation with the results obtained with other models is made.

K e y w o r d s: model, phase transfer, atmospheric corrosion, analytical solution.

Введение. Важность разработки математических моделей, позволяющих с достаточно высокой точностью прогнозировать долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, очевидна. Поэтому в развитых странах указанным вопросам уделяется большое внимание. В настоящее время широкое распространение получили физико(химико)-математические модели двух основных направлений. В моделях первого направления используются, наряду с уравнениями массопереноса, зависимости кинетики физико-химических процессов, второго — зависимости термодинамического равновесия. Недостатком указанных моделей является, прежде всего, использование одномерной системы капиллярной пористости. Таким образом, наличие эффективной (пространственной) системы пористости не учитывается, а в моделях второго направления учитывается частично. В соответствии с указанным также не учитывается в явном виде массоперенос жидкой фазы к подвижной границе фазового перехода, образуемого вокруг капилляра. Известно, что на подвижных границах фазовых переходов должны соблюдаться условия Стефана. Однако в вышеуказанных моделях они не используются либо используются частично. Их использование в полном объеме возможно только при переходе к пространственным задачам.

В соответствии с указанным в настоящей статье приводится постановка задачи с фазовым переходом (3D) типа Стефана. На ее основе при ряде упрощений получено аналитическое решение, рекомендуемое для инженерных расчетов.

Аналитический обзор. Общеизвестно, что процессы коррозии бетона сопровождаются образованием подвижных границ фазовых переходов. Соответственно математическое описание таких процессов относится к классу задач типа Стефана. Однако до настоящего времени в различной форме используется лишь решение (1D) третьей задачи Стефана [1—3]. Причем область ее практического применения ограничена. Сложность решения задач типа Стефана (2D и 3D) известна, поэтому широкое распространение получают модели, в которых используются более простые методы расчета, основывающиеся на ряде упрощений. Можно выделить два основных направления в разработке моделей.

Особенностью физико-математических моделей атмосферной коррозии бетонов, основанных на учете кинетики физико-химических процессов, является использование двух исходных уравнений. Одно уравнение описывает процессы массопереноса в неполностью водонасыщенном поровом пространстве бетона. Процессы нейтрализации бетона учитываются введением в указанное уравнение членов, соответствующих кинетике первого, а в отдельных случаях и нулевого порядка [2]. Таким образом, принимается, что химическая реакция протекает во всем объеме жидкой фазы. Однако остается невыясненным вопрос о растворении и массопереносе нейтрализуемого компонента (портландита), расположенного в виде отдельных частичек за пределами капилляров. Соответственно данное уравнение получено без учета границы фазового перехода. Для определения глубины нейтрализации бетона используется известное решение 3-й задачи Стефана. Оно получено при следующих исходных предпосылках (применительно к данному случаю) [4]:

химически активный компонент находится внутри капилляра, в который поступает раствор агрессивного вещества;

глубина нейтрализации x_c пропорциональна величине $t^{0,5}$.

Важно то, что указанное решение получено в предположении, что процесс лимитируется диффузионным переносом раствора к границе фазового перехода. Условие баланса нейтрализуемого вещества в твердой и жидкой фазе не соблюдается. В частности, из второго уравнения следует, что за границей x_c концентрация раствора в жидкой фазе равна нулю, что не согласуется с первым. Более подробный анализ уравнений данного направления приведен в [4, 5]. Важно подчеркнуть, что на основе моделей данного направления разработаны инженерные методы расчета с соответствующими справочными данными.

Модели, основывающиеся на условиях термодинамического равновесия, построены на следующих исходных предпосылках [6—11]:

процесс рассматривается в качестве квазистационарного. В соответствии с указанным он расчленяется на отдельные интервалы по пространственной и временной координате, в пределах которых процесс может рассматриваться в качестве равновесного.

Соответственно в исходную систему включены уравнения:

массопереноса жидкой фазы с дополнительным членом, учитывающим изменение скорости концентрации нейтрализуемого вещества в твердой фазе;

уравнение скорости переноса нейтрализуемого вещества с поверхности раздела фаз в жидкую фазу;

зависимость термодинамического равновесия нейтрализуемого вещества (ионов Ca^{2+}) в жидкой и твердой фазах.

Несомненным достоинством моделей данного направления является возможность определения положения подвижной границы фазового перехода. Причем фактически принимается, что она образует вокруг капилляра некоторую гиперболическую поверхность. К недостаткам указанных моделей на данном этапе их разработки (отметим, что они все время совершенствуются) можно отнести:

сложность расчета зависимостей термодинамического равновесия в случае многокомпонентных растворов в твердой и жидкой фазе;

зависимость скорости переноса вещества с поверхности фазового перехода является эмпирической, сходной с зависимостью скорости растворения. Таким образом, по существу принимается, что лимитирующей стадией процесса является кинетика процесса на подвижной границе (нейтрализация в результате химической реакции). При этом не учитывается диффузионный перенос вещества к границе фазового перехода;

в исходных зависимостях используется значительное количество эмпирических коэффициентов, что ограничивает область применения моделей данного направления.

Укажем еще на одну особенность моделей обоих направлений. В моделях первого направления зависимость, полученная Стефаном, используется непосредственно, а в моделях второго она следует из расчетов, полученных с учетом эмпирических коэффициентов. Указанное является косвенным доказательством того, что процессы в ряде случаев лимитируются диффузионным подводом вещества к границе фазового перехода. Однако в моделях указанный факт игнорируется.

Особенности процессов коррозии в системе (3D) с учетом фазовых переходов. Структура порового пространства бетона. Основная сложность построения математических моделей связана с необходимостью согласования особенностей протекания физических, химических, массообменных и других процессов в пространстве и во времени. Поэтому обязательными элементами моделей являются структурные схемы бетона, включающие схему порового пространства бетона, а также механизм процессов коррозии. При описании структуры порового пространства бетона в работах авторов принимается, что все капилляры подразделяются на две группы: сквозные, выходящие на наружную поверхность, и микрокапилляры, примыкающие к ним в радиальном направлении. К сквозным относятся капилляры, которые при данной относительной влажности воздушной среды частично заполнены конденсатом. Таким образом, во внутренней воздушной полости возможен массоперенос веществ в газообразном состоянии. Средний радиус сквозных капилляров равен r_0. Соответственно, пористость сквозных капилляров равна ε_f, микрокапилляров — ε_r. Общая капиллярная пористость ε равна:

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \varepsilon_r. \qquad (1)$$

Принимается, что сквозные капилляры распределены равномерно в шахматном порядке по сечению на расстоянии друг от друга $2R_0$. В соответствии с вышеизложенным для исследований может быть выделен структурный элемент (рис. 1) [4, 5, 12, 13].

Радиус структурного элемента равен $\left(\varepsilon = \frac{r_0^2}{R_0^2} \right)$.

Боковые стенки структурного элемента (зона влияния) считаются непроницаемыми. Вокруг сквозного капилляра равномерно распределены частички химически активных веществ цементной матрицы. Поскольку диффузный перенос агрессивного компонента жидкой фазы осуществляется в области, в которой нейтрализованы компоненты в твердой фазе с концентрацией m_0 и объемной массой M_0, то капиллярная пористость в случае образования жидкообразных продуктов коррозии равна:

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^0 + \varepsilon_r^B;\ \varepsilon_r^B = \frac{m_0}{M_0}, \tag{2}$$

где ε_r^0 — начальное значение капиллярной величины пористости; ε_r — дополнительная пористость, образуемая в процессе коррозии.

В случае образования продуктов коррозии в твердой фазе

$$\varepsilon_r = \varepsilon_r^0 + \frac{m_0}{M_0} - \frac{m_1}{M_1}, \tag{3}$$

где m_1, M_1 — концентрация и объемная масса продуктов коррозии в твердой фазе.

Расчетная схема микроструктурного элемента показана на рис. 1.

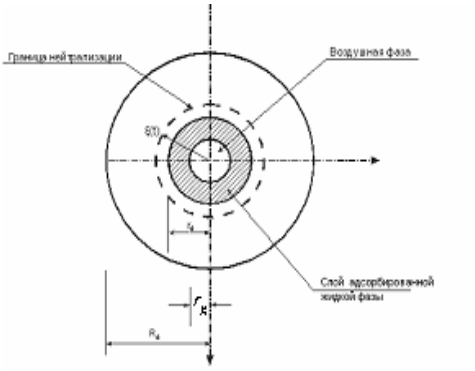


Рис. 1. Схема структурного элемента с капилляром, заполненным жидкой и воздушной фазой

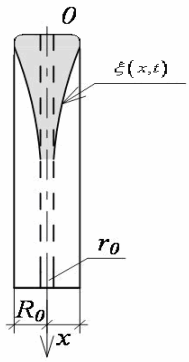


Рис. 2. Расчетная схема процесса коррозии (3D)

Таким образом, принимается, что массоперенос в жидкой фазе в продольном и поперечном направлениях протекает с различными скоростями, пропорциональными эффективным коэффициентам диффузии, которые соответственно равны:

$$D_{1ef} = D\varepsilon_f\psi; \qquad D_{2ef} = D\varepsilon_r, \tag{4}$$

где ψ — степень заполнения сквозных пор конденсатом.

Кроме того, принимается, что в значениях D_{ef} неявно учтена извилистость капилляров. Из вышеизложенного следует, что на микроуровне структурный элемент соответствует схеме (3D), на макроуровне — (1D).

Механизм процессов атмосферной коррозии бетона. Обязательным компонентом, используемым при построении математических моделей процессов коррозии с учетом кинетики физических и химических процессов, является установление механизма процесса, т. е. его стадийное описание. Без знания механизма сложно установить взаимозависимость процессов, протекающих в пространстве и во времени, в том числе с учетом фазовых переходов.

Ниже для примера приведены основные стадии процесса углекислотной коррозии [3, 6, 14—17].

$$CO_2(g) + H_2O \rightarrow H_2CO_3; \qquad (a)$$

$$H_2CO_3(aq) \rightarrow H_2CO_3^-(aq) + H^+(aq); \qquad (в)$$

$$Ca(OH)_2(s) \rightarrow Ca(aq) + 2OH^-(aq); \qquad (c)$$

$$CO^{2+}(aq) + HCO_3^- \rightarrow Ca(HCO_3)_2(aq); \qquad (d)$$

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3(s) + CO_2 + H_2O. \qquad (e)$$

Последняя стадия протекает при $pH > 8$.

В данном случае важно, что стадии (*c*) и (*e*) протекают с образованием фазовых переходов. В представленном виде механизм процессов коррозии имеет ряд недостатков:

целесообразно представить стадии в кинетической форме;

стадии не согласованы с процессами массопереноса, в том числе массообмена на постоянных и подвижных границах. Кроме того, следует выделять лимитирующие стадии.

Поэтому целесообразно механизм в общепринятом виде (в виде кинетических зависимостей) объединять с уравнениями массопереноса. Ниже приводится перечень указанных уравнений, разработанных с учетом характеристик структурного элемента бетона, в том числе с учетом массопереноса в радиальном направлении [4, 5, 12, 13]. Система должна включать:

уравнение массопереноса $CO_2(g)$ в воздушном канале с учетом его адсорбции в пленке конденсата в соответствии с законом Генри. Причем, массоперенос характеризуется молекулярным режимом и протекает в соответствии с законом Кнудсена. Таким образом, стадия (*a*) учитывается непосредственно в данном уравнении. Границы канала $r \le r_g$;

уравнение массопереноса ионов $HCO_3^-(aq)$ в пленке конденсата с учетом массоотдачи в окружающую капиллярно-пористую среду, а также кинетику адсорбции газообразного компонента.

При этом учитывается, что стадии образования $HCO_3^-(aq)$ и распада не являются лимитирующими. Границы пленки конденсата $r_g < r \le r_0$.

Однако при формулировании данного уравнения целесообразно ввести некоторые упрощения. Формально стадия (*c*) характеризует фазовый переход, а стадия (*d*) химическое превращение. Причем расстояние между ними экспериментально ввиду незначительности не определяется. Поэтому стадии (*c*) и (*d*) целесообразно объединить в одну стадию фазового перехода. Указанное означает, что данную стадию можно рассматривать в качестве гетерогенной реакции, протекающей на подвижной границе фазового перехода $\xi(t)$.

Границы массопереноса в радиальном направлении по микрокапиллярам $r_0 < r \le \xi(t).$

Формально указанная система уравнений должна быть дополнена зависимостью, учитывающей стадию (*e*), связанную с фазовым переходом гидрокарбоната кальция в карбонат. Однако в большинстве случаев такое уточнение практического интереса не представляет. Кроме того, в случае, если влагосодержание бетона $\omega = f(x,t)$, указанная система уравнений должна дополняться уравнением влагопереноса с соответствующими граничными условиями.

Постановка задачи типа Стефана (3D). Постановка задачи типа Стефана с учетом фазовых переходов имеет, прежде всего, важное методическое значение, так как позволяет выявить и оценить допустимость различного рода упрощений. Поэтому целесообразно такую постановку использовать для разработки моделей, предназначенных для практического использования, в качестве исходных. Дополнительно учтем, что атмосферная коррозия протекает на относительно малой глубине, поэтому относительное влагосодержание бетона ω можно принять постоянным по глубине:

$$\omega = \xi_f \psi = \text{const}. \tag{5}$$

Соответственно относительное содержание воздушной фазы

$$u = \pi r_g^2 = \varepsilon_f (1 - \psi). \tag{6}$$

Уравнение массопереноса газообразного компонента

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} = D_{e'l''} \frac{\partial^2 p_g}{\partial x^2} - \frac{2\alpha_i}{r_g}(C_g - GC), \tag{7}$$

$$0 < r \le r_g.$$

Уравнение массопереноса ионов HCO_3^- в продольном направлении

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_{1ef} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{2\alpha_i}{r_g}(C_g - GC) - \frac{2r_0}{S} D_{2ef} \frac{\partial C}{\partial t}, \tag{8}$$

$$r_g < r \le r_0.$$

Уравнение массопереноса ионов HCO_3^- в радиальном направлении

$$\frac{\partial C_g}{\partial t} = D_{ef}\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2r_0}{S}D_{2ef}\frac{\partial C}{\partial r}, \tag{9}$$

$$r_0 < r \le \xi(t).$$

Краевые условия:

$x = 0$, $C_g = C_g^0$; (10) $t = 0$, $C_g = 0$; (11)

$r = R_0$, $\frac{\partial C}{\partial r} = 0$; (12) $\frac{\partial C}{\partial x} \to 0$, $x \to \infty$; (13)

$$r = \xi(t),\ D_{ef}\frac{\partial C}{\partial r} = -\mu m_0 \frac{\partial \xi}{\partial t}, \tag{14}$$

$$S = r_0^2 - r_g^2,$$

где $D_{e'l''}$ — эффективный коэффициент диффузии по Кнудсену; C, C_g — соответственно концентрации агрессивного вещества в жидкой и газообразной фазе; α_i — массообменный коэффициент реакции адсорбции; G — коэффициент Генри; m_0 — концентрация в твердой фазе нейтрализуемого компонента цементной матрицы; u — объемное содержание газообразной фазы; p_g — парциальное давление агрессивного вещества в воздушной фазе; μ — стехиометрический коэффициент.

Особое значение имеет условие фазового перехода на границе $\xi(x,t)$. В случае, если процесс лимитируется стадией диффузного подвода вещества к границе, оно имеет вид (14), т. е. совпадает с известными условиями задач, решенных Стефаном [4].

В тех случаях, когда скорость фазового перехода лимитируется скоростью химической реакции (*d*), граничное условие (14) заменяется зависимостью:

$$kC = \mu m_0 \frac{\partial \xi(x,t)}{\partial r \partial x}. \tag{15}$$

Сравнение представленной системы уравнений, а также граничных условий, особенно на границе фазового перехода, позволяет оценить, прежде всего, область применения моделей различных направлений. Здесь ограничимся кратким перечнем основных особенностей задачи типа Стефана (3D) с фазовыми переходами:

учитывается наличие пространственной системы пористости, в соответствии с которой возможен массоперенос также в радиальном направлении. Соответственно в указанном направлении происходит перемещение границы фазового перехода;

из известного факта перемещения указанной границы пропорционально величине $t^{0,5}$ следует, что процессы лимитируются стадией диффузионного переноса вещества в зону реакции (фазового перехода), т. е. процессы коррозии могут быть описаны в рамках диффузионной кинетики. Наличие граничного условия (14) определяет указанную систему уравнений как нелинейную.

Ниже приводится методика сведения исходной системы уравнений (7)—(14) к одному уравнению с функцией источника.

Построение обобщенного уравнения процессов коррозии. Принимается, что процессы коррозии ввиду низкой скорости протекания относятся к квазистационарным. В соответствии с указанным весь интервал значений по пространственной и временной координате расчленяется на элементарные интервалы x_i и t_j, в которых процессы являются равновесными, выделяется элемент, сечение которого показано на рис. 1. Требуется для указанного элемента решить соответствующую плоскую задачу типа Стефана. Поскольку принципиально важно получить аналитическое решение, воспользуемся приближенным методом Л. С. Лейбензона [18]. В соответствии с используемым методом принимается, что распределение концентраций в каждый момент времени соответствует стационарному состоянию. Кроме того, должно удовлетворяться начальное условие

$$C(r,t) = C_0\left(1 - \frac{r - r_0}{\xi}\right);\ r_0 \le r \le R_0; \tag{16}$$

$$t = 0,\ \xi = r_0, \tag{17}$$

где C_0 — концентрация раствора в сквозном капилляре.

Кроме того, дополнительно учитывается условие (14) на подвижной границе. Подставляя зависимость (16) в граничное условие (14), а затем интегрируя с учетом начального условия (17), находим:

$$\xi(t) = \sqrt{\frac{2D_{2ef}C_0}{\mu m_0}t + r_0^2}. \tag{17 a}$$

Таким образом, зависимость перемещения полностью (без учета r_0) совпадает с решением Стефана с тем отличием, что характеризует перемещение подвижной границы в радиальном направлении. При выборе исходного соотношения (16) все они были отклонены на основании анализа получаемых решений. В сущности условие массопереноса по радиальным капиллярам позволяло непосредственно использовать решение Стефана с введением в него начального условия.

Функция стока, характеризующая скорость нейтрализации вещества на подвижной границе, определяется из зависимости

$$q(t) = \frac{2m_0}{\xi(t)}\frac{\partial\xi(t)}{\partial t}, \tag{18}$$

где $2/\xi(t)$ — гидравлический радиус, характеризующий отношение периметра к площади зоны нейтрализации.

Из (18) с учетом (17) следует:

$$q(t)=\frac{2D_{2ef}C_0}{Rt+r_0^2};\ R=\frac{2D_{2ef}C_0}{\mu m_0}. \tag{19}$$

Для объединения уравнений (8) и (9) достаточно в (8) последний член в правой части, учитывающий перенос вещества в радиальном направлении, заменить на значение $\sum_{i,j=1}^{n} q_{ij}(t)$, в котором следует перейти от значения C_0 к значению $C_{ij}(x,t)$. Проанализируем полученное значение функции стока (19). В моделях первого направления концентрация раствора C_f определяется из уравнения массопереноса, в котором влияние химических реакций нейтрализации учитывается зависимостью кинетики первого порядка:

$$\frac{\partial C_f}{\partial t}=-k_0C_f, \tag{20}$$

где k_0 — коэффициент скорости химической реакции массоотдачи. Сравнение (19) и (20) позволяет представить значение k_0 в виде:

$$k_0=\frac{2D_{2ef}}{2D_{2ef}\left(\frac{C_0}{\mu m_0}\right)t+r_0^2}. \tag{21}$$

Из (21) следует, что коэффициент k_0 зависит от целого числа параметров t, r_0, D_{2ef} и соотношения концентраций в единице объема бетона жидкой и твердой фазы нейтрализуемого вещества. На рис. 3 показаны зависимости коэффициентов k_0 от указанных параметров.

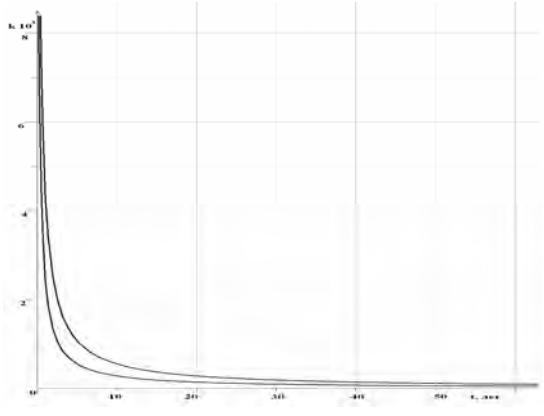


Рис. 3. Зависимость коэффициента массопередачи k_0 от параметров процесса r_0=10^{-4}см, D_{2ef}10^{-9}см^2/с, *1* — $c/\mu m_0$=0,356·10^{-4}, *2* — $c/\mu m_0$=0, 712·1

Вполне очевидно, что использование обобщенного коэффициента k_0 не может считаться удовлетворительным. Таким образом, использование представлений о квазистационарности, пространственной структуре порового пространства, в котором микрокапилляры ориентированы в радиальном направлении, позволило исходную систему уравнений (7)—(9) при граничном условии (14) свести к двум уравнениям (7), (8), причем в последнем вместо функции переноса введена функция стока (19), учитывающая граничное условие (14). При этом исходная система уравнений (7), (8) может быть рекомендована для численных расчетов и более строгого анализа процессов коррозии. Однако их использование для практических целей при массовом обследовании конструкций представляет значительные трудности. Поэтому рассмотрим возможность сведения системы уравнений (7) и (8) к одному обобщенному уравнению. Возможность объединения уравнений (7) и (8) представляет большой интерес для разработки инженерной методики расчета долговечности, в частности, в случае, когда ряд справочных данных может быть получен в результате систематических наблюдений на объектах, проводимых с некоторыми интервалами во времени.

Проанализируем характер распределения концентраций агрессивного компонента C_f в жидкой фазе по глубине слоя бетона. Характерный профиль концентраций C_f для фиксированного значения времени показан на рис. 4.

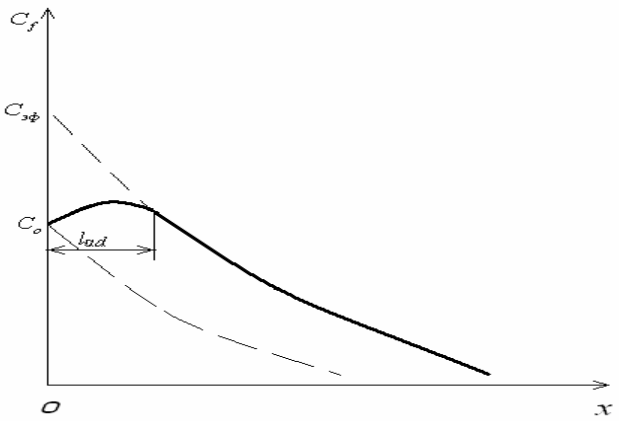


Рис. 4. Распределение концентраций C_f по глубине слоя для времени t

Причем общая концентрация имеет аналогичный характер. На указанной кривой можно выделить глубину зоны адсорбции l_{ad}. Глубина $l_{ad} = f\left(t\right)$ зависит от ε_f и ψ. Причем при $l_{ad} \to 0$ (относительная влажность воздушной среды равна ψ=1) значение C_f минимально, так как адсорбция происходит только в сечении $x = 0$. В случае, если толщина слоя конденсата приближается к толщине монослоя ($\psi \to \min$) массоперенос в нем прекращается и $C_f = 0$ (ориентировочно при относительной влажности воздуха $\psi \approx 0{,}4$).

Таким образом, существует значение Ψ_{opt}, когда $C_f \to \max$. Причем при $\Psi < \Psi_{opt}$ массоперенос в слое конденсата лимитируется переносом в жидкой, а при $\Psi \geq \Psi_{opt}$ в газообразной фазе. Указанное хорошо известно, и способам описания подобной зависимости посвящены многие работы [3, 11, 16, 17]. Определенный недостаток такого подхода заключается в том, что использование эмпирических коэффициентов в зависимостях для всего разнообразия составов бетонов может приводить к серьезным погрешностям. На рис. 4 для сравнения пунктиром показана зависимость для случая коррозии в жидкой среде $(x = 0)$. Для интервала $x \leq l_{ad}$ усредненные значения для различных интервалов по координате можно формально представить в виде:

$$C_{0i} = C_{(0i)} k_i, \qquad C_{oi} = C_{f(0it)} k_i,$$

где k_i — эмпирический коэффициент, характеризующий отношение площадей адсорбции на длине l_{ad} и при $x = 0$.

Как будет показано далее, достаточно ограничиться одним значением $C_0 k_1$. На интервале $x > l_{ad}$ распределение концентраций пропорционально величине $C_{ef}(t)$. Идея метода, используемого в настоящей работе, заключается в том, что наличие осредненных значений концентраций $C_f(x,t) = C_0$ на каждом интервале подразумевается, но количественное значение их не определяется. Далее в соответствии с полученным аналитическим решением, приводимым ниже, устанавливаются расчетные значения концентраций $C_f(x,t)$ и размеры нейтрализованной зоны $C_b(x,t)$. Затем на основе опытных данных величин $x_c(t)$ и $C_f(x,t)$ или $C_b(x,t)$ (C_b — концентрация агрессивного компонента в связанном состоянии), определенных для значений времени t_1 и t_2, из расчетных зависимостей определяются обобщенные параметры, характеризующие процесс коррозии. Число указанных параметров ограничено. Поскольку они определены опытным путем, то являются усредненными, включая все входящие в их состав определенные параметры. Подчеркнем, что для оценки долговечности железобетонных конструкций достаточно определить две величины: $x_c(t)$ и $C_f(x,t)$ в интервале значений $x > x_c(t)$. Значения концентраций $C_f(x,t)$ в переходной зоне определяются для прогнозирования коррозионного состояния арматуры.

Уравнение реакции сорбции имеет вид:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \beta(U_0 - CG), \tag{22}$$

где C, U_0 — концентрация агрессивного вещества в жидкой и воздушной фазе; t — время; β и G — коэффициент скорости сорбции и коэффициент Генри.

Решение уравнения (1) с учетом начального условия $t = 0$, $C = 0$ записывается в виде:

$$C = \frac{U_0 k_1}{G}(1 - e^{-\beta G t}). \tag{23}$$

Аналитическая модель процессов атмосферной коррозии бетона (3D). Постановка и решение краевой задачи.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D_1 \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - q(t); \tag{24}$$

$$x = 0,\ C(0,t) = \frac{U_0 k}{G}(1 - e^{-\beta C t}); \tag{25}$$

$$x \to \infty;\ \frac{\partial C}{\partial x} \to 0\ ; \tag{26}$$

$$t = 0; C = 0,\qquad g(t) = \frac{a_1}{a_2 t + b}; \tag{27}$$

$$a_1 = 2D_1\tilde{C};\ a_2 = 2D_1\frac{\tilde{C}}{\mu m_0};\ b = r_0^2;$$

$$D_1 = D\varepsilon_f\psi;\ \varepsilon_f\psi{=}\omega;\ D_2 = \frac{D\varepsilon_r}{r_0^2};\ \frac{a_2}{b} = 2D_1\frac{\tilde{C}}{\mu m_0}.$$

Здесь D_1, D_2 — эффективные коэффициенты диффузии в направлении осей x и r; D — коэффициент молекулярной диффузии; ε — капиллярная пористость бетона до начала процесса коррозии; ε_r — капиллярная пористость в радиальном направлении; r_0 — средний радиус капилляра, соответствующий капиллярной пористости ε_f; ω — объемное влагосодержание; $\tilde{C}$ — осредненное значение концентрации раствора агрессивного вещества; k_1 — эмпирический коэффициент, учитывающий отношение реальной площади реакции сорбции к площади на границе $x = 0$. Расчетная схема процесса показана на рис. 5.

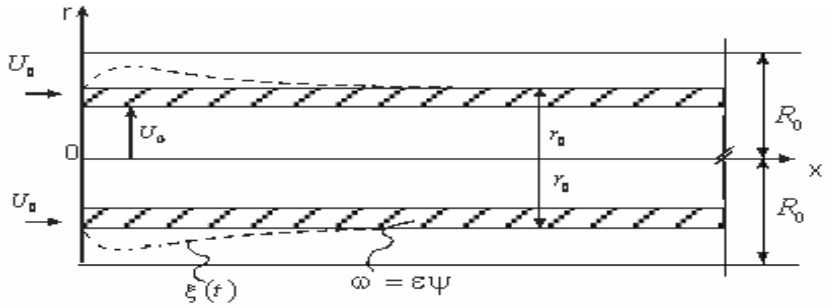


Рис. 5. Расчетная схема процессов атмосферной коррозии: ----- подвижный фронт коррозии

Решение краевой задачи (24)—(27), выполненное методом синус-преобразования Фурье, приведено в [5]. Оно имеет вид:

$$C(x,t)=\left[\frac{U_0 k_1}{G}\operatorname{erfc}\frac{x}{2\sqrt{D_1 t}}-\frac{U_0}{G}\exp(\beta G t)\right]-\mu m_0\ln\left(\frac{a_2 t}{b}+1\right)\times$$
$$\times\left\{\operatorname{erfc}\frac{x}{2\sqrt{D_1 t}}-\exp\left[-\beta G\left(t+\frac{b}{a^2}\right)\right]\right\}, \qquad (28)$$

где erfc — функция ошибок.

Первые два члена уравнения (28) характеризуют процессы массопереноса в поровом пространстве бетона без учета эффектов химического взаимодействия. Третий определяет распределение концентраций продуктов коррозии по глубине слоя. Если ввести функцию повреждаемости $\theta(x,t)$, характеризующую степень нейтрализации бетона, то можно записать для достаточно больших значений t

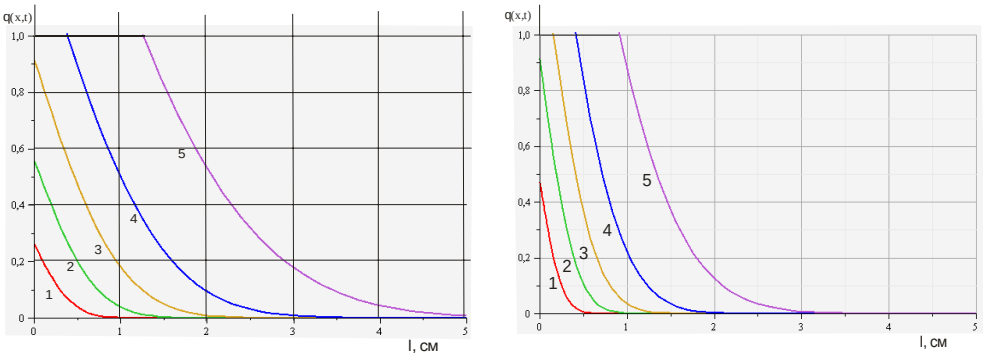
$$\theta(x,t)=\ln\left(\frac{a_2 t}{b}+1\right)\operatorname{erfc}\frac{x}{2}\sqrt{D_1 t}\,. \qquad (29)$$

Глубину нейтрализованного слоя бетона x_c можно определить непосредственно из (29). Однако с учетом характера распределения концентраций на участке l_{ad} для практических целей более целесообразно использовать полуэмпирическую зависимость, следующую из (29) [4, 5, 12, 13]:

$$x_c=A\ln(\alpha_1 t+1),\ \ \alpha=\left(2D\varepsilon_r C/r_0^2\mu m_0\right). \qquad (30)$$

Коэффициенты A, α_1 являются статически усредненными. Кроме того, как указано выше, коэффициент A зависит от способа определения глубины нейтрализации. Концентрация раствора агрессивного вещества $C_f(x,t)$ (в свободном состоянии определяется из (28). Более простое решение можно получить, исходя из следующих соображений: при $\theta(x,t)=1$ концентрация определяется аналогично случаю массопереноса в капиллярно-пористой химически нейтральной среде, а при $\theta(x,t)\le 1$ она пропорциональна величине $\theta(x,t)$. Зависимости для определения $C_f(x,t)\le 1$ приведены в [4].

Анализ результатов численного моделирования и экспериментальных данных. На рис. 6, 7 показаны результаты численного моделирования, устанавливающие зависимость величины $\theta(x,t)$ от параметров процесса. Указанное особенно важно потому, что в ранее разработанных моделях данная величина непосредственно не определялась.



а *б*

Рис. 6. Распределение степени нейтрализации бетона от параметров процесса:
1 — *t*=2 года; *2* — *t*=5 лет; *3* — *t*=10 лет; *4* — *t*=20 лет; *5* — *t*=50 лет:
а — D_1=0,03 см^2/год, α=0,15 1/год; *б* — D_1=0,01 см^2/год, α=0,3 1/год

Из результатов анализа следует, что степень нейтрализации на начальном интервале времени в точке $x = 0$ изменяется от 0 до 1, а глубина переходной зоны зависит преимущественно от величины эффективного коэффициента диффузии. Она увеличивается при $D_1 > 10^{-9}$ см^2/год и резко снижается с уменьшением $D_1 > 10^{-9}$ см^2/год. Скорость увеличения $\theta(x,t)$ определяется преимущественно параметром α. Характер кривых качественно хорошо совпадает с приведенным в работах [3, 11, 14, 15]. К сожалению, количественный анализ экспериментальных данных различных авторов в полном объеме невозможен, так как в них использован целый ряд характеристик, отличных от используемых в модели авторов. Аналогичный характер распределения хлоридов установлен экспериментально и натурными наблюдениями [4, 13].

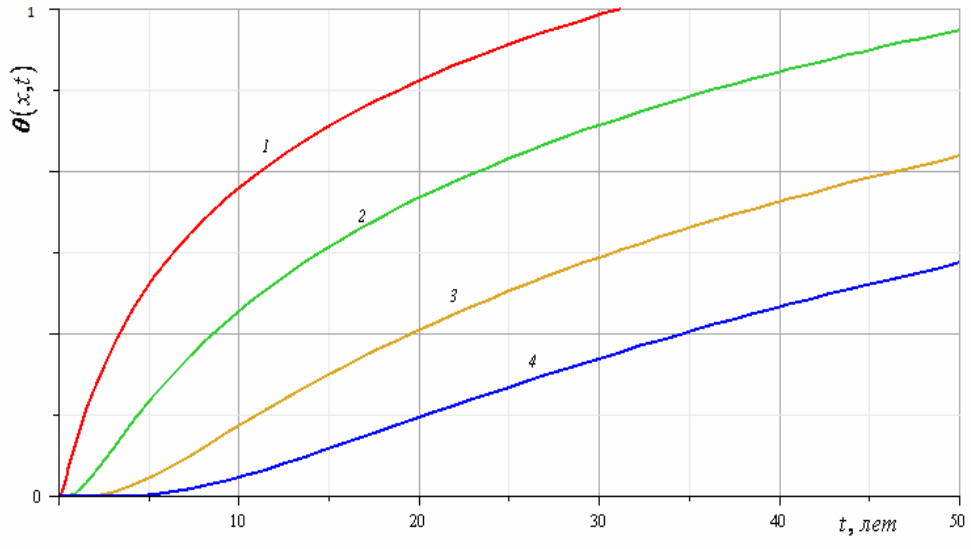


Рис. 7. Зависимость степени нейтрализации бетона от параметров процесса:
1 — *h*=0,5 см, *D*=0,42 см^2/год, α=0,8 1/год; *2* — *h*=1,0 см, *D*=0,12 см^2/год; *3* — *h*=2,0 см, *D*=0,42 см^2/год, α=0,8 1/год; *4* — *h*=2,0 см, *D*=0,42 см^2/год, α=0,8 1/год

Рассмотрим основные особенности построения модели и полученного решения краевой задачи. Хотя по форме зависимость (28) соответствует одномерному процессу, фактически в ней учитывается перемещение границы фазового перехода в радиальном направлении. Поэтому из решения (28) одновременно получается значение величины x_c и C_f. Для описания структуры порового пространства бетона в моделях используются три величины ε_f, ε_r и r_0. Однако в расчетах используется всего два параметра.

Остановимся на анализе отличительных особенностей зависимостей для определения x_c. Из зависимости

$$x_c = A_1\sqrt{t} \tag{31}$$

следует, что при $t \to 0$ $\frac{dx_c}{dt} \to \infty$, а из (29), соответственно, при $t \to 0$ $\frac{dx_c}{dt}$=const.

Анализ результатов экспериментов подтверждает справедливость зависимости (29) [4, 5, 12, 13]. Анализ экспериментальных данных показывает, что при малых значениях времени имеются значительные отклонения от зависимости (31) [3, 19]. Указанное запаздывание рассматривается как индукционный период [3]. Для количественной оценки обеих зависимостей были использованы экспериментальные данные, приведенные в работе [3]. Результаты обработки результатов экспериментов показаны на рис. 8.

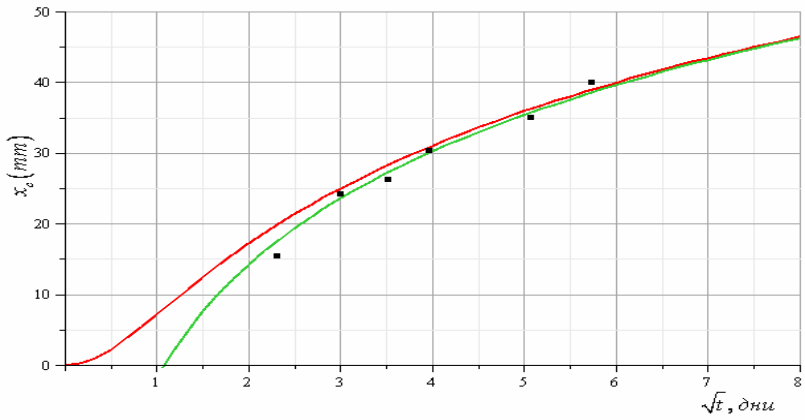


Рис. 8. Зависимость глубины карбонизации от продолжительности процесса: ■ экспериментальные точки; ——— зависимость $x = 11{,}55\ln(0{,}858t + 1)$; ——— зависимость $x = 13{,}595\sqrt{t - 0{,}79}$

Из представленных материалов следует, что зависимость (30) качественно и количественно верно отражает начальный период процесса коррозии. Физическое объяснение данному факту следует из анализа параметра α (30).

При очень малых r_0 (больших значениях α) плотность потока в продольном направлении резко снижается и увеличивается в радиальном направлении. С увеличением r_0 (малых значениях α) имеет место обратная картина. Для сравнительной количественной оценки зависимостей (30) и (31) при больших значениях t были использованы результаты натурных экспериментов, приведенных в работе [16]. На рис. 9 показаны результаты обработки экспериментальных данных. Аналогичные данные приведены в [4, 13].

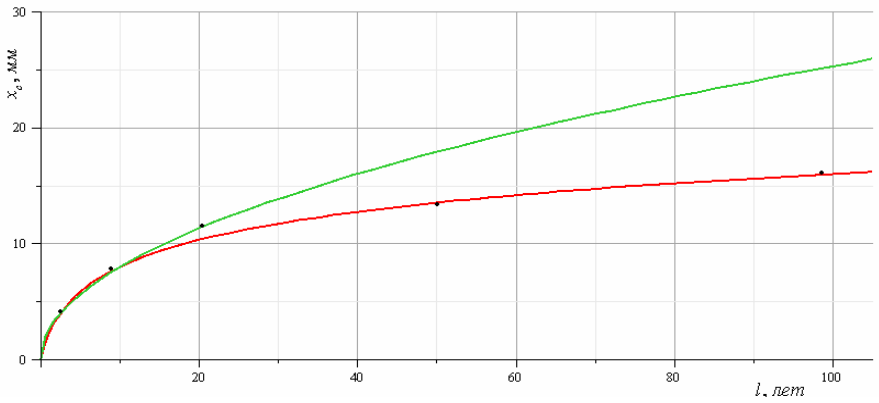


Рис. 9. Зависимость глубины карбонизации от продолжительности процесса:
■ экспериментальные точки; ——— зависимость $h(t)=3{,}64(0{,}8t+1)$;
——— зависимость $x = 2{,}53\sqrt{t}$

Методика обработки результатов экспериментов, а также различные варианты практического использования полученных зависимостей (29), (30) приведены в [4]. Таким образом, при малых и больших значениях времени зависимости (29, 30) более точно отражают особенности процесса, чем (31).

Заключение. Разработанная модель основана на учете пространственной схемы пористости и прямого учета образования и перемещения фронта фазового перехода. В исходных уравнениях (8) и (24) соблюдается условие баланса нейтрализуемого вещества в жидкой и твердой фазе. Указанное достигается введением функции стока, полученной в предположении о квазистационарности процесса из решения плоской задачи типа Стефана. В полученном решении характеристики процесса сгруппированы в виде двух обобщенных параметров, которые определяются непосредственно по материалам натурного обследования. Указанные параметры являются усредненными, поэтому отпадает необходимость в операциях усреднения по каждой из отдельных характеристик (T, C, φ, ψ, $r_0, \varepsilon_f, \varepsilon_r$).

Получено, что при учете пространственной системы пористости зависимость глубины нейтрализации x_c от параметров процесса описывается логарифмической зависимостью. Установлено, что при $t \to 0$ логарифмическая зависимость более верно, чем (31), описывает кинетику процесса. При $t >$ (5…10 лет) использование зависимостей (29), (30) исключает необходимость использования системы поправочных коэффициентов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Meyer A., Wierig H., Husmann K.* Karbonatisierung von Schwerbeton // Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (Heft 182). 1967. P. 1—33.

2. *Ming-Te Liang, Shineg-Min Lin.* Mathematical model and applications for concrete Carbonation // Journal of Marine Science and Technologic. Vol. 11. № 1. P. 20—30 (2003).

3. *Thiery M., Dangla P., Platret M. A.* Prediction model for concrete carbonation based for coupled CO2-H2O-ions transfers and chemical reactions // IODBMC International Conference ON Durability of Building Materials and Components. Lion. April, 2005. P. 8.

4. *Гусев Б. В., Файвусович А. С.* Обобщенные уравнения коррозии бетона (Атмосферная коррозия). Изд. 2-е, испр. и доп. М. : Научный мир, 2011. С. 52.

5. *Гусев Б. В., Файвусович А. С.* Кинетика процессов атмосферной коррозии бетона // Збірник наукових праць Української державної академії транспорту. Вип. 115. Харків, 2010. С. 46—55.

6. *Adenot F., Buil M.* Modeling of the corrosion of cement paste by deionized water. Cement and Concrete Research. Vol. 22. 1992 (2—3). P. 489—496.

7. *Adenot F., Rchet C.* Modelling of the chemical degradation of a cement paste // Mechanisms of chemical degradation of cement based systems. E&Fn Spon, London, 1997.

8. *Benbom S., Walker C., Savage D.* Intercomparison of Cement Solid-Solution Models. Issues Affecting the Geochemical Evolution of Repositories for Radioactive Waste. SKI Report. May 2007. P. 46.

9. *Buil M., Revertegal E., Oliver I.* A model of the attact of pure water or under saturated lime solutius of cement. ASTM STP 1123. 1992. P. 227—241.

10. *Nakarai K., Ishida T., Maekawa K.* Modeling of Calcium leaching from Cement Hydrates Coupled with Micro-pore Formation // Journal of advanced Concrete Technology. Vol. 4. October 2006. P. 395—407.

11. *Xi B. J., Bazant Z. P.* Modeling Chloride Penetration in Saturated Concrete // Jornal of Materials in civil Engineering. / Februar 1999. R. 58—65.

12. Формирование структуры композиционных материалов и их свойства / Б. В. Гусев, В. И. Кондращенко, Б. П. Маслов, А. С. Файвусович. М. : Научный мир, 2006. С. 169—278.

13. *Гусев Б. В., Файвусович А. С.* Построение математической теории процессов коррозии бетона // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 38—41.

14. *Ishida T., Maekawa K.* 2001. Modeling of pH Profile in Pore Water based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory Translation from Proceedings of JSCE. No 648б. V 47. May 2000.

15. *Maekawa K., Ishida T., Kishi T.* (№ 238) Comite Euro-International du Beton, Lausanne. Multi-scale Modeling of Concrete Performance. Integradet Material and Structural Mechanics// Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1. No 2. P. 91—126.

16. *Papadakis V. G., Fardis M. N., Vayenas C. G.* (1991) Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation // ACI Materials Journal 89. P. 119—130.

17. *Papadakis V. G., Efstathion M.P.* Field Validation of a Computer-based Prediction foor Concrete service life // CEB-FIP 2 International Congress June 5—8, 2006. Naples, Italy.

18. *Лыков А. В.* Теория теплопроводности. М. : Высш. шк., 1967. 592 с.

19. *Uomoto T., Takada Y.* (1993) Factors affecting concrete carbonation rate. Concrete library of ISCE, 21, P. 31—44.

1. *Meyer A., Wierig H., Husmann K.* Karbonatisierung von Schwerbeton // Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (Heft 182). 1967. P. 1—33.

2. *Ming-Te Liang, Shineg-Min Lin.* Mathematical model and applications for concrete Carbonation // Journal of Marine Science and Technologic. Vol. 11. № 1. P. 20—30 (2003).

3. *Thiery M., Dangla P., Platret M. A.* Prediction model for concrete carbonation based for coupled CO2-H2O-ions transfers and chemical reactions // IODBMC International Conference ON Durability of Building Materials and Components. Lion. April, 2005. R. 8.

4. *Gusev B. V., Fayvusovich A. S.* Obobshchennye uravneniya korrozii betona (Atmosfernaya korroziya). Izd. 2-e, ispr. i dop. M. : Nauchnyy mir, 2011. S. 52.

5. *Gusev B. V., Fayvusovich A. S.* Kinetika protsessov atmosfernoy korrozii betona // Zbirnik naukovikh prats' Ukraïns'koï derzhavnoï akademiï transportu. Vip. 115. Kharkiv, 2010. S. 46—55.

6. *Adenot F., Buil M.* Modeling of the corrosion of cement paste by deionized water. Cement and Concrete Research. Vol. 22. 1992 (2—3). P. 489—496.

7. *Adenot F., Rchet C.* Modelling of the chemical degradation of a cement paste // Mechanisms of chemical degradation of cement based systems. E&Fn Spon, London, 1997.

8. *Benbom S., Walker C., Savage D.* Intercomparison of Cement Solid-Solution Models. Issues Affecting the Geochemical Evolution of Repositories for Radioactive Waste. SKI Report. May 2007. P. 46.

9. *Buil M., Revertegal E., Oliver I.* A model of the attact of pure water or under saturated lime solutius of cement. ASTM STP 1123. 1992. P. 227—241.

10. *Nakarai K., Ishida T., Maekawa K.* Modeling of Calcium leaching from Cement Hydrates Coupled with Micro-pore Formation // Journal of advanced Concrete Technology. Vol. 4. October 2006. P. 395—407.

11. *Xi B. J., Bazant Z. P.* Modeling Chloride Penetration in Saturated Concrete // Jornal of Materials in civil Engineering. / Februar 1999. R. 58—65.

12. Formirovanie struktury kompozitsionnykh materialov i ikh svoystva / B. V. Gusev, V. I. Kondrashchenko, B. P. Maslov, A. S. Fayvusovich. M. : Nauchnyy mir, 2006. S. 169—278.

13. *Gusev B. V., Fayvusovich A. S.* Postroenie matematicheskoy teorii protsessov korrozii betona // Stroitel'nye materialy. 2008. № 3. S. 38—41.

14. *Ishida T., Maekawa K.* 2001. Modeling of pH Profile in Pore Water based on Mass Transport and Chemical Equilibrium Theory Translation from Proceedings of JSCE. No 648b. V 47. May 2000.

15. *Maekawa K., Ishida T., Kishi T.* (№ 238) Comite Euro-International du Beton, Lausanne. Multi-scale Modeling of Concrete Performance. Integradet Material and Structural Mechanics// Journal of Advanced Concrete Technology. 2003. Vol. 1. No 2. P. 91—126.

16. *Papadakis V. G., Fardis M. N., Vayenas C. G.* (1991) Fundamental modeling and experimental investigation of concrete carbonation // ACI Materials Journal 89. P. 119—130.

17. *Papadakis V. G., Efstathion M.P.* Field Validation of a Computer-based Prediction foor Concrete service life // CEB-FIP 2 International Congress June 5—8, 2006. Naples, Italy.

18. *Lykov A. V.* Teoriya teploprovodnosti. M. : Vyssh. shk., 1967. 592 s.

19. *Uomoto T., Takada Y.* (1993) Factors affecting concrete carbonation rate. Concrete library of ISCE, 21, P. 31—44.

© Гусев Б. В., Файвусович А. С., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Гусев Б. В., Файвусович А. С. Математическая модель процессов атмосферной коррозии бетонов с учетом фазовых переходов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 308—325.

УДК 539.3

Е. М. Зверяев, Г. И. Макаров

МОДЕЛЬ ОРЕБРЕННОЙ ОБОЛОЧКИ

Рассматривается задача определения НДС подкрепленной стержнями оболочки. Уравнения равновесия и формулы деформации-перемещения взяты такими же, как и для гладкой оболочки. Характеристики стержней учитываются в соотношениях упругости с помощью дельта-функций. Устанавливаются асимптотические характеристики подкрепляющих стержней. Они позволяют отбросить малые члены и записать упрощенные соотношения упругости. Решение задачи разыскивается методом простых итераций и методом асимптотического интегрирования. Это позволяет строить решение путем расчленения общего решения задачи на элементарные — безмоментное, чисто моментное и краевой эффект. Для цилиндрической оболочки, подкрепленной только стрингерами, построена обобщенная полубезмоментная теория. Показано, что полученное методом расчленения решение для устранения разрывов на стержнях должно быть дополнено решением уравнения теории пологих оболочек.

К л ю ч е в ы е с л о в а: подкрепленная оболочка, стержень, соотношения упругости, расчленение, итерация.

Determination of stress and strain state of reinforced shell is analyzed. Equilibrium equation and formula of strain-motion are the same as for smooth shell. Characteristics of webs are taken into account in tension balance with the help of delta-function. Asymptotic characteristics of webs are determined. They allow omit minor members and write down simplified tension balance. The solution is found by the approximation method and by the method of asymptotic integration. It allows find solution by multipartition of the complete decision into elementary ones — momentless, clear momental and edge effect. For cylinder shell reinforced by beams the generalized semi-momentless theory was developed. It is proved that the solution obtained by multipartition of the complete decision for crack elimination on webs must be added to the solution of equation of the shallow-shell theory.

K e y w o r d s: reinforced shell, web, tension balance, multipartition, iteration.

Будем исходить из обычной системы уравнений моментной теории оболочек. Соотношения упругости возьмем предложенные в [1, 2]. Систему исходных уравнений представим в виде нескольких групп равенств:

1. Первые три уравнения равновесия сил:

$$A_1 T = -X - A_0 N. \tag{1}$$

2. Первые три соотношения упругости оребренной оболочки [1]:

$$T_1 = \frac{Eh}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_1 + \nu\varepsilon_2\right) + \frac{1}{A_1}\sum_{i=1}^{m}\left(F_i\varepsilon_1 + S_i\kappa_1\right)E_i\delta\left(\alpha_2 - \alpha_{2i}\right);$$

$$S = \frac{Eh}{2\left(1+\nu\right)}\omega + \frac{1}{A_1}\sum_{i=1}^{n} G_j I_j^{(p)}\frac{\tau}{R_2}\delta\left(\alpha_1 - \alpha_{1j}\right); \tag{2}$$

$$T_2 = \frac{Eh}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1\right) + \frac{1}{A_2}\sum_{j=1}^{n}\left(F_j\varepsilon_2 + S_j\kappa_2\right)E_j\delta\left(\alpha_1 - \alpha_{1j}\right).$$

3. Формулы — компоненты тангенциальной деформации-перемещения:

$$\varepsilon = A_3 u. \tag{3}$$

4. Формулы — компоненты нетангенциальной деформации-перемещения:

$$\kappa = A_4 u. \tag{4}$$

5. Нетангенциальные соотношения упругости:

$$\begin{aligned} M_1 &= \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)}\left(\kappa_1 + \nu\kappa_2\right) + \frac{1}{A_1}\sum_{i=1}^{m}\left(I_i\kappa_1 + S_i\varepsilon_1\right)E_i\delta\left(\alpha_2 - \alpha_{2i}\right); \\ H &= \frac{Eh^3}{12\left(1+\nu\right)}\tau + \frac{1}{A_2}\sum_{i=1}^{m}G_i I_i^{(p)}\frac{\tau}{R_1}\delta\left(\alpha_2 - \alpha_{2j}\right) + \\ &+ \frac{1}{A_1}\sum_{j=1}^{n}G_j I_j^{(p)}\frac{\tau}{R_2}\delta\left(\alpha_1 - \alpha_{1j}\right); \\ M_2 &= \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)}\left(\kappa_2 + \nu\kappa_1\right) + \frac{1}{A_2}\sum_{j=1}^{n}\left(I_j\kappa_2 + S_j\varepsilon_2\right)E_j\delta\left(\alpha_1 - \alpha_{1j}\right). \end{aligned} \tag{5}$$

6. Уравнения равновесия моментов:

$$N = A_6 M. \tag{6}$$

В уравнениях (1)—(6) введены вектора: $T = \{T_1,\ S,\ T_2\}$ — вектор тангенциальных усилий, $\varepsilon_1 = \{\varepsilon_1,\ \omega,\ \varepsilon_2\}$ — вектор тангенциальной деформации, $u = \{u_1,\ w,\ u_2\}$ — вектор перемещений, $\kappa = \{\kappa_1, \tau, \kappa_2\}$ — вектор изменения кривизн, $N = \{N_1,\ N_2\}$ — вектор перерезывающих сил, $M = \{M_1,\ H,\ M_2\}$ — вектор моментов, $X = \{X_1,\ Z,\ X_2\}$ — вектор нагрузки и операторы: A_1 — оператор безмоментных уравнений, A_3 — оператор геометрических уравнений (уравнений бесконечно малых изгибаний срединной поверхности оболочки [2]), A_4 — оператор, позволяющий вычислить компоненты изменения кривизны и кручение через перемещения, A_6 — уравнения равновесия моментов. Оператор A_0 имеет вид:

$$A_0 = \begin{Vmatrix} \dfrac{N_1}{R_1} & 0 \\ 0 & \dfrac{N_2}{R_2} \\ -\dfrac{1}{A_1A_2}\dfrac{\partial}{\partial\alpha_1}\left(A_2N_1\right) & -\dfrac{1}{A_2A_1}\dfrac{\partial}{\partial\alpha_2}\left(A_1N_2\right) \end{Vmatrix}.$$

Считается, что оболочка подкреплена системой стержней, состоящей из двух семейств: i-е семейство из m стержней, направленных вдоль координатных линий α_1, заданных уравнениями $\alpha_2 = \alpha_{2i} = \text{const}$, и j-е семейство из

n стержней, направленных вдоль линий α_2, заданных уравнениями $\alpha_1 = \alpha_{1j} = \text{const}$ (i, j — номера стержней). Обозначения F_i, F_j, S_i, S_j, I_i, I_j, $I_i^{(p)}$, $I_j^{(p)}$, E_i, E_j соответствуют принятым в сопротивлении материалов обозначениям характеристик стержней, как то: площади поперечных сечений, статические моменты сечений, осевые моменты инерции сечений, полярные моменты инерции сечений и модули упругости материалов стержней.

Примем некоторый характерный радиус кривизны срединной поверхности за единицу измерения длины. Тогда толщину оболочки h можно считать безразмерным малым параметром, измеренным в долях характерного радиуса. Для определенности будем считать, что оболочка подкреплена тонкостенными стержнями с толщиной стенки, мало отличающейся от толщины оболочки h, и с характерным размером поперечного сечения h^a (обычно $1/2 < a < 1$). Асимптотические порядки геометрических характеристик поперечного сечения стержня, прикрепленного к внутренней или внешней поверхности оболочки, будут такими

$$F_i \sim h^{1+a},\ S_i \sim h^{1+2a},\ I_i \sim h^{1+3a}. \tag{7}$$

Примем дополнительно, что

$$E \sim E_i \sim E_j \sim G_i \sim G_j,\ EhR \sim h^0,\ (i = 1,\ 2,...,\ m,\ j = 1,\ 2,...,n). \tag{8}$$

Будем разыскивать основное напряженное состояние, обладающее малой изменяемостью. Это означает, что можно исходить из следующих соотношений между деформациями:

$$\varepsilon_1 \sim \varepsilon_2 \sim \omega \sim \kappa_1 \sim \kappa_2 \sim \tau. \tag{9}$$

Проинтегрируем первое соотношение из (2) по α_2 в окрестности точки $\alpha_2 = \alpha_{2i}$ при некотором фиксированном i в пределах $\alpha_{2i} - \rho h^a$, $\alpha_{2i} + \rho h^a$, выбрав ρ таким образом, чтобы поперечное сечение стержня попало целиком в интервал интегрирования. Для осредненных на указанном интервале величин получаем

$$T_1^{\text{ср}} = \frac{Eh}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_1^{\text{ср}} + \nu\varepsilon_2^{\text{ср}}\right) + E_i F_i \varepsilon_1^{\text{ср}} + h^a \beta_1, \quad \left(\beta_1 \sim \varepsilon_1^{\text{ср}}\right). \tag{10}$$

Поступив аналогичным образом с S и T_2, получим

$$\begin{aligned} S^{\text{ср}} &= \frac{Eh}{2(1+\nu)}\omega^{\text{ср}} + h^{2a}\beta_s, \\ T_2^{\text{ср}} &= \frac{Eh}{1-\nu^2}\left(\varepsilon_2^{\text{ср}} + \nu\varepsilon_2^{\text{ср}}\right) + E_j F_j \varepsilon_2^{\text{ср}} + h^a \beta_2, \quad (\beta_S \sim \beta_2 \sim \omega^{\text{ср}} \sim \varepsilon_2^{\text{ср}}). \end{aligned} \tag{11}$$

Соотношения (10), (11) показывают, что влияние эксцентриситета подкрепляющих стержней на тангенциальные усилия при выполнении условий (9) мало. Главные соотношения упругости получим, отбросив в (2) нетангенциальные слагаемые. Разрешив последние относительно деформаций, получим:

$$\varepsilon_1 = \frac{a_{22}}{\Delta}T_1 - \frac{a_{12}}{\Delta}T_2,\ \omega = \frac{1+\nu}{Eh}S,\ \varepsilon_2 = \frac{a_{11}}{\Delta}T_2 - \frac{a_{12}}{\Delta}T_1, \tag{12}$$

где введены следующие обозначения:

$$\Delta = a_{11}a_{22} - \frac{Eh}{1-\nu^2},\ \ a_{11} = \frac{Eh}{1-\nu^2} + \frac{1}{A_2}\sum_{i=1}^{m} E_i F_i \delta\left(\alpha_2 - \alpha_{2i}\right),$$
$$a_{22} = \frac{Eh}{1-\nu^2} + \frac{1}{A_1}\sum_{j=1}^{n} E_j F_j \delta\left(\alpha_1 - \alpha_{1j}\right). \qquad (13)$$

Коэффициенты в системе (12) имеют устранимые разрывы в точках $\alpha_2 = \alpha_{2i}$, $\alpha_1 = \alpha_{1j}$. Поэтому если искомое напряженное состояние безмоментно и, следовательно, задача определения тангенциальных усилий из первых трех уравнений равновесия (при $N_1 = N_2 = 0$) разрешима, компоненты тангенциальной деформации определяются выражениями (12), (13). При этом тангенциальные усилия и сдвиг ω представляются везде гладкими функциями, а деформации $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ имеют на стержнях устранимые разрывы. По известным теперь деформациям с помощью уравнений (3) определяются перемещения. Оператор A_3^{-1}, обратный к оператору бесконечно малых изгибаний срединной поверхности оболочки A_3, в достаточно большом числе случаев может быть построен. Перемещения u_1, u_2 должны обладать тангенциальной непрерывностью на стержнях, являющихся для оболочки линиями возмущения безмоментного напряженного состояния. При этом получатся невязки в нетангенциальном перемещении w, устранимые с помощью уравнений напряженного состояния с большой изменяемостью. Далее, по известным перемещениям можно вычислить по формулам (4) компоненты изгибной деформации.

Заметив, что из выражений (12), (13) следует

$$\varepsilon_1 = 0 \text{ при } \alpha_2 = \alpha_{2i},\ \varepsilon_2 = 0 \text{ при } \alpha_1 = \alpha_{1j}, \qquad (14)$$

вычислим по соотношениям (5) моменты, опустив в силу (14) величины, зависящие от эксцентриситета. Моменты и вычисленные по уравнениям (6) перерезывающие усилия будут иметь особенности на стержнях, также устранимые с помощью уравнений быстро меняющегося напряженного состояния.

Введем следующие обозначения:

$$\varepsilon = \hat{A}_2 T,\ M = \hat{A}_5 \kappa, \qquad (15)$$

где $\hat{A}_2 = \begin{Vmatrix} a_{22}/\Delta & 0 & a_{12}/\Delta \\ 0 & \dfrac{2(1+\nu)}{Eh} & 0 \\ a_{12}/\Delta & 0 & a_{11}/\Delta \end{Vmatrix}$, $\hat{A}_5 = \begin{Vmatrix} \hat{a}_{11} & 0 & \hat{a}_{13} \\ 0 & \hat{a}_{22} & 0 \\ \hat{a}_{13} & 0 & \hat{a}_{31} \end{Vmatrix}$,

$\hat{A}_2$ соответствует матричной записи соотношений упругости (12).

$$\hat{a}_{11} = \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)} + \frac{1}{A_2}\sum_{i=1}^{m} E_i I_i \delta\left(\alpha_2 - \alpha_{2i}\right),\ \hat{a}_{13} = \frac{\nu Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)},$$

$$\hat{a}_{33} = \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)} + \frac{1}{A_1}\sum_{j=1}^{n} E_j I_j \delta\left(\alpha_1 - \alpha_{1j}\right),$$

$$\hat{a}_{22} = \frac{Eh^3}{12\left(1+\nu\right)}\tau + \frac{1}{2A_2}\sum_{i=1}^{m} G_i I_i^{(p)} \delta\left(\alpha_2 - \alpha_{2j}\right) + \frac{1}{2A_1}\sum_{j=1}^{n} G_j I_j^{(p)} \delta\left(\alpha_1 - \alpha_{1j}\right).$$

Теперь, после упрощений соотношений упругости исходную систему уравнений (1)—(6) заменим упрощенной

$$A_1 T = -X - A_0 N,\ \varepsilon = \hat{A}_2 T,\ \varepsilon = A_3 u,\ \kappa = A_4 u,\ M = \hat{A}_5 k,\ N = A_6 M, \tag{16}$$

которую можно свести к одному уравнению

$$N = \hat{B} N + \hat{\Phi}, \tag{17}$$

в котором $\hat{B} = -A_6 \hat{A}_5 A_4 A_3^{-1} \hat{A}_2 A_1^{-1} A_0$, $\hat{\Phi} = -A_6 \hat{A}_5 A_4 A_3^{-1} \hat{A}_2 A_1^{-1} X$ представляют собой последовательность элементарных операторов.

Итерационная процедура интегрирования уравнения (17) описана в [3]. В соответствии с методом простых итераций решение уравнения (16) можно искать по следующей схеме:

$$N^{(n+1)} = \hat{B} N^{(n)} + \hat{\Phi}. \tag{18}$$

При этом величина нулевого приближения $N^{(0)}$ берется произвольно. Если оператор $\hat{B}$ является сжимающим, то решение сходится к точному.

В (17) операторы A_1^{-1}, A_3^{-1} являются обратными к операторам безмоментных уравнений и уравнений бесконечно малых изгибаний. В том случае, когда A_1, A_3 являются операторами эллиптического типа, решения соответствующих уравнений существуют и удовлетворяют условиям непрерывности и гладкости. Однако в том случае, когда A_1, A_3 являются операторами параболического или эллиптического типа, решения уравнения с такими операторами могут иметь разрывы вдоль характеристик. Последним обстоятельством и порождены трудности, которые пришлось преодолеть в [4] при решении задачи для цилиндрической оболочки, подкрепленной стрингерами. С другой стороны, на основании физических соображений стрингеры могут быть «размазаны», поскольку характеристики являются линиями квазистационарности НДС. Стрингеры увеличивают стационарность. Имеются, таким образом, достаточно весомые основания исходить из асимптотических оценок полубезмоментной теории гладких оболочек [5] для построения полубезмоментной теории оболочки нулевой кривизны, подкрепленной стрингерами. Учитывая оценки (7) в предположении, что $a > 1/2$, оставим в уравнениях (16) главные слагаемые и запишем их в развернутом виде:

$$\frac{1}{A_1}\frac{\partial u_1}{\partial \alpha_1} = \varepsilon_1, \quad \frac{1}{A_2}\frac{\partial u_2}{\partial \alpha_2} + \frac{1}{A_1 A_2}\frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1} u + \frac{w}{R_2} = 0, \quad \frac{A_2}{A_1}\frac{\partial}{\partial \alpha_1}\frac{v}{A_2} + \frac{1}{A_2}\frac{\partial u}{\partial \alpha_2} = 0,$$

$$\kappa_1 = -\frac{1}{A_1^2}\frac{\partial^2 w}{\partial \alpha_1^2}, \quad \kappa_2 = -\frac{1}{A_2}\frac{\partial}{\partial \alpha_2}\frac{1}{A_2}\frac{\partial w}{\partial \alpha_2}, \quad \tau = -\frac{1}{A_1}\frac{\partial}{\partial \alpha_1}\frac{1}{A_2}\frac{\partial w}{\partial \alpha_2},$$

$$M_1 = \left[\frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)} + \frac{1}{A_2}\sum_{i=1}^{m} E_i I_i \delta\left(\alpha_2 - \alpha_{2i}\right)\right]\kappa_1 + \frac{\nu E h^3}{12\left(1-\nu^2\right)}\kappa_2,$$

$$H = \left[\frac{Eh^3}{12\left(1+\nu\right)}\tau + \frac{1}{2A_2}\sum_{i=1}^{m} G_i I_i^{(p)} \delta\left(\alpha_2 - \alpha_{2j}\right)\right]\tau,$$

$$M_2 = \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)}\left(\kappa_2 + \nu\kappa_1\right), \tag{19}$$

$$\frac{1}{A_2}\frac{\partial M_2}{\partial \alpha_2} - N_2 = 0, \quad \frac{1}{A_1}\frac{\partial M_1}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{A_2}\frac{\partial H}{\partial \alpha_2} + \frac{1}{A_1 A_2}\frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1}\left(M_1 - M_2\right) - N_1 = 0,$$

$$\frac{1}{A_1}\frac{\partial T_1}{\partial \alpha_1} + \frac{1}{A_2}\frac{\partial S}{\partial \alpha_2} + \frac{1}{A_1 A_2}\frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1}\left(T_1 - T_2\right) + X_1 = 0,$$

$$\frac{1}{A_2}\frac{\partial T_2}{\partial \alpha_2} + \frac{1}{A_1}\frac{\partial S}{\partial \alpha_1} + \frac{2}{A_1 A_2}\frac{\partial A_2}{\partial \alpha_1}S + X_2 = 0, \quad -\frac{T_2}{R_2} + \frac{1}{A_2}\frac{\partial N_2}{\partial \alpha_2} + Z = 0,$$

$$T_1 = \left[\frac{Eh}{1-\nu^2} + \frac{1}{A_2}\sum_{i=1}^{m} E_i F_i \delta\left(\alpha_2 - \alpha_{2i}\right)\right]\varepsilon_1 + \frac{\nu E h}{1-\nu^2}\varepsilon_2, \quad \mathrm{S} = \frac{Eh}{1+\nu}\omega, \quad \varepsilon_2 + \nu\varepsilon_1 = 0.$$

Уравнения (19) обобщают полубезмоментную теорию на случай оболочки нулевой кривизны, подкрепленной стрингерами.

Для круговой цилиндрической оболочки единичного радиуса, отнесенной к координатам $\alpha_1 = \xi$, $\alpha_2 = \theta$, система (19) сводится к одному разрешающему уравнению относительно w

$$\left(Eh + \sum_{i=1}^{m} E_i F_i \delta\left(\theta - \theta_i\right)\right)\frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)}\frac{\partial^8 w}{\partial \theta^8} = \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} - \frac{\partial X_2}{\partial \theta} + \frac{\partial X_2}{\partial \xi}\right), \tag{20}$$

где продольные жесткости оболочки и стержней суммируются.

Уравнение (20) имеет вид, зависящий от рассматриваемого интервала по θ. На стержнях, т. е. если $\theta = \theta_i$ при некотором фиксированном значении i надо его проинтегрировать по θ на малом интервале в соответствии с размерами поперечного сечения в пределах $\alpha_{2i} - \rho h^a$, $\alpha_{2i} + \rho h^a$.

Пренебрегая малыми величинами, получаем при $\theta = \theta_i$

$$h\left(Eh + \frac{E_i f_i}{2\rho_i}\right)\frac{\partial^4 \overline{w}}{\partial \xi^4} + \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)}\frac{\partial^8 \overline{w}}{\partial \theta^8} = \frac{\partial^2}{\partial \theta^2}\left(\frac{\partial^2 \overline{Z}}{\partial \theta^2} - \frac{\partial \overline{X}_2}{\partial \theta} + \frac{\partial \overline{X}_2}{\partial \xi}\right),$$

где черта над буквой означает операцию усреднения.

Учитывая малость интервала интегрирования, знак черты можно исключить, и тогда на стрингерах уравнение будет иметь вид

$$h\left(Eh + \frac{E_i f_i}{2\rho_i} \right) \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)} \frac{\partial^8 w}{\partial \theta^8} = \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} - \frac{\partial X_2}{\partial \theta} + \frac{\partial X_2}{\partial \xi} \right),$$

и на интервале между стрингерами

$$Eh \frac{\partial^4 w}{\partial \xi^4} + \frac{Eh^3}{12\left(1-\nu^2\right)} \frac{\partial^8 w}{\partial \theta^8} = \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial^2 Z}{\partial \theta^2} - \frac{\partial X_2}{\partial \theta} + \frac{\partial X_2}{\partial \xi} \right).$$

Эти уравнения примечательны тем, что указывают на невлияние большого числа параметров стрингера, входящих в исходные уравнения состояния (2) и (6), на основное напряженное состояние оболочки. В них не входит коэффициент жесткости стрингера на изгиб $E_i I_i$, но входит только коэффициент тангенциальной жесткости стрингера. Это указывает на то, что стрингер работает как волокно в балке-полоске на растяжение-сжатие.

Деформированное состояние оболочки со стрингерами с помощью этих уравнений можно моделировать следующим образом. Оболочка под нагрузкой деформируется так же, как и при отсутствии стрингеров. Затем на оболочку, как на упругое основание, накладываются стержни, задавая на линиях сопряжения прогибы в соответствии с нагрузкой, жесткостью оболочки как упругого основания и условиями закрепления краев. Частное решение первого уравнения будет иметь устранимые разрывы на стержнях, которые будут устранены с помощью уравнений обобщенного краевого эффекта [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гребень Е. С.* О деформациях и равновесии подкрепленных ребрами тонких оболочек // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1969. № 5. С. 106—114.

2. *Гольденвейзер А. Л.* Теория упругих тонких оболочек. М. : Наука, 1976. 512 с.

3. *Зверяев Е. М.* Декомпозиционные свойства принципа сжатых отображений в теории тонких упругих оболочек // Механика композиционных материалов и конструкций. Т. 3, № 2, 1997. С. 3—19.

4. *Амиро И. Я., Заруцкий В. А.* Теория ребристых оболочек. Киев : Наукова думка, 1980. 367 с.

5. *Зверяев Е. М., Макаров Г. И.* Выделение уравнений элементарных напряженных состояний из уравнений оболочек нулевой кривизны // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2012. № 4. С. 6—14.

1. *Greben' E. S.* O deformatsiyakh i ravnovesii podkreplennykh rebrami tonkikh obolochek // Izv. AN SSSR. Mekhanika tverdogo tela. 1969. № 5. S. 106—114.

2. *Gol'denveyzer A. L.* Teoriya uprugikh tonkikh obolochek. M. : Nauka, 1976. 512 s.

3. *Zveryaev E. M.* Dekompozitsionnye svoystva printsipa szhatykh otobrazheniy v teorii tonkikh uprugikh obolochek // Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy. T. 3, № 2, 1997. S. 3—19.

4. *Amiro I. Ya., Zarutskiy V. A.* Teoriya rebristykh obolochek. Kiev : Naukova dumka, 1980. 367 s.

5. *Zveryaev E. M., Makarov G. I.* Vydelenie uravneniy elementarnykh napryazhennykh sostoyaniy iz uravneniy obolochek nulevoy krivizny // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy. 2012. № 4. S. 6—14.

© Зверяев Е. М., Макаров Г. И., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Зверяев Е. М., Макаров Г. И. Модель оребренной оболочки // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 326—332.

УДК 624.072.33.072.14

В. Б. Зылев, И. В. Алферов

ДИНАМИЧЕСКИЕ ОПОРНЫЕ РЕАКЦИИ В МОСТОВОЙ ФЕРМЕ ПРИ ДВИЖЕНИИ ПОДВИЖНОЙ НАГРУЗКИ

Исследуется горизонтальная составляющая опорной реакции, возникающая в шарнирно-неподвижной опорной части мостовой фермы при движении подвижной нагрузки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: горизонтальная составляющая опорной реакции, мостовая ферма, подвижная нагрузка.

The authors investigate horizontal components of bearing reactions occurring in pinned-immovable bearing element of bridge beam under movement of rolling load.

K e y w o r d s: horizontal components of bearing reaction, bridge beam, rolling load.

В публикациях [1, 2] исследовано появление горизонтальной составляющей опорной реакции в балочных системах, совершающих свободные колебания. В результате исследования было выявлено, что горизонтальная составляющая опорной реакции при движении по первой форме собственных колебаний составляет примерно половину от вертикальной составляющей, а в некоторых случаях превышает ее. Так, например, для двухпролетной балки горизонтальная составляющая опорной реакции превышает вертикальную составляющую в 1,4 раза, а в случае балки переменного сечения — в 2,2 раза. Причина появления горизонтальной составляющей опорной реакции заключается в том, что опорная часть в реальных балках всегда располагается не на нейтральной оси, а сдвинута вниз. Для выявления этой особенности использовались расчетные схемы балок с пластинчатыми конечными элементами, что позволило моделировать опорные закрепления реальных систем. Те же качественные особенности характерны и для разрезных балочных ферм, причем амплитуда горизонтальной опорной реакции в отдельных примерах приближалась к амплитуде вертикальной опорной реакции. Интерес представляет исследование этого вопроса в случае вынужденных колебаний. Поэтому в данной работе исследуются динамические опорные реакции, возникающие в мостовой ферме при движении подвижной нагрузки.

Была создана расчетная схема, которая позволяет моделировать динамическое поведение системы: пролетное строение и движущийся экипаж. Как пролетное строение, так и движущийся экипаж представляют из себя деформируемую упругую систему. Силы взаимодействия между подвижным составом и пролетным строением получаются в результате интегрирования совместных уравнений движения пролетного строения и экипажа.

Для создания расчетной схемы была использована программа, разработанная на кафедре строительной механики [3].

Особенности использования расчетной схемы заключаются в том, что вся конструкция — как элементы подвижного состава, так и элементы фермы, — представляется в виде точечных сосредоточенных масс, соединенных стержнями, работающими на растяжение-сжатие. Силы взаимодействия между подвижным составом и пролетным строением получаются в результате решения контактной задачи [3].

Расчетная схема была получена таким образом, чтобы по возможности отразить как деформационные свойства, так и распределение масс в реальной системе. Были выбраны характеристики железнодорожной фермы с пролетом 55 м (рис. 1).

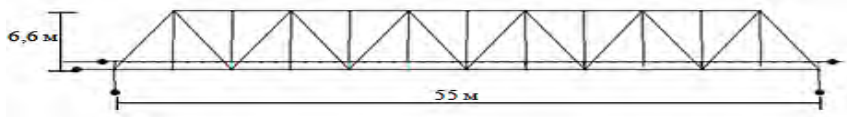


Рис. 1. Расчетная схема

Подвижной состав был представлен локомотивом ВЛ23 с одним нагруженным вагоном (рис. 2).

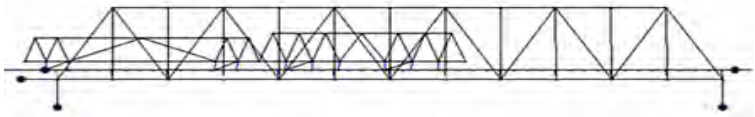


Рис. 2. Мостовая ферма с подвижным составом

Первый этап решения задачи заключается в определении усилий от собственного веса конструкции. Далее точкам экипажа сообщается начальная горизонтальная скорость, равная скорости движения поезда, дальнейшее движение его есть движение по инерции.

Способ решения уравнений движения, основанный на явной схеме интегрирования по Адамсу, дан в работе [4]. Он подробно описан в [3, 5]. Отметим только то, что задача решается с малым временным шагом. В каждый момент времени определяются координаты, скорости всех точечных масс, внутренние усилия во всех элементах системы и контактные силы взаимодействия между экипажем и фермой.

Результат решения представлен в виде графиков зависимости искомых факторов от времени. Например, на рис. 3 представлены начальные участки графиков (даны для отрезка времени 3 с) изменения искомых факторов от времени при скорости движения экипажа 100 км/ч.

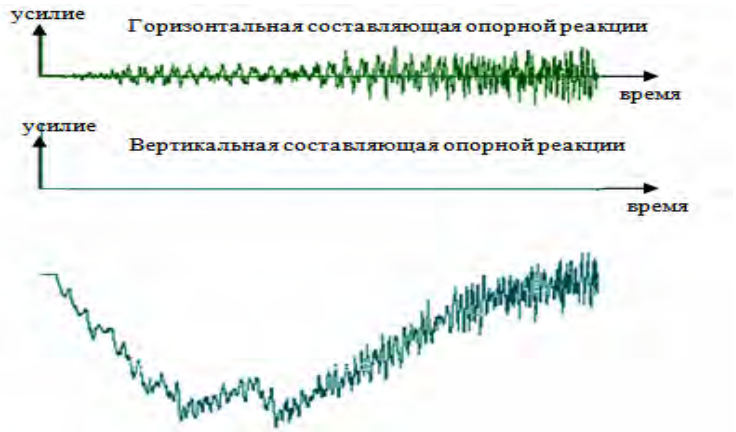


Рис. 3. Начальные участки графиков изменения искомых факторов

График вертикальной опорной реакции начинается со статического значения, равного половине веса фермы.

За период прохождения подвижной нагрузки программа фиксирует max и min значения усилий.

Для целей исследования наибольший интерес представляет горизонтальная составляющая опорной реакции. В табл. 1 приведена зависимость максимальных значений искомых факторов от скорости движения экипажа.

Таблица 1

Зависимость максимальных значений искомых факторов от скорости движения экипажа

Скорость движения экипажа, км/ч	$N_{гор}$, кН	$N_{верт}$, кН
5	21,9	–2539,9
10	47,2	–2548,6
30	122	–2566,6
50	206,9	–2597,5
70	165,5	–2566,1
100	460,9	–2662,2
120	274,7	–2605,7
140	336,3	–2625,7
160	382,8	–2675,4
180	444,4	–2745,1
200	772,6	–2712,7
250	686,4	–2794,2
300	1133,6	–2726,0
350	509,0	–2839,2
400	976,3	–2693,5
450	1145,0	–2831,6
500	1492,6	–3033,4

Поскольку решается весьма сложная многокомпонентная задача, то представляет интерес слежение за сходимостью по временному шагу. Так, в табл. 2 представлены результаты изменения искомых факторов при скорости движения экипижа 100 км/ч при разном шаге по времени.

Таблица 2

Результаты изменения искомых факторов при скорости движения экипижа 100 км/ч при разном шаге по времени

Шаг по времени Δt, с	$N_{гор}$, кН	$N_{верт}$, кН
0,000064977	460,90769	–2662,18822
0,000032489	460,49394	–2662,17242
0,000021659	460,47908	–2662,17082
0,000016244	460,47450	–2662,17121

Для рассмотренного типа подвижного состава реальная скорость не превышает значение 150 км/ч, тем не менее в табл. 1 помещены значения динамических реакций при больших скоростях. Приведенные значения показывают, что для диапазона скоростей, соответствующего скоростному транспорту, возникают большие динамические эффекты, в том числе резко возрастает горизонтальная составляющая опорной реакции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зылев В. Б.*, *Алферов И. В.* Труды V международной науч.-практ. конф. «Инженерные системы-2012». М. : РУДН, 2012. С. 105—109.

2. *Алферов И. В.* Труды науч.-практ. конф. «Наука МИИТа — транспорту». М. : МИИТ, 2012. С. 2—3.

3. *Зылев В. Б.* Вычислительные методы в нелинейной механике конструкций. М. : НИЦ «Инженер», 1999. С. 7, 39—42, 67—73.

4. *Зылев В. Б.*, *Штейн А. В.* Численное решение задачи о нелинейных колебаниях системы нитей // Строительная механика и расчет сооружений. 1986. № 6. С. 58—61.

5. *Александров А. В.*, *Потапов В. Д.*, *Зылев В. Б.* Строительная механика : в 2 кн. Кн. 2. Динамика и устойчивость упругих систем. М. : Высш. шк., 2008. 384 с.

1. *Zylev V. B*, *Alferov I. V.* Trudy V mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. «Inzhenernye sistemy-2012». M. : RUDN, 2012. S. 105—109.

2. *Alferov I. V.* Trudy nauch.-prakt. konf. «Nauka MIITa — transportu». M. : MIIT, 2012. S. 2—3.

3. *Zylev V. B.* Vychislitel'nye metody v nelineynoy mekhanike konstruktsiy. M. : NITs «Inzhener», 1999. S. 7, 39—42, 67—73.

4. *Zylev V. B.*, *Shteyn A. V.* Chislennoe reshenie zadachi o nelineynykh kolebaniyakh sistemy nitey // Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy. 1986. № 6. S. 58—61.

5. *Aleksandrov A. V.*, *Potapov V. D.*, *Zylev V. B.* Stroitel'naya mekhanika : v 2 kn. Kn. 2. Dinamika i ustoychivost' uprugikh sistem. M. : Vyssh. shk., 2008. 384 s.

© Зылев В. Б., Алферов И. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Зылев В. Б., *Алферов И. В.* Динамические опорные реакции в мостовой ферме при движении подвижной нагрузки // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 333—336.

УДК: 624.04

В. А. Игнатьев, А. В. Игнатьев

РЕШЕНИЕ ПЛОСКОЙ ЗАДАЧИ ТЕОРИИ УПРУГОСТИ ПО МЕТОДУ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ФОРМЕ КЛАССИЧЕСКОГО СМЕШАННОГО МЕТОДА

Описан предлагаемый авторами вариант алгоритма поблочного получения матрицы откликов плосконапряженного треугольного конечного элемента.

К л ю ч е в ы е с л о в а: метод конечных элементов, смешанная форма, треугольный конечный элемент, плоское напряженное состояние, матрица откликов.

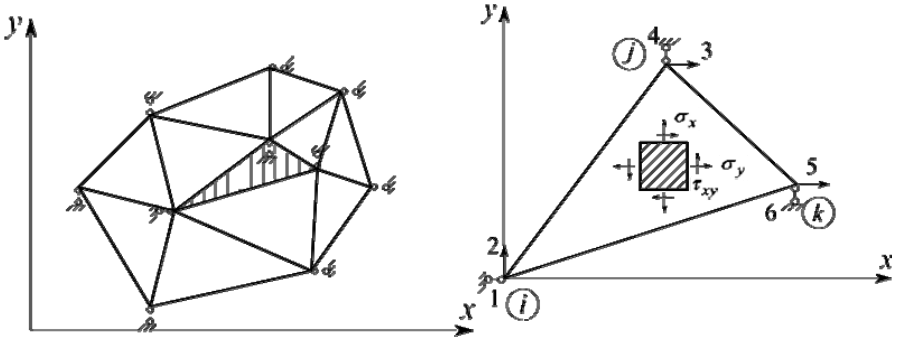
The authors describe the method of block matrix derivation of response of plain stress triangular finite element.

K e y w o r d s: finite element method, mixed form, triangular finite element, plain stress, matrix of responses.

В работах авторов [1, 2 и др.] показано, что МКЭ в форме смешанного метода имеет во многих случаях ряд преимуществ по сравнению с традиционным МКЭ в перемещениях. Однако для его широкого практического применения нужна библиотека конечных элементов и соответствующих им матриц откликов. В данной работе на основе идей, изложенных в [1, 2], предлагаются алгоритмы построения матрицы откликов плосконапряженного конечного элемента.

Простейшим конечным элементом при рассмотрении плоского напряженного состояния является треугольный элемент. Этот элемент нашел широкое применение в расчетах по МКЭ в форме метода перемещений и является хорошо изученным теоретически. Однако в классической смешанной форме МКЭ этот элемент рассматривался только в работах авторов [1, 2]. В данной статье дано дальнейшее развитие идей этих работ.

Основную систему МКЭ в форме смешанного метода получим из основной системы МКЭ в перемещениях путем удаления одной из двух линейных связей по направлениям глобальных осей координат в каждом из узлов сетки КЭ (рис. 1, *а*) и заменим ее усилием (рис. 1, *б*).



а *б*

Рис. 1

При этом следует соблюдать выполнение условий кинематической неизменяемости каждого из КЭ в построенной основной системе (см. рис. 1, *б*), т. е., чтобы каждый из КЭ был закреплен тремя не пересекающимися в одной точке связями или не был закреплен тремя параллельными связями.

Рассмотрим изотропный треугольный конечный элемент, находящийся в плоском напряженном состоянии (см. рис. 1, *б*). Для такого состояния аппроксимирующую функцию напряжений примем в виде

$$\varphi(x, y) = \alpha_1 x^2 + \alpha_2 y^2 + \alpha_3 x^2 y + \alpha_4 x y^2 + \alpha_5 x^3 + \alpha_6 y^3, \quad (1)$$

удовлетворяющем условию совместности деформаций

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = 0.$$

Функции, аппроксимирующие перемещения любой точки КЭ, примем в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_x(x, y) &= a_1 x + a_2 x^2 + a_3 xy, \\ u_y(x, y) &= b_1 y + b_2 y^2 + b_3 xy. \end{aligned} \quad (2)$$

Используя выражения (1), найдем величины напряжений и относительных деформаций КЭ.

Так как

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2},\ \sigma_y = \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2},\ \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y},$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E}(\sigma_x - \nu\sigma_y), \quad \varepsilon_y = \frac{1}{E}(\sigma_y - \nu\sigma_x), \quad \gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G} = \frac{2\tau_{xy}(1+\nu)}{E},$$

то после выполнения дифференцирования получаем:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= 2\alpha_2 + 2\alpha_4 x + 6\alpha_6 y, \\ \sigma_y &= 2\alpha_1 + 2\alpha_3 y + 6\alpha_5 x, \\ \tau_{xy} &= -(2\alpha_3 x + 2\alpha_4 y); \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{2}{E}\left[(\alpha_2 - \nu\alpha_1) + (\alpha_4 - 3\nu\alpha_5)x + (3\alpha_6 - \nu\alpha_3)y\right], \\ \varepsilon_y &= \frac{2}{E}\left[(\alpha_1 - \nu\alpha_2) + (3\alpha_5 - \nu\alpha_4)x + (\alpha_3 - 3\nu\alpha_6)y\right], \\ \gamma_{xy} &= -\frac{2}{G}\left[\alpha_3 x + \alpha_4 y\right] = -\frac{4(1+\nu)}{E}\left[\alpha_3 x + \alpha_4 y\right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Точно также, используя выражения (2) и зависимости $\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial y}, \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x}$, находим

$$\varepsilon_x = a_1 + 2a_2 x + a_3 y,$$
$$\varepsilon_y = b_1 + 2b_2 y + b_3 x, \qquad (5)$$
$$\gamma_{xy} = a_3 x + b_3 y.$$

Из сравнения выражений для относительных деформаций в (4) и (5) видно, что они имеют одинаковый вид линейных функций.

Выразим коэффициенты α через напряжения в узловых точках, подставив в (3) координаты узлов:

$$\{\sigma_{x,t}\} = \left[\Phi_1(x_t, y_t)\right]\{\alpha_{2n}\},$$
$$\{\sigma_{y,t}\} = \left[\Phi_2(x_t, y_t)\right]\{\alpha_{2n-1}\}, \qquad (n = 1, 2, 3;\ t = i, j, k). \qquad (6)$$

Здесь

$$\left[\Phi_1(x_t, y_t)\right] = 2\begin{bmatrix} 1 & x_i & 3y_i \\ 1 & x_j & 3y_j \\ 1 & x_k & 3y_k \end{bmatrix}, \quad \left[\Phi_2(x_t, y_t)\right] = 2\begin{bmatrix} 1 & y_i & 3x_i \\ 1 & y_j & 3x_j \\ 1 & y_k & 3x_k \end{bmatrix},$$

$$\{\alpha_{2n}\} = \lfloor \alpha_2, \alpha_4, \alpha_6 \rfloor^T, \quad \{\alpha_{2n-1}\} = \lfloor \alpha_1, \alpha_3, \alpha_5 \rfloor^T.$$

Из (6) следует:

$$\{\alpha_{2n}\} = \left[\Phi_1(x_t, y_t)\right]^{-1}\{\sigma_{x,t}\}, \quad \{\alpha_{2n-1}\} = \left[\Phi_2(x_t, y_t)\right]^{-1}\{\sigma_{y,t}\}. \qquad (7)$$

Задаваясь последовательно в (7) единичными значениями основных неизвестных $\sigma_{y,i}, \sigma_{x,j}, \sigma_{x,k}$, найдем соответствующие этим воздействиям значения коэффициентов α:

$$\{\alpha_{2n-1}^{(i)}\} = \left[\Phi_2(x_t, y_t)\right]^{-1}\lfloor 1, 0, 0 \rfloor^T \text{ при } \sigma_{y,i} = 1,$$
$$\{\alpha_{2n}^{(j)}\} = \left[\Phi_1(x_t, y_t)\right]^{-1}\lfloor 0, 1, 0 \rfloor^T \text{ при } \sigma_{x,j} = 1, \qquad (8)$$
$$\{\alpha_{2n}^{(k)}\} = \left[\Phi_1(x_t, y_t)\right]^{-1}\lfloor 0, 0, 1 \rfloor^T \text{ при } \sigma_{x,k} = 1.$$

Подставив (8) в (3) и (4), находим соответствующие поля напряжений и относительных деформаций:

$$\tilde{q}_4 = \tilde{\sigma}_{y,i} = 2\lfloor f_2(x, y) \rfloor\{\alpha_{2n-1}^{(i)}\}, \quad \tilde{\tau}_4 = \tilde{\tau}_{xy}^{(y,i)} = -2\alpha_3^{(i)} x,$$
$$\tilde{q}_5 = \tilde{\sigma}_{x,j} = 2\lfloor f_1(x, y) \rfloor\{\alpha_{2n}^{(j)}\}, \quad \tilde{\tau}_5 = \tilde{\tau}_{xy}^{(x,j)} = -2\alpha_4^{(j)} y, \qquad (9)$$
$$\tilde{q}_5 = \tilde{\sigma}_{x,k} = 2\lfloor f_2(x, y) \rfloor\{\alpha_{2n}^{(k)}\}, \quad \tilde{\tau}_6 = \tilde{\tau}_{xy}^{(x,k)} = -2\alpha_4^{(k)} y.$$

$$\tilde{\varepsilon}_4 = \tilde{\varepsilon}_{y,i} = \frac{2}{E}\lfloor f_2(x, y) \rfloor\{\alpha_{2n-1}^{(i)}\}, \quad \tilde{\gamma}_4 = \gamma_{xy}^{(y,i)} = -\frac{4(1+\nu)}{E}\alpha_3^{(i)} x,$$
$$\tilde{\varepsilon}_5 = \tilde{\varepsilon}_{x,j} = \frac{2}{E}2\lfloor f_1(x, y) \rfloor\{\alpha_{2n}^{(j)}\}, \quad \tilde{\gamma}_5 = \gamma_{xy}^{(x,j)} = -\frac{4(1+\nu)}{E}\alpha_4^{(j)} y, \qquad (10)$$
$$\tilde{\varepsilon}_6 = \tilde{\varepsilon}_{x,k} = \frac{2}{E}2\lfloor f_2(x, y) \rfloor\{\alpha_{2n}^{(k)}\}, \quad \tilde{\gamma}_4 = \gamma_{xy}^{(x,k)} = -\frac{4(1+\nu)}{E}\alpha_4^{(k)} y.$$

Здесь $\lfloor f_1(x,y)\rfloor = \lfloor 1, x, 3y\rfloor$, $\lfloor f_2(x,y)\rfloor = \lfloor 1, y, 3x\rfloor$.

С учетом переобозначений, показанных на рис. 2 и в выражениях (9), элементы блока δ матрицы откликов КЭ определяются на основании принципа возможных перемещений выражением

$$\delta_{s,t} = \int_{\Omega} (\tilde{q}_s \tilde{\varepsilon}_t + \tilde{\tau}_s \tilde{\gamma}_t) d\Omega, \quad (s = 4, 5, 6; t = 4, 5, 6). \tag{11}$$

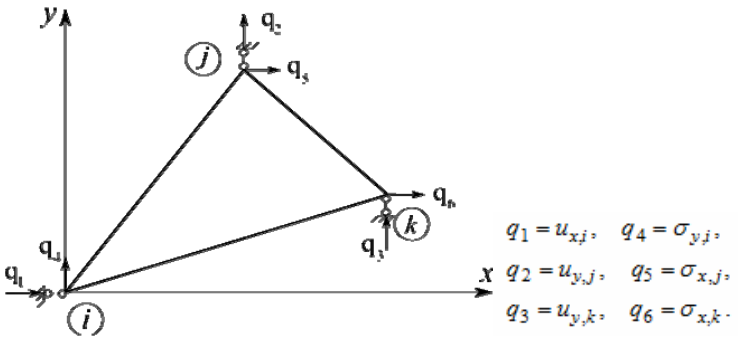


Рис. 2

При использовании второго варианта коэффициенты a и b в (2) выражаются через u_x, u_y в узловых точках конечного элемента

$$\begin{aligned} \{u_{x,t}\} &= [\Phi_3(x_t, y_t)]\{a_n\}, \\ \{u_{y,t}\} &= [\Phi_4(x_t, y_t)]\{b_n\}, \end{aligned} \quad (n = 1, 2, 3;\ t = i, j, k). \tag{12}$$

Здесь

$$[\Phi_3(x_t, y_t)] = 2\begin{bmatrix} x_i & x_i^2 & x_i y_i \\ x_j & x_j^2 & x_j y_j \\ x_k & x_k^2 & x_k y_k \end{bmatrix}, \quad [\Phi_4(x_t, y_t)] = 2\begin{bmatrix} y_i & y_i^2 & x_i y_i \\ y_j & y_j^2 & x_j y_j \\ y_k & y_k^2 & x_k y_k \end{bmatrix},$$

$$\{a_n\} = \lfloor a_1, a_2, a_3\rfloor^T, \quad \{b_n\} = \lfloor b_1, b_3, b_5\rfloor^T.$$

Из (12) следует

$$\{a_n\} = [\Phi_3(x_t, y_t)]^{-1}\{u_{x,t}\}, \quad \{b_n\} = [\Phi_4(x_t, y_t)]^{-1}\{u_{y,t}\}. \tag{13}$$

Задаваясь в (13) единичными значениями кинематических неизвестных ($\tilde{u}_{x,i} = \tilde{q}_1 = 1$, $\tilde{u}_{y,j} = \tilde{q}_2 = 1$, $\tilde{u}_{y,k} = \tilde{q}_3 = 1$), найдем соответствующие этим единичным воздействиям векторы $\{a_n\}$ и $\{b_n\}$:

$$\begin{aligned} \{\tilde{a}_{n,1}\} &= [\Phi_3(x_t, y_t)]^{-1}\lfloor 1, 0, 0\rfloor^T, \\ \{\tilde{b}_{n,2}\} &= [\Phi_4(x_t, y_t)]^{-1}\lfloor 0, 1, 0\rfloor^T, \\ \{\tilde{b}_{n,3}\} &= [\Phi_4(x_t, y_t)]^{-1}\lfloor 0, 0, 1\rfloor^T. \end{aligned} \tag{14}$$

Подставив эти результаты в (5), получим выражения для соответствующих деформаций и напряжений:

$$\begin{aligned}
&\tilde{\varepsilon}_1 = \tilde{\varepsilon}_{x,1} = \lfloor 1, 2x, y \rfloor \{\tilde{a}_{n,1}\}, \quad \tilde{\gamma}_1 = \gamma_{xy}^{(1)} = \lfloor 0, 0, x \rfloor \{\tilde{a}_{n,1}\}, \\
&\tilde{\varepsilon}_2 = \tilde{\varepsilon}_{y,2} = \lfloor 1, 2y, x \rfloor \{\tilde{b}_{n,2}\}, \quad \tilde{\gamma}_2 = \gamma_{xy}^{(2)} = \lfloor 0, 0, y \rfloor \{\tilde{b}_{n,2}\}, \\
&\tilde{\varepsilon}_3 = \tilde{\varepsilon}_{y,3} = \lfloor 1, 2y, x \rfloor \{\tilde{b}_{n,3}\}, \quad \tilde{\gamma}_3 = \gamma_{xy}^{(3)} = \lfloor 0, 0, y \rfloor \{\tilde{b}_{n,3}\}.
\end{aligned} \tag{15}$$

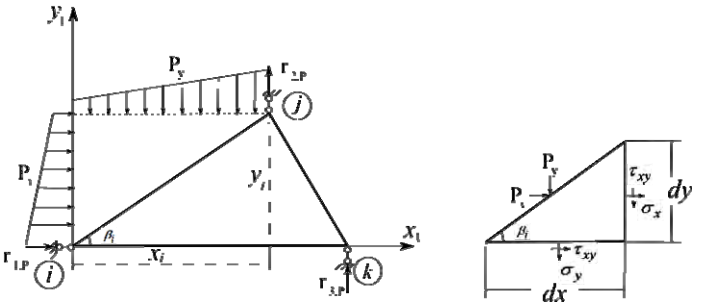
$$\begin{aligned}
&\tilde{\sigma}_{x,1} = \frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu}\{\tilde{\varepsilon}_1\}, \quad \tilde{\tau}_1 = G\{\tilde{\gamma}_1\}, \\
&\tilde{\sigma}_{y,2} = \frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu}\{\tilde{\varepsilon}_2\}, \quad \tilde{\tau}_2 = G\{\tilde{\gamma}_2\}, \\
&\tilde{\sigma}_{y,3} = \frac{2G(1-\nu)}{1-2\nu}\{\tilde{\varepsilon}_3\}, \quad \tilde{\tau}_3 = G\{\tilde{\gamma}_3\}.
\end{aligned} \tag{16}$$

Используя выражения (9), (10) и (15), (16), находим:

$$\begin{aligned}
&\tilde{r}_{t,s} = \int_\Omega (\tilde{\sigma}_s \tilde{\varepsilon}_t + \tilde{\tau}_s \tilde{\gamma}_t) d\Omega, \\
&\tilde{\delta}_{t,s} = \int_\Omega (\tilde{\sigma}_t \tilde{\varepsilon}_s + \tilde{\tau}_t \tilde{\gamma}_s) d\Omega,
\end{aligned} \quad (s = 1, 2, 3; t = 4, 5, 6). \tag{17}$$

Рассмотрим далее нахождение элементов вектора внешних нагрузок на конечный элемент. На рис. 3, *а* показана линейно распределенная по грани *ij* нагрузка

$$P_x = P_{x,i}\left(1 + k_1 \frac{y}{y_j}\right), \quad P_y = P_{y,i}\left(1 + k_2 \frac{x}{x_j}\right). \tag{18}$$



а *б*

Рис. 3

Реакции в связях статически определимой основной системы от этой нагрузки находятся из условий равновесия конечного элемента:

$$\begin{aligned}
&r_{1,P} = \frac{1}{2} P_{x,i}(2 + k_1) y_i, \\
&r_{2,P} = -r_{3,P} = \frac{1}{x_k - x_j}\left[P_{x,i} y_j^{\,2}\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{6}k_1\right) + P_{y,i} x_j^{\,2}\left(\frac{1}{2} + \frac{1}{6}k_2\right)\right].
\end{aligned} \tag{19}$$

Из уравнений равновесия бесконечно малого элемента, прилегающего к наружной стороне *ij* контура КЭ (рис. 3, *б*), следует:

$$P_x = -(\sigma_x + \tau_{xy}\mathrm{ctg}\beta_i),\ P_y = -(\sigma_y + \tau_{yx}\mathrm{tg}\beta_i). \qquad (20)$$

Подставив в эти выражения $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ из (20), получаем:

$$P_x = -[(2\alpha_2 + 2\alpha_4 x + 6\alpha_6 y) - (2\alpha_3 x + 2\alpha_4 y)\mathrm{ctg}\beta_i],$$
$$P_y = -[(2\alpha_1 + 2\alpha_3 y + 6\alpha_5 x) - (2\alpha_3 x + 2\alpha_4 y)\mathrm{tg}\beta_i], \qquad (21)$$

где $\mathrm{ctg}\beta_i = \dfrac{x_j}{y_j}$, $\mathrm{tg}\beta_i = \dfrac{y_j}{x_j}$.

Значение коэффициентов α_s в (21) найдем, используя граничные условия в узлах контура КЭ:

1. При $x = 0, y = 0$: $P_x = P_{x,i}, P_y = P_{y,i}$.

2. При $x = j, y = j$: $P_x = P_{x,j} = P_{x,i}(1 + k_1), P_y = P_{y,j} = P_{y,i}(1 + k_2)$.

3. При $x = k, y = k$: $P_x = P_{x,k} = 0, P_y = P_{y,k} = 0$.

Выражения (21) при выполнении этих условий приводят к системе уравнений:

1. $P_{x,i} = -2\alpha_2$.

2. $P_{y,i} = -2\alpha_1$.

3. $P_{x,j} = P_{x,i}(1+k_1)P_x = -\left[(2\alpha_2 + 2\alpha_4 x_j + 6\alpha_6 y_j) - (2\alpha_3 x_j + 2\alpha_4 y_j)\dfrac{x_j}{y_j}\right]$.

4. $P_{y,j} = P_{y,i}(1+k_2) = -\left[(2\alpha_1 + 2\alpha_3 y_j + 6\alpha_5 x_j) - (2\alpha_3 x_j + 2\alpha_4 y_j)\dfrac{y_j}{x_j}\right]$.

5. $P_{x,k} = 0 = -\left[(2\alpha_2 + 2\alpha_4 x_k + 6\alpha_6 y_k) - (2\alpha_3 x_k + 2\alpha_4 y_k)\dfrac{x_j}{y_j}\right]$.

6. $P_{y,k} = 0 = -\left[(2\alpha_1 + 2\alpha_3 y_k + 6\alpha_5 x_k) - (2\alpha_3 x_k + 2\alpha_4 y_k)\dfrac{y_j}{x_j}\right]$.

Решая эту систему уравнений, находим:

$$\alpha_1 = -\frac{1}{2}P_{y,i},\ \alpha_2 = -\frac{1}{2}P_{x,i},$$

$$\alpha_3 = -\frac{1}{2y_i\left(1 + \dfrac{y_j^2}{x_j^2}\right)}\left[P_{x,i}\left(1 + k_1\frac{y_j}{x_j x_k}\right) - P_{y,i}\left(1 - \frac{x_j}{x_k}\right)\right],$$

$$\alpha_4 = \frac{P_{x,i}}{2x_k} + \alpha_3 \frac{x_j}{y_j}, \quad \alpha_5 = \frac{1}{3}\left(\frac{P_{y,i}}{2x_k} + \alpha_3 \frac{y_j}{x_j} \right),$$

$$\alpha_6 = -\frac{P_{x,i}}{6y_j}\left(k_1 + \frac{x_j}{x_k} \right) + \alpha_3 \frac{{x_j}^2}{3y_j}.$$

По известным α_s получаем выражения для полей напряжений и относительных деформаций $\sigma_{x,P}, \sigma_{y,P}, \tau_{xy,P}, \varepsilon_{x,P}, \varepsilon_{y,P}, \gamma_{xy,P}$.

Тогда $\delta_{s,P} = \int\limits_{\Omega} (\sigma_{x,P}\tilde{\varepsilon}_{x,s} + \sigma_{y,P}\tilde{\varepsilon}_{y,s} + \tau_{xy,P}\tilde{\gamma}_{xy,s}) d\Omega \quad (s = 4, 5, 6)$.

Построенная в локальной системе координат, матрица откликов d_1 преобразовывается в матрицу откликов в глобальной системе координат с помощью матрицы перехода Λ:

$$[d] = [\Lambda]^T [d_1][\Lambda].$$

Построение системы разрешающих уравнений в смешанной форме МКЭ рассмотрено в работе [1].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Игнатьев В. А., Игнатьев А. В., Жиделев А. В.* Смешанная форма метода конечных элементов в задачах строительной механики. Волгоград : ВолгГАСУ, 2006. 172 с.

2. *Игнатьев В. А., Игнатьев А. В.* Усовершенствованный алгоритм построения матрицы откликов для изгибаемого треугольного конечного элемента // Состояние, проблемы и перспективы развития социально-ориентированного строительного комплекса на региональном уровне. Волгоград : ВолгГАСУ, 2012. С. 74—81.

1. *Ignat'ev V. A., Ignat'ev A. V., Zhidelev A. V.* Smeshannaya forma metoda konechnykh elementov v zadachakh stroitel'noy mekhaniki. Volgograd : VolgGASU, 2006. 172 s.

2. *Ignat'ev V. A., Ignat'ev A. V.* Usovershenstvovannyy algoritm postroeniya matritsy otklikov dlya izgibaemogo treugol'nogo konechnogo elementa // Sostoyanie, problemy i perspektivy razvitiya sotsial'no-orientirovannogo stroitel'nogo kompleksa na regional'nom urovne. Volgograd : VolgGASU, 2012. S. 74—81.

© Игнатьев В. А., Игнатьев А. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Игнатьев В. А., Игнатьев А. В. Решение плоской задачи теории упругости по методу конечных элементов в форме классического смешанного метода // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 337—343.

УДК 624.04

Н. И. Карпенко, В. А. Ерышев, Е. В. Латышева, А. С. Бондаренко

ДЕФОРМАЦИИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ЭЛЕМЕНТА С УЧЕТОМ УСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

Устанавливается аналитическая связь между усилиями и деформациями железобетонного образца с симметричным армированием при осевом растяжении с учетом деформаций и напряжений в арматуре и бетоне от усадки бетона. Представлены результаты экспериментальных исследований, включающие: развитие деформаций от усадки бетона в бетонных и такого же размера железобетонных образцах во времени; значения усилий трещинообразования с учетом деформаций от усадки бетона; опытные значения деформаций арматуры и бетона до и после образования трещин.

К л ю ч е в ы е с л о в а: усадочные деформации, напряжение, бетон, экспериментальные исследования.

The authors establish analytical connection between effort and strain of reinforced concrete pattern with symmetrical reinforcement under axial tension taking into account strains and stresses in the reinforcement and concrete of concrete shrinkage. Presented are the results of experimental studies including the development of shrinkage strain in concrete and the same size reinforced concrete patterns through time; the values of effort of crack formation in respect of strain of concrete shrinkage; experimental values of deformation of reinforcement and concrete before and after cracking.

K e y w o r d s: shrinkage deformations, tension, concrete, experimental research.

Большинство бетонов подвержено усадке. В бетонном образце деформации усадки развиваются свободно и достигают максимальной величины для данного периода времени. При наличии препятствий для свободного укорочения бетона (например, в виде арматуры) в нем образуются растягивающие напряжения и могут возникнуть трещины. В нормативных документах напряжения в арматуре от усадки бетона вводятся в расчетные формулы определения усилий трещинообразования. До образования и после образования трещин усадочные деформации железобетонного элемента не учитываются. При производстве испытаний конструкций усадочные деформации и напряжения в бетоне и арматуре остаются вне поля зрения экспериментатора. Между тем параметры силового нагружения суммируются с параметрами от усадки бетона, которые должны приниматься за нулевые отсчеты измеряемых величин в новой системе координат. В настоящей работе устанавливается связь силовых и усадочных параметров с деформациями железобетонного элемента с симметричным армированием при осевом нагружении. Используя полученные зависимости и опытные данные, определены величины деформаций и напряжений в бетоне и арматуре от усадки бетона, установлены некоторые особенности деформирования бетона и арматуры в блоках между трещинами после их образования.

Определение деформаций железобетонного элемента с учетом усадочных деформаций в бетоне. Относительные деформации бетона ε_b, вызывающие его растяжение или сжатие, равны разности деформаций железобетонного элемента ε и деформаций от усадки бетона ε_{sh}:

$$\varepsilon_b = \varepsilon - \varepsilon_{sh}, \qquad (1)$$

где относительные деформации ε и ε_{sh} подставляются со своими знаками.

Напряжения в бетоне связаны с деформациями зависимостью

$$\varepsilon_b = \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b}, \text{ или } \sigma_b = \varepsilon_b E_b \nu_b, \tag{2}$$

где E_b — начальный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении; $\nu_{b(bt)}$ — коэффициент упругопластических деформаций бетона.

Из закона (1) с учетом (2) выразим деформации железобетонного элемента через напряжения в бетоне:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_b}{E_b \nu_b} + \varepsilon_{sh}, \text{ или } \sigma_b = (\varepsilon - \varepsilon_{sh}) E_b \nu_b, \tag{3}$$

то же через напряжения в арматуре:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_s}{E_s}, \text{ или } \sigma_s = \varepsilon\, E_s. \tag{4}$$

Зависимости (1—4), записанные для сжатия, относятся и к растяжению. В первых трех уравнениях следует индекс b заменить на индекс bt, обозначающий растяжение. Усилие, которое воспринимает железобетонный элемент, составляет

$$N = \sigma_b A_b + \sigma_s A_s, \tag{5}$$

где A_s — площадь арматуры; A_b — площадь поперечного сечения элемента.

Вносим в уравнение (5) зависимости (3) и (4), получаем

$$\varepsilon\left(E_s \nu_s A_s + E_b \nu_b A_b\right) = N + \varepsilon_{sh} E_b \nu_b A_b. \tag{6}$$

Из уравнения (6) определяются деформации железобетонного элемента:

$$\varepsilon = \frac{N + \varepsilon_{sh} E_b \nu_b A_b}{E_s \nu_s A_s + E_b \nu_b A_b}. \tag{7}$$

Подставляя зависимость (7) в (3), находим напряжения в бетоне:

$$\sigma_b = \frac{\left(N - \varepsilon_{sh} E_s \nu_s A_s\right) E_b \nu_b}{E_s \nu_s A_s + E_b \nu_b A_b}, \tag{8}$$

а подставляя (7) в (4), находим напряжения в арматуре:

$$\sigma_s = \frac{\left(N - \varepsilon_{sh} E_b \nu_b\right) E_s \nu_s}{E_s \nu_s A_s + E_b \nu_b A_b}. \tag{9}$$

Рассмотрим частный случай, когда $N = 0$. Уравнение (5) запишется в следующем виде:

$$\sigma_{s,sh} A_s + \sigma_{bt,sh} A_b = 0, \tag{10}$$

где $\sigma_{bt,sh}$ и $\sigma_{s,sh}$ соответственно напряжение растяжения в бетоне и сжатия в арматуре от усадки бетона.

Из уравнения (10) следует

$$\sigma_{bt,sh} = -\sigma_{s,sh}\mu\,, \tag{11}$$

где $\mu = A_s / A_b$ — коэффициент армирования.

Соотношение (1) запишется в виде

$$\varepsilon_{bt,sh} = \varepsilon_{sh,r} - \varepsilon_{sh}\,, \tag{12}$$

где $\varepsilon_{bt,sh}$ и $\varepsilon_{sh,r}$ — соответственно относительные деформации растяжения в бетоне и относительные деформации сжатия арматуры в железобетонном элементе от усадки бетона ($\varepsilon_{sh,r} = \varepsilon$).

Напряжения в бетоне связаны с деформациями зависимостью

$$\varepsilon_{bt,sh} = \frac{\sigma_{bt,sh}}{E_b \nu_{bt,sh}}\,, \text{ или } \sigma_{bt,sh} = \varepsilon_{bt,sh} E_{b,} \nu_{bt,sh}\,, \tag{13}$$

где $\nu_{bt,sh}$ — коэффициент упругопластических деформаций бетона при усадке.

Из закона (12) с учетом (13) выразим деформации железобетонного элемента через напряжения в бетоне:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{bt,sh}}{E_b \nu_{bt,sh}} + \varepsilon_{sh}\,, \text{ или } \sigma_{bt,sh} = (\varepsilon - \varepsilon_{sh}) E_b \nu_{bt,sh}\,, \tag{14}$$

то же через напряжения в арматуре:

$$\varepsilon = \frac{\sigma_{s,sh}}{E_s}, \text{ или } \sigma_{s,sh} = \varepsilon\, E_s\,. \tag{15}$$

Подставляя (14) и (15) в уравнение (10), получим

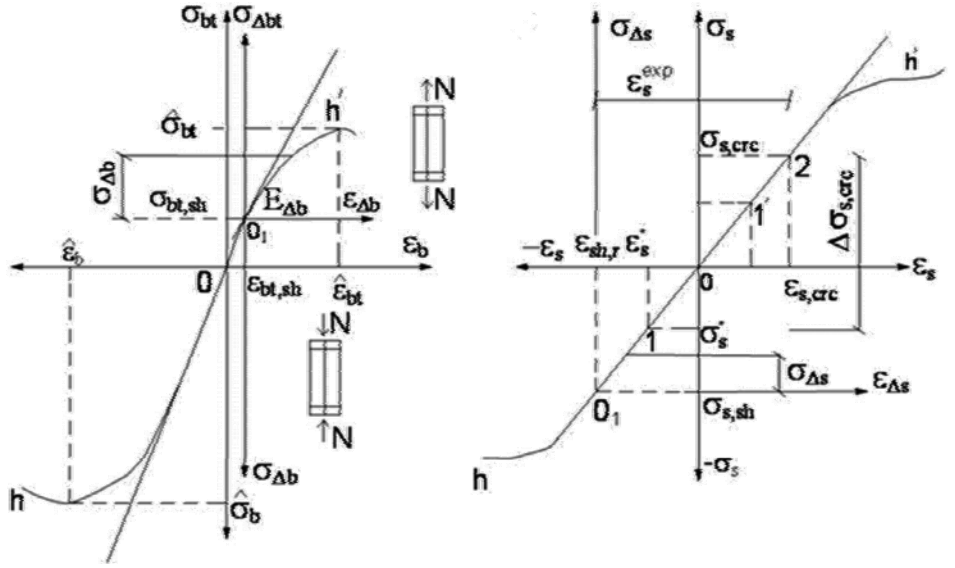
$$\varepsilon\left(E_b \nu_{bt,sh} A_b + E_s A_s\right) - \varepsilon_{sh} E_b A_b \nu_{bt,sh} = 0\,,$$

откуда

$$\varepsilon = \frac{\varepsilon_{sh}}{1 + \alpha\mu / \nu_{bt,sh}}\,, \text{ где } \alpha = \frac{E_s}{E_b}. \tag{16}$$

В формуле (16) неизвестными параметрами являются: ε_{sh} — свободные деформации усадки бетона и коэффициент упругопластических деформаций $\nu_{bt,sh}$. Значение коэффициента $\nu_{bt,sh}$ можно определить с помощью итерационного процесса, последовательным приближением по $\sigma_{bt,sh}$, используя известные зависимости для $\nu_{b(bt)}$ в редакции [1]. Деформации усадки бетона ε_{sh} зависят от многих факторов, включая составы бетона, режимы хранения после изготовления, размеры поперечного сечения и ряд других факторов. Поэтому значения деформаций ε_{sh} к моменту времени t могут определяться опытным путем, прямыми измерениями на стандартных образцах и отвечать конкретным условиям твердения бетона.

Расчет упрощается, если силовые деформации и напряжения в виде конечных приращений отсчитываются в новой системе координат. Начало новой системы координат переносится относительно исходной на величину деформаций и напряжений от усадки бетона (из точки 0 в точку 0_1, рис. 1).



а *б*

Рис. 1. К описанию диаграмм бетона (*а*) и арматуры (*б*) в конечных приращениях

Координаты т. 0_1 определяют напряженно-деформированное состояние сжатия арматуры и растяжения бетона в железобетонном элементе от усадки бетона и являются начальными параметрами построения диаграмм, в том числе нулевыми отчетами для деформаций, измеряемых по приборам в экспериментальных исследованиях. При производстве испытаний конструкций усадочные деформации $\varepsilon_{sh,r}$ и $\varepsilon_{bt,sh}$ остаются, как правило, вне поля зрения экспериментатора и во внимание не принимаются, диаграммы строятся из начала координат (т. 0). Участок 00_1 на диаграммах характеризует историю формирования напряженного состояния элемента при наборе прочности бетона в течение данного времени после распалубливания от усадки бетона. С ростом нагрузки *N* растяжения или сжатия бетон и арматура деформируются совместно, их приращения деформации $\varepsilon_{\Delta b}$ и $\varepsilon_{\Delta s}$ равны приращениям деформации железобетонного образца ε_{Δ}. Этим деформациям на диаграммах соответствуют конкретные величины приращений напряжении $\sigma_{\Delta b}$ и $\sigma_{\Delta s}$.

Новые системы координат для бетона и арматуры связаны с исходной очевидными равенствами:

$$\sigma_{\Delta b} = \sigma_b - \sigma_{bt,sh};\ \varepsilon_{\Delta b} = \varepsilon_{bt} - \varepsilon_{bt,sh};$$
$$\sigma_{\Delta s} = \sigma_s - \sigma_{s,sh};\ \varepsilon_{\Delta s} = \varepsilon_s - \varepsilon, \qquad (17)$$

где $\sigma_{bt,sh}, \varepsilon_{bt,sh}$ — координаты точки 0_1 в исходной системе $\sigma_b 0 \varepsilon_b$; $\sigma_{s,sh}, \varepsilon$ — координаты точки 0_1 в исходной системе $\sigma_s 0 \varepsilon_s$.

Кроме того, изменяются параметры вершины диаграммы для бетона:

$$\hat{\sigma}_{\Delta b} = \hat{\sigma}_b - \sigma_{bt,sh};\ \ \hat{\varepsilon}_{\Delta b} = \hat{\varepsilon}_{bt} - \varepsilon_{bt,sh}.$$

Из условия совместности деформаций бетона и арматуры имеем:

$$\varepsilon_{\Delta b} = \frac{\sigma_{\Delta b}}{E_{\Delta b}\nu_{\Delta b}} = \varepsilon_{\Delta s} = \frac{\sigma_{\Delta s}}{E_s \nu_s} = \varepsilon_{\Delta}, \tag{18}$$

где $E_{\Delta b}$ — касательный модуль в точке 0_1, который приравнивается к начальному для новой системы координат $E_{\Delta b} = E^0_{\Delta b}$; $\nu_{\Delta b}$ — коэффициент упругопластических деформаций бетона в новой системе координат, который вычисляется в редакции [1], где лишь формально всем величинам присваивается индекс Δ (E_b — заменяется на $E_{\Delta b}$, η на $\eta_{\Delta} = \sigma_{\Delta b} / \hat{\sigma}_{\Delta b}$ и т. д.); ε_{Δ} — деформации железобетонного элемента в новой системе координат от осевой нагрузки.

В приращениях напряжений уравнение равновесия (5) записывается в виде

$$\Delta N = \sigma_{\Delta b} A_b + \sigma_{\Delta s} A_s. \tag{19}$$

Выражая приращения напряжений $\sigma_{\Delta b}$ и $\sigma_{\Delta s}$ в (18) через деформации ε_{Δ} и подставляя в уравнение равновесия (19), получаем

$$\varepsilon_{\Delta} = \frac{\Delta N}{E_{\Delta b} A_b \nu_{\Delta b} + E_s A_s \nu_{\Delta s}}. \tag{20}$$

При сжатии элемента растягивающие напряжения в бетоне от усадки уменьшаются до нуля, а затем переходят в сжимающие напряжения (ветвь $0_1 0h$). В арматуре элемента сжимающие напряжения от усадки бетона будут суммироваться с силовыми напряжениями от нагрузки (ветвь $0_1 h$). Наиболее важным с позиции приложения результатов исследований к оценке трещинообразования в растянутой зоне изгибаемых и внецентренно сжатых элементов является осевое растяжение элемента.

При осевом растяжении диаграмма бетона представляется ветвью $0_1 h'$, когда деформации и напряжения увеличиваются от их усадочных величин в т. 0_1 до предельных значений в вершине диаграммы (т. h'): $\varepsilon_{bt} = \hat{\varepsilon}_{bt}$ и $\sigma_{bt} = \hat{\sigma}_{bt} = R_{bt}$, при которых в образце образуются поперечные трещины. Чем больше усадочные напряжения в бетоне, тем короче ветвь $0_1 h'$ и меньше усилие образования трещин N_{crc}.

Параметры трещинообразования. Усилие, которое воспринимает сечение железобетонного элемента непосредственно перед образованием трещин $N = N_{crc}$, определяется при напряжениях в бетоне $\sigma_{bt} = R_{bt}$ и $\nu_{bt} = 0{,}5$. Предельные относительные деформации бетона на растяжение составят

$$\hat{\varepsilon}_{bt} = \hat{\varepsilon}_{\Delta b} + \varepsilon_{bt,sh} = 2R_{bt} / E_b. \tag{21}$$

Соответствующие относительные деформации арматуры с учетом (12), (18) и (21) записываются в виде

$$\varepsilon^*_s = \hat{\varepsilon}_{\Delta b} + \varepsilon = \hat{\varepsilon}_{bt} - \varepsilon_{bt,sh} + \varepsilon = 2R_{bt} / E_b + \varepsilon_{sh}, \tag{22}$$

а напряжения

$$\sigma_s^* = (2R_{bt} / E_b + \varepsilon_{sh})E_s\nu_s. \qquad (23)$$

Из уравнения (23) следует, что если по абсолютной величине относительные деформации усадки бетона ε_{sh} больше его предельных значений на растяжение $\hat{\varepsilon}_{bt}$, то трещинообразование бетона происходит при отрицательных напряжениях в арматуре (соответствует зрелому бетону).

Подставляя выражение (23) в уравнение равновесия (5), получаем

$$N = N_{crc} = R_{bt}A_b + (2R_{bt} / E_b + \varepsilon_{sh})E_s\nu_s A_s. \qquad (24)$$

Формулу (24) можно использовать для определения усадочных деформаций бетона ε_{sh}, когда в экспериментальных исследованиях фиксируется величина усилия трещинообразования $N = N_{crc}$.

$$\varepsilon_{sh} = \frac{N_{crc} - R_{bt}A_b}{E_s\nu_s A_s} - \frac{2R_{bt}}{E_b}. \qquad (25)$$

В то же время возникает необходимость в оценке влияния деформаций усадки бетона на величину усилия трещинообразования, что возможно выполнить при сравнительном анализе опытных и расчетных их значений.

С увеличением нагрузки в арматуре на линейном участке $0_1 2$ формируется напряжение растяжения. До нагрузки трещинообразования $N = N_{crc}$ (отрезки диаграммы: $0_1 1$ — с учетом напряжений от усадки бетона и $01'$ — без их учета) усилие N в каждом сечении элемента воспринимает бетон и РМатура, и справедливо уравнение равновесия (19). После появления трещин усилие N_{crc} полностью воспринимается арматурой, ее напряжения $\sigma_{s,crc}$ и деформации $\varepsilon_{s,crc}$ равны

$$\sigma_{s,crc} = N_{crc}/A_s,\ \varepsilon_{s,crc} = N_{crc} / A_s E_s\nu_s. \qquad (26)$$

Авторы многих публикаций отмечают скачок напряжений в сечении с трещиной при трещинообразовании и рассматривают его как динамический эффект [2]. Без учета усадочных напряжений скачок напряжений реализуется на отрезке $1'$—2 и его величина составляет $\Delta\sigma_s = R_{bt} / \mu$. С учетом усадочных напряжений величина скачка составит

$$\Delta\sigma_{s,crc} = \sigma_{s,crc} - \sigma_s^* = \frac{N_{crc}}{A_s} - \left(2R_{bt} / E_b + \varepsilon_{sh}\right)E_s\nu_s = \frac{R_{bt}}{\mu} - \varepsilon_{sh}E_s\nu_s. \qquad (27)$$

Из уравнения (27) следует, что величина скачка напряжений при передаче усилия на арматуру в сечении с трещиной в общем случае зависит от прочностных свойств бетона, насыщения сечения арматуры и дополнительно от деформации усадки бетона. Очевидно, разность между величинами относительных деформаций в сечении с трещиной, измеренными в опытах $\varepsilon_{s,crc}^{\exp}$ и расчетными по формуле (26), составит значения относительных деформаций арматуры от усадки бетона $\varepsilon_{sh,r}$:

$$\varepsilon_{sh,r} = \varepsilon_{s,crc} - \varepsilon_{s,crc}^{\exp}. \qquad (28)$$

До момента трещинообразования (т. 1 диаграммы) усадочные напряжения и деформации выбираются не полностью, их остаточная величина составляет σ_s^* и ε_s^*. При образовании трещин совместность деформаций арматуры и бетона в сечениях с трещинами нарушается и не выбранные остаточные напряжения высвобождаются. В блоке между трещинами за счет сцепления арматуры с бетоном напряжения могут не переходить через т. 0 и оставаться напряжениями сжатия. Следует отметить, что при такой эпюре напряжений средние напряжения были бы меньше их значений, если бы усадочных напряжений не было. Следовательно, при переходе от деформаций в арматуре в сечении с трещиной ε_s к средним деформациям в блоке между трещинами ε_{sm} необходимо учесть усадочные деформации бетона:

$$\varepsilon_{sm} = (\varepsilon_s + \varepsilon_{sh})\psi_s, \qquad (29)$$

где ψ_s — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами.

Бетон по берегам трещин освобождается от арматуры и напряжения, и деформации в бетоне, включая силовые и усадочные, стремятся к нулевым значениям относительно т. 0. Однако относительно т. 0_1 — начала измерений деформаций в опытах — они принимают отрицательные значения. Некоторые авторы отмечают у трещин смену знака напряжений растяжения на сжатие, что фактически трудно поддается объяснению. Возможно, причиной является неучет усадочных напряжений в бетоне при построении эпюры в блоке между трещинами.

Характеристика опытных образцов. Обоснованность полученных зависимостей определялась экспериментальными исследованиями напряженного состояния железобетонного элемента, при котором происходит передача напряжений между арматурой и бетоном от деформаций усадки бетона и при осевом растяжении железобетонного образца. Для проведения экспериментальных исследований изготавливались 4 серии образцов с одинаковыми размерами 15×15×60 см. Серия включала: бетонные и железобетонные образцы, изготовленные в металлических опалубках одновременно из одного состава тяжелого бетона в условиях Тольяттинского завода ЖБИ в летний период времени.

Составы бетона (табл. 1) подбирались варьированием весовых соотношений различных компонентов с учетом трех факторов: класс бетона в диапазоне В30…В45; различные величины усадочных деформаций в сериях; наличие компонентов на заводе.

Таблица 1

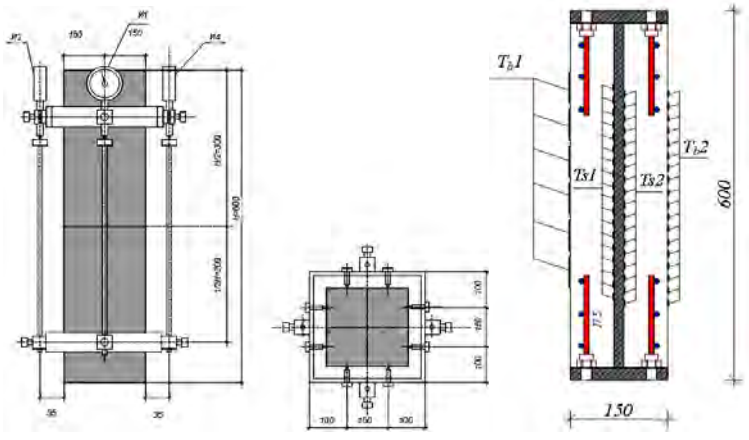
Состав бетонных смесей

Серия (класс б.)	Цемент	Заполнитель	Песок	В/Ц	Пластификатор
1 (В30)	п. ц. 400, 325 кг/м^3	Карбонатный щебень фр. 5…20, М 600, 1265 кг/м^3	Кварцевый, Мкр=1,25>1,3,560 кг/м^3	0,51, 165 л/м^3	—

Окончание табл. 1

2 (B45)	п. ц. 500, 450 кг/м^3	Дробленый гравий, фр. 5…20, М 1000, 1260 кг/м^3	Кварцевый, Мкр=2,56, 540 кг/м^3	0,41, 185 л/м^3	—
3 (B40)	п. ц. 500, 410 кг/м^3	Карбонатный щебень фр. 5…20, М 600, 1100 кг/м^3	Кварцевый, Мкр=1,2, 610 кг/м^3	0,54, 221 л/м^3	ЛМР-НЛХ
4 (B45)	п. ц. 500, 567 кг/м^3	Отсев гранный фр. 0…5, М 1400, 1392 кг/м^3; порошок минеральный карбонатный, МП-1, 113 кг/м^3	Речной волжский, Мкр=1,2, 175 кг/м^3	0,339, 192 л/м^3	ГП Melfiux16

Железобетонные элементы армировались центральным стержнем диаметром 20 мм из арматуры класса А400, в котором на двух диаметрально противоположных сторонах выбирались по длине стержня пазы 4×5 мм под установку непрерывных цепочек тензорезисторов с базой 10 мм (рис. 2, *б*). Тензорезисторы наклеивались на арматуру перед бетонированием с помощью клея циакрин ЭО, изолировались от попадания влаги воском и поверх него эластичным герметиком, которым заполнялись пазы. Зона передачи нагрузки на бетон у торцов образцов усиливалась на участках $l_1=l_3=16$ см с каждой стороны пространственными каркасами с поперечной арматурой диаметром 6 мм, которая устанавливалась с шагом 50 мм. Центральный стержень и пространственные каркасы прикреплялись с помощью сварки к металлическим пластинам толщиной 20 мм по торцам образцов, что обеспечивало надежную анкеровку арматурного стержня и исключало влияние дополнительных смещений арматуры относительно бетона на ширину раскрытия трещин и на параметры сцепления в исследуемой зоне длиной $l_2=26$ см, где процент насыщения арматурой составлял $\mu=1{,}17$ %. Предполагалось, что поперечные трещины в бетоне Тр. 1 и Тр. 2 образуются на границах исследуемой зоны, а ее длина равняется расстоянию между трещинами $l_2=l_{crc}$.



а *б*

Рис. 2. Схема расстановки приборов: *а* — схема расстановки индикаторов; *б* — схема расстановки тензодатчиков: Tb1 — тензодатчики на бетоне, база 50 мм; Tb2 — тензодатчики на бетоне, база 10 мм; Ts1, Ts2 — тензодатчики на арматуре, база 10 мм

Основой для этой предпосылки является «ослабление» бетонного сечения поперечным армированием и концентрацией усадочных напряжений на границе армирования одиночным стержнем и дополнительно хомутами. Влияние шага хомутов поперечной арматуры на расположение трещин отмечалось при анализе трещинообразования в изгибаемых элементах С. А. Дмитриевым, Н. М. Мулиным, центральном и внецентренном растяжении образцов Э. Г. Портером и Г. И. Бердичевским. При испытании натурных ферм В. А. Клевцовым отмечено, что расстояние между трещинами и шаг хомутов, который, как правило, назначается по конструктивным соображениям, в растянутых элементах являются взаимосвязанными величинами: первоначально трещины располагаются в местах постановки хомутов по длине элемента и только потом между хомутами.

Опытные и расчетные значения деформаций и напряжений от усадки бетона. Измерения линейных деформаций усадки бетонных и железобетонных образцов производились при комнатной температуре после распалубливания на третьи сутки (после окончания твердения свежеуложенного бетона во влажных условиях) с помощью индикаторов часового типа с ценой деления 0,01 мм, установленных в рамках на каждой грани образца (см. рис. 2, *а*). Продолжительность измерений определялась временем начала последующих испытаний каждого железобетонного образца на осевое растяжение и сжатие, поэтому составляла от 30 до 890 сут. В большей степени усадке подвержены образцы из мелкозернистого бетона, где в качестве заполнителя использовались отсевы гранита.

Усадочные деформации увеличиваются: с ростом В/Ц, с количеством цемента на единицу объема бетона (при этом высокоактивные цементы дают большую усадку, что согласуется с литературными данными).

Для сравнения в табл. 2 представлены опытные значения относительных усадочных деформаций на 28 сутки измерения, а в табл. 3 — окончание измерения.

Таблица 2

Усадочные деформации бетонных и железобетонных образцов на 28 сутки

Усадочные деформации	Серия 1 (С1-1,2,3)	Серия 2 (С2-1,2,3)	Серия 3 (С3-1)	Серия 4 (С4-1)
$\varepsilon_{sh}\times10^5$	21	29	32	46
$\varepsilon_{sh,r}\times10^5$	—	—	18	21

Таблица 3

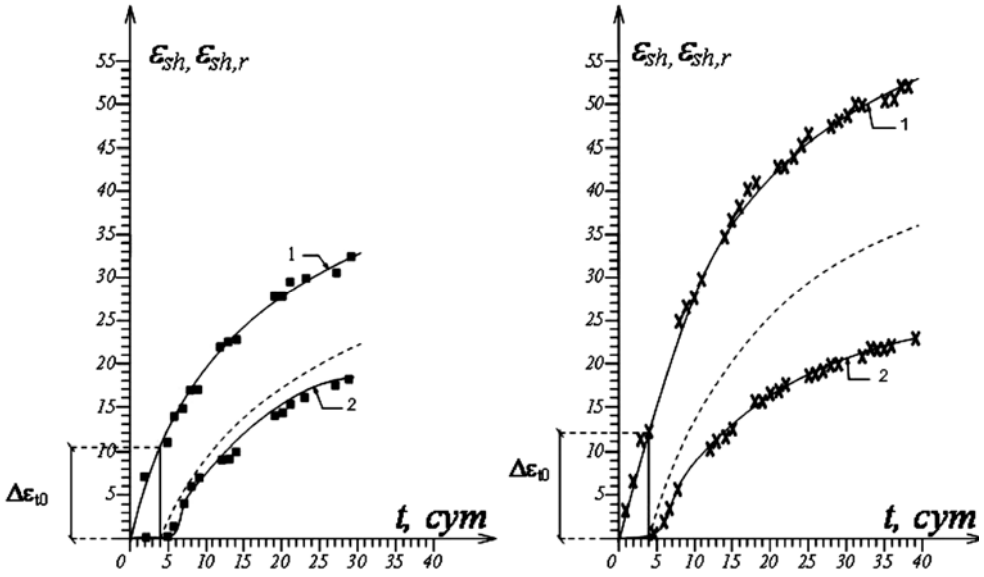
Опытные и расчетные значения усадочных параметров

Серия	Шифр	Сроки (*t*-сут)	$\varepsilon_{sh}^{exp}\times10^5$ опыт	$\varepsilon_{sh,r}^{exp}\times10^5$ опыт	$\Delta\varepsilon_{t0}\times10^5$	$\varepsilon_{sh}^{*}=(\varepsilon_{sh}^{exp}-\varepsilon_{t0})\times10^5$	$\varepsilon_{sh,r}^{exp}\times$ ф-ла (16)	$\sigma_{s,sh}$, МПа, ф-ла (15)	$\sigma_{bt,sh}$, МПа, ф-ла (11)	$\varepsilon_{bt,sh}\times10^5$ ф-ла (12)	$\sigma_{bt,sh}$, МПа, ф-ла (13)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	С1-1	125	37	—	9	–28	–25	–50	0,60	2,6	0,61
	С1-2	135	37	—	9	–28	–25	–50	0,60	2,6	0,61
	С1-3	887	48	—	9	–39	–35	–70	0,84	3,7	0,85

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2	С2-1	35	33	—	9	–24	–23	–45	0,54	1,4	0,54
	С2-2	45	36	—	9	–27	–25	–51	0,61	1,5	0,61
	С2-3	50	38	—	8	–30	–28	–56	0,68	1,7	0,68
3	С3-1	30	32	18	12	–20	–18	–37	0,44	1,4	0,45
4	С4-1	40	51	25	12	–39	–36	–71	0,85	2,3	0,86

Деформации бетонных образцов в 1,7…2 раза превышают деформации железобетонных образцов (рис. 3). Из условия совместности деформаций бетона и арматуры, следуя закону (12), деформации усадки бетона $\varepsilon_{bt,sh}$, вычисленные по опытным значениям ε_{sh} и ε, близки или превышают предельные их значения на растяжение $\hat{\varepsilon}_{bt.}$



а *б*

Рис. 3. Деформации усадки бетонных (*1*) и железобетонных образцов (*2*): *а* — серия 3; *б* — серия 4

Напряжения в бетоне $\sigma_{bt,sh}$, вычисленные по формуле (13), значительно превышают их значения из условия равновесия (10), а в отдельных случаях и предельные напряжения на растяжение R_{bt}, хотя усадочные трещины в бетоне не обнаружены [3].

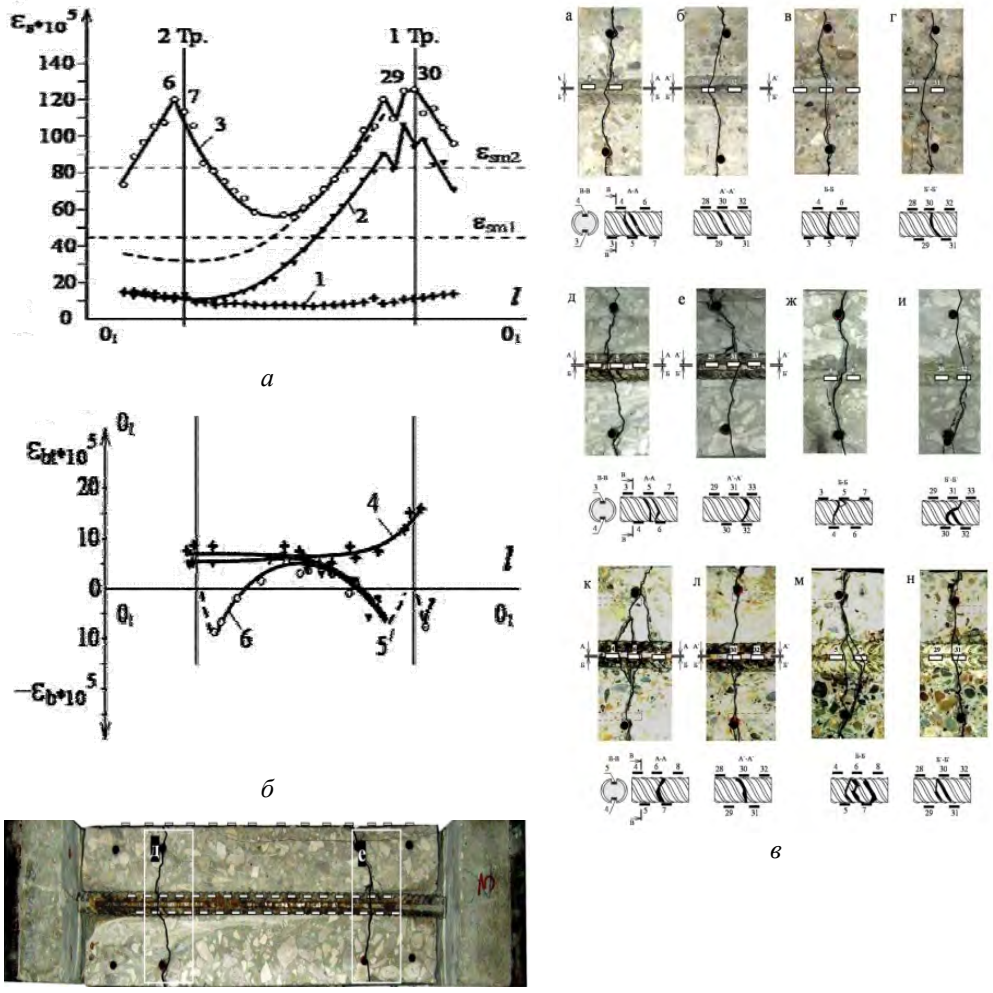
Из сравнения графиков роста усадочных деформаций ε_{sh} в бетонных и ε в железобетонных образцах следует, что свободные усадочные деформации увеличиваются с начала измерений, а деформации железобетонных образцов только на t_0=4…5 сут после распалубливания.

За время прерывания роста относительных деформаций ε свободные деформации выросли на $\Delta\varepsilon_{t0} = (9-12)\cdot 10^{-5}$, что составляет до 25 % от их значения на окончание измерений. С тем чтобы условие совместности деформирования бетона и арматуры выполнялось, из замеренных величин в опыте $\varepsilon_{sh}^{\exp}$ вычтем значения $\Delta\varepsilon_{t0}$ (табл. 3). С учетом $\Delta\varepsilon_{t0}$ свободные относительные деформации ε_{sh}^{*} уменьшились по абсолютной величине, однако их значения примерно на 10 % превышают расчетные значения ε по формуле (16), где $\nu_{bt,sh} = 0,9$. Разница между этими относительными деформациями составляет фактические относительные деформации растяжения бетона от усадки $\varepsilon_{bt,sh}$.

Значения усадочных напряжений $\sigma_{bt,sh}$, вычисленные из условия равновесия (10) и по относительным деформациям бетона (13), согласуются между собой и составляют 30…40 % от предельных на растяжение $\hat{\sigma}_{bt} = R_{bt}$. Последующие испытания железобетонных образцов на растяжение показали обоснованность указанных корректировок при сравнении опытных и расчетных значений усилий трещинообразования.

Опытные и расчетные параметры трещинообразования. Испытания железобетонных образцов на осевое растяжение производились до образования поперечных трещин на установке, которая входит в состав комплекса испытательных стендов лаборатории инженерно-строительного института ТГУ, оснащенного многоканальной тензометрической станцией ММТС-64, которая производит непрерывную запись показаний тензорезисторов с интервалом 0,2 с и хранит в памяти компьютера [3]. Нагружение осуществлялось ступенями, величина которых не превышала 5 % от нагрузки образования трещин, с опросом приборов на каждой ступени в течении 10 мин. Сквозные поперечные трещины образовались в результате хрупкого разрыва бетона в предсказуемых сечениях на границах армирования одиночным стержнем и дополнительно хомутами. Расчетные значения усилий трещинообразования N_{crc}^{*}, вычисленные по формуле (24), без учета относительных деформаций усадки бетона ε_{sh} в 1,2…1,5 раза превышают их опытные величины $N_{crc}^{\exp}$ (табл. 4). Для доказательства обоснованности предпосылки в виде (28) по показаниям тензорезисторов построены распределения относительных деформаций по длине арматурного стержня (рис. 4, *а*) и по бетону на гранях образца (рис. 4, *б*) непосредственно перед образованием трещин и после их образования (образец с шифром С2-3) в последовательности: сначала Тр. 1, затем Тр. 2. Приращение нагрузки между Тр. 1 и Тр. 2 составило $\Delta N = 6...8$ кН. В процессе трещинообразования напряженное состояние образца изменяется: в арматуре в сечениях с трещинами деформации $\varepsilon_{s,crc}^{\exp}$ и напряжения достигают максимальной величины (табл. 4), в блоке между трещинами образуются зоны активного сцепления центрального стержня с бетоном, изменяются значения средних деформаций арматуры $\varepsilon_{sm,1}$ и $\varepsilon_{sm,2}$. Расчетные значения

относительных деформаций арматуры в сечениях с трещинами $\varepsilon_{s,crc}$, вычисленные по формуле (26) при $N_{crc} = N_{crc}^{\exp}$ и $\nu_s = 1$, значительно меньше их опытных величин $\varepsilon_{s,crc}^{\exp}$. Разницу между этими деформациями составляют относительные деформации арматуры (образца) $\varepsilon_{sh,r}$ от усадки бетона.



а

б

в

Рис. 4. Распределение деформаций в арматуре по длине стержня (*а*) и в бетоне (*б*): *1* — деформации арматуры до образования трещин; *2* — то же после образования первой трещины — Тр. 1; *3* — то же после образования второй трещины — Тр. 2; ε_{sm1} и ε_{sm2} — соответственно средние деформации арматуры после образования трещин Тр. 1 и Тр. 2; *4* — деформации бетона до образования трещин; *5* — то же после образования Тр. 1; *6* — то же после образования Тр. 2; *в* — фрагменты пересечения трещин в бетоне с арматурой

Расчетные значения усилий трещинообразования N_{crc}, вычисленные по формуле (24) с учетом деформаций усадки бетона ε_{sh}, удовлетворительно согласуются с их опытными величинами $N_{crc}^{\exp}$.

Таблица 4

Параметры трещинообразования

Шифр	$N_{crc}^{\exp}$, кН	N_{crc}^{*}, кН	$\varepsilon_{s,crc}^{\exp}$ $\times 10^5$ опыт	$\varepsilon_{s,crc}$ $\times 10^5$ ф-ла (26)	$\varepsilon_{sh,r}$ $\times 10^5$ ф-ла (28)	ε_{sh} $\times 10^5$ ф-ла (16)	N_{crc}, Кн, ф-ла (24)	$\Delta\sigma_{s,crc}$, МПа, ф-ла (27)	$\Delta\sigma_{s,crc}^{*}$, МПа, ф-ла (27)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
С 1-3	31	48	81	49	32	35	32,8	135	65
С 2-1	52	62	120	98	22	24	51,6	188	140
С 2-2	44		110	83	27	29	48	179	114
С 2-3	48		121	91	30	32	46	191	127
С 3-1	47	55	108	89	19	20	46,7	166	126
С 4-1	38	63	112	72	40	43	41,5	175	89

Усадочные деформации бетона ε_{sh} в 1,5…2 раза увеличивают скачок напряжений в арматуре в сечениях с трещинами при их образовании (табл. 4, где $\Delta\sigma_{s,crc}$ — скачок напряжений, вычисленный с учетом ε_{sh}, $\Delta\sigma_{s,crc}^{*}$ — то же без учета ε_{sh} по формуле (27) при $N = N_{crc}^{\exp}$). Если отсчет деформации вести не с начала испытаний, а с момента изготовления, когда от нулевой точки откладываются усадочные деформации, то их суммарные величины будут иными. В первом случае деформации арматуры до образования и после образования трещин по длине образца величины положительные. Во втором случае до образования трещин и после их образования в блоке между трещинами с учетом усадочных деформаций они принимают отрицательные значения. В этом случае уменьшаются средние деформации в арматуре в блоке между трещинами и, соответственно, уменьшается коэффициент В. И. Мурашева с $\psi_{s,crc} = 0{,}45$ до $\psi_{s,crc} = 0{,}2$, что больше соответствует его расчетному значению по нормам. В бетоне в первом случае деформации по берегам трещин после их образования принимают отрицательные значения, что отмечалось в работе [2], во втором случае они становятся равными нулю.

Выводы.

1. При твердении в естественных условиях после распалубливания бетоны подвержены усадке. В железобетонных элементах в арматуре и бетоне формируются деформации и напряжения от усадки бетона, которые суммируются с их значениями от различных нагрузок, значительно уменьшают усилия трещинообразования и увеличивают скачок напряжений в арматуре в сечениях с трещинами.

2. Величину деформаций железобетонного элемента от усадки бетона можно определять прямыми наблюдениями на образцах с учетом прерывания их роста в начале измерений; по результатам испытаний на растяжение, в которых фиксируется опытное значение нагрузки трещинообразования и деформации арматуры в сечениях с трещинами.

3. Деформации и напряжения от усадки бетона в железобетонном элементе суммируются с их значениями от воздействия различных нагрузок, что приводит к изменению значений некоторых расчетных параметров: уменьшаются средние деформации арматуры в блоке между трещинами и, соответственно, коэффициент В. И. Мурашева $\psi_{s,crc}$ после образования трещин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Карпенко Н. И.* Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. 412 с.

2. *Бондаренко В. М., Колчунов В. И.* Расчетные модели силового сопротивления железобетона. М. : АСВ, 2004. 472 с.

3. *Ерышев В. А., Латышева Е. В., Бондаренко А. С.* Методика экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния линейных железобетонных элементов при осевом загружении повторными и знакопеременными нагрузками // Вектор науки ТГУ. 2010. № 3. С. 51—56.

1. *Karpenko N. I.* Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona. M. : Stroyizdat, 1996. 412 s.

2. *Bondarenko V. M., Kolchunov V. I.* Raschetnye modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona. M. : ASV, 2004. 472 s.

3. *Eryshev V. A., Latysheva E. V., Bondarenko A. S.* Metodika eksperimental'nykh issle-dovaniy napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya lineynykh zhelezobetonnykh elementov pri osevom zagruzhenii povtornymi i znakoperemennymi nagruzkami // Vektor nauki TGU. 2010. № 3. S. 51—56.

© Карпенко Н. И., Ерышев В. А., Латышева Е. В., Бондаренко А. С., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Деформации железобетонного элемента с учетом усадочных деформаций / Н. И. Карпенко, В. А. Ерышев, Е. В. Латышева, А. С. Бондаренко // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 344—357.

УДК 691.32:620.172

Н. И. Карпенко, С. Н. Карпенко, М. Л. Ухатский

К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРОЧНОСТИ БЕТОНА ПРИ ТРЕХОСНОМ РАСТЯЖЕНИИ И СМЕШАННЫХ НАПРЯЖЕННЫХ СОСТОЯНИЯХ СЖАТИЕ — РАСТЯЖЕНИЕ

Рассматриваются критерии прочности бетона: при трехосном растяжении, двухосном растяжении со сжатием по третьему направлению и растяжении по одному направлению и сжатию по двум другим направлениям.

К л ю ч е в ы е с л о в а: критерии прочности, трехосное растяжение, случаи сжатия-растяжения.

The authors consider the criteria of concrete strength: under triaxial tension, biaxial tension with shrinkage in the thord direction and stretching in one of the directions and shrinkage in other two directions.

K e y w o r d s: criteria of strength, triaxial tension, cases of shrinkage and stretching.

Критерии прочности бетона при объемном напряженном состоянии разрабатывались многими отечественными и зарубежными исследователями. Обзор этих работ приведен в [1, 2]. Недостатком общих критериев является ограниченная возможность описания в одном критерии прочности бетона в области трехосного сжатия и смешанных напряженных состояниях сжатия-растяжения. Трудности возникают вследствие большой разницы в прочностях бетона при сжатии и растяжении. В связи с этим полагаем, что в начале эти области следует выделять для описания прочности отдельно, а затем уже переходить, используя их, к совершенствованию общих критериев.

Условие прочности бетонных элементов в случае трехосного растяжения можно записать в виде:

$$\frac{\sigma_1^2}{R_{bt}^2}+a\left(\frac{\sigma_2^2}{R_{bt}^2}+\frac{\sigma_3^2}{R_{bt}^2}\right)\le 1\ , \tag{1}$$

где σ_1, σ_2, σ_3 — главные напряжения ($\sigma_1\ge\sigma_2\ge\sigma_3$, $\sigma_1\le R_{bt}$); R_{bt} — прочность бетона при одноосном растяжении; a — эмпирический коэффициент влияния, который устанавливается и уточняется на основании данных экспериментов при трехосном растяжении,

$$a\approx 0{,}1+0{,}15\frac{\mathrm{B}-\mathrm{B15}}{\mathrm{B}}, \tag{2}$$

B — класс бетона, в (2) следует принимать $\mathrm{B}\ge\mathrm{B15}$.

В случае двухосного растяжения $\left(\sigma_1>0;\ \sigma_2\ge 0\right)$ и сжатия по третьему направлению $\left(\sigma_3\le 0\right)$ условие прочности по аналогии с [3] рекомендуется записывать в виде:

$$\left(\frac{\sigma_1}{R_{bt}}\right)^2+a\left(\frac{\sigma_2}{R_{bt}}\right)^2+\frac{(1-2c)\left(\frac{\sigma_3}{R_b}\right)^2}{1-2c\left(\frac{\sigma_3}{R_b}\right)^2}\le 1, \tag{3}$$

где R_b — прочность бетона при одноосном сжатии ($\left|\sigma_3\right| \le R_b; \sigma_1 \le R_{bt}$); c — экспериментальный параметр (введен в [3]),

$$c \approx 0,2 - \frac{\text{B} - \text{B30}}{\text{B}}, \tag{4}$$

B — класс бетона, в (4) следует принимать $\text{B} \ge \text{B30}$.

В случае одноосного растяжения ($\sigma_1 > 0$) и сжатия по двум другим направлениям ($\sigma_2 \le 0$; $\sigma_3 \le 0$) условие прочности может быть записано в виде:

$$\left(\frac{\sigma_1}{R_{bt}}\right)^2 + a^*\left(\frac{\sigma_1}{R_{bt}}\right)\left(\frac{\left|\sigma_2\right|}{R_b k_c}\right) + \frac{(1-2c)\left(\frac{\sigma_3}{R_b k_c}\right)^2}{1-2c\left(\frac{\sigma_3}{R_b k_c}\right)^2} \le 1, \tag{5}$$

где $a^* \approx 2a$, k_c определяется по формуле (2.30) из работы [2].

Для тяжелого бетона

$$k_c = 1 + \varphi_{R(e)}\left[1 - \left(\frac{(1-c)(1-\mu_\sigma - 2e)}{2e + c(1-\mu_\sigma - 2e)}\right)^2\right], \tag{6}$$

где

$$0,5 \ge e = 0,3 + \frac{R_b}{R_{b(0)}}, \quad R_b = 200 \ \text{МПа},$$

$$c = \frac{1-1,8e}{1,7(-e)}; \quad \varphi_{R(e)} = 3\frac{R_{bt}}{R_b}\left(1 - \frac{R_{bt}}{R_b}\right),$$

$$\mu_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}.$$

В случае двухосного сжатия $(\sigma_1 = 0)$ критерий (5) преобразовывается к виду

$$\left|\sigma_3^2\right| \le \left(R_b k_c\right)^2. \tag{7}$$

Условия прочности (1), (3), (5) выполняются в виде равенства в случае, когда напряжения σ_1, σ_2, σ_3 достигают своих предельных значений (соответственно величин $\bar{\sigma}_1$, $\bar{\sigma}_2$, $\bar{\sigma}_3$). Переход от σ_i до $\bar{\sigma}_i$ (i = 1, 2, 3) можно осуществить, используя уровень напряжений η ($\eta \le 1$),

$$\bar{\sigma}_i = \sigma_i / \eta. \tag{8}$$

Внося в критерии прочности вместо σ_i значение $\bar{\sigma}_i$, приходим к уравнению по определению η. Например, уравнение (1) представляется в виде

$$\frac{\sigma_1^2}{\eta^2 R_{bt}^2} + a\left(\frac{\sigma_2^2}{\eta^2 R_{bt}^2} + \frac{\sigma_3^2}{\eta^2 R_{bt}^2}\right) = 1, \tag{9}$$

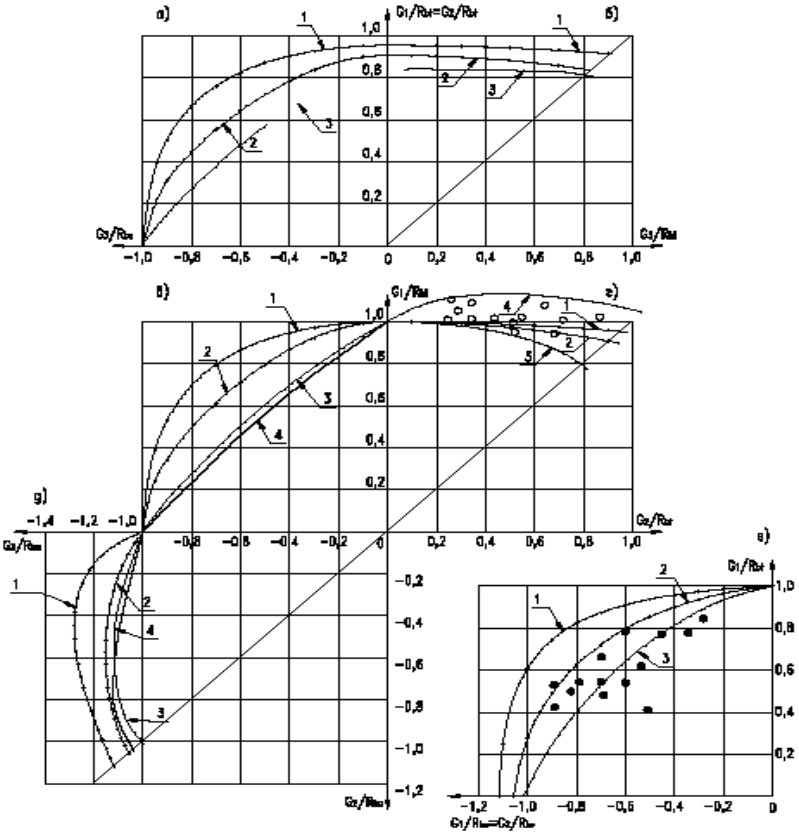
откуда

$$\eta = \frac{1}{R_{bt}}\sqrt{\sigma_1^2 + a(\sigma_2^2 + \sigma_3^2)} \ . \tag{10}$$

В отдельных экспериментальных исследованиях меняются лишь напряжения σ_1, а напряжения σ_2 и σ_3 остаются постоянными. Тогда, например, из (1) следует

$$\frac{\tilde{\sigma}_1^2}{R_{bt}^2} = 1 - a\left(\frac{\sigma_2^2}{R_{bt}^2} + \frac{\sigma_3^2}{R_{bt}^2}\right). \tag{11}$$

Возможны также другие комбинации, например, когда изменяются напряжения $\sigma_1 = \sigma_2$, а напряжение σ_3 остается постоянным. Возможное влияние режимов нагружения на прочность еще подлежит уточнению.



Результаты проверки предлагаемых критериев прочности на основании данных экспериментальных исследований: *а* — двухосное растяжение (при $\sigma_1 = \sigma_2$) со сжатием по третьему направлению $(\sigma_3 < 0)$; *б* — трехосное растяжение при $\sigma_1 = \sigma_2$; *в* — растяжение со сжатием при $\sigma_2 = 0$; *г* — двухосное растяжение $(\sigma_3 = 0)$; *д* — двухосное сжатие $(\sigma_2 = \sigma_3)$ с растяжением по третьему направлению; *1* — теоретическая линия для бетона класса В15 ($R_{bn} = 11$ МПа, R_{btn} =1,15 МПа); *2* — то же для бетона класса В70 (R_{bn} =50 МПа, $R_{btn} = 2,7$ МПа); *3, 4* — верхняя и нижняя границы достоверных опытных значений по [4], ○ ○ — опытные данные ([5] и 6])

Представленные критерии позволяют описать данные экспериментальных исследований в широком диапазоне, однако отдельные параметры критериев еще подлежат уточнению.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Карпенко С. Н.* О разработке более совершенных трехинвариантных критериев прочности бетонов // Известия Орловского гос. техн. ун-та. Строительство. Транспорт. 2007. С. 42—49.

2. *Карпенко Н. И.* Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. С. 60—91.

3. *Карпенко Н. И.* Теория деформирования железобетона с трещинами. М. : Стройиздат, 1976. С. 12.

4. *Ноткус А. И., Кудзис А. П.* О надежности результатов двухосных испытаний бетона // Железобетонные конструкции. Вильнюс, 1979.

5. *Яшин А. В.* Рекомендации по определению прочностных и деформационных характеристик бетона при неодноосных напряженных состояниях. М., 1985. С. 72.

6. *Hannaut D. J.* Nomograms for the failure of plain concrete subjected to short-term multiaxial stresses // Strud. Eug. 1974. № 2, 5. P. 151—165.

1. *Karpenko S. N.* O razrabotke bolee sovershennykh trekhinvariantnykh kriteriev prochnosti betonov // Izvestiya Orlovskogo gos. tekhn. un-ta. Stroitel'stvo. Transport. 2007. S. 42—49.

2. *Karpenko N. I.* Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona. M. : Stroyizdat, 1996. S. 60—91.

3. *Karpenko N. I.* Teoriya deformirovaniya zhelezobetona s treshchinami. M. : Stroyizdat, 1976. S. 12.

4. *Notkus A. I., Kudzis A. P.* O nadezhnosti rezul'tatov dvukhosnykh ispytaniy betona // Zhelezobetonnye konstruktsii. Vil'nyus, 1979.

5. *Yashin A. V.* Rekomendatsii po opredeleniyu prochnostnykh i deformatsionnykh kharakteristik betona pri neodnoosnykh napryazhennykh sostoyaniyakh. M., 1985. S. 72.

6. *Hannaut D. J.* Nomograms for the failure of plain concrete subjected to short-term multiaxial stresses // Strud. Eug. 1974. № 2, 5. P. 151—165.

© Карпенко Н. И., Карпенко С. Н., Ухатский М. Л., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Карпенко Н. И., Карпенко С. Н., Ухатский М. Л. К определению прочности бетона при трехосном растяжении и смешанных напряженных состояниях сжатие — растяжение // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 358—361.

УДК 4.012.45.04

С. Н. Карпенко, А. Н. Петров

МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА В ПРИРАЩЕНИЯХ И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЕ К РАСЧЕТУ БАЛОК-СТЕНОК*

Рассматривается модель деформирования железобетона в приращениях и ее приложение к расчету балок-стенок. Эффективность предложенной модели подтверждается результатами расчета экспериментальных конструкций из опытов НИИМосстроя.

К л ю ч е в ы е с л о в а: теория деформирования железобетона с трещинами, железобетонные балки-стенки, метод конечных элементов.

The model of reinforced concrete creep in additions and its application to the calculation of deep beams is considered. The efficiency of the suggested model is proved by the calculation results of the experimental structures tested by NIIMosstroy.

K e y w o r d s: theory of reinforced concrete with cracks creep, reinforced concrete deep beams, finite element method.

В современном строительстве все чаще проявляются тенденции усложнения конструктивных решений зданий и сооружений, особенно из монолитного железобетона. Среди таких решений — пространственные каркасы зданий с нерегулярной сеткой несущих колонн и стен, монолитно связанных с плитами перекрытий, переходными плитами, конструктивно неоднородными фундаментными плитами, каркасы высотных зданий с сильно нагруженными массивными колоннами, стенами, ядрами жесткости, фундаментными плитами и их соединениями. Все эти конструкции, как, собственно, и конструкции обычных зданий, работают в условиях сложных неоднородных напряженных состояний, что существенно влияет на характер физической нелинейности железобетона, без учета которой снижается точность и надежность проектных решений. В связи с этим построение методов расчета конструкций зданий и сооружений при сложных напряженных состояниях с учетом различных факторов физической нелинейности, включая трещинообразование и приобретаемую при этом анизотропию, является актуальной проблемой современного проектирования.

Основной недостаток существующих моделей и методов решения физически нелинейных задач железобетона заключается в том, что они сводят решение к многоитерационным процедурам, реализация которых для сложных пространственных систем, даже при наличии современной вычислительной техники, становится трудно решаемой проблемой. Выполненные ранее исследования показали, что указанных трудностей можно в значительной степени избежать, построив систему физических соотношений не в традиционной (для железобетона) форме — в виде связей между напряжениями и де-

* Работа выполнена при финансовой поддержке проекта РААСН «Разработка модели деформирования железобетона в инкрементальном виде для безитерационных и слабоитерационных методов расчета железобетонных конструкций при различных напряженных состояниях с учетом трещинообразования и физической нелинейности конструкционных материалов».

формациями, а в виде связей между приращениями напряжений и деформаций (в инкрементальной форме). Такие связи были построены для железобетонных стержней и изгибаемых плит [1, 2]. В настоящей работе рассматривается обобщение инкрементального подхода на случай плоского напряженного состояния. Новые системы физических соотношений позволили значительно снизить количество итераций или избежать их вовсе, заменив шагово-итерационные процедуры шаговыми. При этом была решена задача перестройки нелинейных физических соотношений, записанных в виде связей между напряжениями и деформациями, в связи между их приращениями на шагах изменения нагрузки за счет пошаговой линеаризации.

Согласно деформационной модели железобетона с трещинами Н. И. Карпенко [3], связи между напряжениями и деформациями при плоском напряженном состоянии записываются в виде

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \tag{1}$$

где $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ — относительные деформации; $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ — нормальные и касательные напряжения; C_{ij} — нелинейные коэффициенты симметричной матрицы жесткости железобетона, которые зависят от угла наклона трещин по отношению к арматуре, средних модулей деформации арматуры в элементах с трещинами и модулей деформаций полос бетона между трещинами.

В модели Н. И. Карпенко свойства материала учитываются при помощи секущих характеристик жесткости, связывающих относительные деформации с полными напряжениями, действующими на заданном этапе изменения нагрузки. Такой подход сопряжен с использованием затратных по времени итерационных процедур и дополнительных вычислительных приемов, улучшающих сходимость. Этих недостатков лишено предложенное С. Н. Карпенко построение физических соотношений в инкрементальной форме на основе использования диаграмм материалов в виде ломаных линий. В этом случае зависимости (1) преобразуются к виду:

$$\begin{aligned} \Delta\varepsilon_x &= C_{11}^k \Delta\sigma_x + C_{12}^k \Delta\sigma_y + C_{13}^k \Delta\tau_{xy}, \\ \Delta\varepsilon_y &= C_{12}^k \Delta\sigma_x + C_{22}^k \Delta\sigma_y + C_{23}^k \Delta\tau_{xy}, \\ \Delta\gamma_{xy} &= C_{13}^k \Delta\sigma_x + C_{23}^k \Delta\sigma_y + C_{33}^k \Delta\tau_{xy}, \end{aligned} \tag{2}$$

или в более компактной матричной форме

$$\{\Delta\varepsilon\} = \left[C^k\right]\{\Delta\sigma\}, \tag{3}$$

где $\left[C^k\right]$ — матрица податливости на приращениях.

Коэффициенты матрицы податливости на приращениях выражаются через секущие характеристики по формулам:

$$C_{11}^k = \left(\sigma_{xi+1}C_{11i+1} - \sigma_{xi}C_{11i}\right)\Big/\Delta\sigma_x;$$

$$C_{12}^k = \frac{1}{2}\left[\frac{\sigma_{yi+1}C_{12i+1} - \sigma_{yi}C_{12i}}{\Delta\sigma_y} + \frac{\sigma_{xi+1}C_{12i+1} - \sigma_{xi}C_{12i}}{\Delta\sigma_x}\right];$$

$$C_{13}^k = \frac{1}{2}\left[\frac{\tau_{xyi+1}C_{13i+1} - \tau_{xyi}C_{13i}}{\Delta\tau_{xy}} + \frac{\sigma_{xi+1}C_{13i+1} - \sigma_{xi}C_{13i}}{\Delta\sigma_x}\right]; \quad (4)$$

$$C_{22}^k = \left(\sigma_{yi+1}C_{22i+1} - \sigma_{yi}C_{22i}\right)\Big/\Delta\sigma_y;$$

$$C_{23}^k = \frac{1}{2}\left[\frac{\tau_{xyi+1}C_{23i+1} - \tau_{xyi}C_{23i}}{\Delta\tau_{xy}} + \frac{\sigma_{yi+1}C_{23i+1} - \sigma_{yi}C_{23i}}{\Delta\sigma_y}\right];$$

$$C_{33}^k = \left(\tau_{xyi+1}C_{33i+1} - \tau_{xyi}C_{33i}\right)\Big/\Delta\tau_{xy}.$$

Усреднение побочных коэффициентов C_{12}^k, C_{13}^k, C_{23}^k вводится, чтобы избежать влияния погрешностей в определении напряжений на нарушение симметрии матрицы податливости элемента на приращениях, при пропорциональном нагружении парность коэффициентов соблюдается без усреднения.

Установленные зависимости для железобетонных пластин при условии постоянства коэффициентов податливости становятся подобными зависимостям для пластин из анизотропного материала. Однако расчет железобетонных пластин осложняется тем, что анизотропия, как и нелинейность, приобретается в процессе деформирования и трещинообразования. Как показали представленные ниже результаты расчета экспериментальных балок-стенок, инкрементальный подход существенно упрощает расчет конструкций с приобретаемой анизотропией.

На основе инкрементальных зависимостей (4) были разработаны алгоритм и компьютерная программа расчета железобетонных балок-стенок методом конечных элементов. Программа использована для расчета экспериментальных конструкций из опытов НИИМосстроя [4]. При этом были исследованы шагово-итерационные процедуры, построенные на базе секущих матриц жесткости, малоитерационные процедуры с ограничением числа итераций на каждом шаге нагружения и шаговые процедуры с использованием касательных матриц жесткости в рамках инкрементального подхода.

Балки-стенки БС-1, БС-2, БС-3 имели одинаковые геометрические размеры и практически одинаковое армирование, но существенно отличались прочностью бетона (табл.). Таким образом, при испытании конструкций были реализованы различные схемы разрушения. Разрушение балок-стенок БС-1 и БС-3 сопровождалось текучестью продольной арматуры в пролете конструкции. При разрушении сжатой зоны балки-стенки БС-2 в пролете продольная арматура работала упруго. Балка-стенка БС-3 разрушилась в результате потери устойчивости вертикальной арматуры на опоре после приложения дополнительной сосредоточенной силы по оси опоры при постоянной пролетной нагрузке.

Физико-механические свойства бетона

Марка образца	Класс бетона	R_b, МПа	R_{bt}, МПа	E_b, МПа
БС-1	В 15,5	20,4	1,9	25600
БС-2	В 10,8	14,2	1,4	16600
БС-3	В 29,1	38,2	2,65	29500

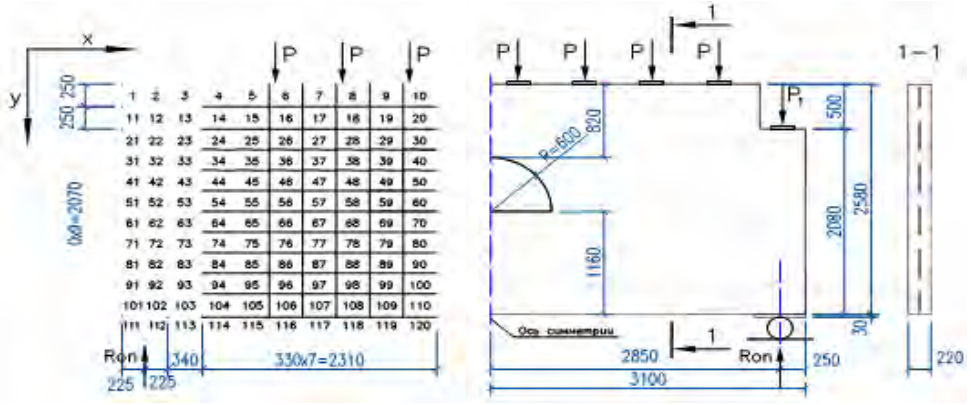


Рис. 1. Расчетная схема балки-стенки; конструкция балок-стенок БС-1, БС-2, БС-3

На рис. 1 представлена расчетная схема балок-стенок. Симметричная часть конструкции была разбита на 120 прямоугольных конечных элементов, соединенных 143 узлами. Опорные элементы № 111 и 112 имели характеристики стали. Для каждого конечного элемента был определен тип жесткости, который был задан в соответствии с классом бетона и арматуры и коэффициентами армирования (рис. 2). Коэффициенты армирования определялись для каждого типа конечных элементов в соответствии с шагом и диаметром арматурных стержней (см. рис. 2).

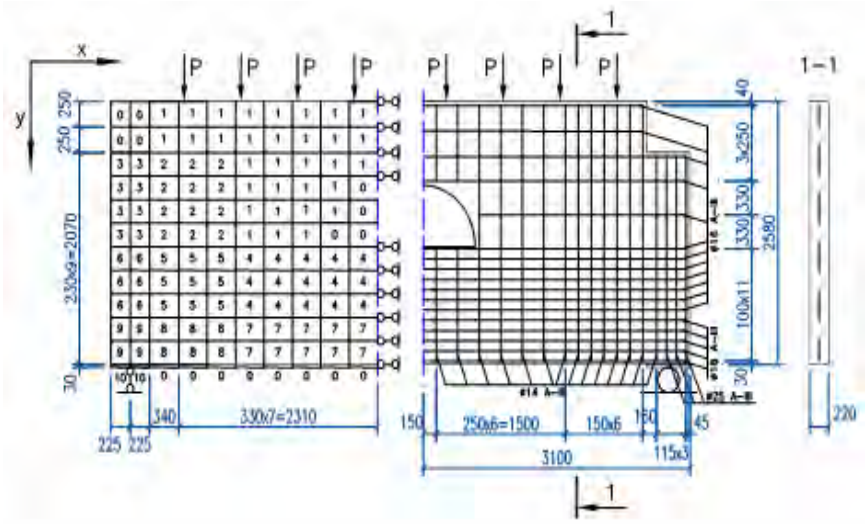


Рис. 2. Нумерация типов жесткостей; армирование балок-стенок БС-1, БС-2, БС-3

В эксперименте нагружение образцов проводилось поэтапно, с выдержкой нагрузки на каждом этапе в течение 10…15 мин. При расчете шаг нагружения определялся с учетом постепенного увеличения нагрузки и был принят в размере 5 % от разрушающей нагрузки.

Результаты расчетов балок-стенок по инкрементальной модели сопоставлялись с экспериментальными данными, данными линейно-упругого расчета и нелинейного расчета, выполненного шагово-итерационным методом с использованием секущих характеристик жесткости.

Как показали расчеты, в балке-стенке БС-1 первые трещины появились в нижнем ряду конечных элементов (№ 108…110) при суммарной нагрузке 400 кН, опытная нагрузка трещинообразования составила 385 кН. Теоретическая кривая прогиба, рассчитанная по инкрементальной модели, по характеру деформирования полностью соответствовала опытной с расхождением в отдельных точках до 10 %. Отклонение теоретической кривой, полученной шагово-итерационным методом с использованием секущих характеристик жесткости, составило 7 %. Разрушение балки-стенки БС-1 сопровождалось текучестью арматуры растянутой зоны (18-й шаг нагружения, элементы № 108, 109, 110), что также соответствовало опытным данным.

В балке-стенке БС-2 первые трещины появились в нижнем ряду конечных элементов (№ 108…110) при суммарной нагрузке 400 кН, опытная нагрузка трещинообразования составила 377 кН. Как и в первом опыте, по мере роста нагрузки происходило увеличение ранее образовавшихся трещин и появление новых. Теоретическая кривая прогиба, рассчитанная по инкрементальной модели, по характеру деформирования полностью соответствовала опытной с расхождением в отдельных точках до 15 %. Отклонение теоретической кривой, полученной шагово-итерационным методом, составило 10 %. Разрушение балки-стенки БС-2 произошло в результате исчерпания прочности бетона сжатой зоны (шаг нагружения 15, элементы № 7…10) и сопровождалось упругой работой растянутой арматуры, что также соответствовало опытным данным.

В балке-стенке БС-3 первые трещины появились в нижнем ряду конечных элементов (№ 106…110) при суммарной нагрузке 600 кН, опытная нагрузка трещинообразования составила 564 кН. Теоретическая кривая прогиба, рассчитанная по инкрементальной модели, по характеру деформирования в целом соответствовала опытной с расхождением в отдельных точках до 20 %. Отклонение теоретической кривой, полученной шагово-итерационным методом, составило 15 %. Разрушение балки-стенки БС-3 произошло в результате исчерпания прочности бетона опорной зоны (20-й шаг нагружения, элементы № 31…32, 41…42, 51…52, 61…62, 71…72, 81…82, 91…92, 101…102), что также соответствовало опыту.

Число итераций, необходимое для достижения 5%-й точности расчета шагово-итерационным методом с использованием секущих характеристик жесткости, составило от 20 до 100 на различных этапах приложения нагрузки. В рамках инкрементального подхода число итераций было ограничено одной на каждом шаге изменения нагрузки, при этом ухудшение точности расчета по сравнению с шагово-итерационным методом составило по перемещениям от 3 до 5 % в зависимости от особенностей решаемой задачи.

Полученные результаты в целом показали хорошее согласование опытных и теоретических прогибов, вычисленных с использованием физических соотношений в инкрементальной форме, а также последовательности образования и развития трещин во всем диапазоне увеличения нагрузки от момента трещинообразования до разрушения, что позволяет рекомендовать инкрементальную модель для численного моделирования железобетонных конструкций, работающих в условиях плоского напряженного состояния. Разработанный метод расчета железобетонных конструкций в приращениях позволяет исключить многоитерационые процедуры при решении физически нелиней-

ных задач и перейти от расчета отдельных конструкций к расчету сложных пространственных конструктивных систем и тем самым существенно повысить надежность проектных решений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Карпенко С. Н.* Построение общей методики расчета железобетонных стержневых конструкций в форме конечных приращений // Бетон и железобетон. 2005. № 1. С. 13—18.

2. *Карпенко С. Н., Палювина С. Н.* О физически нелинейном методе расчета изгибаемых железобетонных плит в конечных приращениях // ACADEMIA архитектура и строительство. 2007. № 3. С. 87—93.

3. *Карпенко Н. И.* Общие модели механики железобетона. М. : Стройиздат, 1996. С. 412.

4. Исследование работы железобетонных балок-стенок / Ю. Ф. Бирулин, Г. Т. Мощевитин, Н. И. Карпенко, Т. А. Балан, Л. И. Ярин // Совершенствование технологии производства и монтажа железобетонных конструкций. М., 1980. С. 5—19.

1. *Karpenko S. N.* Postroenie obshchey metodiki rascheta zhelezobetonnykh sterzhnevykh konstruktsiy v forme konechnykh prirashcheniy // Beton i zhelezobeton. 2005. № 1. S. 13—18.

2. *Karpenko S. N., Palyuvina S. N.* O fizicheski nelineynom metode rascheta izgibaemykh zhelezobetonnykh plit v konechnykh prirashcheniyakh // ACADEMIA arkhitektura i stroitel'stvo. 2007. № 3. S. 87—93.

3. *Karpenko N. I.* Obshchie modeli mekhaniki zhelezobetona. M. : Stroyizdat, 1996. S. 412.

4. Issledovanie raboty zhelezobetonnykh balok-stenok / Yu. F. Birulin, G. T. Moshchevi-tin, N. I. Karpenko, T. A. Balan, L. I. Yarin // Sovershenstvovanie tekhnologii proizvodstva i montazha zhelezobetonnykh konstruktsiy. M., 1980. S. 5—19.

© Карпенко С. Н., Петров А. Н., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Карпенко С. Н., Петров А. Н. Модель деформирования железобетона в приращениях и ее приложение к расчету балок-стенок // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 362—367.

УДК 624.012.45.04:539.3

С. Ф. Клованич

ВАРИАНТ ТЕОРИИ ТЕЧЕНИЯ СВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

Формулируется физическая модель для грунта в виде ассоциированной теории пластического течения, основанной на поверхности нагружения замкнутой формы. Предлагается аналитическая форма этой поверхности. Учитывается дилатация, деформационное упрочнение и разупрочнение материала. Модель ориентирована на метод конечных элементов в нелинейной постановке. Приводятся примеры расчетов, подтверждающие достоверность модели.

К л ю ч е в ы е с л о в а: грунты, пластичность, теория течения, метод конечных элементов.

In this article formulated is the physical model for soil in form of associated plastic flow theory founded on the surface of closed form loading. The authors suggest the analytical form of this surface. They take into account material dilatation, strain strengthening and softening. The model is oriented to the method of finite element in nonlinearity. The examples of calculations that prove this model are given.

K e y w o r d s: soil, plasticity, flow theory, finite element method.

Введение. Классические теории пластичности, используемые в механике грунтов, основанные на гипотезах Мора — Кулона, Друкера — Прагера, Мизеса — Боткина, применяют для описания предельных поверхностей линейные образующие, приводящие к бесконечным значениям прочности материала при бесконечных уровнях гидростатического сжатия. Это обстоятельство обусловлено предположением, что предельное состояние материала наступает только за счет сдвиговых составляющих напряжений, и не учитывает факт возможного разрушения «по отрыву-сжатию» [1]. При этом пластическое течение ассоциируется с поверхностью нагружения, которая строится как модификация (изотропная деформация и (или) перемещение) поверхности прочности и тоже является разомкнутой в области гидростатического сжатия. Между тем, исследования последних лет для большинства материалов свидетельствуют в пользу того, что поверхность пластичности должна быть замкнута как в области изотропного растяжения, так и в области изотропного (гидростатического) сжатия, т. е. в материале реализуется смешанный механизм предельного состояния как по сдвигу, так и по сжатию-растяжению (отрыву) [1, 2, 3]. Этому посвящено значительное число работ [4—10]. Однако в большинстве этих исследований принимают в качестве исходной бесконечную поверхность и замыкают ее в области всестороннего сжатия сферой или эллипсоидом вращения. При этом нарушается методологическое единство описания свойств материала при различных уровнях гидростатического сжатия, поверхность перестает быть гладкой, параметры замыкающей поверхности трудно определимы опытным путем.

Здесь предлагается обобщение известной предельной поверхности Друкера — Прагера, симметричной относительно диагонали пространства главных напряжений, имеющей в качестве образующей замкнутую кривую, в качестве направляющей — криволинейный треугольник. Эта поверхность

является исходной для построения поверхностей нагружения. Другими словами, речь идет о варианте ассоциированной теории пластического течения с деформационным упрочнением.

Постановка задачи. В общем виде теория пластического течения с упрочнением формулируется в виде связи между приращениями деформаций и напряжений [7]:

$$d\{\sigma\} = [D]_{ep}\, d\{\varepsilon\}, \tag{1}$$

где $[D]_{ep}$ — упругопластическая матрица:

$$[D]_{ep} = [D] - [D]\frac{\partial Q}{\partial\{\sigma\}}\left(\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right)^T [D] \Big/ \left(\frac{\partial F}{\partial\{\sigma\}}\right)^T [D]\frac{\partial Q}{\partial\{\sigma\}} + \Lambda, \tag{2}$$

[*D*] — начальная матрица упругости, отвечающая закону Гука для изотропного материала.

Здесь *F* и *Q* — некие функции, называемые функцией нагружения и пластическим потенциалом, при этом $Q \neq F$ соответствует неассоциированной, а *Q*=*F* — ассоциированной формулировке теории течения. При разгрузке, когда $F = 0$; $dF < 0$; $\left(\partial F / \partial\{\sigma\}\right)^T d\{\sigma\} < 0,$ второе слагаемое в (2) принимается равным нулю.

Функция Λ называется функцией упрочнения. Если в качестве параметра упрочнения χ принимается работа напряжений на пластических деформациях, а $d\chi = \{\sigma\}^T d\{\varepsilon_p\}$, то функция упрочнения определяется так:

$$\Lambda = -\partial F / \partial\chi \{\sigma\}^T \; \partial F / \partial\{\sigma\} = -\partial F / \partial\{\varepsilon_p\} \cdot \partial F / \partial\{\sigma\}. \tag{3}$$

Рассмотрим так называемый ассоциированный вариант течения, когда *Q*=*F*. В этом случае *F* представляет собой поверхность, по нормали к которой происходит пластическое течение. В случае учета упрочнения эта поверхность всегда проходит через точку текущего наряжения и меняется в процессе нагружения. Однако в большинстве современных теорий поверхность строится не в шестимерном пространстве напряжений, а в местной текущей цилиндрической октаэдрической системе координат σ_o, τ_o, θ, где θ — так называемый угол вида напряженного состояния $0 \le \theta \le \pi/3$.

$$\sigma_o = 1/3(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z); \quad \tau_o = \sqrt{2/3}\sqrt{J_2}; \quad \theta = 1/3\arccos\left(\sqrt{2}J_3 / \tau_o^3\right). \tag{4}$$

Здесь J_2 и J_3 — второй и третий инварианты девиатора напряжений:

$$J_2 = -s_x s_y - s_y s_z - s_x s_z + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2;$$
$$s_x = \sigma_x - \sigma_o; \; s_y = \sigma_y - \sigma_o; \; s_z = \sigma_z - \sigma_o;$$
$$J_3 = s_x s_y s_z - s_x\tau_{yz}^2 - s_y\tau_{xz}^2 - s_z\tau_{xy}^2 - 2\tau_{xy}\tau_{yz}\tau_{xz}.$$

В этой системе координат $\{\sigma\}=\{\sigma_o\ \tau_o\}$ и $\{\varepsilon\}=\{\varepsilon_o\ \gamma_o\}$, где

$$\varepsilon_o=1/3(\varepsilon_x+\varepsilon_y+\varepsilon_z);\ \gamma_o=2\sqrt{2/3}\sqrt{J_{2\varepsilon}};$$
$$J_2=-e_xe_y-e_ye_z-e_xe_z+1/4\left(\gamma_{xy}^2+\gamma_{yz}^2+\gamma_{xz}^2\right);$$
$$e_x=\varepsilon_x-\varepsilon_o;\ e_y=\varepsilon_y-\varepsilon_o;\ e_z=\varepsilon_z-\varepsilon_o,$$

ε_o и γ_o — октаэдрические продольные и сдвиговые деформации; $J_{2\varepsilon}$ — второй инвариант девиатора деформаций. Начальная матрица упругости [*D*], входящая в выражение (2), в данном случае будет иметь вид

$$[D]=\begin{bmatrix}3K_o & 0\\ 0 & G_o\end{bmatrix}, \tag{5}$$

где K_o и G_o — объемный модуль и модуль сдвига.

Осуществив матричные перемножения и сложение, выражение (2) можно представить в обычной форме:

$$[D]_{ep}=\begin{bmatrix}3K & 0\\ 0 & G\end{bmatrix}, \tag{6}$$

где $3K=3K_o-\lambda\left(a_{11}+a_{12}\dfrac{d\varepsilon_o}{d\gamma_o}\right)/\Delta;\quad G=G_o-\lambda\left(a_{22}+a_{12}\dfrac{d\gamma_o}{d\varepsilon_o}\right)/\Delta.$

Здесь

$$a_{11}=9K_o^2\left(\partial F/\partial\sigma_o\right)^2;\ a_{12}=3K_oG_o\cdot\partial F/\partial\sigma_o\cdot\partial F/\partial\tau_o;\ a_{22}=G_o^2\left(\partial F/\partial\tau_o\right)^2,$$
$$\Delta=-(a_{11}+a_{12})/(3K_o)-\partial F/\partial\chi\left(\sigma_o\cdot\partial F/\partial\sigma_o+\tau_o\cdot\partial F/\partial\tau_o\right).$$

Функция нагружения. Представим выражение для поверхности нагружения в следующем виде:

$$F\left(\sigma_o\tau_o\theta\right)=\tau_o-A_o\left(b+\sigma_o\right)\sqrt{a-\sigma_o}=0,$$

$$\text{или}\ \ \tau_o=A_o\left(b+\sigma_o\right)\sqrt{a-\sigma_o}\ . \tag{7}$$

Эта поверхность всегда проходит через точку с координатами текущего нагружения σ_o,τ_o, замкнута с двух сторон и пересекает ось σ_o в точках $\sigma_o=-b$ и $\sigma_o=a$ (рис. 1, *а*). Кроме того, наложим на (7) следующие условия:

$$\tau_o\big|_{\sigma_o=0}=c_o;\quad \partial\tau_o/\partial\sigma_o\big|_{\sigma_o=0}=M_o, \tag{8}$$

которые позволяют установить следующие соотношения между параметрами кривой (7):

$$A_o=2M_o\sqrt{a}/(2a+b);\quad b=2ac_o/(2aM_o-c_o)\ . \tag{9}$$

Параметр a также может быть установлен точно исходя из условий (8), но при этом выражения для него получаются достаточно громоздкими. Но его можно установить по приближенной, более простой зависимости

$$a \approx \sigma_o / [1 - \left(\tau_o / M \sigma_o\right)^2] + b \,. \qquad (10)$$

Рассмотрим подробно участки кривой (6) на рис. 1 *а*. Прежде всего она асимптотически приближается к предельной по Мору прямой $\tau_o = M_o \sigma_o + c_o$. При этом зона под прямой соответствует зоне упрочнения, над прямой — разупрочнения. На условной диаграмме $\tau_o — \gamma_o$ (рис. 1, *в*) это соответственно восходящие и нисходящие участки. Кроме того, производная функции (6) меняет знак на участке от $-b$ до a. Смена знака производной отвечает участкам уплотнения и дилатации на условной диаграмме $\sigma_o — \varepsilon_o$ (рис. 1, *б*).

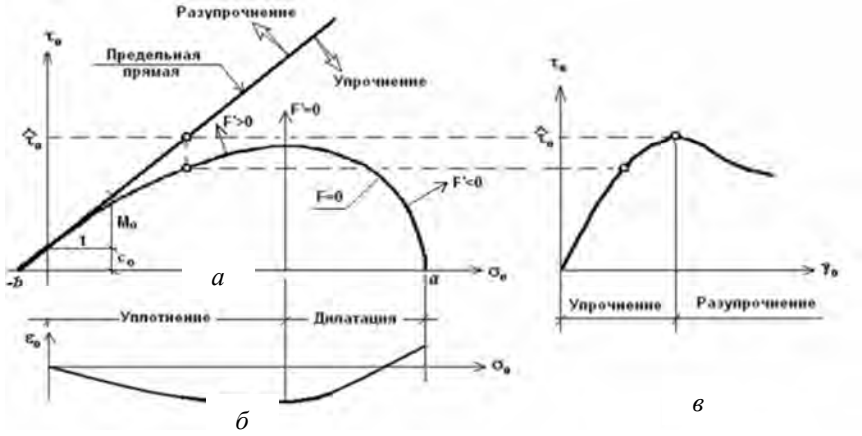


Рис. 1. Функция нагружения

Общий вид поверхности нагружения в простанстве главных напряжений и ее характерные сечения представлены на рис. 2, *а*. Так называемое девиаторное сечение этой поверхности не окружность, а криволинейный треугольник с максимальным τ_1 и минимальным τ_2 радиусами (рис. 2, *б*), соответствующими экстремальным значениям угла $\theta = \pi/3$ и $\theta = 0$ при $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3$ и $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$.

При этом по Кулону

$$M_1 = 2\sqrt{2}\sin\varphi/(3-\sin\varphi);\; M_2 = 2\sqrt{2}\sin\varphi/(3+\sin\varphi);$$

$$c_1 = 2\sqrt{2}c\cos\varphi/(3-\sin\varphi);\; c_2 = 2\sqrt{2}c\cos\varphi/(3+\sin\varphi),$$

где φ и c — кулоновские угол внутреннего трения и сцепление.

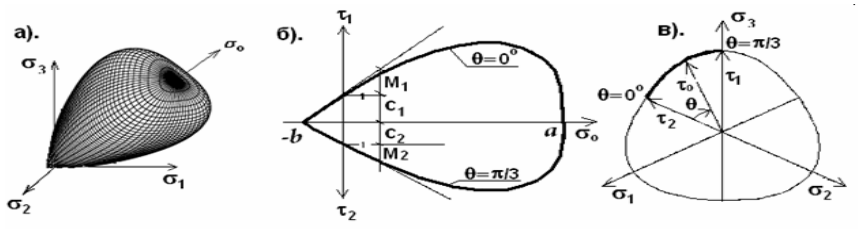


Рис. 2. Общий вид поверхности и ее характерные сечения

Интерполяцию между двумя предельными случаями $\theta = 0$ и $\theta = \pi/3$ можно осуществить с помощью следующего выражения [11]:

$$\rho(\theta) = 1 - 4(1-g)\cos\vartheta(1-\cos\vartheta), \quad \vartheta = \pi/3 - \theta\ , \tag{11}$$

где $g = (3-\sin\varphi)/(3+\sin\varphi)$. При этом $\rho(0) = 1$ и $\rho(\pi/3) = g$. Тогда параметры формулы (9) могут быть определены так:

$$M_o = \rho(\theta)M_1; \quad c_o = \rho(\theta)c_1,\ A_o = \rho(\theta)A_1; \quad A_1 = 2\sqrt{a}M_1/(2a+b). \tag{12}$$

Производные функции нагружения. Вектор-столбец производных $\partial F/\partial\{\sigma\}$, входящий в выражения (2) и (3), имеет вид

$$\partial F/\partial\{\sigma\} = \{\partial F/\partial\sigma_o \quad \partial F/\partial\tau_o\}\ . \tag{13}$$

Дифференцируя (6) по σ_o и τ_o, будем иметь

$$\begin{aligned} &\partial F/\partial\sigma_o = -A_o\left[\sqrt{a-\sigma_o} - 0{,}5(b+\sigma_o)/\sqrt{a-\sigma_o}\right];\\ &\partial F/\partial\tau_o = 1 - (b+\sigma_o)\sqrt{a-\sigma_o}\cdot\partial A_o/\partial\tau_o. \end{aligned} \tag{14}$$

В свою очередь, имея в виду (12) и (4),

$$\begin{aligned} \partial A_o/\partial\tau_o &= A_1\cdot\partial\rho(\theta)/\partial\tau_o = \\ &= 3\sqrt{2}\ J_3\ A_1\partial\rho(\theta)/\partial\theta/\left[\tau_o^4\sqrt{1-2\left(J_3/\tau_o^3\right)^2}\right]. \end{aligned} \tag{15}$$

Дифференцирование выражения (11) дает

$$\partial\rho(\theta)/\partial\theta = -4(1-g)\sin\vartheta(2\cos\vartheta - 1). \tag{16}$$

Таким образом, все аналитические выражения для производных, входящих в соотношения (2) и (3), установлены.

Упрочнение и разупрочнение. Строго говоря, соотношение (6), представляющее собой функцию нагружения, уже учитывает упрочнение, так как соответствующая ей поверхность непрерывно меняет свою форму в процессе нагружения. Параметр a в (10) является функцией напряженного состояния. В принципе выражение для Λ в соотношениях (2) может быть принято равным нулю. По всей видимости, это было бы справедливым, если бы грунт был абсолютно плотным материалом. Однако большинство грунтов обладает довольно высокой пористостью, которая уменьшается в результате его всестороннего обжатия. Причем это уменьшение непропорционально напряжению гидростатического обжатия, что обусловливает дополнительную физическую нелинейность материала. Поэтому изменение пористости целесообразно принять в качестве дополнительной меры упрочнения. Объемная пористость грунта e определяется в зависимости от октаэдрических нормальных напряжений по известной формуле Терцаги [12]

$$e = e^o - \mu\ \ln\sigma_o, \tag{17}$$

где e^o — пористость в естественном, ненагруженном, состоянии; μ — параметр, определяемый из компрессионных испытаний.

График этой функции в логарифмических координатах представлен в виде прямой *1* на рис. 3.

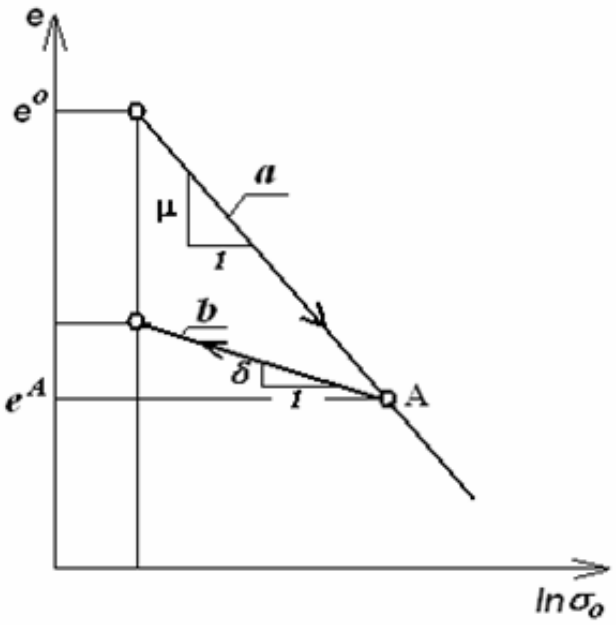


Рис. 3. Изменение пористости

Объемные деформации, вызванные изменением пористости, определяются так:

$$3\varepsilon_{\text{o}} = -(e - e_{\text{o}})/(1+e)\,,\ 3d\varepsilon_{\text{o}} = -de/(1+e)\,. \tag{18}$$

При разгрузке из положения *A* пористость не восстанавливается до первоначального состояния, имеется остаточная пористость. Восстанавливаемая часть также определяется по формуле Терцаги

$$e = e^{A} - \delta \ln\sigma_{\text{o}}\,, \tag{19}$$

где δ — экспериментальный параметр. График функции (19) представлен на рис. 3 (прямая *2*). Приращения пластической части объемных деформаций равны $d\varepsilon_{\text{o}}^{p} = d\varepsilon_{\text{o}} - d\varepsilon_{\text{o}}^{e}$, где $d\varepsilon_{\text{o}}^{e}$ — остаточные деформации. Другими словами,

$$3d\varepsilon_{\text{o}}^{p} = (\mu - \delta)d\sigma_{\text{o}}/\left[(1+e)\sigma_{\text{o}}\right]. \tag{20}$$

Принимая в качестве параметра упрочнения работу октаэдрических нормальных напряжений на пластических деформациях $d\chi = \sigma_{\text{o}} d\varepsilon_{\text{o}}^{p}$, с помощью (20) получим следующее выражение для производной $\partial F/\partial\chi$, входящей в соотношение (3):

$$\partial F/\partial\chi = -3\partial F/\partial\sigma_{\text{o}}\left(1+e\right)/(\mu - \delta)\,. \tag{21}$$

Заметим, что при таком подходе разгрузка осуществляется по нелинейному, логарифмическому закону с модулями $K_o = (1+e)\sigma_o/\delta$; $G_o = 3K_o(1-2\nu)/\left[2(1+\nu)\right]$, где ν — коэффициент поперечных деформаций. При этом, как обычно при разгрузке, второе слагаемое в (2) равно нулю [9].

Если напряжения лежат выше предельной прямой (см. рис. 1, *а*), т. е. находятся в зоне разупрочнения, то соотношения теряют смысл, так как при этом нарушается известный постулат Друккера. Тем не менее, этот эффект в реальных опытах наблюдается, процесс деформирования осуществляется по ниспадающей ветви диаграммы (см. рис.1, *в*). Поэтому, чтобы его учесть, выражение (21) представим в виде

$$\begin{aligned}\partial F/\partial\chi &= 1/\tau_o \cdot \partial F/\partial\tau_o \cdot \partial\tau_o/\partial\gamma_o^p = 1/\tau_o \cdot G_p \cdot \partial F/\partial\tau_o = \\ &= 1/\tau_o \cdot G_o G/(G_o - G)\cdot \partial F/\partial\tau_o,\end{aligned} \tag{22}$$

где G_p — пластический модуль сдвига. Касательный упругопластический модуль G определим, задав аналитическое выражение для кривой на рис. 1, *в*, например, в виде, аналогичном для диаграммы деформирования разупрочняющихся материалов при одноосном сжатии [13],

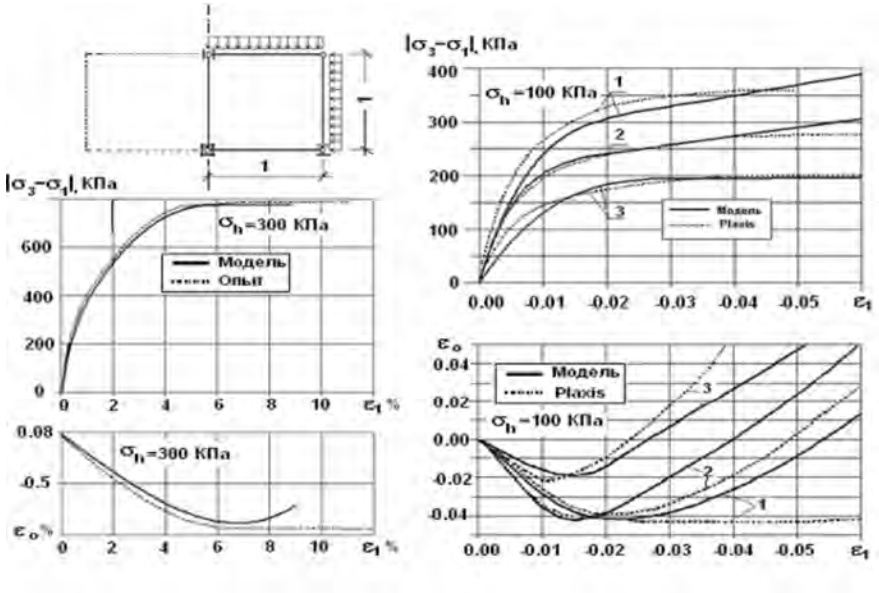
$$\xi = k\eta/\left[1+(k-2)\eta+\eta^2\right], \tag{23}$$

где $\xi = \tau_o/\bar{\tau}_o$; $\eta = \gamma_o/\bar{\gamma}_o$; $k = G_o\bar{\gamma}_o/\bar{\tau}_o$. Здесь $\bar{\gamma}_o$ и $\bar{\tau}_o$ — координаты вершины диаграммы. Дифференцируя (23) по γ_o, получим

$$G = \partial\tau_o/\partial\gamma_o = G_o(1-\eta^2)/\left[1+(k-2)\eta+\eta^2\right]. \tag{24}$$

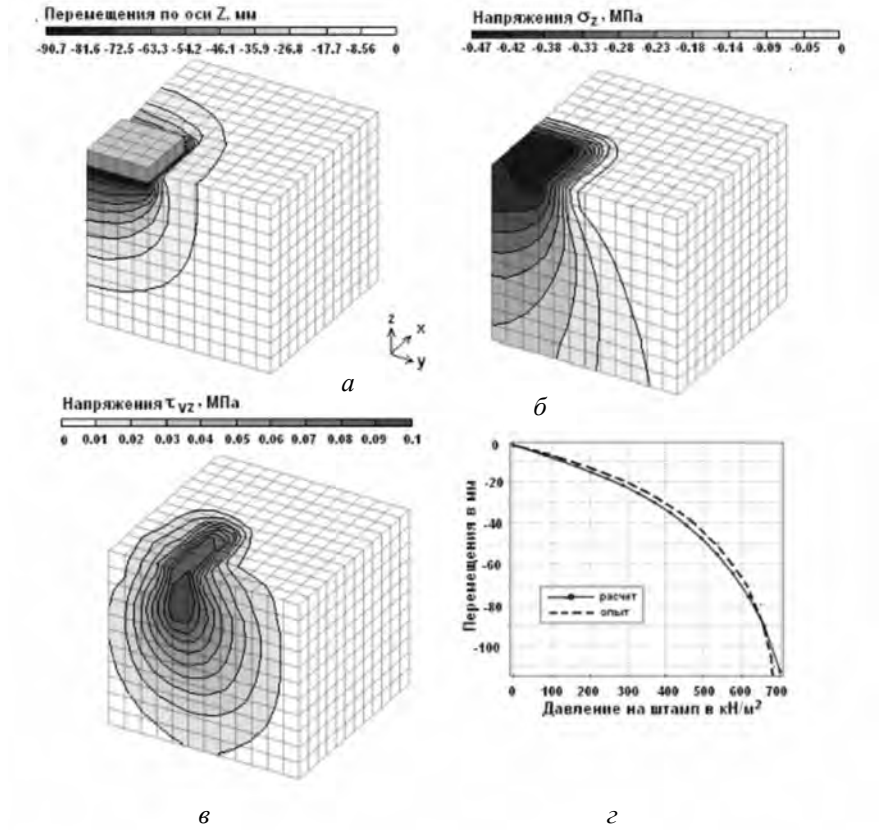
Тестирование модели. Описанная модель тестировалась в составе вычислительного комплекса «Concord» [11], предназначенном для решения физически нелинейных задач в инкрементальной форме методом конечных элементов. В качестве тестового примера рассматривался расчет одного восьмиузлового объемного конечного элемента прямоугольной формы единичных размеров (рис. 4, *а*), с помощью которого моделировалось сложное напряженное состояние. Нагрузки к элементу прикладывались в горизонтальном и вертикальном направлениях ступенями, причем на первой ступени их величины были равны значениям, создающим равномерное гидростатическое сжатие σ_h=100 кПа. На последующих ступенях прикладывалась только вертикальная нагрузка вплоть до наступления предельного состояния. На рис. 4, *б* представлены данные расчетов для грунта со следующими характеристиками: 1) E=20 МПа, ν=0,2, φ=30°, c=0; 2) E=30 МПа, ν=0,2, φ=35°, c=0. Результаты расчетов сравнивались с данными [14].

Приведем результаты численного решения МКЭ еще одной тестовой задачи о действии квадратного жесткого штампа на грунт и сопоставим результаты расчетов с экспериментальными данными [10]. Размер штампа 40×40 см. Нагрузка в испытаниях увеличивалась ступенями по 40 кН/м^2. Для расчета использовались объемные изопараметрические восьмиузловые конечные элементы. Рассматривалась только симметричная часть образца.



а *б*

Рис. 4. Тестовая задача



а *б* *в* *г*

Рис. 5. Задача о штампе

Расчетные характеристики грунта, отвечающие экспериментальным данным [4]: E=2,5 МПа, $\varphi=18^{o}$, c=0,045 МПа. Коэффициент Пуассона $\nu=0{,}35$. Нагружение в расчете принималось аналогично опытному. Результаты расчета осадок штампа по ступеням нагружения представлены на рис. 5, *г*. Здесь же даны изолинии перемещений (рис. 5, *а*) и напряжений (рис. 5, *б*, *в*) при q=680 кН/м^2. Из рисунков видно, что расчетный характер деформированного и напряженного состояния грунта под штампом отвечает истинному.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зарецкий Ю. К.* Вязко-пластичность грунтов и расчеты сооружений. М. : Стройиздат, 1988. 352 с.

2. *Дидух Б. И.* Упругопластическое деформирование грунтов. М. : РУДН, 1987. 166 с.

3. *Гольдин А. Л., Рассказов Л. Н.* Проектрирование грунтовых плотин. М. : АСВ, 2001. 384 с.

4. *Балюра М. В.* Горизонтальные перемещения в основании под жестким штампом // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1973. № 6. С. 39—41.

5. *Stein E., Ramm E., Rabk E.* Error-Controlled Adaptive Finite Element in Solid Mechsnics. Willey, West Sussex PO198SQ, England, 2003. 410 p.

6. *Brinkgreve R. B. J., Vermeer P. A.* Plaxis. Finite Element Code for Soil and Rock Analysis. Materials Models Manual. Part 3. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfild, 1998.

7. *Zienkiewicz O. C.* The Finite Element Metod. Fifth edition. V. 2. Solid Mechanics. Butterworth-Heinmann, 2000. 459 p.

8. *Bigoni D., Piccolroaz* A. Yield Criteria for Quasibrittle and Frictional Materials // Int. J. of Solid and Structures. 2004. № 3. P. 2855—2878.

9. Roscoe K. J., Schofield A. N. Machanical Behavior of an Idealised «Wet» Clay // Proc. European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. V. 1. 1963. P. 47—54.

10. *Collins I. F., Hilder T.* A theoretical Framework for Constructing Elatic / Plastic Constitutive Models of Triaxial Test // Int. J. for Numerical and Analytical Method in Geomechanics. 2002. № 26. P. 131—134.

11. *Клованич С. Ф.* Метод конечных элементов в нелинейных задачах инженерной механики. Запорожье : ИПО Запорожье, 2009. 400 с.

12. *Терцаги К.* Теория механики грунтов. М. : Стройиздат, 1961. 507 с.

13. *Liu T. C. Y., Nilson A. H., Slate F. O.* Stress-Strein Response and Fracture of Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression // ACI Journal. V. 69. 1972. P. 291—295.

14. *Burland J. B.* The Yielding and Dilatation of Clay (Correspondence) // Geotechnique. 1965. V. 15. P. 211—214.

1. *Zaretskiy Yu. K.* Vyazko-plastichnost' gruntov i raschety sooruzheniy. M. : Stroyizdat, 1988. 352 s.

2. *Didukh B. I.* Uprugoplasticheskoe deformirovanie gruntov. M. : RUDN, 1987. 166 s.

3. *Gol'din A. L., Rasskazov L. N.* Proektrirovanie gruntovykh plotin. M. : ASV, 2001. 384 s.

4. *Balyura M. V.* Gorizontal'nye peremeshcheniya v osnovanii pod zhestkim shtampom // Osnovaniya, fundamenty i mekhanika gruntov. 1973. № 6. S. 39—41.

5. *Stein E., Ramm E., Rabk E.* Error-Sontrolled Adaptive Finite Element in Solid Mechsnics. Willey, West Sussex PO198SQ, England, 2003. 410 p.

6. *Brinkgreve R. B. J., Vermeer P. A.* Plaxis. Finite Element Code for Soil and Rock Analysis. Materials Models Manual. Part 3. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfild, 1998.

7. *Zienkiewicz O. C.* The Finite Element Metod. Fifth edition. V. 2. Solid Mechanics. Butterworth-Heinmann, 2000. 459 p.

8. *Bigoni D., Piccolroaz A.* Yield Criteria for Quasibrittle and Frictional Materials // Int. J. of Solid and Structures. 2004. № 3. P. 2855—2878.

9. *Roscoe K. J., Schofield A. N.* Machanical Behavior of an Idealised «Wet» Clay // Proc. European Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering. V. 1. 1963. P. 47—54.

10. *Collins I. F., Hilder T.* A theoretical Framework for Constructing Elatic / Plastic Constitutive Models of Triaxial Test // Int. J. for Numerical and Analytical Method in Geomechanics. 2002. № 26. P. 131—1347.

11. *Klovanich S. F.* Metod konechnykh elementov v nelineynykh zadachakh inzhenernoy mekhaniki. Zaporozh'e : IPO Zaporozh'e, 2009. 400 s.

12. *Tertsagi K.* Teoriya mekhaniki gruntov. M. : Stroyizdat, 1961. 507 s.

13. *Liu T. C. Y., Nilson A. H., Slate F. O.* Stress-Strein Response and Fracture of Concrete in Uniaxial and Biaxial Compression // ACI Journal. V. 69. 1972. P. 291—295.

14. *Burland J. B.* The Yielding and Dilatation of Clay(Correspondence) // Geotechnique. 1965. V. 15. P. 211—214.

© Клованич С. Ф., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Клованич С. Ф. Вариант теории течения связных грунтов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 368—377.

УДК 621.039: 624.012

У. Х. Магдеев, В. И. Морозов, Ю. В. Пухаренко, Юй Хуэй

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОЛСТОСТЕННОГО КОРПУСА ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИЗ ТЯЖЕЛОГО АРМОЦЕМЕНТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ

Оценивается возможность использования программного комплекса ANSYS для оценки напряжено-деформированного состояния (НДС) корпуса высокого давления (КВД) из тяжелого армоцемента (ТАЦ) в рамках линейного и нелинейного учета поведения материалов. Расчет выполняется на внутреннее давление, температурные воздействия, а также на совместное действие температуры и давления. Показано, что учет нелинейности с помощью программы ANSYS дает результаты, отличные от таковых в линейном расчете, и более точно согласующиеся с экспериментальными данными, в частности на физической модели корпуса реактора 1/3 натуральной величины.

К л ю ч е в ы е с л о в а: нелинейный расчет, тяжелый армоцемент, ядерный реактор.

Evaluated is the possibility of using ANSYS programs to calculate stressed and strained state of high pressure body from heavy ferrocement within linear and nonlinear material behavior. Calculated are internal pressure, thermal effect as well as combined temperature and pressure activity. It is shown that taking into account nonlinearity with the help of ANSYS programs gives results different from the results of linear calculations, and they agree more precisely with experimental data, particularly, on physical model of reactor body in 1/3 of its natural size.

K e y w o r d s: nonlinear calculations, heavy ferrocement, nuclear reactor.

В настоящее время имеется большое количество программ, позволяющих выполнять различные расчеты НДС сложных строительных объектов. К числу наиболее популярных программ, используемых в России, Китае и других странах, можно отнести программы ANSYS, ABAQUS, COSMOS. Это достаточно мощные программные комплексы, позволяющие проводить анализ НДС, в том числе сложных по геометрии и характеру работы конструкций и сооружений, как в линейной, так и в нелинейной постановках. Однако в каждом конкретном случае требуется своего рода адаптация программы в связи с необходимостью учета специфики поведения материалов и конструкций под нагрузками и воздействиями.

Рассматривается защитный корпус ядерного реактора (ЯР) из ТАЦ [1], находящийся в условиях внутреннего давления, температурных воздействий, а также при совместном действии температуры и давления. На рис. 1 приводится схема цилиндрического корпуса ЯР и расчетная схема в виде 1/4 части (в силу соответствующей симметрии) в рамках осесимметричной постановки.

Рассматривается вариант, исключающий вероятность смещения днища относительно стенок. Это достигается введением шпонок на контакте днища и стенки. Моделирование шпоночного соединения с возможностью «отлипания» осуществляется с помощью шарнирно-подвижных связей в двух направлениях: вертикальном и горизонтальном [1]. Шпонки моделируются специальным тонким слоем из ортотропного материала. Предполагается, что модуль упругости этого слоя в вертикальном направлении равен модулю упругости

материала днища, а модуль упругости в радиальном и тангенциальном направлениях в 35 раз меньше: $E_r=E_\theta=1000$ МПа; $E_z=35\,000$ МПа [1]. Задачу решаем в линейной и нелинейной постановке. Начальные интегральные жесткостные характеристики ТАЦ стенки даны как для ортотропного материала и задаются в соответствии с [1]: $E_r=44\,800$ МПа, $E_z=52\,000$ МПа, $E_\theta=59\,800$ МПа, $G_{rz}=18\,300$ МПа, $\upsilon=0{,}1$. В рамках нелинейного анализа дополнительно для материала стенки (ТАЦ) строятся зависимости σ — ε с учетом расположения арматурных стрежней относительно угла поворота глобальных осей модели корпуса (рис. 2). Полученные графические зависимости σ — ε задаются как кусочно-линейные функции.

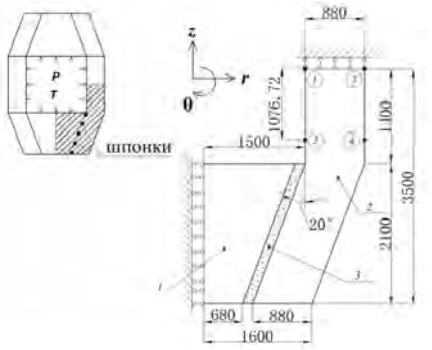


Рис. 1. Принципиальное конструктивное решение и расчетная схема цилиндрического корпуса ЯР [1]: *1* — торцевой элемент; *2* — стенка из ТАЦ; *3* — слой, моделирующий шпонки; номера в кружках — номера точки; *P* — давление; *T* — температура; *r* — радиальное направление; θ — тангенциальное направление; *Z* — вертикальное направление

Предполагается также, что модуль упругости меняется от температуры по зависимостям в соответствии с [2]: $E_\theta=(598–0{,}64T)10^2$ МПа; $E_y=(592–0{,}65T)10^2$ МПа; $E_r=(448–0{,}66T)10^2$ МПа. Температурное поле задается в соотвтетствии с [3]: $T=\Delta Ta(b/a–1)/(b–a)$. На рис. 3 показаны зависимости σ — ε для ТАЦ с учетом влияния температуры.

Здесь E_r, E_θ, E_z, G_{rz} — зависящие от температуры модули деформаций и модули сдвига ортотропного материала; υ — коэффициент Пуасса; σ — напряжение; ε — деформация; T — температура корпуса; ΔT — разность температуры внутренней и наружной поверхности корпуса; a, b — внутренний и наружный радиусы.

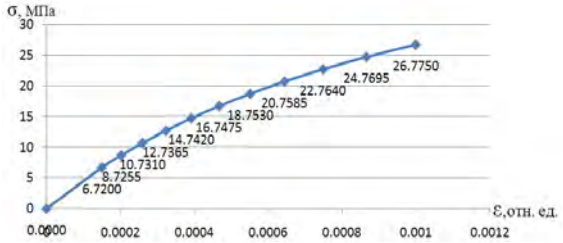


Рис. 2. График зависимости σ — ε для ТАЦ при расчете на давление

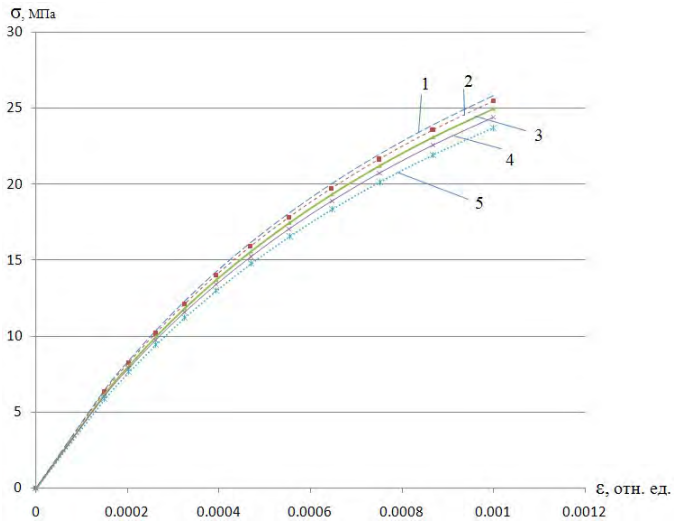


Рис. 3. График зависимости σ — **ε** для ТАЦ с учетом температуры, °С: *1* — 26; *2* — 40; *3* — 50; *4* — 66; *5* — 86

Материал днища рассматриваем как изотропный. В верхней зоне модуль упругости принимается как для бетона: E=39 200 МПа, а в нижней зоне, в связи с возможным трещинообразованием от изгиба днища, существенно занижен (E=5100 МПа). Жесткостные зависимости для днища вводятся также с учетом влияния температуры.

Первая серия расчетов выполнена в линейной постановке на внутреннее давление 10 МПа. Затем — на воздействие температуры до 100 °С на внутренней поверхности и на совместное действие температурного нагрева до 100 °С и давления 10 МПа. Вторая серия расчетов выполнена с использованием метода нелинейного анализа. Выбор параметров нагрузок обусловлен имеющимися опытными данными по результатам испытания физической крупномасштабной модели [1], а также их близостью к эксплуатационным значениям.

Некоторые результаты расчетов приводятся на рис. 4 и 5 и в табл. 1 и 2.

Подтверждается погрешность, привносимая использованием принципа суперпозиции полей напряжений от давления и температуры в нелинейном расчете. Из табл. 2 следует, что сложение результатов расчетов, выполненных раздельно на давление и температуру, дает значения, существенно отличающиеся от результатов, полученных в нелинейном расчете на комплексное воздействие. Заметим, что линейный расчет (см. табл. 1) таких расхождений не обнаруживает.

В таблицах также приводятся значения основных расчетных параметров, характеризующихся отличием их значений в линейном и нелинейном расчетах. В стенках цилиндрической части различия, в частности по тангенциальным напряжениям и тангенциальным деформациям, достигают 25…30 %, причем практически повсеместно учет нелинейности снижает экстремальные значения, тем самым выравнивая поля напряжений и деформаций по сечению.

В то же время на других участках конструкции нелинейный расчет дает значения, удовлетворительно корреспондирующиеся с параметрами из линейного расчета. Данный результат следует считать, пожалуй, ожидаемым,

поскольку в стенках цилиндрической части возникают существенно большие усилия, чем в конусной. Следует признать, однако, что характеры НДС, полученных в линейном и нелинейном расчетах, качественно согласуются. Данное обстоятельство было обнаружено и описано в [1], где подобный эффект объясняется исключительно высокой трещиностойкостью и жесткостью силового корпуса, меняющейся при данных уровнях нагрузок и воздействий несущественно. Вместе с тем, учет нелинейности дает результаты, точнее согласующиеся с опытными данными (см. рис. 5, *б*).

Таблица 1

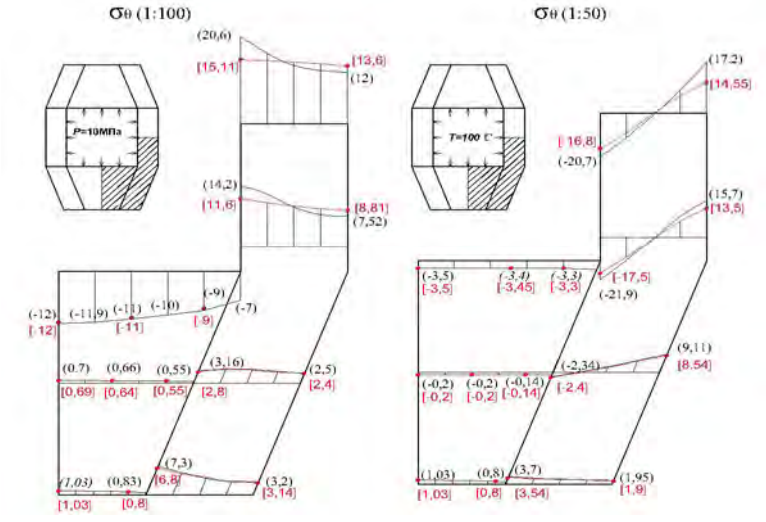
Значения тангенциальных напряжений по результатам линейного расчета (рис. 1)

№ точки	*P* (10 МПа)	*T* (100 ºС)	Сум. 2 + 3	ANSYS	Разн. 4 и 5
1	2	3	4	5	6
1	20,6	–20,7	–0,1	–0,95	0,85
2	12	17,2	29,2	29,75	0,55
3	14,2	–21,9	–7,7	–8,3	0,5
4	7,52	15,7	23,22	23,37	0,15

Таблица 2

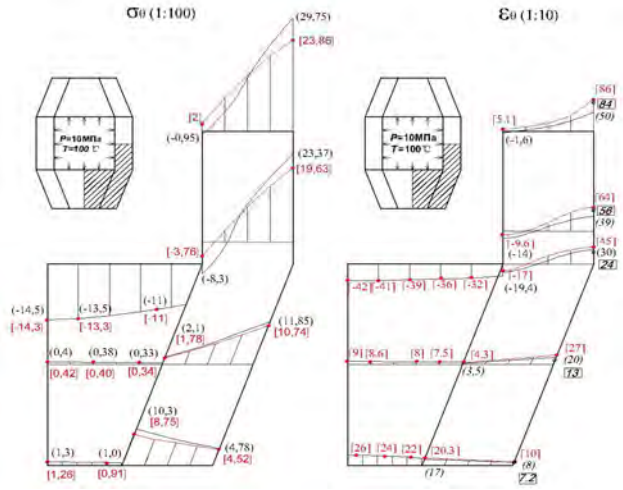
Значения тангенциальных напряжений по результатам нелинейного расчета

№ точки	*P* (10 МПа)	*T* (100 ºС)	Сум. 2 + 3	ANSYS	Разн. 4 и 5
1	2	3	4	5	6
1	15,1	–16,78	–1,69	2	3,69
2	13,63	14,55	28,2	23,86	4,34
3	11,6	–17,5	–5,9	–3,76	2,14
4	7,52	13,5	21,02	19,63	1,4



а *б*

Рис. 4. Результаты линейного и нелинейного расчета физической модели ЯР цилиндрической формы в 1/3 натуральной величины. Значения тангенциальных напряжений: ——— (20,6) — линейный расчет; • [15,11] — нелинейный расчет; *а* — на давление 10 МПа; *б* — при воздействии температуры до 100 °С



а *б*

Рис. 5. Результаты линейного и нелинейного расчета модели ЯР на совместное воздействие давления 10 МПа и температуры 100 °С и опытные значения: *а* — тангенциальных напряжений: — (–0,95) — линейный расчет; • [2] — нелинейный расчет; *б* — тангенциальных относительных деформаций: [86] — нелинейный расчет; ⊗ 84 — опыт [1]; — (50) — линейный расчет

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Морозов В. И. Корпуса высокого давления из тяжелого армоцемента для энергетических строительных и специальных технологий. СПб. : СПбГАСУ, 2011. 394 с.

2. Морозов В. И. Исследование напряженно-деформированного состояния и трещиностойкости толстостенных цилиндрических конструкций из дисперсно-армированного железобетона с высоким содержанием арматуры при неравномерном нагреве : дис… канд. техн. наук. 1977. 260 с.

3. Тимощенко С. П. Теория упругости. М. : Наука, 1975. С. 572.

1. *Morozov V. I.* Korpusa vysokogo davleniya iz tyazhelogo armotsementa dlya energeticheskikh stroitel'nykh i spetsial'nykh tekhnologiy. SPb. : SPbGASU, 2011. 394 s.

2. *Morozov V. I.* Issledovanie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i treshchinostoykosti tolstostennykh tsilindricheskikh konstruktsiy iz dispersno-armirovannogo zhelezobetona s vysokim soderzhaniem armatury pri neravnomernom nagreve : dis… kand. tekhn. nauk. 1977. 260 c.

3. *Timoshchenko S. P.* Teoriya uprugosti. M. : Nauka, 1975. S. 572.

© Магдеев У. Х., Морозов В. И., Пухаренко Ю. В., Юй Хуэй, 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Исследование напряженно-деформированного состояния толстостенного корпуса ядерного реактора из тяжелого армоцемента с использованием численных методов / У. Х. Магдеев, В. И. Морозов, Ю. В. Пухаренко, Юй Хуэй // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 378—382.

УДК 620.193:961.328

Р. Е. Мигаль, В. М. Бондаренко

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОРРОЗИОННЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЮ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА

Выявлено и изучено влияние коррозионных повреждений на нелинейное и неравновесное деформирование железобетонных конструкций.

К л ю ч е в ы е с л о в а: коррозионные повреждения, силовое сопротивление.

The author reveal and investigate the influence of corrosive affections on nonlinear and unbalanced deformation of reinforced concrete constructions.

K e y w o r d s: corrosive affections, strength resistance.

Применяется квазилинейная форма уравнения силового сопротивления [1]:

$$\varepsilon(t, t_0) = \frac{\sigma(t)}{E_{\text{вр}}(\sigma, t, t_0)} = \frac{\overline{S}[\sigma(t)]}{E_{\text{вр. л}}(t, t_0)} = \frac{\sigma(t)\overline{S}^0[\sigma(t)]}{E_{\text{вр. л}}(t, t_0)}, \quad (1)$$

где ε — полная относительная деформация; σ — напряжения, (t, t_0) — начало и окончание наблюдения; $E_{\text{вр}}(\sigma, t, t_0)$, $E_{\text{вр. л}}(t, t_0)$ — нелинейный временный модуль деформации и линейный временный модуль деформации соответственно; $\overline{S}[\sigma(t)]$ и $\overline{S}^0[\sigma(t)]$ — единая для квазилинейного уравнения (1) функция напряжений и единая для квазилинейного уравнения (1) функция нелинейности; $\overline{V}$ и m — единые для квазилинейного уравнения параметры нелинейности [1].

$$\overline{S}^0[\sigma(t)] = 1 + \overline{V}\left[\left(\frac{\sigma(t)}{R}\right)\right]^{\overline{m}}; \; E_{\text{вр. л}}(t, t_0) = \frac{E_{\text{мг}}(t)}{1 + E_{\text{мг}}(t)C_0(t, t_0)}, \quad (2)$$

здесь $E_{\text{мг}}(t)$ и $C_0(t, t_0)$ — модуль мгновенной деформации и мера простой ползучести.

Исследования предполагают устойчивое напряженно-деформированное состояние конструкции [2], т. е. для $\sigma_{\text{ср}} = \text{const}$, $\sigma_{\text{ср}} \le R_{\text{дл}}$.

$$\frac{d\Delta\delta(t)}{dt} = -\alpha[\Delta\delta(t)]^m, \text{ где } \Delta\delta(t) = 1 - \frac{\delta_{\text{кр}}(t_0) - \delta(t)}{\delta_{\text{кр}}}, \text{ при } m(n) \ge 1 \quad (3)$$

$$m(\eta) = \sum_0^2 q_{mi}\eta^i, \quad (4)$$

здесь $\sigma_{\text{ср}}$ — единое расчетное напряжение для сжатой части бетона; δ — глубина фронта продвижения повреждений; a, m, $\delta_{\text{кр}}$ — эмпирические параметры, зависящие от сочетания номинаций бетона и агрессора, уровня действующего напряжения $\eta = \frac{\sigma}{R}$, возраста бетона в начале коррозионного воздействия t_0; q_i — параметры (заметим, что записи для $a(\eta, t)$ и $\delta_{\text{кр}}(\eta, t)$ аналогичны (4) (рис. 1).

Решение (3) приводит к записи:

$$\delta(t) = f_m \delta_{\text{кр}}(t_0), \tag{5}$$

в частности, для $m = 1$

$$f_m = 1 - \Delta\delta(t, t_0) e^{-\alpha(t-t_0)}, \tag{6}$$

для $m > 1$

$$f_m = 1 - \left\langle \left[\Delta\delta(t, t_0)\right]^{\left[(-m)+1\right]} - \alpha\left[(-m)+1\right](t-t_0) \right\rangle^{\frac{1}{\left[(-m)+1\right]}}. \tag{7}$$

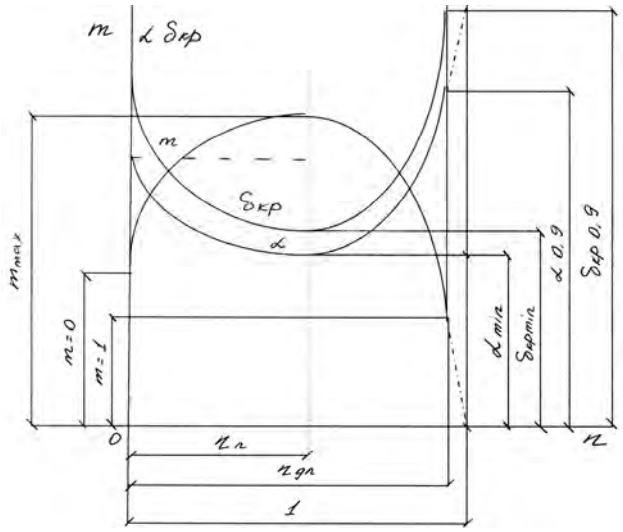


Рис. 1. Связь параметров α, m, $\delta_{\text{кр}}$ с уровнем напряжений η для вычисления величин q_{mi}, q_{ai}, $\delta_{\text{кр}}$

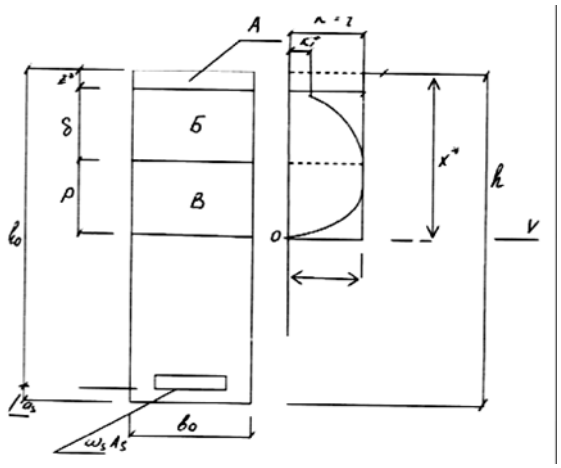


Рис. 2. Схема зонирования сжатой части сечения при коррозионных повреждениях: А — зона полного разрушения, Б — переходная зона частичного разрушения, В — зона неповрежденная и функция K^* сохранения механических характеристик в зоне Б

Функция сохранения исходных характеристик при коррозионных повреждениях K^* в зоне Б ($p \le z \le p+\delta$) характерна тем, что на поверхности контакта бетона с агрессивной средой она наименьшая K_1^* на глубине нейтрализации ($z^* + \delta$) сопряженно приходит к $K_1^*=1$ [3]; в пределах зоны Б она аппроксимируется зависимостью

$$K^*(z)=\sum_{i=0}^{i=2} a_i z^i, \tag{8}$$

коэффициент a_i из условий:

$$\text{при } z=p+\delta \to K^* = K_1^*;\ \text{при } z=p\ K_1^*=1;\ \left.\frac{dK^*}{dz}\right|_{z=p}=0, \tag{9}$$

откуда

$$a_0=1-\left(1-K_1^*\right)\left(\frac{p}{\delta}\right)^2;\ a_1=\frac{2\left(1-K_1^*\right)}{\delta^2};\ a_2=-\frac{1-K_1^*}{\delta^2}. \tag{10}$$

Поскольку (9) и (10) чисто геометрические условия, постольку функция сохранения K^* равно относится по всем силовым характеристикам:

$$K^*=\frac{R^*}{R}=\frac{E^*}{E}=\frac{G^*}{G_0}=\frac{C^*}{C}=\frac{K_{\text{об}}^*}{K_{\text{об}}}=..., \tag{11}$$

где (*) означает, что характеристика относится к поврежденному бетону.

Заметим, что к моменту асимптотической стабилизации (полному затуханию повреждений), т. е. $t \cong \infty$, значение (5):

$$f_m=1 \text{ и } \delta(\infty,t_0)=\delta_{\text{кр}}(t_0). \tag{12}$$

Характеристики силового сопротивления деформированию — жесткость при нагружении $\vec{D}^*$, отпорность при разгужении — $\overleftarrow{D}^*$, соответственно характеристика податливости $\vec{B}^*=\frac{1}{\vec{D}^*}$ и $\overleftarrow{B}^*=\frac{1}{\overleftarrow{D}^*}$, отсчитываются относительно центра тяжести приведенного сечения (ц. т.), положение которого отсчитывается для каждой фиксированной абсциссы x от любой линии отсчета, например растянутой грани; иллюстративно для $\vec{D}^*$ и $t \to \infty$, т. е. $\delta = \delta_{\text{кр}}(t_0)$

$$\vec{y}_{\text{ц.т}}(x)=\sum_1^k \vec{A}_k(x)\vec{E}_k(x,z_k)\vec{y}_k \Big/ \sum_1^k \vec{A}_k(x)\vec{E}_k(x,z_k), \tag{13}$$

где

$$A_S^*=\omega_s A_s;\ E_s^*=\frac{E_s}{\psi_s^*(x)};\ \vec{A}_\sigma=\text{в}_0\vec{p}(x);\ \vec{E}_{\delta p}=\frac{E_{\text{мг}}(t)}{\overline{S}^0\left(p/2\right)\left[1+E_{\text{мг}}C_0(t,t_0)\right]}, \tag{14}$$

$$\vec{A}_\delta=\frac{2}{3}\text{в}_0\vec{\delta}_{\text{кр}}(x);\ \vec{E}_{\sigma\delta}=\frac{E_{\text{мг}}K^*\left[p(x)+\frac{3}{8}\delta_{\text{кр}}(x)\right]}{\overline{S}^0\left[p(x)+\frac{3}{8}\delta_{\text{кр}}(x)\right]\left[1+E_{\text{мг}}(t)C_0(t,t_0)\right]}. \tag{15}$$

Здесь ω_s — коэффициент сохранения силового сопротивления рабочей растянутой арматуры, поврежденной коррозией; $\psi_s^*(x)$ — коэффициент влияния бетона растянутой зоны при $\mathrm{M}_{\text{пр}}^*$; y_A — расстояние от центра тяжести *k*-го компонента сечения от растянутой грани; A_k — площадь сечения *k*-го компонента с учетом изменения $\delta_{\text{кр}}(x)$; E_k — временный модуль *k*-го компонента для $K^*(z_k)$ и $\vec{S}^0(z_k)$, где z_k — расстояние от ц. т. от *k*-го компонента до нейтральной оси напряжений *V*.

Теперь плечо $r_k(x)$ от центра тяжести *k*-го компонента до центра тяжести приведенного сечения:

$$\vec{r_k}(x) = \vec{y}_{\text{ц.т}}(x) - y_{\text{к.}}(x) \tag{16}$$

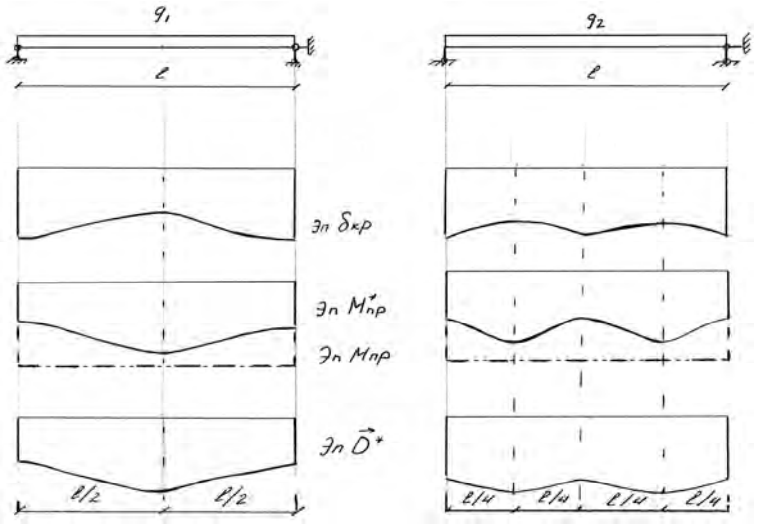
и жесткость:

$$\vec{D}^*(x) = \sum_1^k \vec{A}_k^*(x)\vec{E}_k^*(x)\vec{r_k^2}(x). \tag{17}$$

Аналогично вычисляются отпорность $\overleftarrow{D}^*$, для которой в (14) и (15) принимается $\overleftarrow{S}^0 = 1$.

Далее, с учетом (4) и рис. 3, иллюстративно приведем схемы эпюр $\delta_{\text{кр}}$, $\vec{M}_{\text{пр}}^*$ и $\vec{D}^*$ для одновременно нагруженной шарнирноопертой балки при двух уровнях нагружения.

$$q_1 < \tfrac{1}{2}\, q_{\text{пр}} \text{ и } q_2 < \tfrac{1}{2}\, q_{\text{пр}}. \tag{18}$$



1 вариант $M < \frac{1}{2} M_{\text{пр}}$ 2 вариант $M > \frac{1}{2} M_{\text{пр}}$

Рис. 3. Схема эпюр $\delta_{\text{кр}}$, $\vec{M}_{\text{пр}}^*$ и $\vec{D}^*$ при разных уровнях напряженного состояния для балки, поврежденной коррозией

Таким образом, выявлено и исследовано нелинейное влияние коррозионных повреждений и характеристики силового сопротивления балки в зависимости от уровня нагружения на сопротивление деформированию бетона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мигаль Р. Е.*, *Бондаренко В. М.*, *Ягупов Б. А.* Об исходных посылках расчетных моделей бетона // Вестник ОСН РААСН. Вып. 16. Т. 1, М., 2012.

2. *Бондаренко В. М.* У вопросу об устойчивом и неустойчивом силовом сопротивлении железобетонной конструкции, поврежденных коррозией // Известия ОрелГТУ. Строительство. Транспорт. № 1/20 (533). Орел, 2009.

3. *Бондаренко В. М.*, *Мигаль Р. Е.* Развитие методов железобетонных конструкций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений.

1. *Migal' R. E.*, *Bondarenko V. M.*, *Yagupov B. A.* Ob iskhodnykh posylkakh raschetnykh modeley betona // Vestnik OSN RAASN. Vyp. 16. T. 1, M., 2012.

2. *Bondarenko V. M.* U voprosu ob ustoychivom i neustoychivom silovom soprotivlenii zhelezobetonnoy konstruktsii, povrezhdennykh korroziey // Izvestiya OrelGTU. Stroitel'stvo. Transport. № 1/20 (533). Orel, 2009.

3. *Bondarenko V. M.*, *Migal' R. E.* Razvitie metodov zhelezobetonnykh konstruktsiy // Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktsiy i sooruzheniy.

© Мигаль Р. Е., Бондаренко В. М., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Мигаль Р. Е., *Бондаренко В. М.* Исследование влияния коррозионных повреждений на сопротивление деформированию железобетона // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 383—387.

УДК 620.191.33:691.328.1

Г. В. Мурашкин, Д. А. Панфилов, В. Г. Мурашкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ТРЕЩИНАМИ НА ПРОГИБЫ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ КРАТКОВРЕМЕННОМ ЗАГРУЖЕНИИ

При расчете прогиба и ширины раскрытия трещин величина расстояния между трещинами играет важную роль. От этого расстояния зависит количество трещин, их размер. В нормативной литературе зависимость прогибов от расстояния между трещинами не описана.

В статье описывается зависимость прогибов изгибаемых балок от расстояния между трещинами для бетона классов B25, B30 и B90. Представлены графики теоретических и экспериментальных значений прогибов в зависимости от расстояния между трещинами.

К л ю ч е в ы е с л о в а: прогиб, расстояние между трещинами, изгибаемые элементы.

When assessing deflexion and opening width the gap between cracks plays a very important role. They number of the cracks and their size depend on this gap. In regulatory documents the dependence of deflexion on the gap between cracks has not been described.

The authors describe the dependence of deflexion on the gap between cracks for B25, B30 and B90 class concrete. Graphics for theoretical and experimental indexes of deflexion depending on the gap between cracks are provided.

K e y w o r d s: deflexion, gap between cracks, bending elements.

В расчетах по второй группе предельных состояний величина расстояния между трещинами играет важную роль. От этого расстояния зависит количество трещин, следовательно, и ширина их раскрытия. Связь расстояния между трещинами с величиной прогибов не прямая. Методики расчета прогибов по СП-52-101—2003 [1] или Eurocode 2 [2] не описывают в явном виде зависимость прогибов от расстояния между трещинами. При этом такая зависимость необходима для оценки погрешности величины прогиба в том случае, когда для расчетов принимается нормативное расстояние между трещинами. Для анализа этого вопроса было проведено исследование результатов теоретических расчетов прогибов по усовершенствованной методике расчета прогибов, подробно описанной в [3], с экспериментальными данными, представленными в [3, 4]. В алгоритме расчета прогибов по усовершенствованной методике [3] учтена нелинейная работа бетона с помощью нелинейных диаграмм деформирования, работа растянутой зоны бетона, а также учтен шаг расположения трещин при расчете кривизны поперечного сечения и, в конечном итоге, прогиба конструкции.

Объектами исследования являлись 6 серий изгибаемых железобетонных балок по 3 балки в каждой серии. Первые три серии выполнены из обычного бетона (B25 и B30), 4…6 серии выполнены из высокопрочного бетона HPC (B90). Расположение трещин принято в зоне чистого изгиба, расстояние между трещинами принято одинаковым. Исходные характеристики исследуемых образцов представлены в табл. 1.

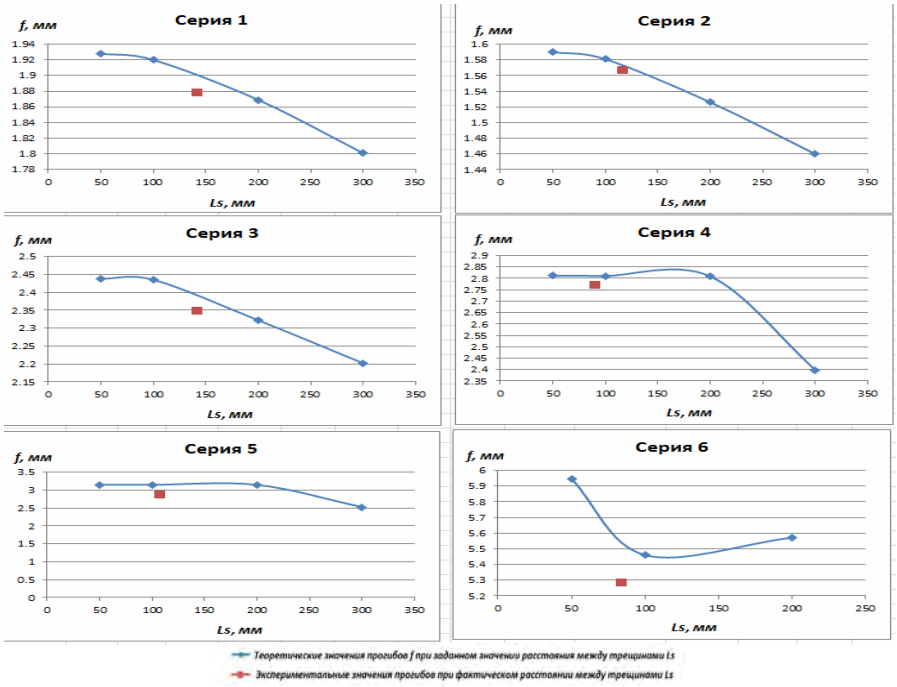
Таблица 1

Исходные характеристики исследуемых образцов

Маркировка образца	Геометрические характеристики			Армирование		Соотношение армирования		
	Расчетный пролет, м	Высота сечения, м	Ширина сечения, м	Арматура растяжения	Арматура сжатия	Поперечное армирование	Арматура растяжения, %	Арматура сжатия, %
Об1,1—1,3	1,2	0,22	0,12	1Ø12	1Ø10	Ø10s90	0,428	0,296
Об2,1—2,3	1,2	0,22	0,12	1Ø16	1Ø10	Ø10s90	0,761	0,296
Об3,1—3,3	1,2	0,22	0,12	1Ø20	1Ø10	Ø10s90	1,189	0,296
Об4,1—4,3	1,2	0,22	0,12	2Ø12	2Ø10	Ø10s90	0,85	0,592
Об5,1—5,3	1,2	0,22	0,12	2Ø16	2Ø10	Ø10s90	1,522	0,592
Об6,1—6,3	1,2	0,12	0,22	2Ø25	—	Ø10s50	3,71	—

В качестве расчетной схемы при испытании изгибаемых образцов принята схема шарнирно-опертой однопролетной балки, загруженной двумя сосредоточенными силами, приложенными на расстоянии 1/3 пролета.

На рис. 1 представлены графики теоретических и экспериментальных значений прогибов в зависимости от расстояния между трещинами. Построенные кривые показывают теоретические значения изменения прогибов при заданном значении расстояния между трещинами — 50, 100, 200, 300 мм. Значение экспериментальных данных отмечено точками на графиках (рис.).



Графики теоретических и экспериментальных значений прогибов в зависимости от расстояния между трещинами

Результаты теоретических и экспериментальных значений прогибов в зависимости от расстояния между трещинами представлены в табл. 2.

На основании проведенных исследований можно сделать выводы о том, что применительно к рассмотренным экспериментальным образцам уменьшение теоретического значения расстояния между трещинами по сравнению с экспериментальным приводит к увеличению значения прогибов на 2,54…11,17 %. Увеличение теоретического значения расстояния между трещинами по сравнению с экспериментальным приводит к занижению значений прогибов на 4,33…15,55 %. Погрешность в определении расстояния между трещинами в диапазоне от 50 до 100 мм для всех серий образцов минимально отражается на вычисляемом значении прогиба. В диапазоне 200…300 мм все образцы показали высокую чувствительность к расстоянию между трещинами.

Значения максимальных отклонений теоретических прогибов от экспериментальных по каждой серии представлены в табл. 3. Положительная величина отклонения соответствует большему теоретическому прогибу над экспериментальным значением.

Таблица 2

Теоретические и экспериментальные значения прогибов в зависимости от расстояния между трещинами

Расстояние между трещинами L_s, м	Серии образцов						
	Об1,1—1,3	Об2,1—2,3	Об3,1—3,3	Об4,1—4,3	Об5,1—5,3	Об6,1—6,3	
	Прогиб f, мм						
Теоретические значения, мм							
0,05	1,928	1,59	2,438	2,812		3,148	5,947
0,1	1,92	1,581	2,435	2,811		3,146	5,46
0,2	1,869	1,526	2,322	2,809		3,146	5,571
0,3	1,801	1,46	2,202	2,399		2,528	—
Опытные значения, мм							
0,142	1,879	—	—	—		—	—
0,116	—	1,567	—	—		—	—
0,142	—	—	2,349	—		—	—
0,09	—	—	—	2,772		—	—
0,107	—	—	—	—		2,87	—
0,084	—	—	—	—		—	5,283

Таблица 3

Значения максимальных отклонений теоретических прогибов от экспериментальных

Серия 1	Серия 2	Серия 3	Серия 4	Серия 5	Серия 6
Максимальные отклонения, %					
2,54	1,45	3,65	1,42	8,83	11,17
–4,33	–7,33	–6,68	–15,55	–13,53	–

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 52-101—2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры. М., 2004. 54 с.

2. Eurocode 2, prEN 1992-1 (Final draft). Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2001. 54 p.

3. *Панфилов Д. А.*, *Мурашкин В. Г.* Усовершенствованная методика расчета общих прогибов изгибаемых железобетонных элементов с учетом дискретного трещинообразования применительно к обычным и высокопрочным бетонам // Строительство и реконструкция. Орел. 2011. № 6. С. 30—42.

4. *Панфилов Д. А*. Экспериментальные исследования прогибов изгибаемых железобетонных элементов, изготовленных из обычных и высокопрочных бетонов // Бетон и железобетон. М., 2011. № 6. С. 8—12.

1. SP 52-101—2003. Betonnye i zhelezobetonnye konstruktsii bez predvaritel'nogo napryazheniya armatury. M., 2004. 54 s.

2. Eurocode 2, prEN 1992-1 (Final draft). Design of concrete structures. Part 1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2001. 54 p.

3. *Panfilov D. A.*, *Murashkin V. G.* Usovershenstvovannaya metodika rascheta obshchikh progibov izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov s uchetom diskretnogo treshchinoobrazovaniya, primenitel'no k obychnym i vysokoprochnym betonam // Stroitel'stvo i rekonstruktsiya. Orel. 2011. № 6. S. 30—42.

4. *Panfilov D. A.* Eksperimental'nye issledovaniya progibov izgibaemykh zhelezobetonnykh elementov, izgotovlennykh iz obychnykh i vysokoprochnykh betonov // Beton i zhelezobeton. M., 2011. № 6. S. 8—12.

© Мурашкин Г. В., Панфилов Д. А., Мурашкин В. Г., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Мурашкин Г .В., Панфилов Д. А., Мурашкин В. Г. Исследование влияния расстояния между трещинами на прогибы изгибаемых железобетонных элементов от при кратковременном загружении // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 388—391.

УДК 624.042

В. В. Петров, И. В. Кривошеин

РАСЧЕТ НЕОДНОРОДНЫХ ПОЛОГИХ ОБОЛОЧЕК С ДВУМЯ ВИДАМИ НЕЛИНЕЙНОСТИ

Рассматриваются пологие оболочки на прямоугольном плане. Учитывается геометрическая, физическая нелинейность и неоднородность свойств материала по толщине оболочки. Технологическая неоднородность создается методом диффузии высокопрочного материала в основной материал оболочки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оболочка, неоднородность, нелинейность.

Shallow shell on right-angular design are considered in the article. The authors take into account geometrical, physical nonlinearity and nonhomogeneous properties of the material in the shell depth. Technological nonhomogeneity is created by the method of diffusion of high-tenacity material into the main shell material.

K e y w o r d s: shell, nonhomogeneity, nonlinearity.

Оболочки являются весьма эффективными конструкциями, они находят применение в различных областях техники, в том числе и в строительстве. Важным моментом при конструировании оболочек является выбор материала для их изготовления. В последнее время появилось много видов новых перспективных материалов, в том числе изготовленных с применением нанотехнологий. Основной постоянно действующей нагрузкой на оболочку является ее собственный вес, который нелинейно возрастает с увеличением перекрываемых оболочкой пролетов. Для уменьшения этой нагрузки перспективно применение легких пористых материалов, обладающих низким объемным весом, но которые, к сожалению, обладают низкими прочностными характеристиками.

Для усиления материала оболочки в ее поверхностные слои методом диффузии или с помощью других технологий, которые здесь не рассматриваются, внедряют другой материал с высокими прочностными характеристиками, в результате чего появляется технологическая неоднородность. В машиностроении это называется плакированием поверхности. Возникает необходимость разработки методов расчета такого рода неоднородных оболочек, исследования влияния неоднородности на распределение внутренних напряжений в оболочках, определения предельных нагрузок, приводящих к разрушению исходного и упрочненного материалов, и определения критических нагрузок, приводящих к потере устойчивости неоднородных оболочек.

Рассмотрим тонкостенную пологую оболочку на прямоугольном плане под действием поперечной нагрузки. Полагаем, что оболочка выполнена из легкого пористого материала с невысокими прочностными характеристиками. Таким образом, считаем, что в направлении толщины оболочки имеется технологическая неоднородность. Полагаем, что и исходный, и упрочняющий материалы имеют нелинейные диаграммы деформирования. При расчете оболочек одной из важных задач является определение нагрузки, при которой оболочка теряет устойчивость, поэтому наряду с физической необходимо учесть и геометрическую нелинейность. Геометрическая нелинейность учи-

тывается в геометрических соотношениях, предложенных В. З. Власовым, который распространил уравнения Кармана для пластинок на оболочки. Для учета физической нелинейности применяется деформационная теория малых упруго-пластических деформаций.

При наличии геометрической и физической нелинейностей уравнения, описывающие напряженно-деформированное состояние оболочек, становятся сложными нелинейными дифференциальными уравнениями в частных производных и их решение представляет собой сложную проблему. Для решения сформулированной проблемы методом последовательных нагружений [1] построим инкрементальные линейные уравнения, последовательное решение которых позволяет получить решение интересующей нас нелинейной задачи. Объем статьи не позволяет привести здесь вывод этих уравнений, поэтому отсылаем читателя, например, к работам [2], [3], где приведен вывод этих уравнений.

Присваивая индекс n в качестве номера этапа последовательного нагружения, запишем линейную инкрементальную систему уравнений в смешанной форме для расчета оболочек с учетом геометрической и физической нелинейностей в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} \Omega_{11}\Delta\varphi_{n+1} + \Omega_{12}\Delta w_{n+1} &= 0 \\ -\Omega_{21}\Delta\varphi_{n+1} + \Omega_{22}\Delta w_{n+1} &= \Delta q_{n+1} \end{aligned}\right\}, \tag{1}$$

где введены следующие обозначения дифференциальных операторов:

$$\begin{aligned} \Omega_{11} &= \frac{4}{3}\nabla^2\left[J_{k,n}^{-1}\nabla^2(...)\right] - 2L\left(J_{k,n}^{-1},...\right); \\ \Omega_{12} &= \Omega_{21} = \nabla_k^2(...) + L(W_n,...); \\ \Omega_{22} &= \nabla^2\left[D_{k,n}\nabla^2(...)\right] - \frac{1}{2}L\left(D_{k,n},...\right) - L\left(\varphi_n,...\right), \end{aligned} \tag{2}$$

где вместо точек следует поставить ту функцию, на которую действует оператор.

В (1) и (2) приняты следующие обозначения: $\Delta\varphi$ — приращение функции усилий, с помощью которой определяются осевые (мембранные) усилия в оболочке; Δw — приращение прогиба срединной поверхности оболочки. Эти приращения вызваны приращением нагрузки Δq. Суммарный прогиб и суммарная функция усилий обозначены соответственно $W(x,y)$ и $\varphi(x,y)$. Переменные жесткости оболочки на растяжение-сжатие и изгиб, обозначенные соответственно $J_k(x,y)$ и $D_k(x,y)$, определяются по формулам

$$I_k(x,y) = \frac{4}{3}\int_{-h/2}^{h/2} E_k^* dz, \quad D_k(x,y) = \frac{4}{3}\int_{-h/2}^{h/2} E_k^* z^2 dz, \tag{3}$$

где $E_k^* = E_k\psi(z)$, $E_k(x,y,z)$ — касательный модуль, а $\psi(z)$ — функция неоднородности материала; h — толщина оболочки. Оси x, y направлены вдоль плана сторон оболочки, а ось z направлена вниз нормально плану оболочки.

В дифференциальных операторах (2) использованы следующие обозначения: ∇^2 — оператор Лапласа; оператор $\nabla_k^2 = k_2 \dfrac{\partial^2}{\partial x^2} + k_1 \dfrac{\partial^2}{\partial y^2}$ — оператор Власова, зависящий от главных кривизн оболочки k_1, k_2; нелинейный дифференциальный оператор $L(A,B)$ определяется по формуле

$$L(A,B) = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2}\frac{\partial^2 B}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\frac{\partial^2 B}{\partial x^2} - 2\frac{\partial^2 A}{\partial x \partial y}\frac{\partial^2 B}{\partial x \partial y}. \qquad (4)$$

Функцию неоднородности $\psi(z)$ задаем в виде экспоненты:

$$\psi(z) = \exp\left(\frac{|z| - |z_0|}{h/2 - |z_0|}\ln K\right), \qquad (5)$$

где z_0 — координата фронта упрочнения (линия, отделяющая упрочненный слой материала оболочки от исходного), а коэффициент K — параметр неоднородности прочностных свойств материала, есть отношение временного сопротивления упрочняющего материала к временному сопротивлению исходного материала. В точках фронта упрочнения $z = z_0$ функция неоднородности $\psi(z_0) = 1$, в упрочненном слое функция неоднородности изменяется по экспоненциальному закону, а в исходном материале при изменении переменной $|z_0| \geq |z| \geq 0$ функция неоднородности равна единице. В точках фронта упрочнения функция неоднородности не имеет разрыва, поэтому фронт упрочнения не является концентратором напряжений.

Численная реализация линейных дифференциальных уравнений (1) на каждом этапе нагружения осуществлялась методом сеток размером 32×32. Этот размер был выбран в результате пробных расчетов с применением сеток других размеров. Для вычисления определенных интегралов типа (3) применен метод Симпсона, интервал интегрирования разбивался на 256 частей. Для уменьшения погрешностей линеаризации уравнений и сокращения времени счета применен разработанный нами эффективный двухшаговый метод последовательного возмущения параметров [4].

Для исследования сформулированных выше задач рассмотрим пологую оболочку на квадратном плане с размерами $2a \times 2a$ под действием равномерно распределенной поперечной нагрузки q. Полагаем, что по контуру оболочка опирается на диафрагмы, жесткие в своей плоскости и гибкие из своей плоскости. В расчетной схеме оболочки такая опора называется подвижным шарниром. Обозначим буквой s толщину упрочненного слоя и введем понятие относительной толщины упрочненного слоя $\lambda = s/h$. Исследуем напряженно-деформированное состояние оболочки в зависимости от изменения безразмерной нагрузки $p = 16qa^4 / E_0 h^4$ (здесь E_0 — модуль упругости исходного материала), безразмерных параметров λ и K и безразмерных параметров кривизны $k_\xi = 4k_x a^2 / h$, $k_\eta = 4k_y a^2 / h$. В приведенных ниже численных расчетах полагаем, что оболочки имеют одинаковые безразмерные параметры кривизны в направлении пространственных координат $k_\xi = k_\eta$.

Основная характеристика оболочки — кривая «нагрузка — прогиб в центре» — с ростом параметров кривизны приобретает сложный вид. В окрестности верхней критической нагрузки наблюдается образование петли, построение которой весьма трудоемко и требует применения специальных вычислительных алгоритмов. Исследования показали [5], что в отличие от кривой «нагрузка — прогиб в центре», кривая «нагрузка — максимальный прогиб» является монотонной при всех параметрах кривизны оболочки и не содержит в окрестности критической нагрузки петель. Максимальный прогиб с ростом параметра кривизны перемещается по полю плана оболочки, как правило, от центра оболочки к центам ее четвертей, однако экстремум кривой — верхняя критическая нагрузка — определяется без затруднений.

На рис. 1 приведены результаты численного исследования оболочки с параметрами кривизны $k_\xi = k_\eta = 60$. Номера кривых на этом рисунке численно равны величине коэффициента неоднородности *K*. Относительная толщина упрочненного слоя $\lambda = 0,25$.

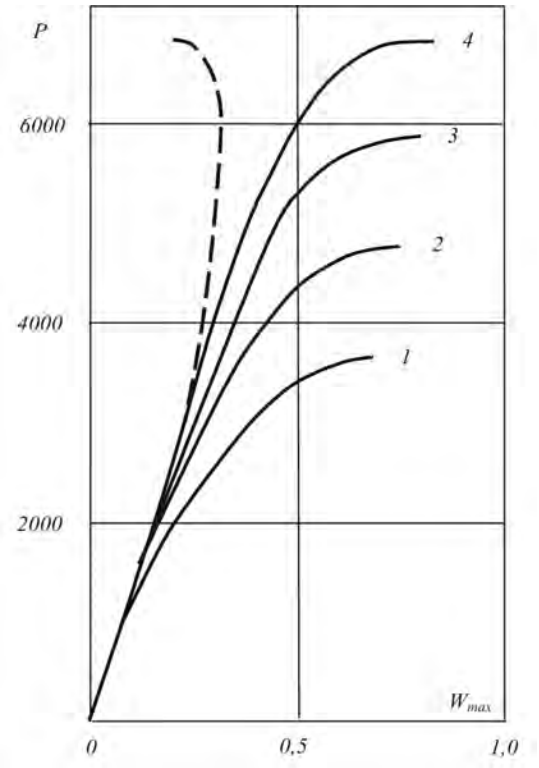


Рис. 1

Для случая, когда коэффициент неоднородности $K = 4$, на рис. 1 пунктиром показана зависимость «нагрузка — прогиб в центре». Сравнивая эти две кривые, можно заключить, что перед потерей устойчивости происходит замедление прогибов в центре оболочки и рост максимальных прогибов в области центров четвертей оболочки. Подобное петлеобразование в окрестности верхней критической нагрузки наблюдалось во всех рассмотренных случаях. Кривая *1* получена для случая однородной оболочки.

На рис. 2 показаны зависимости нагрузка — максимальный прогиб в оболочке с параметрами кривизны $k_\xi = k_\eta = 40$. Номера кривых численно равны величине коэффициента неоднородности *K*. Относительная толщина упрочненного слоя $\lambda = 0,25$. Кривые рис. 2 качественно не отличаются от кривых рис. 1.

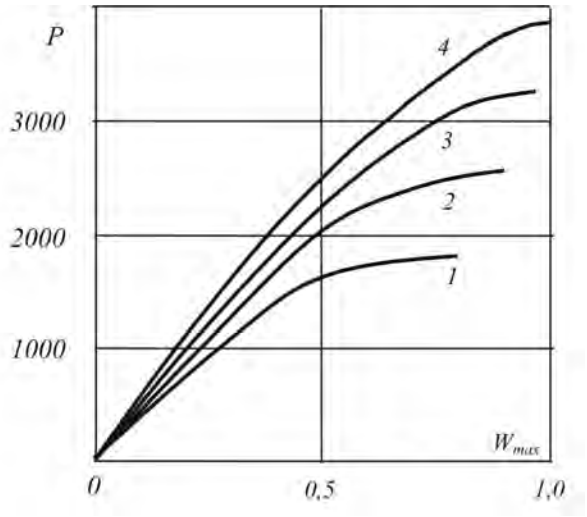


Рис. 2

На рис. 3 показаны зависимости величин критических нагрузок от безразмерной толщины упрочненного слоя λ. Верхняя группа кривых соответствует оболочке с безразмерными кривизнами $k_\xi = k_\eta = 60$, а нижняя группа кривых получена для оболочек с $k_\xi = k_\eta = 40$. Номера кривых численно равны величине коэффициента неоднородности *K*.

Результаты расчета показывают, что с увеличением толщины упрочненного слоя оболочки величина ее критической нагрузки увеличивается по закону, мало отличающемуся от линейного. С увеличением параметра *K* начальный угол наклона кривых возрастает, и заметно возрастает запас устойчивости оболочки.

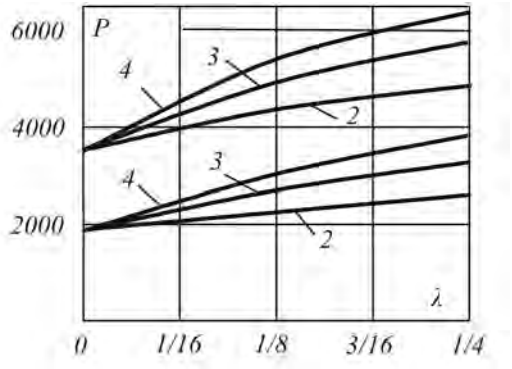


Рис. 3

На рис. 4 приведены нормированные к единице эпюры распределения интенсивности напряжений по толщине оболочки в ее центре. Параметры кривизны оболочки: $k_\xi = k_\eta = 60$, относительная толщина упрочненного слоя $\lambda = 0,25$. Номера кривых численно равны коэффициенту неоднородности *K*. При $K = 1$ имеем эпюру распределения интенсивности напряжений по толщине оболочки. Нормированные эпюры удобны для анализа качественных изменений в эпюрах при изменении каких-либо параметров (в данном случае коэффициента *K*).

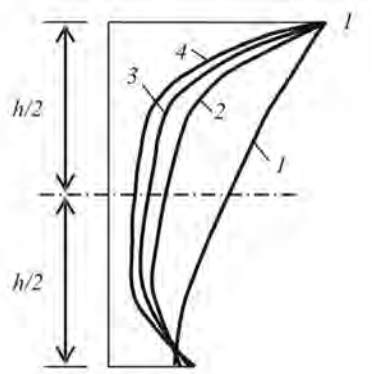


Рис. 4

Анализ эпюр показывает, что наличие технологической неоднородности приводит к перераспределению напряжений. Там, где прочностные характеристики материала повышаются, напряжения увеличиваются, а там, где прочностные характеристики материала ниже, происходит уменьшение напряжений. Это проявление свойства статической неопределимости в малом объеме. Важным является то обстоятельство, что с увеличением прочностных свойств диффундирующего материала напряжения в основном материале заметно снижаются, что создает существенный (до двух раз) запас прочности в исходном материале с невысокими прочностными характеристиками.

Таким образом, можно сделать вывод, что при конструировании оболочек создание технологической неоднородности в виде упрочненных поверхностных слоев позволяет регулировать весовые характеристики конструкции и создавать запас их прочности и устойчивости. Кроме того, применение легких пористых материалов при возведении оболочек позволяет решать и другие проблемы, связанные, например, с шумопоглощением и теплоизоляцией.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Петров В. В.* Метод последовательных нагружений в нелинейной теории пластинок и оболочек. Саратов : Изд-во Сарат. ун-та, 1975. 119 с.

2. *Петров В. В., Кривошеин И. В.* Методы расчета конструкций из нелинейно-деформируемого материала. М. : АСВ, 2009. 208 с.

3. *Петров В. В., Кривошеин И. В.* Прочность и устойчивость нелинейно деформируемых пологих оболочек // ACADEMIA, строительство и архитектура. 2009. № 3. С. 83—87.

4. *Петров В. В.* Двухшаговый метод последовательного возмущения параметров и его применение к решению нелинейных задач механики твердого деформируемого тела // Проблемы прочности элементов конструкций под действием нагрузок и рабочих сред. Саратов : СГТУ, 2001. С. 6—12.

5. *Петров В. В., Кривошеин И. В.* Влияние условий опирания по контуру на устойчивость полимербетонных оболочек // Вестник ВРО РААСН. 2010. Вып. 13. С. 175—182.

1. *Petrov V. V.* Metod posledovatel'nykh nagruzheniy v nelineynoy teorii plastinok i obolochek. Saratov : Izd-vo Sarat. un-ta, 1975. 119 s.

2. *Petrov V. V., Krivoshein I. V.* Metody rascheta konstruktsiy iz nelineyno-deformiruemogo materiala. M. : ASV, 2009. 208 s.

3. *Petrov V. V., Krivoshein I. V.* Prochnost' i ustoychivost' nelineyno deformiruemykh pologikh obolochek // ACADEMIA, stroitel'stvo i arkhitektura. 2009. № 3. S. 83—87.

4. *Petrov V. V.* Dvukhshagovyy metod posledovatel'nogo vozmushcheniya parametrov i ego primenenie k resheniyu nelineynykh zadach mekhaniki tverdogo deformiruemogo tela // Problemy prochnosti elementov konstruktsiy pod deystviem nagruzok i rabochikh sred. Saratov : SGTU, 2001. S. 6—12.

5. *Petrov V. V., Krivoshein I. V.* Vliyanie usloviy opiraniya po konturu na ustoychivost' polimerbetonnykh obolochek // Vestnik VRO RAASN. 2010. Vyp. 13. S. 175—182.

© Петров В. В., Кривошеин И. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Петров В. В., Кривошеин И. В. Расчет неоднородных пологих оболочек с двумя видами нелинейности // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 392—398.

УДК 624.012

Б. С. Соколов, Л. Р. Фатхуллин

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ КЛАДОК ИЗ ВЫСОКОПУСТОТНЫХ ВИБРОПРЕССОВАННЫХ БЕТОННЫХ БЛОКОВ

Представлена предпосылка к новой методике расчета каменных кладок, выполненных из бетонных блоков высокой пустотности, производимых по вибропрессованной технологии, отражающей фактический механизм разрушения бетона при сжатии на основе теории сопротивления анизотропных материалов при сжатии.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокопустотный вибропрессованный бетонный блок, компьютерное моделирование, методика расчета, теория сопротивления анизотропных материалов при сжатии.

Suggested is the condition for a new calculation methodology of masonry construction made of concrete high hollow masonry produced according to vibro-pressing technology that reflects the mechanism of concrete destruction under compression based on the theory of resistance of anisotropic material under compression.

K e y w o r d s: concrete high hollow vibro-pressed masonry, software modeling, calculation methodology, theory of resistance of anisotropic material under compression.

Вибропрессованные бетонные блоки высокой пустотности применяются для возведения несущих внутренних, наружных стен, перегородок, а также для устройства фундаментов (рис. 1).

Рис. 1. Вибропрессованные блоки для возведения наружных, внутренних стен, перегородок и для возведения фундаментов, производимые ОАО «КАВАГ» [1]

По результатам анализа нормативной и технической литературы установлено, что единственными нормами по расчету каменных кладок из бетонных блоков высокой пустотности являются территориальные нормы [2], основанные на проведении исследований продукции, производимой на линиях фирмы «Besser» типа V3-12 Vibropac. Прочность таких кладок оценивается нормативными требованиями [3] для сплошных кладок с введением в расчетные выражения параметров, отражающих особенности рассматриваемых блоков.

Исходя из этого, актуальность данной работы заключается в необходимости совершенствования методики расчета кладок из высокопустотных вибропрессованных бетонных блоков, учитывающей фактический механизм разрушения при сжатии на основе теории сопротивления анизотропных материалов сжатию [4], что являлось целью исследований.

Достижение поставленной цели решалось в два этапа — компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния блоков и кладок из них и проведение физических экспериментов.

Ниже излагаются результаты численных исследований, в ходе выполнения которых решались следующие задачи:

разработка информационной схемы компьютерного моделирования блоков и кладок из них (см. рис. 1);

построение математических моделей процессов нагружения образцов при варьировании различных факторов, влияющих на несущую способность кладки;

анализ полученных результатов НДС кладки с определением наиболее значимых факторов, влияющих на несущую способность кладки, и построение аналитических зависимостей фактор — прочность.

За базовый образец принят блок размерами 400(h)×300(b)×190(L) мм производства ОАО «КАВАГ» марки М100 (см. рис. 1) с пустотностью 50 %. На рис. 2 приведена информационная схема компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния блоков и кладок из них, а в табл. 1 — их характеристика.

При выборе математической модели отдано предпочтение методу конечных элементов (МКЭ), реализованному в программном комплексе «ЛИРА 9.6». Триангуляция сетки элементов зависит от типа и размера блоков. В качестве основных приняты восьмиузловые и шестиузловые объемные КЭ с линейной и нелинейной зависимостью между напряжениями и деформациями.

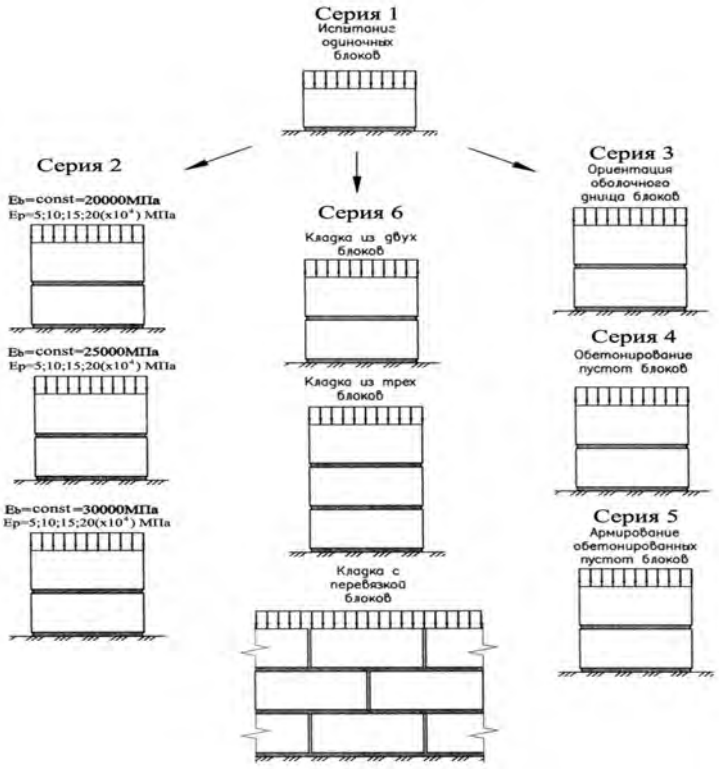


Рис. 2. Информационная схема компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния блоков и кладок из них

Таблица 1

Характеристика компьютерных моделей

№ серии	Наименование серии	Задачи исследования	Варьируемый фактор
1	Одиночные блоки	Влияние марки блока на его несущую способность	$E_{b1} = 20000$ МПа $E_{b2} = 25000$ МПа $E_{b2} = 30000$ МПа
2	Столбы из 2-х блоков	Влияние марки блока, марки раствора кладки, их соотношения на несущую способность моделей	E_b, E_p, E_b / E_p; $E_b = 2;\ 2{,}5;\ 3\ (\times 10^4)$ МПа $E_p = 5;\ 10;\ 15;\ 20\ (\times 10^4)$ МПа
3	Столбы из 2-х блоков	Влияние положения днища блоков	Положение оболочного днища блока
4	Столбы из 2-х блоков	НДС моделей при различном количестве заполнения полостей блоков	Наличие обетонирования полостей блоков
5	Столбы из 2-х блоков	НДС столбов при армировании полостей блоков	Коэффициент армирования
6	Столбы и кладки из 2-х и 3-х блоков	НДС моделей при различной высоте кладки и наличия перевязки швов	Высота кладки и наличие перевязки швов

1-я серия образцов. Результаты в виде изополей напряжений приведены на рис. 3. Из рисунков видно, что характер распределения напряжений в блоках соответствует модели разрушения по теории [4]. В верхней и нижней частях блоков образуются клинообразные уплотнения, что свидетельствует о наличии зоны сжатия-сжатия.

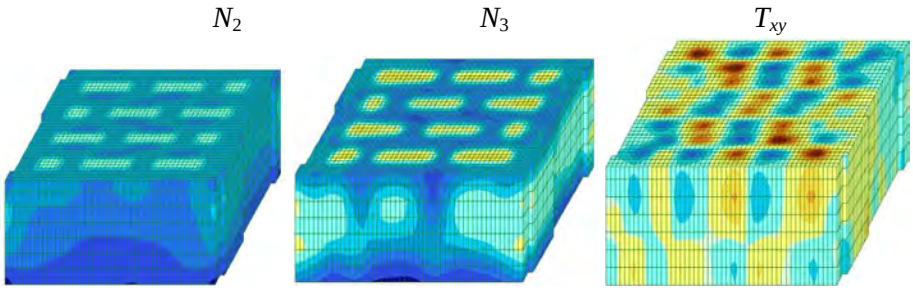


Рис. 3. Изополя главных сжимающих, растягивающих и касательных напряжений в образцах

Виртуальное разрушение блоков происходит по модели разрушения анизотропных материалов в сжимающем силовом потоке [4].

2-я серия образцов. Исследования столбов из двух блоков представлены на рис. 4 в виде графиков зависимостей исследуемый фактор — усилия в элементах.

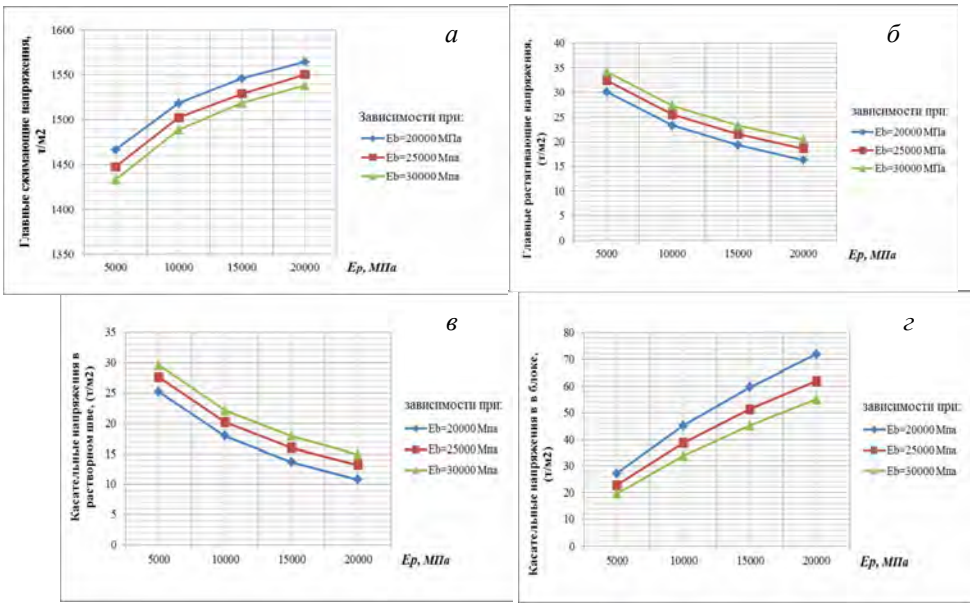
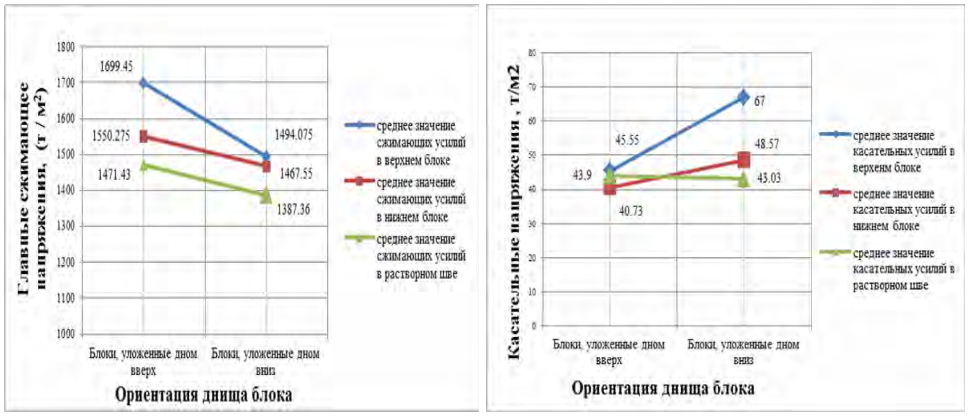


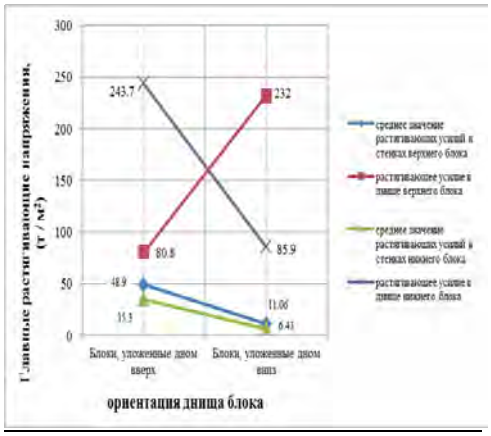
Рис. 4. Графики зависимостей напряжений в образцах от E_p при различных E_b: *а, б* — соответственно главных сжимающих и главных растягивающих напряжений; *в, г* — соответственно главных касательных напряжений в растворном шве и в бетоне блока

Результаты показали, что модуль деформации бетона блока практически не влияет на характер напряженного состояния кладки, а модуль деформации растворного шва оказывает лишь незначительное влияние на НДС кладки. С увеличением нагрузки происходит увеличение напряжений при сохранении характера распределения этих напряжений. В моделях образуются клинообразные уплотнения в зонах передачи нагрузки, что соответствует модели разрушения анизотропных материалов [4].

3-я серия образцов. Установлено, что при укладке блоков положением оболочного дна вниз происходит уменьшение сжимающих усилий во всех частях образца. В верхнем блоке уменьшение сжимающих усилий составляет от 3 до 34 %, а в нижнем блоке от 4 до 27 %. Растворная часть также разгружается, но незначительно по отношению к бетонным блокам. Уменьшение главных растягивающих напряжений в верхнем блоке составляет от 50 до 63 %, в днище блока наблюдается уменьшение напряжений практически до нулевых значений. Однако крайние стенки блока испытывают увеличение растягивающих нагрузок до 22 %. Это связано с уменьшением площади приложения равномерной нагрузки. В случае с блоками, уложенными днищем вверх, нагрузка прикладывалась как равномерная по всей постели камня, а в случае с блоками, уложенными дном вниз, нагрузка перераспределилась, и на меньшую площадь стала приходиться большая нагрузка. Уменьшение растягивающих напряжений также можно наблюдать в нижнем блоке, оно составляет от 24 до 89 % в торцевой стенке (рис. 5).



а *б*



в

Рис. 5. Графики зависимостей напряжений в образцах при различной ориентации дна блока: *а*, *б*, *в* — соответственно главных сжимающих, касательных и растягивающих напряжений

4-я серия образцов. Изучение влияния заполнения пустот блоков, раствором исследовалось при различном количестве обетонированных пустот блоков, которые показаны на рис. 6. Первые два варианта предполагают заполнение 50 % пустот блоков и вариант 3 — со 100%-м заполнением всех пустот блоков.

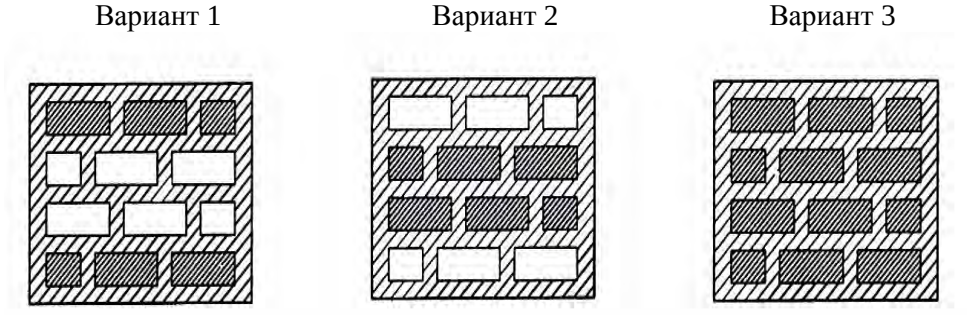
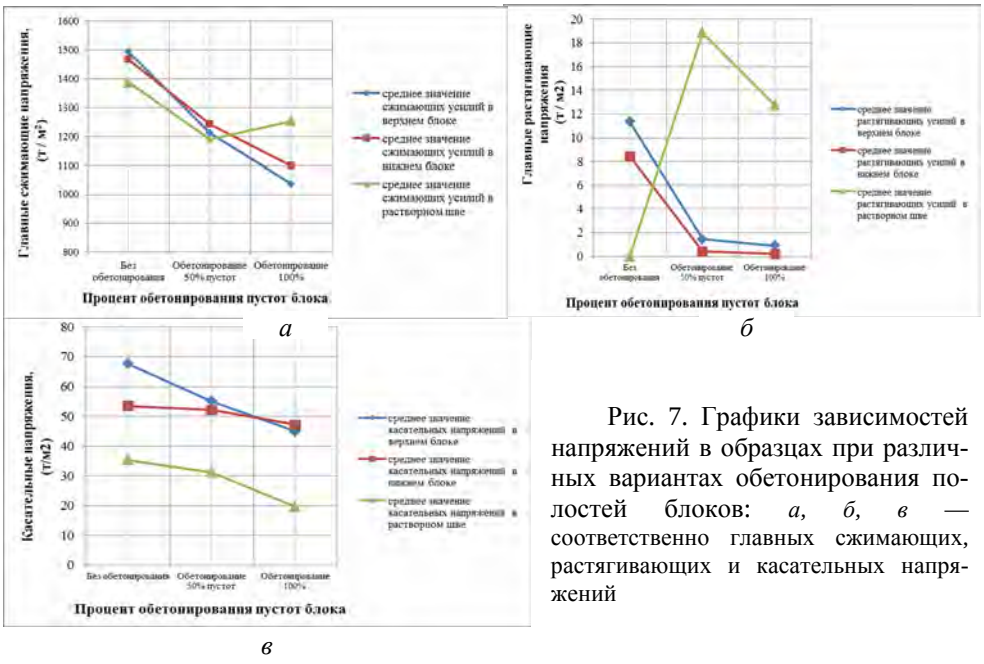


Рис. 6. Варианты обетонирования пустот блоков

На рис. 7 представлены результаты в виде графиков зависимостей исследуемый фактор — усилия в элементах.



а *б* *в*

Рис. 7. Графики зависимостей напряжений в образцах при различных вариантах обетонирования полостей блоков: *а, б, в* — соответственно главных сжимающих, растягивающих и касательных напряжений

При первом варианте обетонирования наблюдается снижение во всех стенках блоков, как верхнего, так и нижнего, сжимающих и растягивающих напряжений, однако в днище нижнего блока растягивающие напряжения возрастают на 45 %, касательные на 36 %. Растворный шов в зоне опирания стенок блока на другой блок начинает испытывать растягивающие напряжения. При втором варианте обетонирования наблюдается такое же снижение всех сжимающих, растягивающих и касательных напряжений. Однако по отношению к первому варианту обетонирования крайние и торцевые стенки верхнего блока нагружены на 5 %. При обетонировании блоков на 100 % наблюдается снижение сжимающих усилий в верхнем блоке в среднем на 33 %, в нижнем на 30 %. В растворном шве сжимающие усилия снижаются на 25 %, кроме зоны под средней стенкой верхнего блока, здесь сжимающие напряжения увеличиваются на 30 %. Растягивающие напряжения в некоторых зонах снижаются практически до нулевых значений, а в некоторых переходят в область сжатия-сжатия.

*5-я серия образцов.*Исследование влияния армирования обетонированных полостей бетонных блоков проводилось аналогично исследованиям просто обетонированных пустот, отличие заключалось лишь в наличии арматурной сетки в пустотах, заполненных бетоном. Диаметр арматуры 6 мм, класс стали А240. Изучение проводилось аналогично вышеописанным, рассматривалось два варианта заполнения пустот на 50 % и вариант с полным заполнением пустот.

При сравнении результатов расчетов исследований обетонирования полостей блоков и армированного обетонирования замечено, что они практически идентичны. Это явление связано с тем, что арматура располагается в обетонированных пустотах в зоне двухосного сжатия бетона, т. е. в зоне, где бетон работает на сжатие.

6-я серия образцов. В 6-й серии исследований были рассмотрены образцы кладок из двух, трех блоков, а также кладки с перевязкой швов.

На рис. 8 представлены результаты исследований в виде изополей главных сжимающих, растягивающих, а также касательных напряжений в образцах кладок.

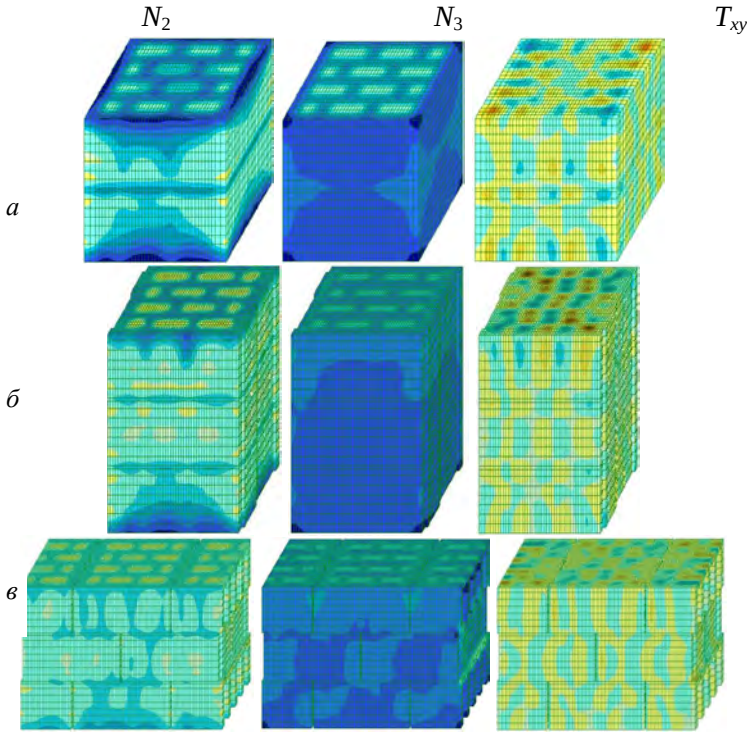


Рис. 8. Изополя напряжений в моделях: *а* — с двумя блоками; *б* — с тремя блоками; *в* — с перевязкой швов

По полученным результатам установлено, что при увеличении высоты кладки на размер одного блока (рассматривается кладка с двумя и тремя блоками без перевязки швов) в растворном шве менее чем на 1 % увеличиваются сжимающие напряжения. Растягивающие и касательные напряжения в шве увеличиваются соответственно на 7,3 и 2,6 %. При сравнении результатов исследования кладки с двумя блоками и кладки с перевязкой швов тот же растворный шов испытывает увеличение сжимающих напряжений на 48,5 %, увеличение растягивающих напряжений на 183 %, увеличение касательных напряжений на 67,7 %.

Сравнение результатов НДС самих бетонных блоков при исследовании кладки из двух блоков и из трех блоков без перевязки швов, показало, что изменение высоты кладки на один блок приводит к увеличению сжимающих напряжений в блоках кладки менее чем на 1 %, растягивающих напряжений — на 4,1 %, касательных — на 14,3 %. При сравнении кладок из трех блоков с перевязкой швов и без перевязки очевидно, что изменение НДС более существенно, а именно: блоки в кладке претерпевают изменение растягивающих усилий на 94 % в сторону увеличения, сжимающие и касательные напряжения также увеличиваются соответственно на 10 и 141 %.

На основе полученных данных путем аппроксимации графиков зависимостей исследуемый фактор — усилия в элементах и общей формулы теории [4] получены расчетные выражения, позволяющие учесть влияние каждого исследованного фактора на несущую способность кладки из данных блоков в виде:

$$N \le \frac{N_{bt}\cos\alpha \cdot 1/\gamma_{btEp} + N_{sh} \cdot 1/\gamma_{sqEp(p)}\gamma_{sqEp(b)}}{\sin\alpha} + N_{ef} \cdot 1/\gamma_{efEp},$$

где γ_{efEp}, γ_{btEp}, $\gamma_{sqEp(p)}$, $\gamma_{sqEp(b)}$ — коэффициенты, учитывающие особенности кладки, соответственно при раздавливании, отрыве и сдвиге ($\gamma_{sqEp(p)}$ — для растворного шва, $\gamma_{sqEp(b)}$ — для бетона блока).

Полученные данные способствовали оптимизации физических экспериментов, результаты которых будут опубликованы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ОАО Завод строительных конструкций «КАВАГ». URL: http://zsk-kavag.ru/ (дата обращения: 25.01.2013).

2. ТСН 51-303—00 РБ. Каменные и армокаменные конструкции на основе вибропрессованных бетонных изделий, производимых на оборудовании фирмы «Basser». Территориальные строительные нормы РБ/УГНБУ. Уфа : БашНИИстрой, 1999. 46 с.

3. СНиП II-22—81*. Каменные и армокаменные конструкции. М. : ФГУП ЦПП, 2004.

4. *Соколов Б. С.* Теория силового сопротивления анизотропных материалов сжатию и ее практическое применение. М. : АСВ, 2011. 160 с.

1. OAO Zavod stroitel'nykh konstruktsiy «KAVAG». URL: http://zsk-kavag.ru/ (data obrashcheniya: 25.01.2013).

2. TSN 51-303—00 RB. Kamennye i armokamennye konstruktsii na osnove vibropressovannykh betonnykh izdeliy, proizvodimykh na oborudovanii firmy «Basser». Territorial'nye stroitel'nye normy RB/UGNBU. Ufa : BashNIIstroy, 1999. 46 s.

3. SNiP II-22—81*. Kamennye i armokamennye konstruktsii. M. : FGUP TsPP, 2004.

4. *Sokolov B. S.* Teoriya silovogo soprotivleniya anizotropnykh materialov szhatiyu i ee prakticheskoe primenenie. M. : ASV, 2011. 160 s.

© Соколов Б. С., Фатхуллин Л. Р., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Соколов Б. С., Фатхуллин Л. Р. Исследование напряженно-деформированного состояния кладок из высокопустотных вибропрессованных бетонных блоков // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 399—406.

УДК 539.384.6

А. А. Трещев, М. Ю. Делягин

ВЛИЯНИЕ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОСТИ, СВЯЗАННОСТИ И ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ НЕЛИНЕЙНОСТИ НА НДС СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ

Рассмотрена задача расчета пологих сферических оболочек из материалов, свойства которых зависят от вида напряженного состояния. Оценено влияние разносопротивляемости, связанности и геометрической нелинейности на напряженно-деформированное состояние сферической оболочки из графита АРВ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: разносопротивляемость, геометрическая нелинейность, связанность, термоупругость, оболочки.

The calculation of shallow spherical shells made of materials which properties depend on the type of stress state are considered in the article. The effect of different resistance, connectedness and geometric nonlinearity on the stress-strain state of spherical shell made of graphite APB is estimated.

K e y w o r d s: different resistance, geometric nonlinearity, connectedness, thermoelasticity, shells.

Одной из основных задач развития промышленности России является создание новых высокоэффективных материалов, таких как графиты, композиты, наноматериалы, углепластики, стеклопластики. Их свойства зачастую противоречат классическим теориям механики деформируемого твердого тела. Для успешного внедрения прогрессивных материалов и экономичных пространственных конструкций, выполненных из них, необходимо применение новых математических моделей расчета, которые учитывают зависимость свойств материала от вида реализуемого в точке напряженного состояния, связанность полей напряжений и температур, геометрическую нелинейность.

Используя методику, предложенную в работах Н. М. Матченко и А. А. Трещева [1, 2], в рамках закона теплопроводности Фурье, классических условий динамического равновесия и гипотез Кирхгофа — Лява были получены разрешающие уравнения для решения связанной задачи об изгибе сферических оболочек из изотропных разносопротивляющихся материалов в условиях термомеханического нагружения.

Уравнения состояния термоупругого изотропного разносопротивляющегося материала получим в пространстве главных напряжений, применив операции дифференцирования к термодинамическому потенциалу Гиббса [1] в форме $e_k = -\partial\Gamma / \partial\sigma_k$ и $L = \partial\Gamma / \partial T$. Переходя к цилиндрической системе координат и используя статическую гипотезу Кирхгофа — Лява, принимаем $\sigma_z = 0$, тогда, с учетом осесимметричного загружения получим:

$$
\begin{aligned}
e_r &= A\sigma_r + C\sigma_\varphi + A_t\theta^\circ + B\alpha_r\sigma_r + D\left(\alpha_r + \alpha_\varphi\right)\sigma_\varphi + \\
&\quad + \left(0{,}5B - D\right)\left[\left(1-\alpha_r^2\right)\sigma_r - \alpha_\varphi^2\sigma_\varphi\right]\alpha_r + B_t\alpha_r\theta^\circ; \\
e_\varphi &= A\sigma_\varphi + C\sigma_r + A_t\theta^\circ + B\alpha_\varphi\sigma_\varphi + D\left(\alpha_\varphi + \alpha_r\right)\sigma_r + \\
&\quad + \left(0{,}5B - D\right)\left[\left(1-\alpha_\varphi^2\right)\sigma_\varphi - \alpha_r^2\sigma_r\right]\alpha_\varphi + B_t\alpha_\varphi\theta^\circ; \\
L &= \left(A_t + B_t\alpha_r\right)\sigma_r + \left(A_t + B_t\alpha_\varphi\right)\sigma_\varphi + C_\sigma\theta^o / T_0,
\end{aligned}
\qquad (1)
$$

где e_r, e_φ — радиальные и окружные деформации; σ_r, σ_φ — радиальные и окружные напряжения; A, B, C, D, A_t, B_t — константы потенциала [1, 2], $A = 0,5\left(1/E^+ + 1/E^-\right)$, $B = 0,5\left(1/E^+ - 1/E^-\right)$, $A_t = 0,5\left(\alpha_{t1}^+ + \alpha_{t1}^-\right)$, $C = -0,5\left(\nu^+/E^+ + \nu^-/E^-\right)$, $B_t = 0,5\left(\alpha_{t1}^+ - \alpha_{t1}^-\right)$, $D = -0,5\left(\nu^+/E^+ - \nu^-/E^-\right)$, E^+, E^-, ν^+, ν^-, α_{t1}^+, α_{t1}^- — модули упругости, коэффициенты Пуассона и коэффициенты линейного теплового расширения материала при одноосном растяжении (+) и одноосном сжатии (–) соответственно; $\alpha_r = \sigma_r / S$, $\alpha_\varphi = \sigma_\varphi / S$ — нормированные напряжения; $S = \sqrt{\sigma_r{}^2 + \sigma_\varphi{}^2}$ — модуль вектора полного напряжения; L — плотность энтропии; $\theta^\circ = T - T_0$ — изменение температуры; T — текущая температура оболочки в точке; T_0 — начальная температура оболочки.

Так как рассматриваемая задача физически и геометрически нелинейная, решение будем искать в приращениях функций. Линеаризацию проводим на начальном этапе построения разрешающей системы уравнений согласно методу последовательных нагружений.

Приращения деформаций δe_r, δe_φ выразим через приращения напряжений $\delta\sigma_r, \delta\sigma_\varphi$ и изменений температур $\delta\theta^\circ$ с учетом уравнений (1):

$$\delta e_r = \Delta_{11}\delta\sigma_r + \Delta_{12}\delta\sigma_\varphi + \Delta_{13}\delta\theta^\circ;\ \delta e_\varphi = \Delta_{21}\delta\sigma_r + \Delta_{22}\delta\sigma_\varphi + \Delta_{23}\delta\theta^\circ, \qquad (2)$$

где $\Delta_{13} = \dfrac{\partial e_r}{\partial\theta^\circ} = A_t + B_t\alpha_r$; $\Delta_{23} = \dfrac{\partial e_\varphi}{\partial\theta^\circ} = A_t + B_t\alpha_\varphi$;

$$\Delta_{11} = \frac{\partial e_r}{\partial\sigma_r} = A + B\left(\alpha_r{}^3 + 2\alpha_r\alpha_\varphi{}^2\right) + D\alpha_\varphi{}^3 - D\alpha_r\alpha_\varphi{}^2 +$$
$$+ \left(0,5B - D\right)\left[\alpha_r{}^3 + 2\alpha_r\alpha_\varphi{}^2 - \alpha_r{}^5 - \alpha_\varphi{}^5 - 4\alpha_r{}^3\alpha_\varphi{}^2 + 2\alpha_r{}^2\alpha_\varphi{}^3\right] + B_t\theta^\circ\alpha_\varphi / S;$$

$$\Delta_{22} = \frac{\partial e_\varphi}{\partial\sigma_\varphi} = A + B\left(\alpha_\varphi{}^3 + 2\alpha_r{}^2\alpha_\varphi\right) + D\alpha_r{}^3 - D\alpha_r{}^2\alpha_\varphi +$$
$$+ \left(0,5B - D\right)\left[\alpha_\varphi{}^3 + 2\alpha_\varphi\alpha_r{}^2 - \alpha_\varphi{}^5 - \alpha_r{}^5 - 4\alpha_r{}^2\alpha_\varphi{}^3 + 2\alpha_r{}^3\alpha_\varphi{}^2\right] + B_t\theta^\circ\alpha_r / S;$$

$$\Delta_{12} = \Delta_{21} = \frac{\partial e_r}{\partial\sigma_\varphi} = \frac{\partial e_\varphi}{\partial\sigma_r} = C - B\alpha_r{}^2\alpha_\varphi + D\left(2\alpha_r\alpha_\varphi + \alpha_r{}^3 + \alpha_\varphi{}^3\right) +$$
$$+ \left(0,5B - D\right)\left[-\alpha_\varphi\alpha_r{}^2 + 3\alpha_r{}^4\alpha_\varphi - 3\alpha_r{}^3\alpha_\varphi{}^2\right] - B_t\theta^\circ\alpha_r\alpha_\varphi / S.$$

Выразим из уравнений (2) приращения главных напряжений:

$$\delta\sigma_r = B_{11}\delta e_r + B_{12}\delta e_\varphi + B_{13}\delta\theta^\circ;$$
$$\delta\sigma_\varphi = B_{21}\delta e_r + B_{22}\delta e_\varphi + B_{23}\delta\theta^\circ, \qquad (3)$$

где $B_{11} = \Delta_{22}/\Delta$; $B_{12} = -\Delta_{21}/\Delta$; $B_{21} = -\Delta_{12}/\Delta$; $B_{22} = \Delta_{11}/\Delta$; $B_{13} = \left(\Delta_{13}\Delta_{21} - \Delta_{23}\Delta_{11}\right)/\Delta$; $B_{23} = \left(\Delta_{23}\Delta_{12} - \Delta_{13}\Delta_{22}\right)/\Delta$; $\Delta = \Delta_{11}\Delta_{22} - \Delta_{12}\Delta_{21}$.

Для расширения границ применимости решения задачи максимальные прогибы ограничиваем толщиной оболочки. Тогда компоненты тензора деформаций будем записывать согласно теории Т. Кармана [3]:

$$e_r = u_{,r} - kw + 0,5w_{,r}{}^2 - zw_{,rr}; \quad e_\varphi = \frac{u}{r} - kw - \frac{z}{r}w_{,r}, \tag{4}$$

где u, w — радиальные перемещения и прогибы срединной поверхности; k — кривизна оболочки; r — радиальная координата; z — вертикальная координата, отсчитываемая от срединной поверхности оболочки.

Пренебрегая малыми высшего порядка, получим выражения для приращений деформаций:

$$\begin{aligned} &\delta e_r = (\delta u)_{,r} - k\delta w + w_{,r}(\delta w)_{,r} - z(\delta w)_{,rr}; \\ &\delta e_\varphi = \frac{\delta u}{r} - k\delta w - \frac{z}{r}(\delta w)_{,r}. \end{aligned} \tag{5}$$

Определим приращения усилий:

$$\begin{aligned} &\delta N_r = \int\limits_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_r dz;\ \delta N_\varphi = \int\limits_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_\varphi dz; \\ &\delta M_r = \int\limits_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_r z dz;\ \delta M_\varphi = \int\limits_{-h/2}^{h/2} \delta\sigma_\varphi z dz. \end{aligned} \tag{6}$$

Уравнения равновесия для сферической оболочки под воздействием равномерно распределенной нагрузки с учетом геометрической нелинейности имеют вид:

$$\begin{aligned} &M_{r,rr} - M_{\varphi,r}/r + 2M_{r,r}/r + k(N_r + N_\varphi) + N_r w_{,rr} = -q; \\ &N_{r,r} + (N_r - N_\varphi)/r - k\left[M_{r,r} + (M_r - M_\varphi)/r\right] = 0. \end{aligned} \tag{7}$$

Пренебрегая малыми высшего порядка, получим линеаризованные уравнения:

$$\begin{aligned} &(\delta M_r)_{,rr} - (\delta M_\varphi)_{,r}/r + 2(\delta M_r)_{,r}/r + \\ &+k(\delta N_r + \delta N_\varphi) + (\delta N_r) w_{,rr} + N_r(\delta w)_{,rr} = -\delta q; \\ &(\delta N_r)_{,r} + (\delta N_r - \delta N_\varphi)/r - k\left[(\delta M_r)_{,r} + (\delta M_r - \delta M_\varphi)/r\right] = 0. \end{aligned} \tag{8}$$

Уравнение притока тепла получим, подставляя выражение для плотности энтропии разносопротивляющегося материала в уравнение теплопроводности Фурье:

$$\lambda\theta^\circ_{,zz} - \rho C_\sigma \theta\circ_{,t} - \left(A_t(\sigma_r + \sigma_\varphi)_{,t} + B_t(S)_{,t}\right)T_0 + U = 0, \tag{9}$$

где λ — коэффициент теплопроводности; C_σ — теплоемкость материала при постоянном напряжении; U — удельная мощность источников тепла.

Получим уравнение теплопроводности в приращениях:

$$\lambda\left(\delta\theta^{\circ}\right)_{,zz}-\rho C_{\sigma}\left(\delta\theta^{\circ}\right)_{,t}- \\ -\left[A_t\left(\delta\sigma_r+\delta\sigma_{\varphi}\right)_{,t}+B_t\left(\alpha_r\left(\delta\sigma_r\right)_{,t}+\alpha_{\varphi}\left(\delta\sigma_{\varphi}\right)_{,t}\right)\right]T_0+U=0. \qquad (10)$$

Два уравнения равновесия и уравнение теплопроводности решаются совместно для учета связанности полей напряжений и температур. Подставляя в уравнения (8) и (10) зависимости (3), (5), (6), получим систему линеаризованных дифференциальных уравнений в частных производных относительно приращений прогибов, радиальных перемещений и изменений температур:

$$\begin{cases} J_{11}\left(\delta w\right)_{,rrrr}+K_{11}\left(\delta w\right)_{,rrr}+K_{12}\left(\delta w\right)_{,rr}+K_{13}\left(\delta w\right)_{,r}+ \\ +K_{14}\left(\delta w\right)+J_{14}\left(\delta u\right)_{,rrr}+K_{15}\left(\delta u\right)_{,rr}+K_{16}\left(\delta u\right)_{,r}+K_{17}\left(\delta u\right)=\delta q-K_{q1}; \\ K_{21}\left(\delta w\right)_{,rrr}+K_{22}\left(\delta w\right)_{,rr}+K_{23}\left(\delta w\right)_{,r}+K_{24}\left(\delta w\right)+ \\ +K_{25}\left(\delta u\right)_{,rr}+K_{26}\left(\delta u\right)_{,r}+K_{27}\left(\delta u\right)=-K_{q2}; \\ \lambda\left(\delta\theta^{\circ}\right)_{,zz}+K_{31}\left(\delta\theta^{\circ}\right)_{,t}+K_{32}\left(\delta u\right)_{,rt}+K_{33}\left(\delta w\right)_{,t}+K_{34}\left(\delta w\right)_{,rt}+ \\ +K_{35}\left(\delta w\right)_{,rrt}+K_{36}\left(\delta u\right)_{,t}+U+K_{37}\left(\delta u\right)_{,r}+ \\ +K_{38}\left(\delta u\right)+K_{39}\left(\delta w\right)_{,rr}+K_{310}\left(\delta w\right)+K_{311}\left(\delta w\right)_{,r}+K_{312}\left(\delta\theta^{\circ}\right)=0, \end{cases}$$

где J_{ij}, K_{ij} — функции накопленного к рассматриваемому моменту нагружения напряженного состояния.

Разрешающую систему линейных дифференциальных уравнений необходимо дополнить граничными и начальными условиями в приращениях. Граничные условия для жесткой заделки по контуру запишутся следующим образом:

$$\delta w=0;\ \left(\delta w\right)_{,r}=0;\ \delta u=0.$$

Для центра оболочки:

$$\left(\delta w\right)_{,r}=0;\ \delta u=0.$$

Температурные начальные условия в приращениях примут вид:

$$\delta\theta^{\circ}\left(z=h/2\right)=0;\ \delta\theta^{\circ}\left(z=-h/2\right)=0.$$

С помощью метода конечных разностей перейдем к системе линейных алгебраических уравнений. Решать систему будем дважды на каждом этапе нагружения согласно двухшаговому методу последовательного возмущения параметров В. В. Петрова [4]. Это позволит многократно сократить погрешность линеаризации методом последовательных нагружений и уменьшить требуемое количество шагов по нагрузке и затраты машинного времени. Для полного учета эффекта разносопротивляемости на первом этапе необходимо дополнительно решить задачу о малых прогибах оболочки итерационным методом упругих решений А. А. Ильюшина. Алгоритм программы был реализован в среде MATLAB.

С помощью разработанной программы была рассчитана жестко защемленная пологая сферическая оболочка радиусом в плане 1 м со стрелой подъема 0,08 м и толщиной 0,03 м из конструкционного графита АРВ с характеристиками: $E^+ = 0,375\text{ГПА}$, $E^- = 0,613\text{ГПА}$, $\nu^+ = 0,2$, $\nu^- = 0,35$, $\alpha_{t1}^+ = 4\cdot 10^{-6}\,K^{-1}$, $\alpha_{t1}^- = 6\cdot 10^{-6}\,K^{-1}$. Максимальная поперечная нагрузка была принята равной 12 кПа. Начальная температура оболочки 300 К. На верхней поверхности температура понижалась до 290 К, а на нижней повышалась до 320 К.

Сравнивались четыре различных варианта постановки задачи: с учетом связанности, разносопротивляемости и геометрической нелинейности (на рис. 1—3 сплошная линия), с учетом связанности, геометрической нелинейности, но с осредненными из опытов на одноосные растяжение и сжатие механическими характеристиками (на рис. 1—3 штрихпунктирная линия), с учетом связанности и разносопротивляемости без геометрической нелинейности (на рис. 1—3 сплошная линия с маркерами), с учетом разносопротивляемости и геометрической нелинейности, но без учета связанности (на рис. 1—3 штриховая линия).

На рис. 1 показаны прогибы оболочки. Поправка в величину максимального прогиба за счет разносопротивляемости составила 45 %, за счет геометрической нелинейности — 24 %. Влияние связанности на прогибы оболочки, выполненной из графита АРВ, не превышает 3 %.

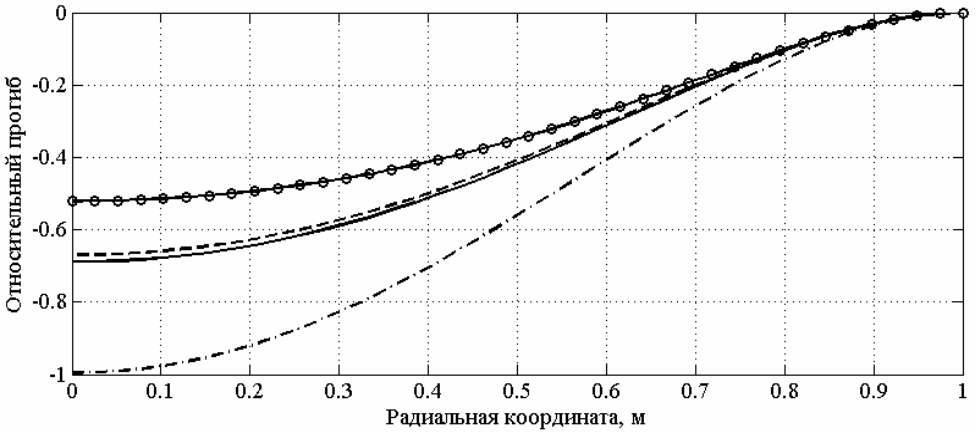


Рис. 1. Прогибы оболочки

На рис. 2 представлено распределение радиальных напряжений на верхней и нижней поверхностях оболочки вдоль радиуса. Поправки в радиальные напряжения за счет учета зависимости свойств материала от вида напряженного состояния достигают на верхней поверхности 29 %, на нижней — 56 %. Расхождения между геометрически линейным расчетом и расчетом по нелинейной теории типа Т. Кармана в величине напряжений не превосходят 33 %. Влияние связанности проявляется незначительно. Расхождение между несвязанной и связанной постановками задачи в величине радиальных напряжений составляет 4 %.

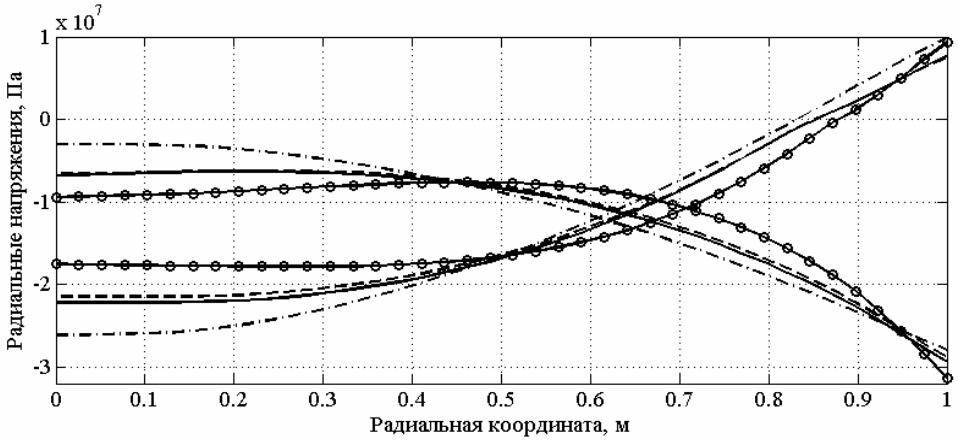


Рис. 2. Радиальные напряжения

На рис. 3 представлено распределение окружных напряжений на верхней и нижней поверхностях оболочки вдоль радиуса. Поправки в окружные напряжения за счет разносопротивляемости достигают на верхней поверхности 19 %, на нижней — 25 %. Расхождение между геометрически линейным и нелинейным расчетами в величине окружных напряжений составляет 33 %. Учет связанности полей напряжений и температур вносит поправки до 4 % в распределение окружных напряжений.

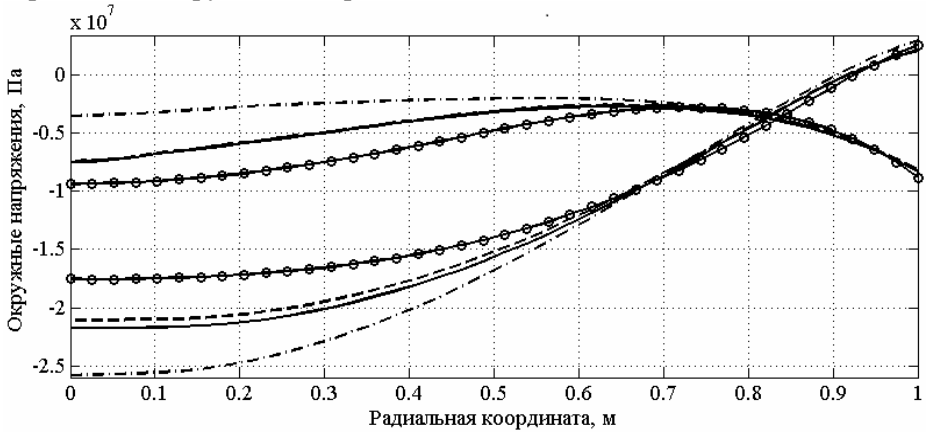


Рис. 3. Окружные напряжения

Связанная задача о больших прогибах сферической оболочки из изотропных разносопротивляющихся материалов под воздействием поперечной нагрузки и температуры до сих пор не решалась. На основании результатов проведенной работы можно сделать вывод, что рассматриваемые физические эффекты вносят значительные коррективы в НДС конструкций. Поправки в величины напряжений достигают 56 %, что существенно влияет на несущую способность конструкции. Так как большинство оболочек из новых материалов проектируются тонкими, особую важность приобретает учет геометрической нелинейности. Было показано, что геометрически линейные расчеты не могут удовлетворительно описать НДС гибких конструкций. Постановка за-

дачи с учетом связанности полей напряжений и температур обеспечивает повышенную точность вычисления температурных напряжений, что крайне важно в графитовых оболочках, применяемых в конструкциях энергетической отрасли. Таким образом, учет рассмотренных физических эффектов и геометрической нелинейности позволит обеспечить должный уровень безопасности и экономичности оболочек из новых эффективных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Матченко Н. М., Трещев. А. А.* Теория деформирования разносопротивляющихся материалов. Прикладные задачи теории упругости. М. : Тула : РААСН ; ТулГУ, 2004. 211 с.

2. *Трещев А. А.* Теория деформирования и прочности материалов, чувствительных к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения. М. : Тула : РААСН ; ТулГУ, 2008. 264 с.

3. *Karman Th.* Festigkeitsprobleme in Machinenbau. Enzyklopadie der Mathematischen Wissenschaften. Bd IV. Mechanik, Teilband 4, Hft 3, Art 27, Punkt 8. Ebene Platten. Leipzig: B. G. Teubner, 1910. S. 311—385.

4. *Петров В. В., Кривошеин И. В.* Методы расчета конструкций из нелинейно деформируемого материала : учеб. пособие. М. : АСВ, 2009. 208 с.

1. *Matchenko N. M., Treshchev. A. A.* Teoriya deformirovaniya raznosoprotivlyayushchikhsya mate-rialov. Prikladnye zadachi teorii uprugosti. M. : Tula : RAASN ; TulGU, 2004. 211 s.

2. *Treshchev A. A.* Teoriya deformirovaniya i prochnosti materialov, chuvstvitel'nykh k vidu napryazhennogo sostoyaniya. Opredelyayushchie sootnosheniya. M. : Tula : RAASN ; TulGU, 2008. 264 s.

3. *Karman Th.* Festigkeitsprobleme in Machinenbau. Enzyklopadie der Mathematischen Wissenschaften. Bd IV. Mechanik, Teilband 4, Hft 3, Art 27, Punkt 8. Ebene Platten. Leipzig: B. G. Teubner, 1910. S. 311—385.

4. *Petrov V. V., Krivoshein I. V.* Metody rascheta konstruktsiy iz nelineyno deformi-ruemogo materiala : ucheb. posobie. M. : ASV, 2009. 208 s.

© Трещев А. А., Делягин М. Ю., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Трещев А. А., Делягин М. Ю. Влияние разносопротивляемости связанности и геометрической нелинейности на НДС сферической оболочки // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 407—413.

УДК 539.384.6

А. А. Трещев, М. Б. Шерешевский

ИССЛЕДОВАНИЕ НДС ПРЯМОУГОЛЬНОЙ В ПЛАНЕ ОБОЛОЧКИ ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ГАУССОВОЙ КРИВИЗНЫ ИЗ ОРТОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ РАЗНОСОПРОТИВЛЯЕМОСТИ

Дается постановка задачи изгиба пологой прямоугольной в плане ортотропной оболочки положительной гауссовой кривизны из разносопротивляющихся материалов. На основе теории, предложенной А. А. Трещевым [1], выводятся разрешающие уравнения. Далее приводится методика получения численного решения, некоторые результаты, а также их анализ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ортотропная оболочка, разносопротивляющийся материал, разрешающие уравнения, пологая оболочка положительной гауссовой кривизны.

The article concerns bending of sloping rectangular in plan shell with positive gauss curvature made of different resistant materials. Resolving equations is deduced on the basis of the theory suggested by A. A. Treshchev. The article also contains the description of method of getting numerical solution, some results and their analysis.

K e y w o r d s: orthotropic shell, different resistant material, resolving equations, sloping shell with positive gauss curvature.

Классические теории, базирующиеся на гипотезах о существовании однозначной зависимости между напряжениями и деформациями, не могут правильно оценить напряженно-деформированные состояния некоторых анизотропных конструкционных материалов. Такими материалами являются ряд полимеров и большинство композитов. Механические характеристики таких материалов зачастую зависят от вида напряженного состояния. Цель работы — адаптировать определяющие соотношения теории анизотропных разносопротивляющихся материалов А. А. Трещева для расчета пологих оболочек положительной гауссовой кривизны, получить разрешающую систему уравнений, разработать алгоритм численного решения системы, решить на его основе тестовую задачу и провести анализ полученных результатов.

В качестве физических зависимостей будем использовать соотношения, выдвинутые в работе [1], с учетом гипотез Кирхгофа и при совпадении осей декартовой системы координат с главными осями анизотропии:

$$e_{11} = A_{11}\sigma_{11} + A_{12}\sigma_{12};\ \ e_{12} = A_{66}\tau_{12};\ \ e_{22} = A_{12}\sigma_{11} + A_{22}\sigma_{12}, \qquad (1)$$

где

$$C_{11} = A_{2222}/\Delta;\ C_{22} = A_{1111}/\Delta;\ C_{12} = -A_{1122}/\Delta;\ C_{66} = 1/A_{1212};$$

$$\Delta = A_{1111}A_{2222} - A_{1122}^2;$$

$\alpha_{ij} = \sigma_{ij}/S$ — тензор нормированных напряжений с нормой пространства S, S — модуль вектора полного напряжения в нормированном девятимерном «пространстве», введенном в монографии [1],

$$S = \sqrt{\sigma_k\sigma_k};$$

A_{ijkm}, B_{ijkm} — константы, подлежащие определению из экспериментов по деформированию образцов материала на одноосное растяжение и одноосное сжатие поочередно вдоль осей x_1, x_2, x_3 и под углом 45° к ним

$$A_{kkkk} = (1/E_k^+ + 1/E_k^-)/2;\ B_{kkkk} = (1/E_k^+ - 1/E_k^-)/2;$$
$$A_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ + \nu_{ij}^-/E_j^-)/2;\ B_{iijj} = -(\nu_{ij}^+/E_j^+ - \nu_{ij}^-/E_j^-)/2;$$
$$A_{ijij} = (1/E_{ij}^+ + 1/E_{ij}^-) - 0,25[(1/E_i^+ + 1/E_j^+ + 1/E_i^- + 1/E_j^-) - 2(\nu_{ji}^+/E_i^+ + \nu_{ji}^-/E_i^-)];$$
$$B_{ijij} = \sqrt{2}(1/E_{ij}^+ - 1/E_{ij}^-) - 0,125\sqrt{2}[(1/E_i^+ + 1/E_j^+ - 1/E_i^- - 1/E_j^-) -$$
$$- 4(\nu_{ji}^+/E_i^+ - \nu_{ji}^-/E_i^-)];$$

$E_i^\pm, \nu_{ij}^\pm$ — модули деформаций и коэффициенты поперечной деформации при растяжении и сжатии в направлениях соответствующих главных осей анизотропии.

Геометрические соотношения представляем в рамках уровня точности теории Т. Кармана:

$$e_{11} = \varepsilon_{11} + x_3\chi_{11};\ e_{22} = \varepsilon_{22} + x_3\chi_{22};\ \gamma_{12} = 2\varepsilon_{12} + x_3\chi_{12}, \qquad (2)$$

где

$$\varepsilon_{11} = u_{,1} + k_1 w + 0,5w_{,1}^2;\ \varepsilon_{22} = v_{,2} + k_2 w + 0,5w_{,2}^2;$$
$$2\varepsilon_{12} = u_{,2} + v_{,1} + w_{,1}w_{,2};$$
$$\chi_{11} = -w_{,11};\ \ \chi_{22} = -w_{,22};\ \ \chi_{12} = -2w_{,12};$$

ε_{ij} — деформации в срединной поверхности; χ_{ij} — кривизны срединной поверхности; u, v, w — перемещения вдоль координатных осей x_1, x_2 и x_3 соответственно.

Так как задача является нелинейной как физически, так и геометрически, было принято решить ее двухшаговым методом последовательных возмущений параметров [2]. В основе данного метода лежит то, что мы разбиваем всю нагрузку на малые приращения и принимаем, что малому приращению нагрузки соответствуют столь же малые приращения перемещений, деформаций и напряжений. Поэтому для его использования необходимо получить наши разрешающие уравнения, выраженные в приращениях.

Следуя методике последовательных нагружений, запишем геометрические соотношения для оболочки в приращениях

$$\delta e_{11} = \delta\varepsilon_{11} + x_3\delta\chi_{11};\ \ \delta e_{22} = \delta\varepsilon_{22} + x_3\delta\chi_{22};\ \delta\gamma_{12} = \delta(2\varepsilon_{12}) + x_3\delta\chi_{12}, \qquad (3)$$

где

$$\varepsilon_{11} = (\delta u)_{,1} + k_1\delta w + w_{,1}(\delta w)_{,1};\ \delta\varepsilon_{22} = (\delta v)_{,2} + k_2\delta w + w_{,2}(\delta w)_{,2};$$
$$\delta(2\varepsilon_{12}) = (\delta u)_{,2} + (\delta v)_{,1} + w_{,2}(\delta w)_{,1} + w_{,1}(\delta w)_{,2};$$
$$\delta\chi_{11} = -(\delta w)_{,11};\ \ \chi_{22} = -(\delta w)_{,22};\ \ \chi_{12} = -2(\delta w)_{,12}.$$

Физические зависимости в приращениях представим следующим образом:

$$\delta e_{11} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{11}}\delta\sigma_{11} + \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{22}}\delta\sigma_{22} + \frac{\partial e_{11}}{\partial \tau_{12}}\delta\tau_{12},$$

$$\delta e_{22} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{11}}\delta\sigma_{11} + \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{22}}\delta\sigma_{22} + \frac{\partial e_{22}}{\partial \tau_{12}}\delta\tau_{12},$$

$$\delta e_{12} = \frac{\partial e_{12}}{\partial \sigma_{11}}\delta\sigma_{11} + \frac{\partial e_{12}}{\partial \sigma_{22}}\delta\sigma_{22} + \frac{\partial e_{12}}{\partial \tau_{12}}\delta\tau_{12},$$

или

$$\begin{aligned}
\delta\sigma_{11} &= \hat{B}_{11}\delta e_{11} + \hat{B}_{12}\delta e_{22} + \hat{B}_{13}\delta e_{12},\\
\delta\sigma_{22} &= \hat{B}_{21}\delta e_{11} + \hat{B}_{22}\delta e_{22} + \hat{B}_{23}\delta e_{12},\\
\delta\tau_{12} &= \hat{B}_{31}\delta e_{11} + \hat{B}_{32}\delta e_{22} + \hat{B}_{33}\delta e_{12},
\end{aligned} \qquad (4)$$

где

$$\hat{B}_{11} = \frac{\Delta_{22}\Delta_{33} - \Delta_{32}\Delta_{23}}{\Delta};\ \hat{B}_{12} = \hat{B}_{21} = \frac{\Delta_{32}\Delta_{13} - \Delta_{12}\Delta_{33}}{\Delta};\ \hat{B}_{13} = \hat{B}_{31} = \frac{\Delta_{12}\Delta_{23} - \Delta_{22}\Delta_{13}}{\Delta};$$

$$\hat{B}_{22} = \frac{\Delta_{11}\Delta_{33} - \Delta_{13}\Delta_{31}}{\Delta};\ \hat{B}_{23} = \hat{B}_{32} = \frac{\Delta_{21}\Delta_{13} - \Delta_{11}\Delta_{23}}{\Delta};\ \hat{B}_{33} = \frac{\Delta_{11}\Delta_{22} - \Delta_{12}\Delta_{21}}{\Delta}$$

$$\Delta_{11} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{11}};\ \Delta_{12} = \Delta_{21} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \sigma_{22}} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{11}};\ \Delta_{13} = \Delta_{31} = \frac{\partial e_{11}}{\partial \tau_{12}} = \frac{\partial e_{12}}{\partial \sigma_{11}};$$

$$\Delta_{22} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \sigma_{22}};\ \Delta_{23} = \Delta_{32} = \frac{\partial e_{22}}{\partial \tau_{12}} = \frac{\partial e_{12}}{\partial \sigma_{22}};\ \Delta_{33} = \frac{\partial e_{12}}{\partial \tau_{12}}.$$

Перейдем от приращений напряжений к приращениям усилий и моментов:

$$\begin{aligned}
\delta N_{11} &= C_{11}\delta\varepsilon_{11} + C_{12}\delta\varepsilon_{22} + C_{13}\delta(2\varepsilon_{12}) + D_{11}\delta\chi_{11} + D_{12}\delta\chi_{22} + D_{13}\delta\chi_{12};\\
\delta N_{22} &= C_{21}\delta\varepsilon_{11} + C_{22}\delta\varepsilon_{22} + C_{23}\delta(2\varepsilon_{12}) + D_{21}\delta\chi_{11} + D_{22}\delta\chi_{22} + D_{23}\delta\chi_{12};\\
\delta N_{12} &= C_{31}\delta\varepsilon_{11} + C_{32}\delta\varepsilon_{22} + C_{33}\delta(2\varepsilon_{12}) + D_{31}\delta\chi_{11} + D_{32}\delta\chi_{22} + D_{33}\delta\chi_{12};\\
\delta M_{11} &= D_{11}\delta\varepsilon_{11} + D_{12}\delta\varepsilon_{22} + D_{13}\delta(2\varepsilon_{12}) + F_{11}\delta\chi_{11} + F_{12}\delta\chi_{22} + F_{13}\delta\chi_{12};\\
\delta M_{22} &= D_{21}\delta\varepsilon_{11} + D_{22}\delta\varepsilon_{22} + D_{23}\delta(2\varepsilon_{12}) + F_{21}\delta\chi_{11} + F_{22}\delta\chi_{22} + F_{23}\delta\chi_{12};\\
\delta M_{12} &= D_{31}\delta\varepsilon_{11} + D_{32}\delta\varepsilon_{22} + D_{33}\delta(2\varepsilon_{12}) + F_{31}\delta\chi_{11} + F_{32}\delta\chi_{22} + F_{33}\delta\chi_{12};
\end{aligned} \qquad (5)$$

где

$$C_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \hat{B}_{ij}dx_3;\ D_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \hat{B}_{ij}x_3dx_3;\ F_{ij} = \int_{-h/2}^{h/2} \hat{B}_{ij}x_3^2dx_3.$$

Уравнения равновесия в приращениях имеют вид

$$(\delta N_{11})_{,1} + (\delta N_{12})_{,2} = 0;\ (\delta N_{22})_{,2} + (\delta N_{12})_{,1} = 0;$$

$$(\delta Q_1)_{,1} + (\delta Q_2)_{,2} + (\delta w)_{,11} N_{11} + w_{,11}\delta N_{11} - k_1\delta N_{11} + \tag{6}$$
$$+(\delta w)_{,22} N_{22} + w_{,22}\delta N_{22} - k_2\delta N_{22} + 2(\delta w)_{12} N_{12} + 2w_{,12}\delta N_{12} = -q;$$

$$\delta Q_1 = (\delta M_{11})_{,1} + (\delta M_{12})_{,2};\ \delta Q_2 = (\delta M_{22})_{,2} + (\delta M_{12})_{,1}.$$

Подставляя зависимости (5) в уравнения (6), учитывая при этом соотношения (3) и (4), получим линеаризованную систему разрешающих дифференциальных уравнений относительно приращений функций *u*, *v* и *w*.

$$\delta w_{,1}\delta w_{22} D_{1212} - \delta w_{,11} Q_{1111,1} - \delta w_{,22} Q_{1122,1} - 2\delta w_{,12} Q_{1212,2} +$$
$$+1/2\cdot\delta w_{,1}{}^2 D_{1111,1} + 1/2\cdot\delta w_{,2}{}^2 D_{1122,1} + \delta u_{,1} D_{1111,1} + \delta u_{,2} D_{1212,2} +$$
$$+\delta v_{,2} D_{1122,1} + \delta v_{,1} D_{1212,2} - \delta w_{,111} Q_{1111} - \delta w_{,122} Q_{1122} - 2\delta w_{,122} Q_{1212} +$$
$$+\delta u_{,11} D_{1111} + \delta u_{,22} D_{1212} + \delta v_{,12} D_{1122} + \delta v_{,12} D_{1212} + w_{,11}\delta w_{,1} D_{1111} +$$
$$+w_{,12}\delta w_{,2} D_{1212} + w_{,1}\delta w_{,22} D_{1212} + \delta w_{,1} w_{,22} D_{1212} + w_{,12}\delta w_{,2} D_{1122} +$$
$$w_{,2}\delta w_{,12} D_{1122} + w_{,1}\delta w_{,11} D_{1111} + \delta w_{,12} w_{,2} D_{1212} + k_1\delta w_{,1} D_{1111} +$$
$$+k_2\delta w_{,1} D_{1122} + \delta w_{,1} D_{1111}\delta w_{,11} + \delta w_{,2} D_{1122}\delta w_{,12} + \delta w_{,12}\delta w_{,2} D_{1212} +$$
$$+k_2\delta w D_{1122,1} + \delta w_1\delta w_2 D_{1212,2} + k_1\delta w D_{1111,1} + \delta w_{,1} w_{,2} D_{1212,2} +$$
$$+w_{,2}\delta w_{,2} D_{1122,1} + w_{,1}\delta w_{,1} D_{1111,1} + w_{,1}\delta w_{,2} D_{1212,2} = 0.$$
$$1/2\cdot\delta w_{,2}{}^2 D_{2222,2} + 1/2\cdot\delta w_{,1}{}^2 D_{1122,2} - \delta w_{,222} Q_{2222} + \delta v_{,11} D_{1212} +$$
$$+\delta v_{,22} D_{2222} - \delta w_{,112} Q_{1122} - 2\delta w_{,112} Q_{1212} - 2\delta w_{,12} Q_{1212,1} -$$
$$-\delta w_{,11} Q_{1122,2} - \delta w_{,22} Q_{2222,2} + \delta u_{,12} D_{1212} + \delta u_{,12} D_{1122} + D_{1212,1}\delta v_{,1} +$$
$$+D_{1212,1}\delta u_{,2} + D_{1122,2}\delta u_{,1} + D_{2222,2}\delta v_{,2} + D_{1122,2} k_1\delta w +$$
$$+D_{2222,2} k_2\delta w + w_{,11}\delta w_{,2} D_{1212} + w_{,22}\delta w_{,2} D_{2222} + \delta w_{,12}\delta w_{,1} D_{1212} +$$
$$+\delta w_{,12}\delta w_{,1} D_{1122} + \delta w_{,12} w_{,1} D_{1212} + \delta w_{,12} w_{,1} D_{1122} + \delta w_{,11}\delta w_{,2} D_{1212} +$$
$$+\delta w_{,11} w_{,2} D_{1212} + \delta w_{,22} w_{,2} D_{2222} + \delta w_{,22}\delta w_{,2} D_{2222} + \delta w_{,1} w_{,12} D_{1122} +$$
$$+\delta w_{,1} w_{,12} D_{1212} + \delta w_{,2} D_{1122} k_1 + \delta w_{,2} k_2 D_{2222} + \delta w_{,2} D_{1212,1} w_{,1} +$$
$$+\delta w_{,2} D_{2222,2} w_{,2} + \delta w_{,2} D_{1212,1}\delta w_{,1} + \delta w_{,1} w_{,2} D_{1212,1} + \delta w_{,1} w_{,1} D_{1122,2} = 0;$$

$$w_{,111}\delta w_{,1} Q_{1111} + w_{,222}\delta w_{,2} Q_{2222} + 2\delta w_{,2} w_{,112} Q_{1212} + \delta w_{,2} w_{,112} Q_{1122} +$$
$$+2\delta w_{,1} w_{,122} Q_{1212} + \delta w_{,1} w_{,122} Q_{1122} + Q_{2222,22} k_2\delta w + Q_{2222,22} w_{,2}\delta w_{,2} +$$
$$+Q_{1122,11} k_2\delta w + Q_{1122,11} w_{,2}\delta w_{,2} + Q_{1111,11} k_1\delta w + Q_{1111,11}\delta w_{,1} w_{,1} +$$
$$+2Q_{1212,12}\delta w_{,1} w_{,2} + 2Q_{1212,12}\delta w_{,1}\delta w_{,2} + 2Q_{1212,12} w_{,1}\delta w_{,2} +$$
$$+2\delta w_{,122}\delta w_{,1} Q_{1212} + \delta w_{,122}\delta w_{,1} Q_{1122} + 2\delta w_{,122} w_{,1} Q_{1212} + \delta w_{,122} w_{,1} Q_{1122} +$$
$$+\delta w_{,111} w_{,1} Q_{1111} + \delta w_{,111}\delta w_{,1} Q_{1111} + 4\delta w_{,12} w_{,12} Q_{1122} + 2\delta w_{,12}\delta w_{,1} Q_{1212,2} +$$

$$+2\delta w_{,12}\delta w_{,1}Q_{1122,2}+2\delta w_{,12}\delta w_{,2}Q_{1212,1}+2\delta w_{,12}\delta w_{,2}Q_{1122,1}+2\delta w_{,12}w_{,1}Q_{1212,2}+$$
$$+2\delta w_{,12}w_{,1}Q_{1122,2}+2\delta w_{,12}w_{,2}Q_{1212,1}+2\delta w_{,12}w_{,2}Q_{1122,1}-\delta w_{,22}w_{,11}Q_{1122}+$$
$$+2\delta w_{,22}w_{,11}Q_{1212}+2\delta w_{,22}k_2Q_{2222}+2\delta w_{,22}w_{,1}Q_{1212,1}+$$
$$+2\delta w_{,22}\delta w_{,2}Q_{2222,2}+2\delta w_{,22}\delta w_{,1}Q_{1212,1}+\delta w_{,22}w_{,22}Q_{2222}+2\delta w_{,22}w_{,2}Q_{2222,2}+$$
$$2\delta w_{,22}k_1Q_{1122}+2\delta w_{,11}Q_{1212}\delta w_{,22}+\delta w_{,11}w_{,11}Q_{1111}-\delta w_{,11}w_{,22}Q_{1122}+$$
$$+2\delta w_{,11}w_{,22}Q_{1212}+2\delta w_{,11}k_1Q_{1111}+2\delta w_{,11}w_{,2}Q_{1212,2}+2\delta w_{,11}\delta w_{,2}Q_{1212,2}+$$
$$+2\delta w_{,11}w_{,1}Q_{1111,1}+2\delta w_{,11}\delta w_{,1}Q_{1111,1}+2\delta w_{,11}k_2Q_{1122}+\delta w_{,222}w_{,2}Q_{2222}+$$
$$+\delta w_{,222}\delta w_{,2}Q_{2222}+2\delta w_{,112}\delta w_{,2}Q_{1212}+\delta w_{,112}\delta w_{,2}Q_{1122}+2\delta w_{,112}w_{,2}Q_{1212}+$$
$$+\delta w_{,112}w_{,2}Q_{1122}+1/2\cdot w_{,22}\delta w_{,1}{}^2D_{1122}+2w_{,22}\delta w_{,1}Q_{1212,1}+$$
$$+1/2\cdot w_{,22}\delta w_{,2}{}^2D_{2222}+2w_{,22}\delta w_{,2}Q_{2222,2}+w_{,22}\delta u_{,1}D_{1122}+$$
$$+w_{,22}\delta v_{,2}D_{2222}+1/2\cdot w_{,11}\delta w_{,1}{}^2D_{1111}+2w_{,11}\delta w_{,1}Q_{1111,1}+1/2\cdot w_{,11}\delta w_{,2}{}^2D_{1122}+$$
$$+2w_{,11}\delta w_{,2}Q_{1212,2}+w_{,11}\delta u_{,1}D_{1111}+w_{,11}\delta v_{,2}D_{1122}+2w_{,12}\delta w_{,1}Q_{1212,2}+$$
$$+2w_{,12}\delta w_{,1}Q_{1122,2}+2w_{,12}\delta w_{,2}Q_{1212,1}+2w_{,12}\delta w_{,2}Q_{1122,1}+2w_{,12}D_{1212}\delta v_{,1}+$$
$$+2w_{,12}D_{1212}\delta u_{,2}+2\delta w_{,1}k_1Q_{1111,1}+2\delta w_{,1}k_2Q_{1122,1}+2\delta w_{,2}k_2Q_{2222,2}+$$
$$+2\delta w_2k_1Q_{1122,2}-\delta v_{,2}k_2D_{2222}-\delta v_{,2}D_{1122}k_1-\delta u_{,1}k_1D_{1111}-\delta u_{,1}D_{1122}k_2-$$
$$-\delta wD_{2222}k_2{}^2-\delta wk_1{}^2D_{1111}-1/2\cdot\delta w_{,1}{}^2k_1D_{1111}-1/2\cdot\delta w_{,1}{}^2D_{1122}k_2-$$
$$-1/2\cdot\delta w_{,2}{}^2k_2D_{2222}-1/2\cdot\delta w_{,2}{}^2D_{1122}k_1+Q_{1122,22}k_1\delta w+Q_{1122,22}\delta w_{,1}w_{,1}-$$
$$-\delta w_{,1111}K_{,1111}-\delta w_{,2222}K_{2222}+\delta v_{,222}Q_{2222}+\delta u_{,111}Q_{1111}+\delta w_{,11}{}^2Q_{1111}+$$
$$+\delta w_{,22}{}^2Q_{2222}+Q_{2222,22}\delta v_{,2}+1/2\cdot Q_{2222,22}\delta w_{,2}{}^2+Q_{1122,11}\delta v_{,2}+$$
$$+1/2\cdot Q_{1122,11}\delta w_{,2}{}^2+1/2\cdot Q_{1111,11}\delta w_{,1}{}^2+Q_{1111,11}\delta u_{,1}+2Q_{1212,12}\delta v_{,1}+$$
$$+2Q_{1212,12}\delta u_{,2}-2\delta w_{,1122}K_{1122}-4\delta w_{,1122}K_{1212}-2\delta w_{,122}K_{1122,1}-$$
$$-4\delta w_{,122}K_{1212,1}-2\delta w_{,111}K_{1111,1}-4\delta w_{,12}K_{1212,12}-\delta w_{,22}K_{2222,22}-$$
$$-\delta w_{,22}K_{1122,11}-\delta w_{,11}K_{1111,11}-\delta w_{,11}K_{1122,22}-2\delta w_{,222}K_{2222,2}-$$
$$-4\delta w_{,112}K_{1212,2}-2\delta w_{,112}K_{1122,2}+2\delta v_{,112}Q_{1212}+\delta v_{,112}Q_{1122}+2\delta u_{,122}Q_{1212}+$$
$$+\delta u_{,122}Q_{1122}+2\delta w_{,12}{}^2Q_{1212}+2\delta w_{,12}{}^2Q_{1122}+1/2\cdot Q_{1122,22}\delta w_{,1}{}^2+Q_{1122,22}\delta u_{,1}+$$
$$+2\delta u_{,12}Q_{1212,2}+2\delta u_{,12}Q_{1122,2}+2\delta v_{,12}Q_{1212,1}+2\delta v_{,12}Q_{1122,1}+2\delta u_{,11}Q_{1111,1}+$$
$$+2\delta u_{,22}Q_{1212,1}+2\delta v_{,11}Q_{1212,2}+2\delta v_{,22}Q_{2222,2}+w_{,22}\delta w_{,1}w_{,1}D_{1122}+$$
$$+w_{,22}\delta w_{,2}w_{,2}D_{2222}+w_{,22}\delta wD_{1122}k_1+w_{22}\delta wk_2D_{2222}+w_{11}\delta w_{,1}w_{,1}D_{1111}+$$
$$+w_{,11}\delta w_{,2}w_{,2}D_{1122}+w_{,11}\delta wk_1D_{1111}+w_{,11}\delta wD_{1122}k_2+2w_{,12}\delta w_{,1}w_{,2}D_{1212}+$$
$$+2w_{,12}\delta w_{,1}\delta w_{,2}D_{1212}+2w_{,12}\delta w_{,2}w_{,1}D_{1212}-\delta w_{,1}w_{,1}k_1D_{1111}-\delta w_{,1}w_{,1}D_{1122}k_2-$$
$$-\delta w_{,2}w_{,2}k_2D_{2222}-\delta w_{,2}w_{,2}D_{1122}k_1-2\delta wk_2k_1D_{1122}=-\delta q.$$

Для уменьшения погрешности расчетов методом последовательных нагружений можно в качестве значений параметров на первом шаге итераций использовать результаты, полученные с помощью метода упругих параметров Ильюшина для аналогичного случая, но без учета геометрической нелинейности.

В качестве примера рассматривается задача о нагружении прямоугольной в плане пологой оболочки положительной гауссовой кривизны внешней равномерно распределенной нагрузкой, приложенной перпендикулярно поверхности оболочки. В качестве граничных условий принято жесткое защемление по всему контуру оболочки, т. е. прогибы и углы поворота равны нулю:

$$w = 0,\ w_{,i} = 0,\ i = 1,2.$$

Полученные результаты расчета по предложенной модели сравнивались с результатами расчета, базирующимися на применении физических соотношений, принятых в классической теории анизотропных материалов, на основе программного комплекса ANSYS. Размеры оболочки в плане были приняты равными $a = b = 1{,}5$ м, толщина оболочки $h = 0{,}1$ м, стрела подъема $f = 0{,}1$ м, главные кривизны $k_1 = k_2 = 0{,}176$, величина внешней нагрузки $q = 4500$ Па. В качестве материала для оболочки был принят графит 16К9-27/ATJ-S со следующими характеристиками: $E_1^+ = 16{,}56$ МПа, $E_1^- = 12{,}42$ МПа, $E_2^+ = 10{,}35$ МПа, $E_2^- = 8{,}28$ МПа, $E_{12}^+ = 11{,}04$ МПа, $E_{12}^- = 9{,}315$ МПа, $\nu_{12}^+ = 0{,}14$, $\nu_{12}^- = 0{,}095$.

Полученные разрешающие дифференциальные уравнения второго порядка в перемещениях неоднородны и достаточно сложны, поэтому для их решения можно использовать численные методы решения, из которых в данном случае наиболее просто реализуется метод конечных разностей.

На рис. 1—3 приведены некоторые наиболее характерные результаты расчета напряженно-деформированного состояния оболочки, описанной выше. Сплошной линией построены графики, полученные в результате расчета, пунктирной — полученные для классической модели в программном комплексе ANSYS.

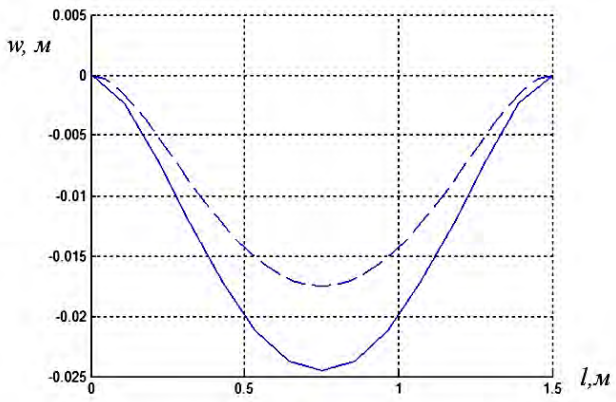


Рис. 1. Прогибы по сечению вдоль оси x_1

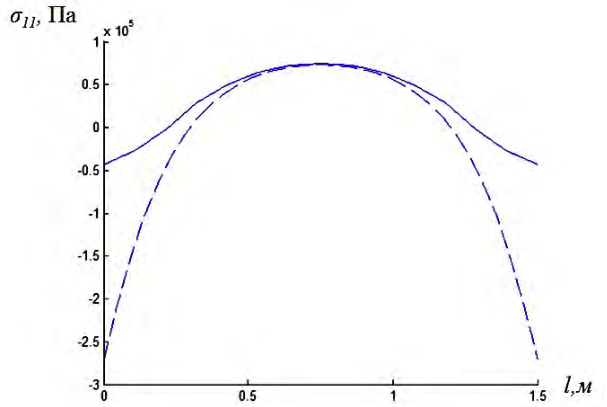


Рис. 2. Нормальные напряжения по сечению вдоль оси x_1

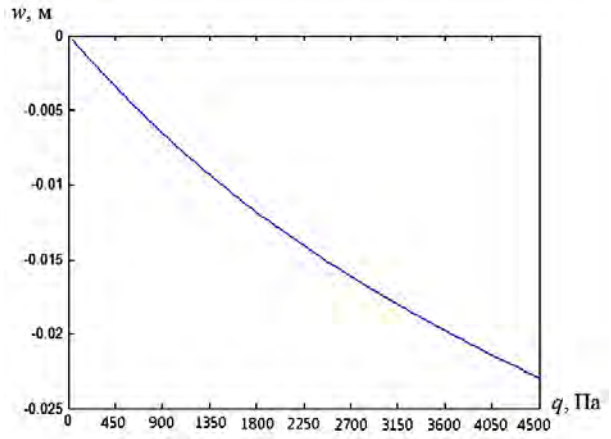


Рис. 3. График зависимости прогибов от нагрузки

Из анализа результатов, показанных на рис. 1—3, становится ясно, что учет влияния разносопротивляемости при расчете пологих прямоугольных в плане оболочек значительно влияет на точность расчета некоторых параметров НДС. К примеру, в нашем случае разница конечных прогибов может достигать 30 %.

Из вышесказанного следует сделать вывод, что учет влияния вида напряженно-деформированного состояния на работу материала является необходимым, так как позволяет получить значительно более точные результаты по сравнению с результатами, полученными с использованием классических методик.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Трещев А. А.* Теория деформирования и прочности материалов, чувствительных к виду напряженного состояния. Определяющие соотношения. М. : Тула, 2008. 264 с.

2. *Петров В. В., Кривошеин И. В.* Методы расчета конструкций из нелинейно деформируемого материала : учеб. пособие. М. : АСВ, 2009. 208 с.

1. *Treshchev A. A.* Teoriya deformirovaniya i prochnosti materialov, chuvstvitel'nykh k vidu napryazhennogo sostoyaniya. Opredelyayushchie sootnosheniya. M. : Tula, 2008. 264 s.

2. *Petrov V. V.*, *Krivoshein I. V.* Metody rascheta konstruktsiy iz nelineyno deformiruemogo materiala : ucheb. posobie. M. : ASV, 2009. 208 s.

© Трещев А. А., Шерешевский М. Б., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Трещев А. А., *Шерешевский М. Б.* Исследование НДС прямоугольной в плане оболочки положительной гауссовой кривизны из ортотропных материалов с учетом свойств разносопротивляемости // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 414—421.

УДК 699.812.2

В. С. Федоров, Н. А. Граминовский

ТЕРМОСИЛОВОЕ ДЕФОРМИРОВАНИЕ БЕТОНА ПОД НАГРУЗКОЙ

Приведены результаты исследования изотермического деформирования высокопрочных бетонов при высокотемпературном воздействии. На основании обработки экспериментальных данных построены кривые деформирования бетона при нестационарном нагреве с учетом силового воздействия и определены деформации температурного расширения бетона, включая усадку. Подтверждено предположение об инвариантности изменения механических свойств от режима кратковременного нагрева.

К л ю ч е в ы е с л о в а: высокопрочный бетон, изотермические диаграммы деформирования.

The article provides the results of the research of isothermal strain of high-strength concrete under high temperature impact. On the basis of experimental data concrete strain curves at unsteady heat taking into account power impact were designed and strain of concrete temperature expansion including shrinkage were defined. The authors prove the suggestion about invariability of change of mechanical properties from short-term heat regime.

K e y w o r d s: high-strength concrete, isothermal diagram of strain.

Накоплен обширный экспериментальный материал о термосиловом деформировании бетона при высокотемпературном воздействии при скорости подъема температуры от 2 до 15 °С, характерном для условий пожара. Установлены основные факторы, влияющие на прочностные и деформативные свойства бетона в этих условиях [1].

Общим для зарубежных исследований У. Шнайдера (ФРГ) [2] и Андерберга (Швеция) [3] является представление суммарной деформации бетона из отдельных компонент, которые отражают суммарные деформации материала от силового и температурного воздействия.

В настоящей работе представлены результаты исследования высокопрочных бетонов класса В40 и В80 [4] на совместное воздействие температуры и нагрузки следующего состава (табл. 1).

Т а б л и ц а 1

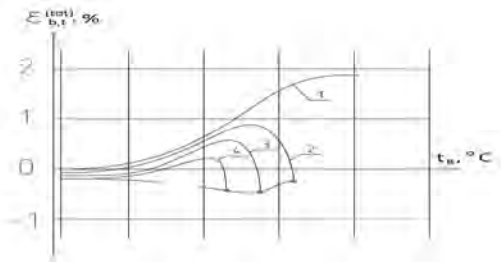
Состав бетонов

Наименование заполнителя	Количество на 1 м^3	
	В80	В40
Цемент, кг	497	480
Модификатор МБ 10-01, кг	99 (20 % от массы Ц)	77 (16 % от массы Ц)
Песок, кг	447	448
Щебень фракции 5…10, кг	477	477
Вода, кг	165	163
Добавка СНВ, кг	7,5 (0,015 от массы Ц)	14,4 (0,03 от массы Ц)

Для каждого класса бетона было проведено 4 серии испытаний по 5…6 образцов в каждой серии при уровне нагружения $\eta_{\sigma,0}$ = 0, 0,3, 0,5 и 0,7 от разрушающей нагрузки и скорости подъема температуры 5…7 °С/мин.

На рис. представлены изотермические кривые деформирования бетона, которые отражают деформирование нагруженного материала при нестационарном высокотемпературном воздействии, характерном для условий пожара.

Для статистической обработки результатов испытаний принимались опытные данные деформирования при температуре 20, 200, 400 и 600 °С.



Кривые деформирования бетонных образцов: *1* — без нагружения; *2* — $\eta_{\sigma,0}$=0,3; *3* — $\eta_{\sigma,0}$=0,5; *4* — $\eta_{\sigma,0}$=0,7

В табл. 2 приведены результаты статистической обработки [5] результатов испытаний при температуре 600 °С.

Таблица 2

Результаты статистической обработки

Температурные деформации, %							
Температура	Колич. образцов	Среднее арифметическое	Среднеквадратичное отклонение	Доверительный интервал	Коэффициент вариации	Относительная погрешность	Коэффициент однородности
600	6	0,96	0,03	0,03	2,82	3,24	0,92

Сравнение кривых развития деформирования цилиндров для бетонов классов В40 и В80 показывает, что класс бетона не влияет на форму деформирования.

Деформирование образцов бетона развивается при взаимосвязи двух явлений: температурного удлинения и продольного сжатия от нагрузки. Кривая деформирования образца без нагрузки (рис., кривая *1*) определяет деформации температурного расширения, включая усадку. Кривые деформирования (*2*—*4*) представляют собой суммарные деформации (1) нагруженных образцов бетона при нестационарном нагреве и напрямую не определяют напряженно-деформированное состояние материала.

Модель изотермического деформирования бетона выражается двумя компонентами:

$$\varepsilon_{b,t}^{(tot)} = \varepsilon_{b,t}^{(tem)} + \varepsilon_{b,t}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{b,t}^{(tot)}$ — полные деформации; $\varepsilon_{b,t}^{(tem)}$ — температурные деформации, вызванные изменением температуры бетона; $\varepsilon_{b,t}$ — силовые деформации, обусловленные приложенной нагрузкой.

В (1) деформация $\varepsilon_{b,t}^{(tem)}$ зависит от состава бетона, который характеризуется коэффициентом температурного расширения и является функцией только температуры.

$$\varepsilon_{b,t}^{(tem)} = \alpha(T)[T(\tau) - T_{н}],$$

где $T(\tau)$ — переменная во времени температура материала; $T_{н}$ — начальная температура; $\alpha(T)$ — коэффициент линейного температурного расширения материала, зависящий от температуры.

Силовые деформации (2) определяются как разность полных и температурных деформаций.

$$\varepsilon_{b,t} = \varepsilon_{b,t}^{(tot)} \quad \varepsilon_{b,t}^{(tem)} \quad . \qquad (2)$$

При малых уровнях нагружения (0,3…0,5 от разрушающей нагрузки) на начальной стадии нагрева происходит удлинение образца, т. е. деформации температурного расширения превышают деформации сжатия, обусловленные силовым воздействием с учетом температурного нагрева материала. Чем выше уровень нагружения, тем существеннее проявляются деформации сжатия, развитие которых по мере роста температуры нагрева переходит в лавинообразное состояние.

Изменения скорости нагрева (2…3 и 8…10 °С/мин) не привели к изменению кривых изотермического деформирования бетона при одном и том же уровне нагружения. Из этого следует, что при таких условиях воздействия свойства при интенсивном нагреве зависят от температуры, но не зависят от времени воздействия, и в этом случае можно сформулировать предположение об инвариантности изменения механических свойств от режима кратковременного нагрева.

Полученные результаты позволяют, используя подходы, гипотезы и предпосылки, принятые в работе [1], разработать модель термосилового деформирования бетона с учетом его высокотемпературного нагрева.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций / В. С. Федоров, В. Е. Левитский, И. С. Молчадский, А. В. Александров. М. : АСВ, 2009. 408 с.

2. Properties of Materials at High Temperatures. Concrete. RILEM, 1985.

3. *Anderberg Y.*, *Thelandersson S.* Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures. Pt. Experimental Investigation and Material Model. Sweden : Lund, 1976.

4. ГОСТ 24452—80. Бетоны. Методы испытаний.

5. *Смирнов Н. В.*, *Дунин-Барковский И. В.* Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. М. : Наука, 1969. 511 с.

1. Ognestoykost' i pozharnaya opasnost' stroitel'nykh konstruktsiy / V. S. Fedorov, V. E. Levitskiy, I. S. Molchadskiy, A. V. Aleksandrov. M. : ASV, 2009. 408 s.

2. Properties of Materials at High Temperatures. Concrete. RILEM, 1985.

3. *Anderberg Y.*, *Thelandersson S.* Stress and Deformation Characteristics of Concrete at High Temperatures. Pt. Experimental Investigation and Material Model. Sweden : Lund, 1976.

4. GOST 24452—80. Betony. Metody ispytaniy.

5. *Smirnov N. V.*, *Dunin-Barkovskiy I. V.* Kurs teorii veroyatnostey i matematicheskoy statistiki dlya tekhnicheskikh prilozheniy. M. : Nauka, 1969. 511 s.

© Федоров В. С., Граминовский Н. А., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Федоров В. С., *Граминовский Н. А.* Термосиловое деформирование бетона под нагрузкой // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки . С. 422—424.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

УДК 656

Ю. П. Бочаров, М. Л. Петрович, А. С. Баранов

ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТЬ СОЗДАНИЯ ИНТЕРМОДАЛЬНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

Раскрываются вопросы формирования интермодальных транспортных систем городов, показана их связь с территориально-транспортным планированием и комплексным подходом. Представлена классификация интермодальных узлов в зависимости от уровней территориально-транспортного планирования.

К л ю ч е в ы е с л о в а: интермодальная транспортная система, территориально-транспортное планирование, интермодальный узел, комплексный подход.

The authors reveal the issues of formation of city intermodal transport systems. The connection between territorial and transport planning and comprehensive approach is shown. Classification of intermodal hubs depending on the level of territorial and transport planning is provided.

K e y w o r d s: intermodal transport systems, territorial and transport planning, intermodal hubs, comprehensive approach.

В российских городах отмечается быстрый рост уровня автомобилизации, вызывающий конфликтные ситуации между пассажирским общественным и индивидуальным видами транспорта, между грузовыми и пассажирскими перевозками. Происходит подавление инфраструктуры пешеходного движения, подмена комплексного планирования развития транспортных систем городов планированием развития автомобильных дорог.

Понимание транспортной системы города как простой суммы отдельных видов транспортной инфраструктуры, каждый из которых решает только одну узкую задачу, существенно препятствует развитию городов, снижает эффективность отраслевых капиталовложений и не может обеспечить решение существующих транспортных проблем.

Ключевые понятия данной статьи — «транспортные системы городов» и «интермодальность» — по отдельности применяются достаточно давно. Изучение и планирование развития транспортных систем городов ведется более 100 лет, система интермодальных перевозок, в которых перевозка одного места груза осуществляется с использованием разных видов транспорта, уходит корнями в далекое прошлое. Соединение их в одном термине «интермодальные транспортные системы городов» для отечественной практики является терминологической новацией последнего десятилетия. Определение «интермодальные транспортные системы городов» введено документом [1], разработанным в ЦНИИП градостроительства в 2001—2007 гг. (МДС 30-2.2008).

Это системы, «в которых совместно используется несколько видов транспорта как единый комплекс. Пассажирская интермодальная система, объединяя различные виды транспорта, устанавливает единые специальные типы подвижного состава, инфраструктуры пересадочных узлов и терминалов».

Интермодальные транспортные системы требуют комплексного подхода, в первую очередь на стадии разработки стратегических планов, схем территориального планирования, генеральных планов.

Комплексное планирование интермодальных транспортных систем заключается в подходе к городу как целостному социально-пространственному объекту, а к транспортной системе города — как инфраструктурному элементу города, обеспечивающему и предопределяющему стратегический план городского развития.

Результатом комплексного планирования должно стать получение синергетического эффекта от взаимодействия различных видов транспорта и от рационального землепользования, увязанного с возможностями транспортной системы, что, в свою очередь, позволит снизить затраты на развитие транспортной системы.

Идея восстановления комплексного подхода в России оказалась во многом созвучной идеям преобразования транспортных систем в городах Северной Америки и Западной Европы, прозвучавшим в конце 1980—1990 гг. Общее в них то, что в работу транспортной системы включался (часто — возвращался) общественный транспорт как приоритетный вид транспорта. Индивидуальный автомобиль вытеснялся из центров городов, пешеходные зоны заменяли проезжие части дорог.

Характеризуют аналогию заметки В. Вучика [2] по поводу сложившейся в середине 1970—1980 гг. транспортной ситуации: «В США есть давние традиции, основанные на глубоко укоренившихся предпочтениях автомобиля перед всеми прочими видами транспорта, и эти традиции формируют условия и практики, препятствующие эффективному интермодальному планированию… Планирование развития различных видов транспорта (автомобильного, общественного, велосипедного) по-прежнему идет раздельно, а не интегрированно. Причин тому несколько. Финансирование все еще выделяется по большей части на отдельные виды транспорта. Планированием развития каждого вида транспорта занимается отдельное ведомство. Большинство профессионалов ориентировано на определенный вид транспорта».

Желание включить в планы развития городов передвижения с использованием всех видов транспорта привело к использованию термина «интермодальное планирование» и «интермодальные транспортные системы».

Интермодальные транспортные системы — территориальные транспортные системы, в которых для осуществления городского движения используются различные виды транспорта.

Использование понятия «интермодальная транспортная система» находит свое применение, в первую очередь, в территориальном и транспортном планировании. Исходя из целей и задач создания комплексной системы планирования, предлагается использовать более общее понятие «*территориально-транспортное планирование*», предложенное для обсуждения в ряде публикаций [3].

Территориально-транспортное планирование должно вестись на нескольких уровнях — от глобального, в котором город рассматривается как узел глобальной транспортно-коммуникационной сети со сценарным прогнозом на 20…30 лет вперед, до отдельных объектов строительства и благоустройства, в котором отражаются реалии фактического землепользования и краткосрочного финансирования.

Всего можно выделить 7 уровней, которые различаются:

по масштабам, позволяющим наиболее продуктивно работать с выбранной транспортной системой;

объемам финансирования, выделяемым на развитие транспортной системы;

численности населения, обслуживание которого возлагается на транспортную систему;

задачам, ставящимся перед проектировщиками.

Характеристика уровней представлена в табл. и на рис. 1.

Уровни территориально-транспортного планирования

Уровень	Масштаб карты	Население на территории планирования, тыс. чел.	Объем финансирования, млрд р.	Решаемые задачи
Международный	1:50 000 000	50 000...500 000	100...2 000	Стратегии развития международных транспортных коридоров
Федеральный	1:10 000 000	10 000...140 000	100...1 500	Стратегии развития, выбор внешних видов транспорта
Региональный	1:1 000 000	1000...30 000	100...1 000	Транспортное обслуживание городских агломераций, выбор внешних видов транспорта и планировочных решений
Агломерационный	1:50 000 (1:100 000)	100...15 000	100...1 000	Транспортное обслуживание поселений агломераций, взаимодействие с внешними транспортными сетями, выбор скоростных видов транспорта
Городской (поселенческий)	1:10 000 (1:20 000)	1...1 000	10...500	Транспортное обслуживание районов города, организация магистральной УДС, выбор видов транспорта и организация магистральных транспортных сетей, размещение крупных объектов
Районный	1:2000 (М 1:500)	10...100	10...50	Транспортное обслуживание земельных участков, крупных пассажирообразующих объектов, организация УДС, организация транспортных сетей, размещение объектов транспорта
Местный	1:500—1:2000	до 300...500 (дневной пассажирооборот)	0,001...1	Организация движения УДС, взаимодействие отдельных объектов транспортной инфраструктуры

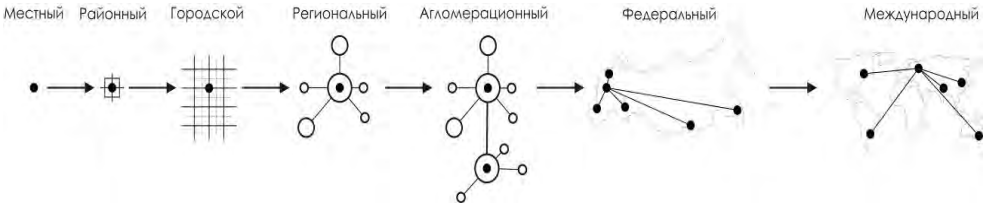


Рис. 1. Уровни территориально-транспортного планирования

На первое место в территориально-транспортном планировании выходит задача поиска оптимального сочетания различных видов транспортной инфраструктуры, обеспечивающего реализацию стратегических установок. Параллельно решается задача рационального землепользования в увязке с развитием транспортной системы.

В решении этих задач транспортная система города рассматривается как многовидовая («мультимодальная») и обеспечивающая цепочку передвижений или перемещений грузов с помощью различных видов транспорта («интермодальная»). Важнейшими элементами «интермодальной» системы становятся узлы, которые вместе с привычными улицами, автодорогами, водными, воздушными и железнодорожными путями сообщения (также мультимодальными каналами и пространствами) образуют «транспортно-коммуникативный каркас» городского пространства, формируют каркас городской агломерации и являются основой городского транспортного узла.

Узлы, в которых осуществляется смена видов транспорта в процессе передвижения пассажиров или перемещения грузов, являются интермодальными. К простейшим интермодальным узлам можно отнести остановочный пункт, где пешеход превращается в пассажира.

Интермодальные узлы важно классифицировать в увязке с уровнями территориально-транспортного планирования (рис. 2). Данная типология позволяет определить значение для города каждого узла в зависимости от количества, мощности и класса транспортных инфраструктурных сетей.

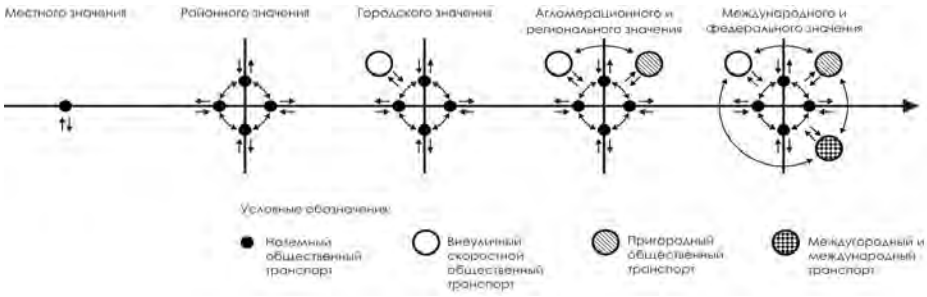


Рис. 2. Интермодальные узлы в зависимости от уровней территориально-транспортного планирования

Практическое применение результатов исследования позволяет совершенствовать работу транспортных систем городов посредством выделения из их структуры интермодальных узлов, оптимизация которых повышает связность, качество и безопасность системы в целом. Рассматривая

Санкт-Петербург как интермодальную транспортную систему, можно выделить 90 интермодальных узлов (14 районного значения, 43 городского, 25 регионального и 8 федерального), требующих первоочередного анализа с целью выявления неэффективно работающих элементов и последующего их преобразования.

Интермодальность как инструмент оптимизации городских пространств требует более подробного и глубокого изучения. Углубление знаний в этой области будет способствовать укреплению комплексного подхода в проектировании транспортных систем городов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методические рекомендации по модернизации транспортных систем городов. МДС 30-2.2008 / Ю. П. Бочаров [и др.]. М. : ЦНИИП градостроительства РААСН, 2008.

2. *Вучик В. Р.* Транспорт в городах, удобных для жизни. М. : Территория будущего, 2011. 576 с.

3. *Петрович М. Л.* Транспортно-территориальное планирование в муниципальном образовании: проблемы, пути решения, примеры // Градостроительство и территориальное планирование России. Ростов н/Д : ГИС-ассоциация, 2007.

1. Metodicheskie rekomendatsii po modernizatsii transportnykh sistem gorodov. MDS 30-2.2008 / Yu. P. Bocharov [i dr.]. M. : TsNIIP gradostroitel'stva RAASN, 2008.

2. *Vuchik V. R.* Transport v gorodakh, udobnykh dlya zhizni. M. : Territoriya budushchego, 2011. 576 s.

3. *Petrovich M. L.* Transportno-territorial'noe planirovanie v munitsipal'nom obrazovanii: problemy, puti resheniya, primery // Gradostroitel'stvo i territorial'noe planirovanie Rossii : Rostov n/D : GIS-assotsiatsiya, 2007.

© Бочаров Ю. П., Петрович М. Л., Баранов А. С., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Бочаров Ю. П., Петрович М. Л., Баранов А. С. Целесообразность создания интермодальных транспортных систем // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 425—429.

УДК 711.73

Ю. П. Бочаров, М. Л. Петрович, А. С. Баранов

РАНЖИРОВАНИЕ ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНЫХ УЗЛОВ ГОРОДСКОЙ ИНТЕРМОДАЛЬНОЙ ТРАНСПОРТНОЙ СИСТЕМЫ

Транспортно-пересадочные узлы — основные элементы современных интермодальных транспортных систем. Авторами предлагается система критериев для ранжирования транспортно-пересадочных узлов по значению в транспортной системе города, в качестве примера ранжируются транспортно-пересадочные узлы в Санкт-Петербурге. Результаты исследования могут быть использованы при разработке комплексных планов развития транспортной системы Санкт-Петербурга, других городов России.

К л ю ч е в ы е с л о в а: транспортно-пересадочный узел, интермодальная транспортная система.

The article is devoted to intermodal hubs — the basic elements of modern intermodal transport systems. The authors offer the criteria system for ranging of intermodal hubs on value in city transport system. As an example intermodal hubs in St. Petersburg are ranged. The results of the research can be used when developing comprehensive plans of the development of transport system in St. Petersburg and other Russian cities.

K e y w o r d s: intermodal hub, intermodal transport system.

Понятие интермодальности применяется для характеристики транспортной системы, в которой интеграция различных видов транспорта приводит к повышению эффективности использования каждого из них. Особое звучание это понятие получило с принятием в 1991 г. Федерального закона США «Об эффективном использовании интермодальных систем наземного транспорта» (Intermodal Surface Transportation Efficiency Act), обозначаемого аббревиатурой ISTEA. Закон регламентировал федеральную поддержку городских интермодальных пассажирских систем, способствовал устранению перекоса в сторону строительства автодорожной сети и тотального использования индивидуального транспорта для всех видов передвижений. Преобразования транспортных систем многих городов США, произошедшие благодаря федеральной поддержке, показывают эффективность стратегических решений, принятых двадцать лет назад. Были восстановлены или созданы заново системы городского общественного транспорта с интегрированными системами оплаты, расписаниями, информационным обеспечением, получили развитие транспортно-пересадочные узлы, включающие перехватывающие стоянки, удобные связи между внешним и городским транспортом [1, 2].

Города Российской Федерации встретились с проблемой перегрузки улично-дорожной сети потоками индивидуального транспорта только в последние 10—15 лет. Активный интерес к применению зарубежного опыта борьбы с дорожными заторами посредством развития общественного транспорта и построения интермодальных транспортных систем закономерен. Но для эффективного применения опыта необходимо выявить особенности развития транспортных систем российских городов, современное их состояние, историю и тренды развития. Необходимо учесть, что в советский период развития транспортные системы городов формировались на основе обществен-

ного транспорта с высокой координацией взаимодействия между разными его видами в условиях централизованного планирования и государственного финансирования [3]. Устройство транспортно-пересадочных узлов подчинялось генеральным планам развития городов, для увязки отдельных элементов узлов применялась многоуровневая система планировочной документации. Резкое снижение уровня координации произошло в постперестроечный период, после 1991 г. Для российских городов актуальным теперь является не столько создание, сколько восстановление интегрированных транспортных пассажирских систем с включением в них индивидуального транспорта на основе современных условий управления транспортными системами. Многочисленные публикации последних лет отражают направления исследований в области комплексного планирования развития транспортных систем российских городов [4].

Важным документом для российской практики планирования стала разработка рекомендаций МДС, в которых введено понятие интермодальной транспортной системы [5]. В фокусе внимания исследователей вновь оказались комплексное планирование и транспортно-пересадочные узлы [6].

Транспортно-пересадочные узлы (ТПУ) являются основными элементами городской интермодальной транспортной системы (ГИТС). С целью определения уровня значимости транспортно-пересадочных узлов нами предложено ввести универсальный показатель — ранг узла:

$$R = Lk_L + Pk_P + Gk_G + Mk_M + Uk_U + Sk_S + Ak_A + Tk_T + Ck_C,$$

где R — ранг узла в ГИТС; L — уровень связей; P — суточный пассажирооборот; G — количество групп видов транспорта; M — количество маршрутов и регулярность движения наземного общественного транспорта; U — количество линий городского внеуличного общественного транспорта; S — количество направлений и регулярность движения пригородного транспорта; A — количество направлений и регулярность беспересадочных сообщений внешнего транспорта; T — суточный поток индивидуального транспорта в узле; C — принадлежность узла к общественно-деловому центру города; k_L, k_P, k_G, k_M, k_U, k_S, k_A, k_T, k_C — коэффициенты приведения.

Формула представляет собой сумму 9 критериев, каждый из которых умножен на соответствующий коэффициент приведения (табл. 1). Величина коэффициента приведения отражает значимость соответствующего критерия. Максимально возможное значение каждого критерия равно 1 вне зависимости от изначальной единицы измерения. При максимальных значениях всех показателей ранг узла равен 10.

Таблица 1

Значения коэффициентов приведения

Коэффициент	k_L	k_P	k_G	k_M	k_U	k_S	k_A	k_T	k_C
Значение	2,0	3,0	2,0	0,5	0,5	0,5	0,5	1,5	0,5

Предложенная методика ранжирования транспортно-пересадочных узлов апробирована на примере Санкт-Петербурга. Для оценки было отобрано 90 основных ТПУ города, имеющих связь с метрополитеном или железной дорогой пригородного сообщения. Анализ осуществлялся при помощи геоинформационной системы РГИС [7].

Критерии оценки транспортно-пересадочных узлов:

1. Уровень связей *L* (табл. 2).

Таблица 2

Характеристика уровней связей

Уровень связей	Международный	Национальный	Региональный	Агломерационный (пригородный)	Городской	Районный	Местный
Значение *L*	1,0	0,8	0,7	0,6	0,5	0,3	0,1

Определяется по дальности связей, которые обслуживаются данным узлом. В Санкт-Петербурге выявлено 9 узлов международного уровня, 1 национального, 23 регионального, 1 агломерационного, 42 городского и 14 районного уровня.

2. Суточный пассажирооборот *P*, тыс. чел./сут. Определяется потоком пассажиров на вход и выход из основного пассажирообразующего объекта транспортной инфраструктуры. Зачастую таким объектом является станция метрополитена или головное сооружение внешнего транспорта (вокзал, аэропорт).

Нормируется по максимальному значению пассажирооборота в ТПУ города. Для Санкт-Петербурга принято максимальное значение 265 тыс. чел./сут, исходя из современного положения в узле Московского вокзала. Для сравнения ТПУ разных городов предлагается нормировать данный критерий по максимальному значению для группы городов (например, для ранжирования крупнейших ТПУ мира можно принять узел Shinjuku в Токио, у которого пассажирооборот достигает 3700 тыс. чел./сут).

3. Количество групп видов транспорта *G*. Для данного критерия все возможные объекты транспортной инфраструктуры ТПУ разбиты на 4 группы:

а) городской наземный общественный транспорт;

б) городской внеуличный общественный транспорт;

в) пригородный (агломерационный) транспорт;

г) внешний транспорт.

Наличие в узле одной из этих групп позволяет присвоить узлу 0,25 балла, таким образом, максимально возможное значение по данному критерию равно 1 при наличии представителей всех 4 групп. В Санкт-Петербурге максимальный балл присвоен только 5 узлам — всем железнодорожным вокзалам.

4. Количество маршрутов и регулярность движения наземного общественного транспорта *M*. Определяется суммированием регулярности движения всех маршрутов наземного общественного транспорта (автобус, троллейбус, трамвай, маршрутное такси), проходящих через ТПУ.

$$M = f_{M1} + f_{M2} + ... + f_{Mn},$$

где M — количество маршрутов движения наземного общественного транспорта с учетом их регулярности движения; 1, 2,..., n — маршруты движения наземного общественного транспорта в узле; f_M — регулярность движения маршрута (табл. 3).

Таблица 3

Значение регулярности движения маршрута в зависимости от интервала движения

Интервал движения, мин	< 10	10...30	30...60	60 <
Значение f_M	1,0	0,7	0,5	0,3

Для апробации методики в исследуемом городе регулярность движения маршрутов условно принята за 1, таким образом, значение данного критерия соответствует количеству маршрутов в узле. Количество маршрутов варьируется от 1 (узел «Морской фасад») до 65 (узел станции метро «Проспект Просвещения»). Критерий нормировался по максимальному значению — 65.

5. Количество линий городского внеуличного общественного транспорта *U* (табл. 4).

Таблица 4

Значение регулярности движения маршрута в зависимости от интервала движения

Количество станций метрополитена в узле	1	2	3
Значение *U*	0,5	0,7	1,0

В Санкт-Петербурге городской внеуличный общественный транспорт представлен метрополитеном. Всего в городе 50 ТПУ с одной станцией метрополитена, 6 — с двумя и 1 — с тремя (узел Сенная площадь).

6. Количество направлений и регулярность движения пригородного транспорта *S* (табл. 5).

Таблица 5

Значение регулярности движения направления в зависимости от интервала движения

Интервал движения, мин	< 15	15...30	30...60	60 <
Значение f_S	1,0	0,7	0,5	0,3

Определяется суммированием регулярности движения всех направлений движения пригородного транспорта (пригородная электричка, автобус).

$$S = f_{S1} + f_{S2} + ... + f_{Sn},$$

где *S* — количество направлений движения пригородного транспорта с учетом его регулярности движения; 1, 2,..., *n* — направления движения пригородного транспорта в узле; f_S — регулярность движения направления пригородного транспорта.

Для Санкт-Петербурга регулярность движения направлений пригородного транспорта условно принята за 1, таким образом, значение данного критерия соответствует количеству направлений пригородного транспорта в узле. Узел Финляндского вокзала обслуживает 9 направлений и занимает лидирующую позицию.

7. Количество направлений и регулярность беспересадочных сообщений внешнего транспорта *A*. Определяется суммированием регулярности движения всех направлений движения внешнего транспорта.

$$A = f_{A1} + f_{A2} + ... + f_{An},$$

где A — количество направлений движения внешнего транспорта с учетом его регулярности движения; 1, 2,..., n — направления движения внешнего транспорта в узле; f_A — регулярность движения направления внешнего транспорта (табл. 6).

Таблица 6

Значение регулярности движения по направлению в зависимости от интервала движения

Интервал движения	Чаще, чем 1 раз в день	1 раз в день	2...3 раза в неделю	1 раз в неделю	Реже, чем 1 раз в неделю
Значение f_A	1,0	0,7	0,5	0,3	0,1

Для Санкт-Петербурга регулярность движения по линиям внешнего транспорта условно принята за 1, таким образом, значение данного критерия соответствует количеству направлений внешнего транспорта в узле. Узел «Аэропорт Пулково» обслуживает более 100 направлений. Критерий нормировался по значению 20.

8. Оборот индивидуального транспорта в среднемаксимальный утренний час *T*. При работе с Санкт-Петербургом данный критерий был определен с помощью агломерационной транспортной модели, предоставленной ЗАО «Петербургский НИПИГрад». Результат получен путем суммирования величин транспортных потоков, входящих в узел. Максимальный оборот индивидуального транспорта зафиксирован в узле Московского вокзала и составляет 100,1 тыс. ед./сут. Среднее значение по городу составляет 29,7 тыс. ед./сут при минимальном 0,3 тыс.ед./сут (узел станции «Левашово»).

9. Принадлежность узла к историческому общественно-деловому центру города *C*. Учитывается в случае территориальной принадлежности узла к общественно-деловому центру города. 16 из рассмотренных транспортно-пересадочных узлов территориально расположены в общественно-деловом центре Санкт-Петербурга.

Все 90 рассмотренных узлов сгруппированы по 5 классам: 1-й класс — ранг от 10 до 5 (13 узлов); 2-й класс — от 5 до 4 (18 узлов); 3-й класс — от 4 до 3 (31 узел); 4-й класс — от 3 до 2 (22 узла); 5-й класс — от 2 до 0 (6 узлов). Присвоенный класс говорит о значимости того или иного транспортно-пересадочного узла в городской интермодальной транспортной системе и может стать основой в обосновании необходимости преобразования узлов с выделением очередности.

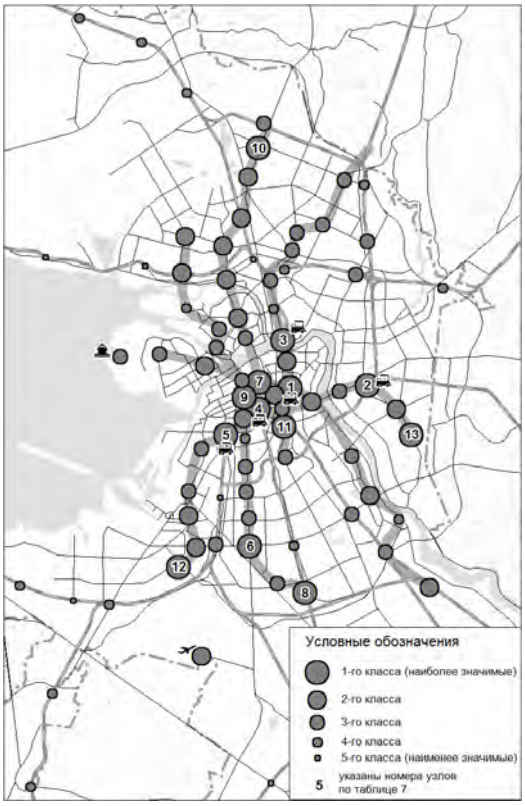
Результаты ранжирования представлены в табл. 7 и на картодиаграмме (рис.).

Представленная методика позволяет увидеть точки роста в структуре интермодальных транспортных систем, оперируя строго определенными качественными и количественными критериями. Наглядным примером может служить узел Центрального автовокзала (№ 11), оказавшийся в одном классе с крупнейшими ТПУ Санкт-Петербурга. Узел находится в старом промышленном поясе города, но с приходом в 2010 г. станции метро «Обводный канал» значительно увеличил свой ранг и претендует на дальнейший рост.

Таблица 7

Транспортно-пересадочные узлы Санкт-Петербурга 1-го класса

№	Наименование ТПУ	*L*	*P*	*G*	*M*	*U*	*S*	*A*	*T*	*C*	Ранг
1	Московский вокзал	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,6	1,0	1,0	1,0	9,5
2	Ладожский вокзал	1,0	0,6	1,0	0,9	0,5	0,6	0,5	0,4	0,0	7,1
3	Финляндский вокзал	1,0	0,5	1,0	0,7	0,5	1,0	0,1	0,5	0,0	7,0
4	Витебский вокзал	1,0	0,3	1,0	0,4	0,7	0,4	1,0	0,2	1,0	6,8
5	Балтийский вокзал	1,0	0,4	1,0	0,3	0,5	0,8	0,4	0,9	0,0	6,6
6	Московская площадь	1,0	0,6	0,8	1,0	0,5	0,2	0,0	0,5	0,0	6,4
7	Гостиный Двор	0,5	0,9	0,5	0,5	0,7	0,0	0,0	0,7	1,0	6,2
8	Балканская площадь	0,7	0,6	0,8	1,0	0,5	0,4	0,0	0,4	0,0	5,9
9	Сенная площадь	0,5	0,8	0,5	0,5	1,0	0,0	0,0	0,6	1,0	5,8
10	Станция метро «Проспект Просвещения»	0,7	0,6	0,8	1,0	0,5	0,2	0,0	0,2	0,0	5,6
11	Центральный автовокзал	1,0	0,1	0,8	0,3	0,5	0,7	1,0	0,7	0,0	5,5
12	Станция метро «Проспект Ветеранов»	0,7	0,7	0,5	1,0	0,5	0,1	0,1	0,3	0,0	5,4
13	Станция метро «Улица Дыбенко»	0,7	0,4	0,8	0,9	0,5	0,3	0,0	0,4	0,0	5,1



Картодиаграмма размещения основных ТПУ Санкт-Петербурга с указанием класса каждого узла

Апробирование методики показало необходимость уточнения инструментов выявления критериев, что предполагается выполнить на следующих стадиях исследования. Результаты исследования могут быть использованы при разработке комплексных планов развития транспортной системы Санкт-Петербурга и других городов России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Rita [Электронный ресурс]. URL: http://ntl.bts.gov/DOCS/istea.html (дата обращения: 29.11.2012).

2. *Вучик В. Р.* Транспорт в городах, удобных для жизни. М. : Территория будущего, 2011. С. 233—236.

3. Рекомендации по разработке комплексных транспортных схем для крупных городов / КиевНИИП градостроительства, БелНИИП градостроительства. М. : Стройиздат, 1982. 120 с.

4. Транспортные системы городов и зон их влияния [Электронный ресурс]. URL: http://www.waksman.ru/ (дата обращения: 29.11.2012).

5. Методические рекомендации по модернизации транспортных систем городов / Ю. П. Бочаров, З. В. Азаренкова, А. А. Агасьянц, О. С. Семенова. М. : Стройиздат, 2009.

6. Интермодальные транспортные системы / Ю. П. Бочаров, М. Л. Петрович, А. Ю. Михайлов, А. С. Баранов // Преобразование транспортно-коммуникационных пространств городов. Санкт-Петербург. Площадь Балтийского вокзала : материалы II Международной науч.-практ. конф. СПб. : СПбГАСУ, 2012. С. 116—119.

7. Региональная геоинформационная система Санкт-Петербурга. URL: http://rgis.spb.ru/ (дата обращения: 29.11.2012).

1. Rita [Elektronnyy resurs]. URL: http://ntl.bts.gov/DOCS/istea.html (data obrashcheniya: 29.11.2012).

2. *Vuchik V. R.* Transport v gorodakh, udobnykh dlya zhizni. M. : Territoriya budushchego, 2011. S. 233—236.

3. Rekomendatsii po razrabotke kompleksnykh transportnykh skhem dlya krupnykh gorodov / KievNIIP gradostroitel'stva, BelNIIP gradostroitel'stva. M. : Stroyizdat, 1982. 120 s.

4. Transportnye sistemy gorodov i zon ikh vliyaniya [Elektronnyy resurs]. URL: http://www.waksman.ru/ (data obrashcheniya: 29.11.2012).

5. Metodicheskie rekomendatsii po modernizatsii transportnykh sistem gorodov / Yu. P. Bocharov, Z. V. Azarenkova, A. A. Agas'yants, O. S. Semenova. M. : Stroyizdat, 2009.

6. Intermodal'nye transportnye sistemy / Yu. P. Bocharov, M. L. Petrovich, A. Yu. Mikhaylov, A. S. Baranov // Preobrazovanie transportno-kommunikatsionnykh prostranstv gorodov. Sankt-Peterburg. Ploshchad' Baltiyskogo vokzala : materialy II Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. SPb. : SPbGASU, 2012. S. 116—119.

7. Regional'naya geoinformatsionnaya sistema Sankt-Peterburga. URL: http://rgis.spb.ru/ (data obrashcheniya: 29.11.2012).

©Бочаров Ю. П., Петрович М. Л., Баранов А. С., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Бочаров Ю. П., Петрович М. Л., Баранов А. С. Ранжирование транспортно-пересадочных узлов городской интермодальной транспортной системы // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 430—436.

УДК 678.074:625.7

В. М. Комов, В. А. Кадушкин

ПРОГРАММНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ, АРМИРОВАННЫХ СИНТЕТИЧЕСКИМИ РЕШЕТКАМИ

Рассмотрено программное моделирование дорожных одежд автомобильных дорог низших категорий. Получено интегральное уравнение, которое позволяет моделировать трехслойные конструкции дорожных одежд под геологические характеристики площадки. Приведено сравнение дорожных одежд, армированных и неармированных синтетическими решетками, под нагрузкой.

К л ю ч е в ы е с л о в а: дорожная одежда, синтетическая решетка, программное моделирование, вертикальное смещение.

Software modeling of road surfacing of the lowest class is considered. Integral equation that allows design three-layer road surfacing adjusted to geological characteristics of the ground was worked out. The authors compare road surfacing reinforced and unreinforced by synthetic grills under load.

K e y w o r d s: road surfacing, synthetic grill, software modeling, vertical shift.

Сельскохозяйственный транспорт выступает в качестве одной из базовых отраслей национального хозяйства Российской Федерации. От степени развития и эффективности его работы зависит бесперебойность всех отраслей сельского хозяйства, а также каждого предприятия в отдельности. Социально-экономическое развитие страны, а также вступление во Всемирную торговую организацию сопровождается увеличением нагрузки на сельскохозяйственную транспортную сеть, в частности на автомобильные дороги сельскохозяйственного назначения.

В рамках научно-исследовательской работы «Расчет дорожных одежд в строительстве на объектах сельскохозяйственного назначения» на подъездной автомобильной дороге к строительной площадке учебно-лабораторного корпуса ФГБОУ ВПО СПбГАУ в 2011 г. был проведен натурный эксперимент по использованию синтетических решеток в качестве армирующего материала дорожной одежды, покрытием которой являются инертные материалы (песок, щебень, песчано-гравийная смесь). Результаты эксперимента показали, что использование синтетических решеток в дорожных одеждах сельскохозяйственного назначения увеличивает эффективность работы дорожной одежды по сравнению с участком автодороги, неармированным решеткой, и позволяет использовать дорожную одежду с покрытием из инертного материала без снижения ее прочностных характеристик. Кроме того, уменьшение толщин слоев дорожной одежды соответственно уменьшает ее стоимость.

Исходя из этого, одной из задач, решаемых в составе научно-исследовательской работы, является реализация математической модели, которая позволяет подобрать оптимальные конструкции дорожных одежд в зависимости от толщин слоев дорожной одежды и применяемых инертных материалов.

В ходе математического моделирования решены следующие задачи: рассмотрено упругое трехслойное полупространство, нагруженное на внешней поверхности нормальной осесимметрической нагрузкой с цилиндрической системой координат r, Θ, z (рис. 1), в которой первый слой толщины h_1 ограничен плоскостями $z = 0$, $z = h_1$. Граница между первым и вторым слоями содержит упругую армированную прослойку.

Второй слой располагается между плоскостями $z = h_1$ и $z = h_2$ и, следовательно, имеет толщину, равную разности $h_2–h_1$. Третий слой ограничен сверху плоскостью $z = h_2$ и является бесконечным. Каждый из трех слоев характеризован модулем упругости E_i и коэффициентом Пуассона ν_i, $i = 1, 2, 3$. Нагрузка, действующая на верхний слой, равномерно распределена по площади круга радиуса R с центром в начале координат. Из соображений симметрии следует, что все рассматриваемые ниже величины должны зависеть только от двух координат r, z.

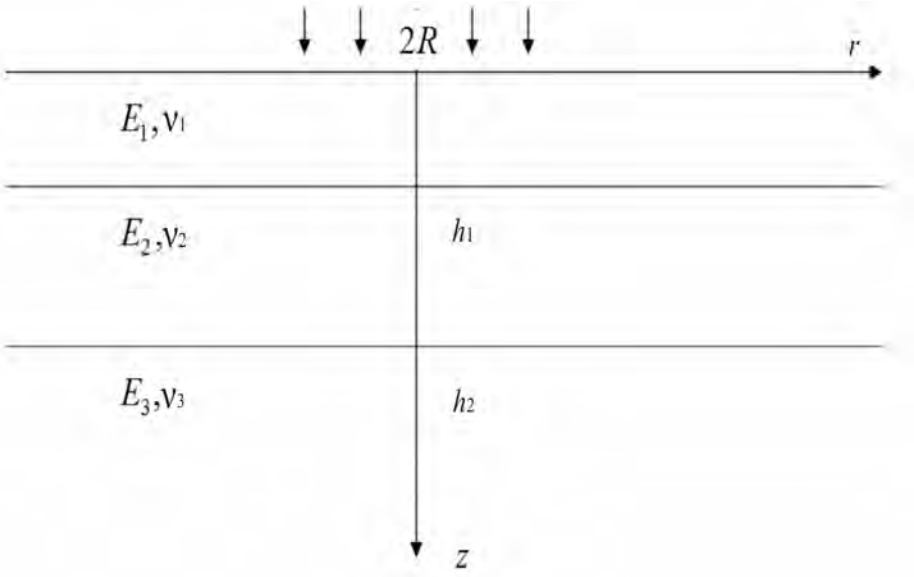


Рис. 1. Упругое трехслойное пространство

Предполагаются выполненными следующие граничные условия:
на поверхности $z = 0$:

$$\sigma_{z1}(r,0) = \begin{cases} p, & r \le r0 \\ 0, & r > r0 \end{cases}; \quad (1)$$

$$\tau_{rz1}(r,0) = 0; \quad (2)$$

на границе $z = h_1$:

$$\sigma_{z1}(r,h_1) = \sigma_{z2}(r,h_1); \quad (3)$$

$$W_1(r,h_1) = W_2(r,h_1); \quad (4)$$

$$\tau_{rz1}(r,h_1)=\tau_{rz2}(r,h_1)=$$
$$=k_1\left(\frac{\partial^2 U_2(r,h_1)}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial U_2(r,h_1)}{\partial r}-\frac{1}{r^2}U_2(r,h_1)\right); \quad (5)$$

на границе $z = h_2$:

$$\sigma_{z2}(r,h_2)=\sigma_{z3}(r,h_2);$$

$$\tau_{rz2}(r,h_2)=\tau_{rz3}(r,h_2); \quad (6)$$

$$U_2(r,h_2)=U_3(r,h_2);$$

$$W_2(r,h_2)=W_3(r,h_2). \quad (7)$$

С математической точки зрения влияние армированной прослойки описывает условие (5) [1]. В соотношении (5) символом k_1 обозначена жесткость на растяжение прослойки, равная ([2]) $k_1=E_2A_p/(1–\nu_2^2)$, где A_p — площадь сечения решетки; E_2 — модуль упругости, ν_2 — коэффициент Пуассона армирующего слоя.

Решение задачи представляется интегралами, подынтегральные выражения которых формируются с использованием следующих величин:

$$m_1=\frac{-E_2+E_3+E_3\nu_2-E_2\nu_3}{4E_3(-1+\nu_2^2)}; \quad (8)$$

$$m_2=\frac{2(-E_2+E_3+E_3\nu^2{}_2+E_2\nu^2{}_3}{4E_3(-1+\nu_2^2)}; \quad (9)$$

$$m_3=\frac{-E_2+E_3+E_3\nu_2-E_2\nu_3}{4E_3(-1+\nu_2^2)}; \quad (10)$$

$$m_4=\frac{-E_2-E_3+E_3\nu_2+2E_3\nu^2{}_2-E_2\nu_3-2E_2\nu_3{}^2}{4E_3(-1+\nu_2^2)}. \quad (11)$$

С использованием расчетной программы Mathematica 8.0 был произведен расчет армированной дорожной одежды с применением следующих исходных данных:

модули Юнга (кг/см^2) слоев: E_1=4500; E_2=1200; E_3=280;

коэффициенты Пуассона слоев: ν_1=0,3; ν_2=0,3; ν_3=0,35;

толщина 1-го слоя d_1=20 см;

толщина 2-го слоя d_2=30 см;

интенсивность внешней нагрузки p=10 кг/см^2;

радиус штампа r_0=18 см;

коэффициент армирующей прослойки k=30 000;

Графики нормального напряжения σ_z в зависимости от расстояния r от центра штампа на горизонтах: z=10; z=20; z=50; z=100.

В результате расчета были получены следующие значения:

1) график поверхности вертикального смещения W на горизонте z=20 (рис. 2);

2) таблица значений вертикального смещения W на оси штампа:

W (0,0)	W (0,10)	W (0,20)	W (0,30)	W (0,40)	W (0,50)	W (0,100)
–0,245781	–0,236799	–0,178114	–0,147554	–0,127788	–0,114461	–0,0780317

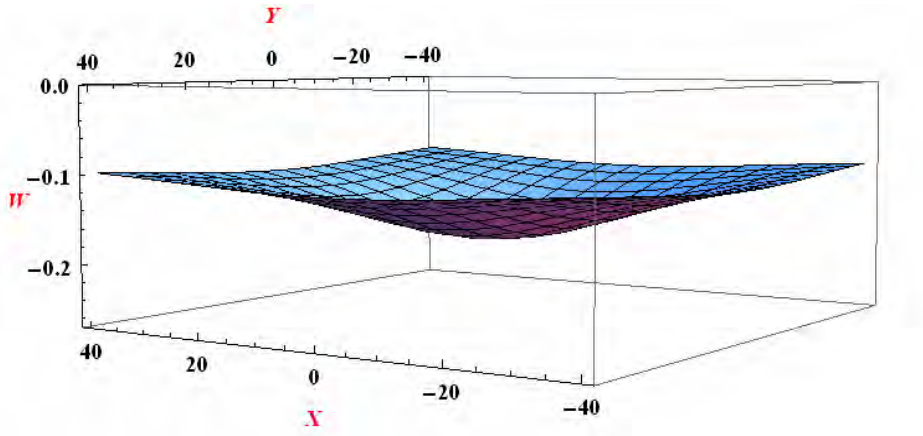


Рис. 2. График поверхности вертикального смещения W

Полученное интегральное уравнение (11) позволяет смоделировать трехслойные конструкции дорожных одежд дорожных одежд под геологические характеристики площадки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Туроверов К. К.* К вопросу исследования напряженного и деформированного состояния упругого слоистого полупространства // Научные труды Лесотехнической академии, 1962. № 94.

2. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд // под ред. Н. Н. Иванова. М. : Транспорт, 1973. С. 1—328.

1. *Turoverov K. K.* K voprosu issledovaniya napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya uprugogo sloistogo poluprostranstva // Nauchnye trudy Lesotekhnicheskoy akademii. 1962. № 94.

2. Konstruirovanie i raschet nezhestkikh dorozhnykh odezhd // pod red. N. N. Ivanova. M. : Transport, 1973. S. 1—328.

© Комов В. М., Кадушкин В. А., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Комов В. М., Кадушкин В. А. Программное моделирование дорожных одежд сельскохозяйственного назначения, армированных синтетическими решетками // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 437—440.

УДК 691.168

В. Г. Котлов, М. Г. Салихов, Е. В. Веюков, Т. В. Железнова, Е. В. Вайнштейн

О ПРИМЕНЕНИИ В ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНАХ ДЛЯ ПОКРЫТИЙ УЛИЦ АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТОВ ХОЛОДНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

Обоснована необходимость целевого использования асфальтогранулятов (АГ) холодного фрезерования в качестве добавки в щебеночно-мастичные асфальтобетоны (ЩМА) для верхнего слоя покрытий улиц и автомобильных дорог. Приведены результаты экспериментальных исследований некоторых свойств образцов ЩМА с добавками АГ, подтвердивших рабочую гипотезу авторов. Использование ЩМА с добавками АГ позволяет повысить эффективность дорожного строительства, в том числе в городских условиях.

К л ю ч е в ы е с л о в а: щебеночно-мастичный асфальтобетон, асфальтогранулят, снижение себестоимости.

The authors prove the necessity of target use of granular asphalt (GA) of cold trimming as additive to chip-mastic asphalt concrete (CMAC) for the upper layer of street and road finishing. Provided are the results of experimental researches of some properties of patterns of CMAC with GA additives that proves the author's working hypotheses. The use of CMAC with GA additives allows increase effectiveness of road construction even in urban area.

K e y w o r d s: chip-mastic asphalt concrete, granular asphalt, reduction of costs.

Многолетний опыт использования щебеночно-мастичных асфальтобетонов (ЩМА) за рубежом и в РФ подтверждает мысль о том, что к настоящему времени человечество к изобретению долговечного шероховатого материала для верхнего слоя дорожных покрытий в последнее десятилетие продвинулось достаточно близко. Данный материал в покрытиях, по мнению многих авторов [1, 2], по сравнению с классическими асфальтобетонами (АБ), долговечнее в 2—3 раза, обладает хорошей шероховатостью, повышенной сдвигоустойчивостью, меньшим трещинообразованием, большой шумопоглощаемостью и т. д. Благодаря вышеперечисленным преимуществам, ЩМА становится одним из самых прогрессивных материалов, особенно для загруженных городских дорог и улиц.

Из-за резкого повышения интенсивности движения в последние годы процесс разрушения покрытия из АБ также усилился. Благодаря внедрению в дорожной отрасли прогрессивных методов холодного фрезерования (ресайклинга) «старого» асфальтобетонного покрытия типов А и Б возрос и объем образующегося асфальтогранулята (АГ), представляющего собой смесь крошек старого асфальтобетона с размером фракций 0…40 мм [3, 4]. АГ — это ценный продукт, состоящий из дорогостоящих компонентов, пригодных для проектирования новых смесей — щебня, песка, минерального порошка и битума. Поэтому направлять их только для использования в выравнивающих слоях дорожных одежд будет не совсем целесообразно.

Поскольку для приготовления щебеночно-мастичных смесей (ЩМАС) требуется применять относительно дорогостоящие, как правило, привозные исходные материалы — прочный узкофракционированный щебень кубической формы (фракциями 5…10, 5…15, 5…20 мм), дробленый песок, минеральный порошок, стабилизирующую добавку и вязкий битум с увеличенным расходом — себестоимость ЩМА в Поволжском регионе оказывается выше на 30…40 %, чем у классических мелкозернистых АБ [1].

Имея в виду вышесказанное и то, что АГ, по сути дела, относится к местным ресурсам, способным снизить себестоимость ЩМА при сохранении его отличных эксплуатационных показателей, в данной работе поставлена цель проверить динамику изменения некоторых свойств ЩМА при добавлении в них АГ. Работа выполнена в филиале кафедры автомобильных дорог Поволжского государственного технологического университета — лаборатории ГКУ «Марийскавтодор». Известен также опыт использования асфальтогранулятов в горячих асфальтобетонах [5].

Для экспериментальных исследований были взяты АГ холодного фрезерования покрытия федеральной автомобильной дороги «Йошкар-Ола — Зеленодольск» на участке «г. Йошкар-Ола — пос. Куяр». Их фракционный состав представлен в табл. 1.

Таблица 1

Состав асафальтогранулята

Размер фракций, м	25…20	20…15	15…10	10…5	5…1,25	1,25… 0,16	0,16… 0,071	Менее 0,071
Содержание, % от общей массы	6,4	3,9	4,8	13,3	22,6	57,6	2,8	1,4

Содержание битума в АГ было установлено экспериментальным методом выжига и составило 2,0 % по массе.

Состав ЩМАС запроектирован по принципу непрерывной гранулометрии [4]. Щебень М1200 фр. 5…20 мм взят из Миньярского каменного карьера, поставляется ОАО «Орское карьероуправление». В качестве дробленого песка использованы отсевы дробления прочного щебня из того же карьероуправления. Взяты минеральный порошок по ГОСТ Р52129—2003 и стабилизирующая добавка Viatop-66. Показатели физико-механических свойств взятого для экспериментов битума вязкого приведены в табл. 2.

Таблица 2

Физико-механические показатели битума БНД 90/130

Наименование показателя	Нормативные показатели по ГОСТ 22245—90	Фактические показатели
Глубина проникания иглы, 0,1 мм: при 25 °С при ±0 °С	 91…130 28	 128 29
Температура размягчения по кольцу и шару, °С, не ниже	43	45
Растяжимость, см, не менее: при 25 °С при ±0 °С	 65 4	 77 4,2
Температура хрупкости, °С, не выше	–17	–20
Температура вспышки, °С, не ниже	230	233
Сцепление с мрамором, песком	Выдерживает	Выдерживает
Изменение температуры размягчения после прогрева, °С, не более	5	2
Индекс пенетрации	+1…–1	–1

Были изготовлены и испытаны стандартные цилиндрические образцы ЩМА размером 71,4×71,4 мм по методике ГОСТ 12801—98 [6]. Фактические составы показаны в табл. 3.

Таблица 3

Состав асафальтогранулята

№ образцов	Количество АГ, % от массы исходной смеси	Дробленый песок, %	Минеральный порошок, %	Щебень М1200 фр. 5…20 мм, %	Битум вязкий БНД 90/130, %	Стабилизирующая добавка (Viatop-66), %
1	0	12,2	10,8	77,0	6,0	0,6
2	5	13,0	10,0	72,0	6,0	0,4
3	10	8,0	10,0	72,0	6,0	0,4
4	15	3,0	10,0	72,0	6,0	0,4

Результаты испытаний по стандартным методикам приведены в табл. 4.

Таблица 4

Физико-механические показатели образцов ЩМА с добавками АГ

№ образцов	Водонасыщение	Предел прочности при сжатии, МПа			Коэффициент водостойкости
		σ^{+20}	$\sigma_{вод}$	$\sigma_{сж}^{+50}$	
1	1,70	2,55	2,20	1,02	0,86
2	1,20	2,73	2,34	1,00	0,86
3	1,75	2,77	2,35	0,92	0,85
4	1,10	2,80	2,46	0,92	0,85
5 (по ГОСТ 31015—2002	1,0…4,0	2,20	—	Не менее 0,65	Не менее 0,85

Анализ полученных данных показывает (см. табл. 4), что при добавлении в ЩМА асфальтогранулятов холодного фрезерования в пределах 0…15 % улучшается ряд свойств: значения водонасыщения снижаются, прочности при сжатии — повышаются и становятся выше нормативных. Кроме того, установлено, что при добавлении в ЩМА АГ происходит значительный рост показателя устойчивости ЩМА под действием расчетных нагрузок при высоких температурах.

Выполненные экспериментальные исследования подтверждают возможность и экономическую целесообразность использования асфальтогранулятов холодного фрезерования при производстве ЩМА для покрытий тяжелонагруженных городских улиц и автомобильных дорог. В дальнейшем предстоит выполнить теоретические исследования внутренних процессов структурообразования и разработать регламент работ по приготовлению смесей и их укладке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кирюхин Г. Н., Смирнов Е. А.* Строительство дорожных и аэродромных покрытий из щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей // Автомобильные дороги и мосты : обзорная информация. М. : Информавтодор, 2003. Вып. 2. 96 с.

2. Щебеночно-мастичные асфальтобетонные смеси в дорожном строительстве // Автомобильные дороги : тематическая подборка. М. : Информавтодор, 2004. 80 с.

3. Разработка стандарта предприятия по использованию асфальтогранулята холодного фрезерования / М. Г. Салихов, Н. П. Буданов, В. М. Вайнштейн, Е. В. Вайнштейн // Сборник научных трудов. Повышение долговечности транспортных сооружений и безопасности движения : Всерос. НПК. Казань : КазГАСУ, 2005. С. 217—219.

4. ГОСТ 31015—2002. Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон щебеночно-мастичные. Технические условия. Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. 24 с.

5. СТП 5718-001-010063—2006. Стандарт предприятия. Смеси асфальтобетонные с добавкой асфальтогранулята старого асфальтобетона. Технические условия. М., 2007. 7 с.

6. ГОСТ 12801—98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. Госстрой России, ГУП ЦПП, 1999. 41 с.

1. *Kiryukhin G. N., Smirnov E. A.* Stroitel'stvo dorozhnykh i aerodromnykh pokrytiy iz shchebenochno-mastichnykh asfal'tobetonnykh smesey // Avtomobil'nye dorogi i mosty : obzornaya informatsiya. M. : Informavtodor, 2003. Vyp. 2. 96 s.

2. Shchebenochno-mastichnye asfal'tobetonnye smesi v dorozhnom stroitel'stve // Avtomobil'nye dorogi : tematicheskaya podborka. M. :- Informavtodor, 2004. 80 s.

3. Razrabotka standarta predpriyatiya po ispol'zovaniyu asfal'togranulyata kholodnogo frezerovaniya / M. G. Salikhov, N. P. Budanov, V. M. Vaynshteyn, E. V. Vaynshteyn // Sbornik nauchnykh trudov. Povyshenie dolgovechnosti transportnykh sooruzheniy i bezopasnosti dvizheniya : Vseros. NPK. Kazan' : KazGASU, 2005. S. 217—219.

4. GOST 31015—2002. Smesi asfal'tobetonnye i asfal'tobeton shchebenochno-mastichnye. Tekhnicheskie usloviya. Gosstroy Rossii, GUP TsPP, 2003. 24 s.

5. STP 5718-001-010063—2006. Standart predpriyatiya. Smesi asfal'tobetonnye s dobavkoy asfal'togranulyata starogo asfal'toetona. Tekhnicheskie usloviya. M., 2007. 7 s.

6. GOST 12801—98. Materialy na osnove organicheskikh vyazhushchikh dlya dorozhnogo i aerodromnogo stroitel'stva. Metody ispytaniy. Gosstroy Rossii, GUP TsPP, 1999. 41 s.

© Котлов В. Г., Салихов М. Г., Веюков Е. В., Железнова Т. В., Вайнштейн Е. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

О применении в щебеночно-мастичных асфальтобетонах для покрытий улиц асфальтогранулятов холодного фрезерования / В. Г. Котлов, М. Г. Салихов, Е. В. Веюков, Т. В. Железнова, Е. В. Вайнштейн // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 441—444.

УДК 625.8:622

А. О. Лютенко, М. С. Лебедев, В. В. Строкова

АНАЛИЗ ОТХОДОВ ГОРНОЙ ДОБЫЧИ КАК ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ*

На примере техногенных образований трех различных месторождений Российской Федерации показаны возможности использования многотоннажных отходов горнодобывающих предприятий при производстве дорожно-строительных материалов. В большинстве случаев для повышения эффективности такого нетрадиционного сырья необходимо коренное изменение его характеристик, что позволяет значительно расширить области использования рассматриваемых материалов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: техногенное сырье, горнодобывающие предприятия, компоненты дорожно-строительных материалов.

By the example of technogenic formations extracted in three different field deposits of the Russian Federation the authors show the possibility of using large-tonnage wastes of mining enterprises when producing road construction materials. In many cases to increase efficiency of such nontraditional raw material it is necessary to change significantly its features that allows greatly expand spheres where this material can be used.

K e y w o r d s: technogenic raw material, mining enterprise, components of road-construction materials.

В настоящее время предприятия, занимающиеся добычей полезных ископаемых, стремятся к получению максимальной выгоды при наименьших затратах, извлекая из недр Земли необходимые ресурсы. При этом сопутствующие продукты — отходы добычи и переработки — складируются в большинстве случаев без определения каких-либо путей их дальнейшего использования. Применение такого сырья в крупнотоннажных отраслях индустрии, в частности в дорожном строительстве, является перспективным путем развития не только дорожной отрасли, но и горнодобывающей промышленности.

Исследования возможности использования отходов горнодобывающих предприятий как компонентов или сырья для получения дорожно-строительных материалов проводились на примере техногенных образований 3 месторождений: Лебединского месторождения Курской магнитной аномалии (КМА), месторождения алмазов им. М. В. Ломоносова Архангельской алмазоносной провинции (ААП) и Коркинского месторождения бурых углей в Челябинской области (КУМ). Рассмотрим техногенное сырье из природных запасов перечисленных регионов в отдельности.

Регион Курской магнитной аномалии — крупнейший район по добыче железных руд открытым способом. Большинство месторождений бассейна находятся на территории Белгородской области. Мощным «производителем» отходов является Лебединский горно-обогатительный комбинат (ЛГОК), где за год образуется более 10 млн $м^3$ техногенного сырья [1].

*Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: соглашение 14.B37.21.1218; Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова; РФФИ, договор № 12-08-87603.

При производстве щебня из скальных попутно добываемых пород на Лебединском горно-обогатительном комбинате образуются отходы, которые селективно складируются на территории дробильно-сортировочной фабрики (ОДСФ). Кроме того, при разработке новых запасов железных руд в отвалы вывозится рыхлая вскрыша (РВ), которая пополняется на 7 млн $м^3$ ежегодно. Данные образования занимают значительную территорию, и их складирование связано с большими расходами, а также проблемой экологического прессинга на окружающую среду. Изучение состава и свойств техногенного сырья КМА свидетельствует о том, что ОДСФ в основном представлены обломками кварцитопесчаника и, согласно дорожной классификации, отнесены к песчаным грунтам, а рыхлая вскрыша характеризуется присутствием значительной доли глинистой составляющей и отнесена к суглинку тяжелому [2].

Архангельская алмазоносная провинция — третья по счету и вторая по значимости в пределах России. Ее запасы составляют около 20 % от общероссийских. Одно из крупнейших месторождений региона — имени М. В. Ломоносова — крупнейшее в Европе среди коренных залежей алмазов.

Предположительно, объем отвальных пород при добыче и обогащении руды данного месторождения составит около 280 млн тонн [3].

Исследования возможности применения отходов ААП в дорожном строительстве проводились с использованием вскрышных пород: песчано-глинистых отложений четвертичного возраста и песчаников с прослоями глин алевролитов и гравелитов урзугской свиты. Они представляют собой глинистые грунты полидисперсного состава с высоким уровнем pH и небольшой емкостью катионного обмена [4].

Главным сырьевым источником угольной промышленности Южного Урала служит Челябинский угольный бассейн. Флагманом открытой добычи угля здесь является уникальный по размерам и технологическим приемам разрез «Коркинский». За 70 лет работы Коркинское месторождение (КУМ) стало одним из крупнейших карьеров России, крупнейшим угольным разрезом Европы. Объем выработанного пространства разреза уже составляет более 800 млн $м^3$, к концу отработки превысит 1 млрд $м^3$. Многотоннажное техногенное сырье КУМ в виде отходов добычи и переработки угля занимает площадь около 1230 га и распределено зонально по территории разработки в виде отвалов [5]. Отвалы горных пород находятся на расстоянии от самого разреза и простираются вдоль трассы М36 более чем на 25 км.

Отходы Коркинского угольного месторождения характеризуются разнообразием в минеральном и гранулометрическом составах и представлены крупными и мелкими обломками аргиллитов, алевролитов, песчаника, угля, глинистыми грунтами. Данный разброс в составе определяет и различие в свойствах, что, в свою очередь, влияет на возможность применения того или иного вида техногенного грунта в качестве строительного материала или его компонента [6].

Рассматриваемые техногенные грунты различных месторождений в своем естественном виде мало пригодны при строительстве автомобильных дорог. Расширение путей их использования возможно только при коренном изменении физических, физико-химических, физико-механических и механических характеристик.

Анализ схемы (рис.) свидетельствует о том, что вскрышные породы изучаемых месторождений представляют собой глинистые образования, которые

в естественном виде вследствие низкой водоустойчивости не пригодны для устройства дорожных одежд и требуют введения в них вяжущего или комплекса вяжущих с целью изменения их первоначальных свойств и придания им достаточной связности, прочности и морозостойкости [7]. Укрепление вяжущими веществами позволит применять их в дорожном строительстве в качестве оснований, покрытий со слоем износа и укрепленных обочин. Также возможно использование таких грунтов для отсыпки земляного полотна и создания краевых укрепленных полос.

Хвосты обогащения представляют собой крупнодисперсные и мелкодисперсные обломки пород, обладая при этом значительно более стабильными свойствами, что предполагает их использование в качестве заполнителей в бетоны и грунтобетоны, материала для отсыпки слоев насыпей и откосов, при устройстве укрепленных обочин, а также в качестве минеральных порошков для асфальтобетонов [8].

Однако стоит отметить, что особенности минерального состава отходов добычи, заключающиеся в значительном содержании слоистых алюмосиликатов, преимущественно глинистых минералов, обусловливают их низкую водостойкость. Улучшению физико-механических характеристик пород способствует термическая модификация, в результате которой образуются сырьевые материалы, обладающие структурной стабильностью в присутствии воды [9]. Последнее обстоятельство, а также высокая адгезия к высокомолекулярным соединениям битума, объясняющаяся развитой морфологией поверхности частиц и значительной концентрацией активных адсорбционных центров на ней, позволяют применять отходы добычи в качестве наполнителей асфальтобетонных смесей.

Крупнообломочные породы КУМ после термической модификации приобретают необходимую водостойкость, что позволяет применять их в качестве крупного и мелкого заполнителя в пористых и высокопористых асфальтобетонах [10]. Также возможно использовать их как материал для устройства укрепленных и неукрепленных оснований дорожных одежд.

Рациональные области использования отходов горнодобывающих предприятий в дорожном строительстве

Особняком среди пород вскрыши стоят грунты с высоким содержанием активного кремнеземистого компонента — глины опоковидной и опоки. Входящее в состав техногенного сырья такое высокореакционное вещество может являться активным компонентом различных вяжущих веществ (например, комплексного грунтоизвесткового вяжущего [11]) и компонентов дорожно-строительных материалов, а преобладающие глинистые фазы могут выполнять роль активного заполнителя в грунтобетонных композициях в укрепленных слоях дорожной одежды. Также опока является ценным сырьем при производстве портландцемента в качестве активной минеральной добавки, поэтому использование ее в больших объемах для дорожного строительства экономически невыгодно.

Таким образом, анализ состава и свойств изученного техногенного сырья указывает на возможность его использования при производстве дорожно-строительных материалов для устройства конструктивных слоев дорожных одежд в различных климатических зонах. Применение отходов горной добычи позволит расширить сырьевую базу дорожной отрасли, снизить себестоимость продукции, уменьшить негативное влияние на экологическую обстановку в районах разработки месторождений полезных ископаемых, а также получить дополнительную прибыль горнодобывающим предприятиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Российский статистический ежегодник, 1994 г. М. : Госкомстат России, 1995. 627 с.

2. *Карацупа С. В.*, *Дмитриева Т. В.* Разработка композиционного материала для дорожного строительства на основе техногенного сырья КМА // Материалы I Всероссийской (VII) науч.-техн. конф. «Строительство: материалы, конструкции, технологии», 18—20 марта 2009 г. Братск : БрГУ, 2009. С. 127—131.

3. Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия) / под ред. О. А. Богатикова. М. : МГУ, 1999. 524 с.

4. *Лютенко А. О.*, *Строкова В. В.*, *Володченко А. Н.* Анализ состава техногенного сырья Архангельской алмазоносной провинции с точки зрения использования в дорожном строительстве // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова : материалы Международной науч.-практ. конф. «Современные технологии в промышленности строительных материалов и стройиндустрии». Белгород : БГТУ, 2005. № 9. С. 418—420.

5. *Тынтеров И. А.*, *Кузьменко Ю. М.*, *Ширкин Г. Г.* Коркинский угольный разрез. Челябинск, 2000. 225 с.

6. Рациональные области использования сырья угольных разрезов / Е. И. Ходыкин [и др.] // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2009. № 3. С. 125—128.

7. *Безрук В. М.* Укрепление грунтов в дорожном и аэродромном строительстве. М. : Транспорт, 1971. 247 с.

8. *Высоцкий А. В.* Эффективный асфальтобетон на минеральных материалах из железосодержащего техногенного сырья КМА : автореф. дис… канд. техн. наук. Белгород, 2004. 23 с.

9. Изменение свойств минеральных порошков из алюмосиликатного сырья под влиянием термической модификации / М. С. Лебедев и др. // Строительные материалы. 2012. № 9. С. 68—70.

10. *Лютенко А. О.*, *Лебедев М. С.* Дорожно-строительные материалы с использованием модифицированного техногенного сырья // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в промышленности строительных материалов : сб. докл. Международной науч.-практ. конф., Белгород, 5—8 окт. 2010 г. Белгород : БГТУ, 2010. С. 162—166.

11. Композиционное вяжущее на основе попутно-добываемых пород угольных месторождений для укрепления грунтов в дорожном строительстве / А. О. Лютенко и др. // Строительные материалы. 2009. № 7. С. 22—23.

1. Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik, 1994 g. M. : Goskomstat Rossii, 1995. 627 s.

2. *Karatsupa S. V.*, *Dmitrieva T. V.* Razrabotka kompozitsionnogo materiala dlya dorozhnogo stroitel'stva na osnove tekhnogennogo syr'ya KMA // Materialy I Vserossiyskoy (VII) nauch.-tekhn. konf. «Stroitel'stvo: materialy, konstruktsii, tekhnologii», 18—20 marta 2009 g. Bratsk : BrGU, 2009. S. 127—131.

3. Arkhangel'skaya almazonosnaya provintsiya (geologiya, petrografiya, geokhimiya i mineralogiya) / pod red. O. A. Bogatikova. M. : MGU, 1999. 524 s.

4. *Lyutenko A. O.*, *Strokova V. V.*, *Volodchenko A. N.* Analiz sostava tekhnogennogo syr'ya Arkhangel'skoy almazonosnoy provintsii s tochki zreniya ispol'zovaniya v dorozhnom stroitel'stve // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova : materialy Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf. «Sovremennye tekhnologii v promyshlennosti stroitel'nykh materialov i stroyindustrii». Belgorod : BGTU, 2005. № 9. S. 418—420.

5. *Tynterov I. A.*, *Kuz'menko Yu. M.*, *Shirkin G. G.* Korkinskiy ugol'nyy razrez. Chelyabinsk, 2000. 225 s.

6. Ratsional'nye oblasti ispol'zovaniya syr'ya ugol'nykh razrezov / E. I. Khodykin [i dr.] // Vestnik BGTU im. V. G. Shukhova. 2009. № 3. S. 125—128.

7. *Bezruk V. M.* Ukreplenie gruntov v dorozhnom i aerodromnom stroitel'stve. M. : Transport, 1971. 247 s.

8. *Vysotskiy A. V.* Effektivnyy asfal'tobeton na mineral'nykh materialakh iz zhelezosoderzhashchego tekhnogennogo syr'ya KMA : avtoref. dis… kand. tekhn. nauk. Belgorod, 2004. 23 s.

9. Izmenenie svoystv mineral'nykh poroshkov iz alyumosilikatnogo syr'ya pod vliyaniem termicheskoy modifikatsii / M. S. Lebedev i dr. // Stroitel'nye materialy. 2012. № 9. S. 68—70.

10. *Lyutenko A. O.*, *Lebedev M. S.* Dorozhno-stroitel'nye materialy s ispol'zovaniem modifitsirovannogo tekhnogennogo syr'ya // Nauchnye issledovaniya, nanosistemy i resursosberegayushchie tekhnologii v promyshlennosti stroitel'nykh materialov : sb. dokl. Mezhdunarodnoy nauch.-prakt. konf., Belgorod, 5—8 okt. 2010 g. Belgorod : BGTU, 2010. S. 162—166.

11. Kompozitsionnoe vyazhushchee na osnove poputno-dobyvaemykh porod ugol'nykh mestorozhdeniy dlya ukrepleniya gruntov v dorozhnom stroitel'stve / A. O. Lyutenko i dr. // Stroitel'nye materialy. 2009. № 7. S. 22—23.

© Лютенко А. О., Лебедев М. С., Строкова В. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Лютенко А. О., Лебедев М. С., Строкова В. В. Анализ отходов горной добычи как потенциального источника сырья для производства дорожно-строительных материалов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 445—449.

УДК 711.7

А. И. Стрельников

АГЛОМЕРАЦИОННОЕ ТРАНСПОРТНОЕ ИЗУЧЕНИЕ ПОДМОСКОВЬЯ

Международный конкурс на концепцию развития Московской агломерации не был поддержан предшествующими обоснованиями. Поэтому полезно обсудить итоги транспортного анализа трудового расселения, выполненного инициативной группой.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Московская агломерация, концепция развития Москвы, транспортная система, моделирование транспортных потоков, транспортный прогноз, зоны влияния городов.

International competition for the concept development of the Moscow metropolitan area was not supported by previous justifications. Therefore it is useful to discuss the results of the transport analysis of labor settlement, made by a group.

K e y w o r d s: Moscow agglomeration, concept of Moscow development, transportation system, traffic modeling, traffic forecast, the zone of influence of cities.

Прошедший конкурс на концепцию развития Москвы в ее новой конфигурации дает повод вспомнить международный конкурс 1930-х годов. Помимо формалистических «ракет» В. В. Кратюка и Н. А. Ладовского, были предложены к рассмотрению и агломерационные размышления зарубежных авторов Майеров, Э. Мая и особо продуманные отечественные разработки С. С. Шестакова и Г. Е. Мищенко. Тогда не был придуман Градостроительный кодекс, отвергающий понятие «агломерация» как несуществующий объект управления. Наше счастье, что усилиями энтузиастов (А. М. Лола [1]; В. Л. Глазычева [2]; В. Я. Любовного [4, 5]) термин вернулся в профессиональный лексикон.

Тем не менее, плохо координирующаяся с конституционном обязательным референдумом (при изменении границ субъектов Федерации) новая конфигурация административных границ Москвы принудила конкурсантов искать формалистические приемы освоения территории (некоторые постарались избежать насильственного формирования Федерального центра на присоединенных территориях).

Мне довелось разрабатывать специальный инструмент для объективного выявления зон влияния городов по транспортным критериям [6]. Идея заключалась в использовании того факта, что средние затраты времени на передвижения в нормальных условиях растут от центра города к его периферии и далее до некоторой границы в пригороде, где угасает тяготение к городу-центру и начинает превалировать тяготение к городу-конкуренту. Идея неоднократно была использована для выявления зон влияния ряда городов по разным типам связей (трудовых, культурно-бытовых, рекреационных). Место «досетевого» подхода было обозначено в [7].

Применительно к Москве сходное исследование удалось провести благодаря сотрудничеству с ИСА РАН: инициативный коллектив в составе математиков ИСА, разработчиков великолепной развиваемой программы TransNet (В. И. Швецов, А. А. Алиев) и советников РААСН (Ю. З. Шершевский, А. И. Стрельников). С начала 2000-х гг. при поддержке ООО ЦИТИ (Центр

исследования транспортной инфраструктуры) был сделан транспортный прогноз для Москвы (естественно, для профессионалов в границах предположительной агломерации — ориентировочно в 50-километровом радиусе — в границах бетонного кольца) и затем по заказу ГУП МО НИиПИ градостроительства транспортный прогноз был выполнен в целом для Московской области. К сожалению, первая работа не была востребована НИиПИ генплана Москвы, но вторая работа вошла в состав проекта развития области. Методика опубликована в [8].

Результаты специальных (помимо транспортных потоков) расчетов представлены на рисунках зон средних времен отправления и прибытия для Москвы и Подмосковья (рис. 1, 2). Время отправления характеризует относительное удобство места жительства, время прибытия — доступность мест труда. Интенсивность цвета характеризует величину времени: затемненные участки — это повышенные затраты времени, светлые — пониженные.

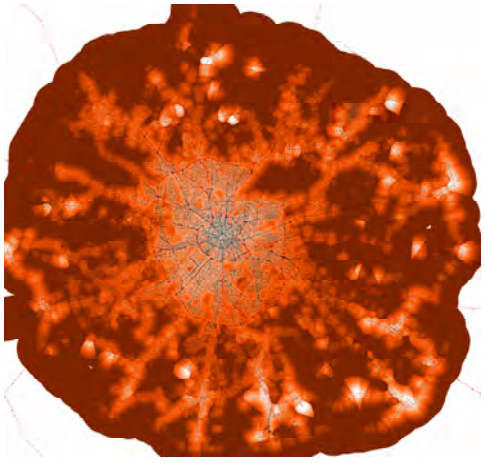


Рис. 1. Москва и ближнее Подмосковье. Среднее время отправления с трудовыми целями

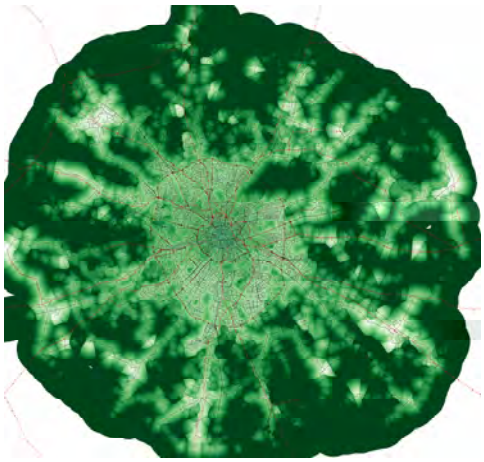


Рис. 2. Москва и ближнее Подмосковье. Среднее время прибытия с трудовыми целями

В целом следует отметить, что зона активного тяготения к Москве по результатам расчетов на 90 % укладывается в пределах 50 км, причем в этой зоне уже появляются очаги отрыва от агломерации — участки со светлой раскраской. Это зоны с небольшими затратами времени, что свидетельствует о «самозамыкании» трудового расселения и формировании местной системы расселения. Вывод: потенциальная московская агломерация не столь обширна, как это представляется непрофессиональной группе ЛПР. Кроме того, по сравнению с предыдущим анализом по воздушным расстояниям данное представление требует дополнительного осмысления: здесь в сетевой модели понижение затрат времени происходит не только в зонах относительного баланса объектов отправления и прибытия (населения и мест труда в данном случае), но и в узлах транспортной сети, удаленность от которых приводит к повышению затрат времени.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лола А. М.* Основы градоведения и теория города. М. : КомКнига, 2005.
2. *Глазычев В. Л.* Урбанистика. М. : Европа, 2008.
3. *Малоян Г. А.* Агломерация — градостроительные проблемы. М. : АСВ, 2010.
4. Проблемы развития агломераций России. М. : Красанд, 2009.
5. *Любовный В. Я.* Самаро-Тольяттинская агломерация: история формирования и перспективы развития». М. : Экон-информ, 2011.
6. *Стрельников А.* Программа определения потенциальной транспортной потребности по воздушным расстояниям // Автоматизация проектирования городских транспортных систем. Вып. 4. М. : Стройиздат, 1977.
7. Справочник проектировщика. Градостроительство / под ред. В. Н. Белоусова. М. : Стройиздат, 1978.
8. Моделирование транспортных потоков в крупном городе с применением к Московской агломерации / А. Алиев, А. Стрельников, В. Швецов, Ю. Шершевский // Автоматика и телемеханика. 2005. № 11.

1. *Lola A. M.* Osnovy gradovedeniya i teoriya goroda. M. : KomKniga, 2005.
2. *Glazychev V. L.* Urbanistika. M. : Evropa, 2008.
3. *Maloyan G. A.* Aglomeratsiya — gradostroitel'nye problemy. M. : ASV, 2010.
4. Problemy razvitiya aglomeratsiy Rossii. M. : Krasand, 2009.
5. *Lyubovnyy V. Ya.* Samaro-Tol'yattinskaya aglomeratsiya: istoriya formirovaniya i perspektivy razvitiya». M. : Ekon-inform, 2011.
6. *Strel'nikov A.* Programma opredeleniya potentsial'noy transportnoy potrebnosti po vozdushnym rasstoyaniyam // Avtomatizatsiya proektirovaniya gorodskikh transportnykh sistem. Vyp. 4. M. : Stroyizdat, 1977.
7. Spravochnik proektirovshchika. Gradostroitel'stvo / pod red. V. N. Belousova. M. : Stroyizdat, 1978.
8. Modelirovanie transportnykh potokov v krupnom gorode s primeneniem k Moskovskoy aglomeratsii / A. Aliev, A. Strel'nikov, V. Shvetsov, Yu. Shershevskiy // Avtomatika i teleme-khanika. 2005. № 11.

© Стрельников А. И., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Стрельников А. И. Агломерационное транспортное изучение Подмосковья // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 450—452.

УДК 725. 381.3

О. Ш. Тер-Восканян

АВТОПАРКОВОЧНЫЕ СТРУКТУРЫ В ГОРОДЕ: ОТ ПРОШЛОГО К НАСТОЯЩЕМУ

Раскрыты тенденции формирования автопарковочных структур в городе на основе отечественного и зарубежного опыта, а также обследований и опроса автовладельцев. Предложены принципы формирования автопарковок для создания бестранспортной жилой зоны.

К л ю ч е в ы е с л о в а: автопарковочные структуры в городе, автомобилизация и строительство гаражей, бестранспортные жилые зоны, разделение пешеходов и транспорта.

The authors reveal trends of formation of car parking structures in cities on the base of domestic and foreign experience as well as examinations and questioning of car owners. Principles of car parking shaping for creation of direct dumping residential zone are suggested.

K e y w o r d s: car parking structures in a city, motorization and the construction of garages, direct dumping residential zones, separation of pedestrians and vehicles.

Формирование автопарковочных структур и развитие индивидуального транспорта в городе — сложная противоречивая задача. С одной стороны, автомобиль ассоциируется с техническим прогрессом, дает человеку большую свободу в передвижении, способствует «пространственному развитию общества» [1], с другой стороны, индивидуальный транспорт противоречит общественному характеру города, ассоциируется с американским образом жизни, а также повинен в плачевном экологическом состоянии.

Скорее всего, проблема не в автомобиле, а в том, как он и сопровождающие его структуры взаимодействуют с городом, а также в каких социальных условиях они развиваются.

Технические проблемы автомобилизации решались на разных этапах в США, Европе и Азии и объединяет их комплексное решение автопарковочных структур с транспортными магистралями, улицами, жилыми домами, офисами и другими городскими функциями. В Париже, Чикаго, Нью-Йорке прокладывались новые относительно транзитные магистрали через жесткую сетку сложившейся транспортной структуры. Увеличивалась не только протяженность транспортной сети, но и ее пропускная способность, без которой проблему парковок решить невозможно.

Градостроители и архитекторы не только разрабатывали современные проекты, но и пытались заглянуть в будущее. Известный футуролог Луис Канн в 1947 г. представлял город с пешеходным центром, защищенным от автомобиля стенами и ожерельем цилиндрических паркингов-башен. Футуролог Е. М. Кори описывал городское будущее как интеграцию скоростных дорог и автопарковок. Современный, реальный проект доктора Роланда Липа для Москвы — размещение гаражей-стоянок и транспортных магистралей на эстакадах над жилыми и общественными зданиями с полной утилизацией вредных веществ и устранение всевозможных колебаний и вибраций от движущегося транспорта — свидетельствует о том, что такое будущее наступило.

Но прежде гаражное строительство прошло сложный путь развития от семейного гаража как склада, который необходимо спрятать или завуалировать, к пониманию гаража как самодостаточного архитектурного целого — к объединению парковок с отдельными жилыми и общественными зданиями,

к интеграции с комплексами жилых и общественных зданий, к интеграции гаражей с транспортными сооружениями, дорогами, проездами и, наконец, попыткам ограничить доступ автомобилей в центр города сооружением терминалов, P+R и P+J.

Наиболее радикальным современным решением проблем автопарковок является полное разделение пешеходов и транспорта в вертикальном пространстве. Например, в Париже полностью убрали парковки под землю, решив тем самым проблему пробок. Освоение в Париже подземного пространства началось сразу после войны, и сейчас оно отстроено на 7…10 этажей. Среди них 200 парковок занимают 2,5 млрд м^3.

Подземное пространство сегодня широко используется во многих странах, в том числе и в России. В то же время, вспоминая работу Саймона Хенли, в которой раскрыто влияние на развитие архитектуры «этих безмолвных, наземных структур», не правильно будет отказаться совсем от их эстетического воздействия на человека. В результате переноса автопарков под землю их абстрактные формы перестали влиять и обогащать архитектуру города, в отличие от периода, когда русский архитектор Константин Мельников в 1925 г. оценил пространственные свойства ландшафта и возможность взаимосвязи с ним парковочных структур. После спроектированных им двух гаражей для Парижа на 1000 м каждый, по выражению Хэнли, модель склада была разбита прекрасными абстракциями Мельникова. Идеалом архитектуры стали не статичные пирамиды, а спиральная архитектура в динамике. Этот динамизм не осуществился в футуристической архитектуре Запада. Он возник в русском конструктивизме. Самые элементарные рампы давали большую свободу дизайнеру, чем различные подъемные механизмы, которые не отражают на фасаде специфику сооружения. Оба гаража представляли водителю фантастический вид города и работали во взаимосвязи с окружающим пространством. В дальнейшем в разных странах — Англии, США, Германии — было построено много выдающихся по архитектуре гаражей, в которых динамичная, брутальная конструкция сооружения выражала экспрессию, впечатляя своей выразительностью.

В 1930-х гг. особое значение в архитектуре гаражей придавалось освещению, которое давало возможность вписать сооружение в структуру ночного города. Замечательный пример масштаба гаражного строительства представляют две 60-этажные башни в Чикаго с 16-ю этажами парковок в основании каждой башни. В начале 1990-х гг. началось изучение пространственных возможностей вписывания гаражных структур в природный и городской ландшафты и интеграция их с жильем, офисами, магазинами. Они также соединялись рампами с дорогой, с терминалами для грузовиков и такси. Эти сооружения являются многофункциональными, в которых также используется и крыша.

Автомобилизация и строительство гаражей в нашей стране имеют свою специфику, так как такого скачка в приобретении личного транспорта за относительно короткое время не было ни в одной стране мира. Парк автомобилей при численности населения России в 142 млн человек составляет 35,5 млн ед., что в 43 раза больше, чем в 1970 г. (724 тыс. ед.). В связи с быстрым ростом автомобилизации проблемы с парковками очень сложные. Особенно они сложны в Москве, так как ее ежедневно посещает больше 1 млн человек. Отда-

вая должное влиянию столицы на страну и признавая необходимость создания транспортной доступности к ее культурным ценностям, все же нельзя не признать, что рост ее гипертрофирован, так как Москву и ее окрестности считает местом своих инвестиций, работы и жилья большая часть населения бывшего Советского Союза. Если эти тенденции не снизятся, то дальнейший рост Москвы может привести к полной деградации города и невозможности на должном уровне решить проблемы хранения и парковки автомобилей.

Проведенное обследование размещения автомобилей и количества квартир в центральной, срединной и периферийной зонах Москвы показало, что жилые функции в последнее время не подчиняются общей закономерности концентрации в центральном ядре города, а больше зависят от материального положения людей. Недостаточное количество жилых функций в центральном ядре города нарушает гармонию транспортных сообщений между местами приложения труда, жильем и другим фокусами тяготения населения. Кроме того, раздельное формирование элитных и социальных жилых комплексов также отрицательно влияет на возможность устройства парковочных мест. Одни комплексы строятся с очень низкой плотностью населения и создают, особенно в центре города, ненормальную обстановку пустующих переулков. Другие комплексы строятся с очень высокой плотностью населения, в них невозможно без кардинальной реконструкции построить гаражи, стоянки. По утверждению многих специалистов, программа «Народный гараж» провалилась. Одной из причин является очень высокая плотность населения в жилье эконом-класса в экономных дворах. Другая проблема — чрезмерная, неоправданная стоимость гаражей, которая, в свою очередь, возникает не только из-за недобросовестности строителей, инвесторов, администрации, но и от недостаточной площади сооружений. Чем площадь больше, тем стоимость одного машино-места меньше.

Был проведен опрос автовладельцев. Было выяснено, что пользуются автомобилем 200…360 дней в году 61 % семей, в основном состоящих из молодых людей. В свободные дни они 1 или 2 раза в неделю, а то и в месяц, ездят за покупками в крупные гипермаркеты. Наличие пробок их не останавливает, так как ездить на машине для них не только удобство, но и престиж и способ самоутверждения. Кроме того, другого способа передвижения по Москве они не знают, в отличие от коренных москвичей, особенно пожилых. Автомобилем они пользуются в основном для поездки на дачу. Летом он там и стоит, а зимой ставится в гараж, взятый в аренду. Большинство автовладельцев — 58 % — ставят автомашины на гостевой стоянке, которая превращается в постоянное хранение и представляет собой расширенную дворовую проезжую часть, которая плотно прилегает к детским площадкам и к тротуару придомовой территории. О вредном воздействии автомобилей на людей и даже на собственных детей никто не задумывается. Если у людей появятся деньги, то они скорее купят еще одну машину, подороже, чем приобретут гараж.

Пробки на улицах повлияли еще на одну тенденцию — приобретение различных видов транспорта. Например, автопарк одной семьи: подержанная иномарка для поездок всей семьи на дачу, подержанный мотоцикл для поездок на работу, подержанная «Ока» для поездок на даче за продуктами и квадроцикл для развлечения детей. Если бы приобретать гаражи было проще, то таких семей было бы больше.

Основная проблема формирования автопарковочных структур возникает в районах социального жилья. В жилых комплексах бизнес-класса накоплен значительный опыт их строительства, который строители готовы применить для жилья эконом-класса. Как показали обследования, люди не хотят приобретать места в необоснованно дорогих гаражах, не имеющих никаких удобств, оборудования, изоляции помещений. Единственный выход из этой ситуации — поселение людей разного достатка в одних домах.

С учетом всех выявленных тенденций, прежде всего сближения автопарковочных структур с транспортными, жилыми и общественными функциями, предложен новый принцип формирования жилых комплексов и три принципа размещения автопарковок в них:

1) автопарковочные структуры совмещаются с общественными центрами в узлах пересечения улично-дорожной сети;

2) автопарковочные структуры концентрируются в транспортных узлах, а общественные центры размещаются на перегонах между ними;

3) автопарковочные структуры вместе с общественными центрами размещаются линейно вдоль улично-дорожной сети.

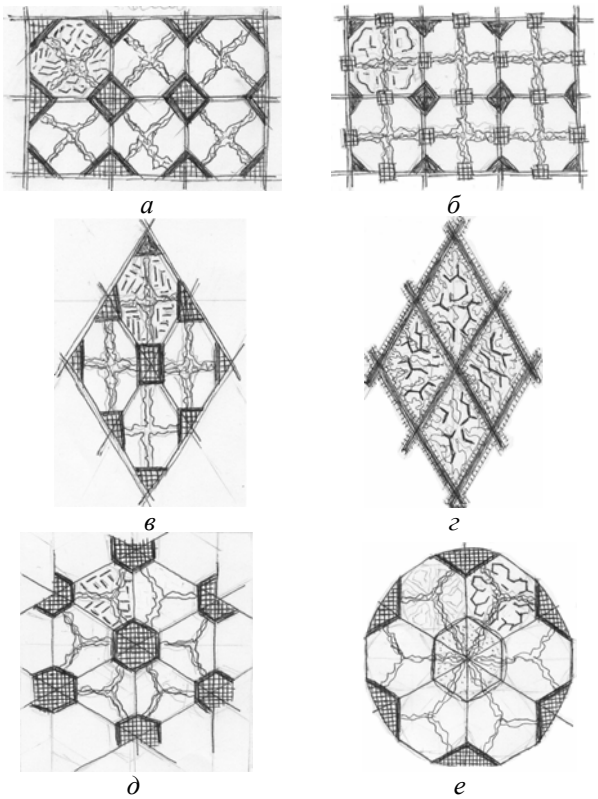


Рис. 1. Схемы формирования автопарковок в различных планировочных ситуациях: *а* — автопарковочные структуры совмещены с общественными центрами (прямоугольная форма начертания транспортной сети); *б* — автопарковочные структуры разделены с общественными центрами (прямоугольная форма начертания транспортной сети); *в* — автопарковочные структуры совмещены с общественными центрами (ромбовидная форма начертания транспортной сети); *г* — автопарковочные структуры и культурно-бытовое обслуживание расположены вдоль улично-дорожной сети; *д* — автопарковочные структуры и общественные центры совмещены в узлах пересечения улично-дорожной сети (треугольная структура начертания транспортной сети); *е* — автопарковочные структуры и общественные центры совмещены в узлах пересечения улично-дорожной сети (радиально-кольцевая структура начертания транспортной сети)

Прежде всего, благодаря соблюдению этих принципов осуществляется формирование бестранспортной зоны в масштабе не меньше бывшего микрорайона. Жилые дома строятся с двумя выходами — один пешеходный во двор, другой транспортный — на улицу. Жилые комплексы — дворы, свободные от автомобилей, выходят на пешеходный зеленый коридор, приводящий кратчайшими путями к общественным центрам. Зеленый коридор объединяет в единую систему как центры, так и дворовые пространства и, в то же время, создает условия для дифференциации в пространстве различных возрастных групп населения. Дворовое пространство предназначается для отдыха стариков и детей, зеленый коридор — для детей старшего возраста и взрослых, с пешеходными и велодорожками, со спортивными площадками. В жилых домах торговли и других учреждений нет. Все вынесено в общественные центры. Автомобили размещаются или в первых этажах жилых домов или в подземном пространстве под дворами, а также в центрах: подземные гаражи, многоэтажные, на крышах общественных зданий. Вдоль улично-дорожной сети проложена дублирующая дорога для въезда в автомобильные стоянки.

На основе изучения отечественного и зарубежного опыта формирования автопарковочных структур разработана расширенная их типология.

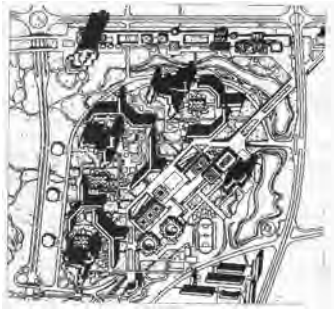


Рис. 2. Северное Чертаново: автопарковочные структуры и общественный центр расположены вдоль улично-дорожной сети

Рис. 3. Автопарковочные структуры и общественные центры в углах, на пересечении улично-дорожной сети. Жилой комплекс в бестранспортной зоне. Центры объединены пешеходными, зелеными коридорами. Жилые дома имеют два выхода, один пешеходный для выхода в систему жилых дворов; другой — с противоположной стороны для выезда транспорта на уличную сеть и систему автостоянок. Гаражи-стоянки под землей, или встроенные в первые этажи зданий, или в стыковках жилых корпусов. Гаражи-стоянки также в общественных центрах

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Simon Henley* The Architectur of parking. Thames @ Hudson, 2007.

1. *Simon Henley* The Architectur of parking. Thames @ Hudson, 2007.

© Тер-Восканян О. Ш., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Тер-Восканян О. Ш. Автопарковочные структуры в городе: от прошлого к настоящему // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 453—458.

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА, ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

УДК 621.311, 697

В. К. Аверьянов, В. Н. Толмачев, А. И. Тютюнников, А. Г. Михайлов, М. А. Журавский, А. А. Мележик

ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЕ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ. НАПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Обобщены цели и задачи, стоящие перед специалистами при разработке энергосистем поселений, ориентированных на устойчивое развитие, и рассмотрены основные направления по обеспечению решения этих задач.

К л ю ч е в ы е с л о в а: возобновляемые источники энергии, вторичные энергоресурсы, гибридные энергокомплексы, инновационные технологии, устойчивое развитие, энергосистема, энергоэффективные здания.

The auhors of the article generalize targets and tasks that specialists face when developing power systems in communities oriented to stable development. The main ways how to find solutions to these tasks are considered.

K e y w o r d s: renewable energy sources, secondary energy resources, hybrid power comlex, innovative technology, stable development, power system, power efficient buildings.

Среди мировых проблем, вызывающих международную озабоченность и часто рассматриваемых как критические, две взаимосвязанные, несомненно, стоят в ряду первостепенных:

экология и качество среды обитания;

энергообеспечение при исчерпании легкодоступных запасов органических видов топлива и возрастании, за счет этого, их стоимости.

В этих условиях существенно расширились задачи, стоящие перед специалистами, принимающими участие в формировании облика поселений и их энергосистем (рис.).

Решение перечисленных задач основывается на системном подходе [2], предполагающем как чисто техническое совершенствование существующих и разработку новых технологий и оборудования, так и одновременное внедрение этих инноваций в градостроительную практику за счет применения различного рода механизмов стимулирования качества принимаемых решений (административных, финансовых, методологических и др.).

Цели	Задачи	Оптимизированные критерии
• Обеспечение требуемого качества среды обитания, способствующего благоприятным условиям жизнедеятельности населения • Минимизация затрат невозобновляемых топливно-энергетических ресурсов и воды • Экономичность строительства, соответствующая условиям и объемам финансирования	Обеспечение основных взаимосвязанных задач энергетической безопасности • Энергообеспечение, где главным является бесперебойность энергоснабжения при высоком качестве энергии и предоставляемых энергетических услугах • Энергодоступность по цене и энергоэффективности • Энергоприемлемость по влиянию на окружающую среду	Комплексы критериев • Санитарно-эпидемиологической безопасности • Экологичности • Энергоэффективности • Экономической эффективности

Основные цели, задачи и целевые индикаторы развития энергосистемы поселений [1]

Для стимулирования качества и эффективности решений, принимаемых при развитии территорий, в последнее время активно развиваются и применяются так называемые «зеленые» стандарты — международные и национальные системы оценки и сертификации решений в строительстве. В России также используются международные «зеленые» стандарты, разрабатываются и применяются национальные стандарты подобного типа [3], ориентированные на отечественный опыт и условия, основным из которых является ГОСТ Р 54964—2012.

Совершенствование технологий, используемых в энергетике, идет по двум основным направлениям: разработке инновационного оборудования и схем с его использованием для существенного повышения энергоэффективности звеньев ТЭК и энергосбережения у потребителя, а также замене распространенных топливных технологий альтернативными с повышением потребительских свойств традиционных видов топлива и вовлечением в энергобалансы новых, в том числе возобновляемых, источников энергии (ВИЭ) [4].

Существенно большие, по сравнению с другими странами, удельные расходы тепловой энергии на жизнеобеспечение населения нашей страны при общемировых тенденциях увеличения стоимости топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) и воды приводят к высоким темпам роста коммунальных расходов и, как следствие, к обострению из-за низких показателей качества обслуживания кризиса в ЖКХ. Согласно проведенным опросам [5], тепловой дискомфорт ощущает более трети населения России.

В малых населенных пунктах (МНП), суммарный фонд недвижимости которых составляет около одного миллиарда квадратных метров, в настоящее время проблемы улучшения условий жизнедеятельности и качественного энергоснабжения стоят особенно остро. Их энергоснабжение часто осуществляется по традиционным для городов схемам, а также с помощью морально и физически устаревших энергоустановок.

Характерными особенностями систем энергоснабжения МНП, как правило, являются *изолированность от централизованных систем* энерго- и ресурсоснабжения (прежде всего, ЕЭС и ЕСГ России), а также *преобладание децентрализованных и индивидуальных систем* энергоснабжения малой мощности. Это определяет повышенные требования к условиям поставок топлива и его качеству, где главным является возможность автоматизации энергоустановок. Так, согласно оптимизационным расчетам академика РАН А. Н. Мелентьева, чем меньше населенный пункт, тем более квалифицированные виды топлива следует использовать.

В этой связи, ориентируясь на качественное энергоснабжение МНП и учитывая отечественный и зарубежный опыт, основными направлениями развития энергосистем следует считать:

внедрение *гибридных энергокомплексов* — систем генерации на базе источников различного типа и систем аккумулирования энергии, находящихся под единым управлением. Помимо высоких показателей энергоэффективности, применение таких систем обеспечивает взаимное резервирование мощностей и уход от монотопливности;

более широкое *использование инновационных энергоустановок*, в том числе комбинированных (когенерационных и тригенерационных) и работающих на базе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии, а также вторичных энергоресурсов (ВЭР);

повышение уровня *автоматизации технологических процессов* с развитием систем удаленного доступа для мониторинга и управления режимами функционирования;

создание *энергоэффективных систем транспорта и потребления энергии*.

Последнее требует понимания того, что создание энергоэффективных систем потребления энергии позволяет существенно снизить капитальные и последующие эксплуатационные расходы на обслуживающую инфраструктуру. В этой связи следует ориентироваться на строительство зданий повышенных классов энергоэффективности — по технологиям зданий с низким и ультранизким энергопотреблением [6, 7] («пассивных», «зеленых», «активных» зданий и др.).

При этом распространенная в последнее время тенденция чрезмерного (сверхнормативного) утепления зданий должна быть заменена внедрением прогрессивных и инновационных инженерных решений, например вовлечением в энергобаланс ВЭР и ВИЭ, позволяющими при сопоставимых затратах получать существенно больший эффект.

Из условий только потребительских качеств для МНП определяется следующая приоритетность систем теплоснабжения по типу используемой на теплогенераторах энергии: электрические, на газовом топливе, далее — жидко- и твердотопливные.

Преимущество электроэнергии по удобству и простоте использования очевидно. И даже в районах с централизованными системами теплоснабжения любые «недотопы» компенсируются в первую очередь путем использования электрообогревателей. Так, по данным ВНИПИэнергопрома, из-за сложившихся условий в теплоснабжении похолодание в Европейской части России на 1 °С приводит к увеличению электропотребления на 0,6 %.

Вместе с тем, из-за низкого КПД электростанций (в пределах 33…38 %) использование электроэнергии в качестве основного ресурса для организации отопления является не самым эффективным и может рекомендоваться к рассмотрению в следующих случаях:

при расположении потребителей в зонах дешевой генерации электроэнергии (ГЭС, ГеоТЭС, ВЭУ и др. [8, 9]) при условии обеспечения в требуемых объемах стабильного электроснабжения с учетом категорийности потребителей;

для удаленных небольших населенных пунктов с проблемами устойчивого снабжения топливом, мелких объектов, временных сооружений и др.

При использовании электроотопления следует предусматривать строительство зданий повышенных классов энергоэффективности. Здесь дороговизна электроэнергии приводит к существенному сокращению сроков окупаемости энергосберегающих решений и к последующим относительно низким затратам на отопление.

Для повышения эффективности электроотопления можно рекомендовать следующие основные решения:

применение *систем управления мощностью*, что особенно легко и недорого реализуется для электроотопления с электрическими отопительными приборами без промежуточных контуров теплоносителя. Ручное, программное или дистанционное отключение и снижение мощности отдельных электроприборов, в том числе расположенных во временно неиспользуемых помещениях, позволяет сократить электропотребление на 20…40 %;

применение комфортного *лучистого отопления*, в том числе с организацией локального обогрева, для повышения радиационной составляющей результирующей температуры внутреннего воздуха. За счет использования панельных, инфракрасных, в том числе пленочных обогревателей электропотребление снижается на 5…15 %;

использование *электроприборов с теплоаккумуляторами и устройств, ограничивающих включение электроприборов в пиковую зону суток*. Разница в дифференцированных по зонам суток тарифов в ряде регионов России составляет более 500 %, что дает соответствующую экономию затрат на электроэнергию. Вместе с тем, электроаккумуляционные системы отопления требуют существенного увеличения установленной мощности;

применение электроприводных тепловых насосов (ТН), позволяющих, в отличие от традиционных систем, в которых 1 кВт·ч электроэнергии преобразуется в 860 ккал теплоты, из 1 кВт·ч электроэнергии получать более 2000…3000 ккал за счет дополнительного использования низкопотенциальной теплоты ВЭР и ВИЭ. Ввиду высоких стоимостей теплонасосных систем, в 2…3 раза превышающих затраты на традиционные решения, требуется обоснованный выбор мощности и эффективного коэффициента замещения тепловой нагрузки ТН. Для достижения максимального эффекта требуется создание низкотемпературных систем отопления с температурами теплоносителя 50…65 °С. Как правило, оптимальная доля замещения отопительной нагрузки находится в диапазоне 0,6…0,8 при мощности ТН, составляющей 40…60 % расчетной нагрузки [10].

Второй по потребительским качествам тепловой источник — теплогенераторы, использующие горючий газ. Технологичность, энергоэффективность

и экологичность газовых теплогенераторов, а также меньшие финансовые затраты определяют их приоритетность.

Повышение эффективности систем отопления в зоне наличия газового топлива помимо комплекса энергосбергающих решений у потребителей достигается внедрением следующих инновационных технологий:

индивидуальных газовых отопительных приборов. Использование газа по аналогии с электроэнергией позволяет создавать системы отопления без использования промежуточных теплоносителей. Стационарные или переносные газовые конвекторы, тепловые пушки и инфракрасные излучатели имеют КПД порядка 90 %, при этом отсутствие промежуточных контуров позволяет достигать такого же КПД для всей системы отопления в целом, в то время как, например, для гидравлических систем отопления общий КПД на 15…30 % ниже из-за потерь в теплообменном оборудовании, сетях и др. При этом существующий уровень систем газовой безопасности уже сейчас позволяет говорить о возможности массового внедрения таких решений при малоэтажном и, прежде всего, индивидуальном строительстве;

конденсационных котлов, которые в комбинации с низкотемпературными системами отопления имеют среднегодовой КПД до 108 % и КПД более 90…95 % — в системах отопления с общепринятым отопительным графиком 95/70 °С;

газовых тепловых насосов, КПД которых за счет вовлечения в энергобаланс низкопотенциальной теплоты достигает 175 % [11].

Выработка электроэнергии для потребителей при наличии газа производится газовыми электрогенераторами различного типа [4]. Кроме того, на рынке появились универсальные ТН Sanyo с газомоторным приводом, в составе которых имеются также электрогенераторы для обеспечения собственных нужд инженерных систем.

Повышение эффективности использования газа при наличии тепловой и электрической нагрузки обеспечивается:

созданием *когенерационных (тригенерационных) технологий* для совместной выработки электроэнергии и теплоты (холода). Промышленные образцы когенерационных установок электрической мощностью от 10…15 кВт и выше имеют расход топлива на 30…35 % ниже, чем при раздельной выработке. Использование абсорбционных холодильных машин позволяет эффективно утилизировать теплоту в теплый период года на нужды систем холодоснабжения (в системах кондиционирования воздуха, сельскохозяйственных и иных холодильниках);

применением *топливных элементов*. Инновационные технологии позволяют создавать комбинированные установки по выработке водорода из метана или с помощью электролиза воды, с применением электроэнергии, полученной от ВИЭ, с дальнейшим его использованием для получения электроэнергии и теплоты в топливных элементах [4, 12]. При этом эффективность получения электроэнергии в данном случае выше, чем традиционными способами. Подобного рода установки выпускаются промышленностью и находят все большее применение и в сфере ЖКХ.

В условиях роста количества средних и мелких месторождений газа, а также учитывая ограниченные технологические и экономические возможности сетевого газоснабжения, для удовлетворения растущего спроса на газовое

топливо развиваются и внедряются новые технологии по расширению источников и способов его поставок.

К инновационным следует отнести технологии [13, 14]:

автономного газоснабжения населенных пунктов сжиженным (СПГ) и компримированным (КПГ) природным газом, в перспективе — газогидратами;

нетрадиционных источников газового топлива — природных (газы метаноугольных месторождений, природные газогидраты, сланцевый газ и др.) и синтезированных (биогаз, газ конверсии твердого топлива и др.) горючих газов.

Ввиду переменного состава альтернативных газов существуют проблемы использования их в обычных энергетических установках. В настоящее время разработано различное инновационное энергетическое оборудование для использования рассматриваемых газов [15].

Электро- и теплоснабжение большинства удаленных МНП в настоящее время обеспечивается с использованием дизельного топлива. Схемные решения таких систем аналогичны автономным системам, использующим СУГ, СПГ и КПГ, но, вместе с тем, существенно уступают им по экологическим и стоимостным показателям.

Для развития энергосистем с дизельными энергоисточниками можно рекомендовать следующие решения:

строительство *зданий повышенных классов энергоэффективности* — по аналогии с системами, использующими электроэнергию;

перевод существующих дизельных энергоисточников в газодизельный режим или их замену на более экологичные на газе и альтернативных видах жидкого топлива;

дооснащение дизельных электростанций энергоустановками бинарного цикла, повышающими КПД на 8…15 % за счет утилизации теплоты ДЭС;

использование дизельных энергоисточников в качестве резервных либо пиковых в составе гибридных энергоустановок, в том числе с ВИЭ, например ветродизельных комплексов.

Для энергоснабжения отдельных потребителей на жидком топливе могут также рассматриваться теплогенераторы на отработанных маслах, индивидуальные жидкотопливные отопительные приборы, горелки с самотечными системами топливоподачи и др.

К альтернативным видам жидкого топлива относятся газовый конденсат, нефть малых месторождений, биодизель, биоэтанол и биометанол.

Характерной особенностью жидких топлив, которую следует учитывать при их выборе, является изменение физико-химических показателей в процессе хранения [16].

Для работы на альтернативных видах жидкого топлива разработаны и уже реализуются специализированные, в том числе отечественные, энергоустановки, например электростанция контейнерного исполнения «Звезда-МТ-1650ВК-05М3» на базе газонефтяных электроагрегатов 7ГДГ-Н и 8ГДГ-Н.

Актуальным для МНП является вопрос повышения эффективности использования твердого топлива. Основными проблемами здесь являются низкий КПД котлов малой мощности и сложность автоматизации технологических процессов.

Эти проблемы решаются по следующим основным направлениям:

создание *гибридных систем*, в которых теплоснабжение обеспечивается от совместно работающих теплогенераторов на различных видах топлива с промежуточным аккумулированием теплоты;

использованием *теплогенераторов с повышенной продолжительностью горения топлива* по сравнению с традиционными твердотопливными котлами — пиролизных котлов и теплогенераторов с массивными загрузками топлива и регулируемыми процессами дымоудаления и воздухоподачи;

внедрение *теплогенераторов на низкосортных твердых топливах* с применением технологии низко- и высокотемпературного кипящего слоя [17];

облагораживание твердого топлива с получением конечного продукта с высокими потребительскими свойствами — гранулированного и брикетированного твердого топлива, а также синтез-газа [18].

Выводы.

1. Обеспечение устойчивого развития МНП требует комплексного подхода с консолидацией знаний и опыта всех специалистов, участвующих в формировании их жизненного цикла, — архитекторов, инженеров, экологов и гигиенистов. В этом случае инфраструктура МНП рассматривается как единая энергосистема и обеспечивается благоприятное взаимодействие с другими системами, основными объектами которых являются экосистема и человек.

2. В условиях роста цен на традиционное топливо, а также из-за ограниченных технологических и экономических возможностей сетевого энерго- и топливоснабжения становятся актуальными разработка и внедрение альтернативных инновационных технологий во всех звеньях ТЭК и у потребителя.

3. Высокая наукоемкость инновационных решений, их разнообразие для энергоснабжения МНП требует разработки нормативно-методических документов по рассматриваемой тематике как одной из приоритетных.

4. Объективные требования обеспечения МНП более квалифицированными видами топлива определяют необходимость коренной реконструкции их систем энергоснабжения, способствующей повышению качества энергоснабжения и снижению затрат населения на нужды отопления.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК:

1. Малоэтажное строительство. Тренды качественного энергоснабжения / В. К. Аверьянов, В. Н. Толмачев, М. А. Журавский, А. А. Мележик // Вестник отделения строительных наук. Вып. 16. В 2 т. Т. 2. М. : РААСН, 2012. С. 191—208.

2. Энергетические стратегии субъектов РФ — эффективный механизм комплексного развития региональных систем энергоснабжения / А. М. Карасевич, А. В. Федяев, Г. Г. Лачков, Е. В. Сеннова, Ю. А. Охорзин // Газовая промышленность. 2009. № 10 (637). С. 40—44.

3. Рейтинговая система комплексной оценки энергоэффективности, экологической и санитарно-эпидемиологической безопасности зданий / В. К. Аверьянов, А. П. Кончев, А. Г. Михайлов, А. И. Тютюнников, А. А. Мележик // Вестник отделения строительных наук. Вып. 15. Москва — Орел — Курск, 2011. С. 287—296.

4. *Аверьянов В. К.*, *Карасевич А. М.*, *Федяев А. В.* Системы малой энергетики: современное состояние и перспективы развития. Т. 1 и 2. М., 2008. 960 с.

5. *Некрасов А. С.*, *Воронина С. А.*, *Семикашев В. В.* Проблемы обеспечения населения России теплом // Вести в электроэнергетике. 2012. № 3. С. 30—37.

6. Энергоэффективные здания. Анализ современного состояния и перспектив развития на основе реализованных проектов. Опыт немецких специалистов / Ehhorn H. и др. // АВОК. 2006. № 2. С. 36—47.

7. *Табунщиков Ю. А.*, *Бродач М. М.*, *Шилкин Н. В.* Энергоэффективные здания. М. : АВОК-ПРЕСС, 2003. 200 с.

8. Эффективность энергоснабжения населенных пунктов при использовании возобновляемых источников энергии / В. К. Аверьянов, В. Н. Толмачев, В. А. Карасевич, А. А. Челазнов, М. А. Журавский // Экономическое возрождение России. 2012. № 1 (31). С. 57—71.

9. Возобновляемые источники энергии в обеспечении эффективного энергоснабжения потребителей / В. К. Аверьянов, В. Н. Толмачев, Ю. В. Юферев, М. А. Журавский // Исследования и инновационные разработки РААСН : сб. ст. к общ. собр. РААСН. В 2 т. Т. 2 / РААСН, Иван. гос. архит.-строит. ун-т. Иваново, 2010. С. 8—19.

10. *Тютюнников А. И.* Направления использования тепловых насосов в системах теплоснабжения // Газинформ. 2010. № 2 (29). С. 46—50.

11. *Шчепанович С.* Уникальные решения для охлаждения и обогрева с использованием высокоэффективных газовых абсорбционных агрегатов // Газинформ. 2012. № 3. С. 42—45.

12. *Козлов С. И., Фатеев Н. В.* Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы / под ред. Е. П. Велихова. М. : Газпром ВНИИГАЗ, 2009. 520 с.

13. *Карасевич А. М., Ярыгин Ю. Н., Дроздов Ю. В.* Расширение источников поставок газа при газификации регионов России // Газовая промышленность : спецвыпуск «Газификация и газораспределение». 2009. № 640. С. 23—25.

14. *Якушев В. С.* О конкурентоспособности нетрадиционных источников углеводородов на региональных рынках // Газовая промышленность : спецвыпуск «Нетрадиционные ресурсы нефти и газа» 2012. № 676. С. 16—22.

15. *Пайков К. А., Левкович А. В.* Электростанции «НГ-Энерго»: проектные решения на попутном нефтяном газе // Газинформ. 2009. № 1/24. С. 48—50.

16. Исследование стабильности биодизельного топлива при хранении / В. Г. Систер, С. А. Нагорнов, С. В. Романцова, С. В. Бодягина // Проблемы энергетики. 2012. № 1—2.

17. *Юферев Ю. В., Юферев А. Ю.* Вовлечение низкосортных углей и местных видов топлива в энергобаланс регионов России из условий их энергетической безопасности // Газинформ, 2011. № 3/34. С. 52—55.

18. *Кейко А. В.* Системная оценка технологии термохимической конверсии низкосортного твердого топлива : автореф. дис… д-ра техн. наук. Иркутск, 2012. 33 с.

1. Maloetazhnoe stroitel'stvo. Trendy kachestvennogo energosnabzheniya / V. K. Aver'yanov, V. N. Tolmachev, M. A. Zhuravskiy, A. A. Melezhik // Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk. Vyp. 16. V 2 t. T. 2. M. : RAASN. 2012. C. 191—208.

2. Energeticheskie strategii sub"ektov RF — effektivnyy mekhanizm kompleksnogo razvitiya regional'nykh sistem energosnabzheniya / A. M. Karasevich, A. V. Fedyaev, G. G. Lachkov, E. V. Sennova, Yu. A. Okhorzin // Gazovaya promyshlennost'. 2009. № 10 (637). S. 40—44.

3. Reytingovaya sistema kompleksnoy otsenki energoeffektivnosti, ekologicheskoy i sanitarno-epidemiologicheskoy bezopasnosti zdaniy / V. K. Aver'yanov, A. P. Konchev, A. G. Mikhaylov, A. I. Tyutyunnikov, A. A. Melezhik // Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk. Vyp. 15 / RAASN. Moskva - Orel – Kursk, 2011. C. 287—296.

4. *Aver'yanov V. K., Karasevich A. M., Fedyaev A. V.* Sistemy maloy energetiki: sovremennoe sostoyanie i perspektivy razvitiya. T. 1 i 2. M., 2008. 960 s.

5. *Nekrasov A. S., Voronina S. A., Semikashev V. V.* Problemy obespecheniya naseleniya Rossii teplom // Vesti v elektroenergetike. 2012. № 3. C. 30—37.

6. Energoeffektivnye zdaniya. Analiz sovremennogo sostoyaniya i perspektiv razvitiya na osnove realizovannykh proektov. Opyt nemetskikh spetsialistov / Ehhorn H. i dr. // AVOK. 2006. № 2. S. 36—47.

7. *Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M., Shilkin N. V.* Energoeffektivnye zdaniya. M. : AVOK-PRESS, 2003. 200 s.

8. Effektivnost' energosnabzheniya naselennykh punktov pri ispol'zovanii vozobnovlyaemykh istochnikov energii / V. K. Aver'yanov, V. N. Tolmachev, V. A. Karasevich, A. A. Chelaznov, M. A. Zhuravskiy // Ekonomicheskoe vozrozhdenie Rossii. 2012. № 1 (31). S. 57—71.

9. Vozobnovlyaemye istochniki energii v obespechenii effektivnogo energosnabzheniya potrebiteley / V. K. Aver'yanov, V. N. Tolmachev, Yu. V. Yuferev, M. A. Zhuravskiy // Issledovaniya i innovatsionnye razrabotki RAASN : sb. st. k obshch. sobr. RAASN. V 2 t. T. 2 / RAASN, Ivan. gos. arkhit.-stroit. un-t. Ivanovo, 2010. S. 8—19.

10. *Tyutyunnikov A. I.* Napravleniya ispol'zovaniya teplovykh nasosov v sistemakh teplosnabzheniya // Gazinform. 2010. № 2 (29). S. 46—50.

11. *Shchepanovich S.* Unikal'nye resheniya dlya okhlazhdeniya i obogreva s ispol'zovaniem vysokoeffektivnykh gazovykh absorbtsionnykh agregatov // Gazinform. 2012. № 3. S. 42—45.

12. *Kozlov S. I.*, *Fateev N. V.* Vodorodnaya energetika: sovremennoe sostoyanie, problemy, perspektivy / pod red. E. P. Velikhova. M. : Gazprom VNIIGAZ, 2009. 520 s.

13. *Karasevich A. M.*, *Yarygin Yu. N.*, *Drozdov Yu. V.* Rasshirenie istochnikov postavok gaza pri gazifikatsii regionov Rossii // Gazovaya promyshlennost' : spetsvypusk «Gazifikatsiya i gazoraspredelenie». 2009. № 640. S. 23—25.

14. *Yakushev V. S.* O konkurentosposobnosti netraditsionnykh istochnikov uglevodorodov na regional'nykh rynkakh // Gazovaya promyshlennost' : spetsvypusk «Netraditsionnye resursy nefti i gaza» 2012. № 676. S. 16—22.

15. *Paykov K. A.*, *Levkovich A. V.* Elektrostantsii «NG-Energo»: proektnye resheniya na poputnom neftyanom gaze // Gazinform. 2009. № 1/24. S. 48—50.

16. Issledovanie stabil'nosti biodizel'nogo topliva pri khranenii / V. G. Sister, S. A. Nagornov, S. V. Romantsova, S. V. Bodyagina // Problemy energetiki. 2012. № 1—2.

17. *Yuferev Yu. V.*, *Yuferev A.* Yu. Vovlechenie nizkosortnykh ugley i mestnykh vidov topliva v energobalans regionov Rossii iz usloviy ikh energeticheskoy bezopasnosti // Gazinform. 2011. № 3/34. S. 52—55.

18. *Keyko A. V.* Sistemnaya otsenka tekhnologii termokhimicheskoy konversii nizkosortnogo tverdogo topliva : avtoref. dis… d-ra tekhn. nauk. Irkutsk, 2012. 33 s.

© Аверьянов В. К., Толмачев В. Н., Тютюнников А. И., Михайлов А. Г., Журавский М. А., Мележик А. А., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Энергоснабжение малых населенных пунктов. Направления устойчивого развития / В. К. Аверьянов, В. Н. Толмачев, А. И. Тютюнников, А. Г. Михайлов, М. А. Журавский, А. А. Мележик // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 459—467.

УДК 534.83:621.43.065

В. Г. Гагарин, В. В. Козлов

О НОРМИРОВАНИИ ТЕПЛОЗАЩИТЫ И ТРЕБОВАНИЯХ РАСХОДА ЭНЕРГИИ НА ОТОПЛЕНИЕ И ВЕНТИЛЯЦИЮ В ПРОЕКТЕ АКТУАЛИЗИРОВАННОЙ РЕДАКЦИИ СНиП «ТЕПЛОВАЯ ЗАЩИТА ЗДАНИЙ»

Отмечены принципы, положенные в основу при актуализации СНиП «Тепловая защита зданий». Приведены поэлементные требования к теплозащите ограждающих конструкций. При этом приведен краткий анализ требований к теплозащите ограждающих конструкций в зарубежных странах. Приведено обоснование необходимости нормирования удельной теплозащитной характеристики здания и приведены требования к ней при нормировании. Указаны требования к нормированию удельного расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: тепловая защита зданий, приведенное сопротивление теплопередаче ограждений, удельное потребление энергии.

The authors mark principles on which actualization of SNiP «Thermal protection of buildings» is based. Elementwise requirements to thermal protection envelopments are provided. Brief analysis of heat-shielding requirements of protecting designs in foreign countries is given. The substantiation of necessity of rationing of the specific heat-shielding characteristic of a building is stated as well as the requirements led to it at rationing. Requirements to rationing of the specific expense of thermal energy for heating and ventilation of buildings are specified.

K e y w o r d s: thermal protection of the buildings, reduced total thermal resistance to the heat transfer of envelopments, specific consumption of energy.

Введение. Основной нормативный документ по строительной теплофизике утвержден Министерством регионального развития и должен вступить в действие с 1 июля 2013 г. Это «Свод правил СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02—2003».

Актуализация СНиП 23-02 «Тепловая защита зданий» выполнялась коллективом НИИСФ РААСН с привлечением специалистов из МГСУ, ОАО «КТБ ЖБ», ЦНИИЭП жилища, на основе редакции этого документа 2003 г. [1]. При проведении актуализации СНиП необходимо было решить несколько задач, главные из которых заключаются в следующем:

сохранить основные понятия и, по-возможности, требования редакции СНиП 23-02—2003;

повысить энергоэффективность проектируемых зданий за счет неиспользованных резервов;

провести гармонизацию СНиП с зарубежными нормами;

включить в СНиП наиболее необходимые методики расчета нормируемых теплофизических показателей;

устранить выявленные недостатки СНиП 23-02—2003;

обеспечить возможность использования СНиП для проектирования новых ограждающих конструкций с повышенными теплозащитными свойствами;

заложить основы для дальнейшего развития нормирования теплофизических свойств ограждающих конструкций.

Основное внимание специалистов, а также производителей и продавцов теплоизоляционных материалов при обсуждении актуализированной редакции СНиП было обращено на нормирование теплозащиты и расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий. Краткому изложению этих вопросов и обоснованию принятых решений посвящена данная статья.

В актуализированной редакции СНиП нормирование теплозащиты зданий и расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий осуществляется тремя видами требований: поэлементные требования к теплозащите ограждающих конструкций, требования к теплозащите оболочки здания (к совокупности всех наружных ограждающих конструкций) и требования к расходу тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания.

Поэлементные требования к ограждающим конструкциям. Прежде всего, следует отметить, что подход к повышению энергоэффективности зданий исключительно за счет повышения требуемого сопротивления теплопередачи стен является тупиковым и экономически необоснованным. Ссылки на зарубежный опыт в данном вопросе несостоятельны, поскольку в зарубежных нормах нормируются коэффициенты теплопередачи только по глади конструкции (т. н. значения *U*), т. е. без учета теплопроводных включений. Этим и объясняются те низкие значения *U*, которые там представлены (чем ниже значение *U*, тем более утепленной является конструкция). Теплопроводные включения в зарубежных нормах нормируются отдельно и в большинстве случаев не полно. В большинстве случаев учет влияния теплопроводных включений при проектировании ограждающих конструкций неудовлетворителен. Так, в обзоре [2] отмечено, что соответствующие расчеты не проверяются в Норвегии, Финляндии, Бельгии, Нидерландах, Германии, Франции и других странах. В ряде стран отсутствуют требования к часто встречающимся в ограждающих конструкциях теплотехническим неоднородностям или вообще отсутствуют соответствующие методы оценки их влияния. Например, в нормах Дании [3] указаны требования только к трем видам теплотехнических неоднородностей из десятка возможных. В Польше, Греции и некоторых других странах вообще отсутствуют методы оценки влияния теплотехнических неоднородностей, а в расчетах они просто не учитываются. Эти обстоятельства приводят к повышенному расходу теплоизоляционных материалов, который, однако, не приводит к адекватному повышению реальных теплозащитных свойств ограждающих конструкций. Кроме того, в Европе не учитывается эксплуатационная влажность теплоизоляционных материалов, что приводит к занижению на 20…25 % расчетных значений коэффициентов теплопроводности теплоизоляционных материалов и к неоправданному занижению расчетных значений *U* проектируемых в Европе ограждающих конструкций по сравнению с проектируемыми по российским нормам. В России же нормируется приведенное сопротивление теплопередаче, отражающее влияние всех теплопроводных включений, а расчетная теплопроводность строительных материалов принимается с учетом их эксплуатационной влажности. К тому же следует отметить, что отсутствуют единые европейские нормы, наиболее развитой системой нормирования теплозащиты зданий среди зарубежных стран обладает Германия, но и в немецких нормах отсутствуют разделы, давно вошедшие в отечественные СНиП. Поэтому при актуализации поэлементных требований к теплозащите ограждающих конструкций учитывался отечественный опыт.

При нормировании приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций в актуализированном СНиП принято традиционное требование:

$$R_{\text{о}}^{\text{пр}} \geq R_{\text{о}}^{\text{норм}}, \text{ где } R_{\text{о}}^{\text{норм}} = R_{\text{о}}^{\text{тр}} m_{\text{р}}, \qquad (1)$$

здесь $R_{\text{о}}^{\text{норм}}$ — нормируемое значение сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, м^2·°С/Вт; $R_{\text{о}}^{\text{тр}}$ — базовое значение требуемого сопротивления теплопередаче ограждающей конструкции, м^2·°С/Вт, принимаемое в зависимости от градусо-суток отопительного периода по таблице, аналогичной табл. 4 из действующего СНиП [1]; $m_{\text{р}}$ — коэффициент, учитывающий особенности региона строительства, принимаемый для стен не менее $m_{\text{р}} = 0{,}63$, для светопрозрачных конструкций не менее $m_{\text{р}} = 0{,}95$, для остальных ограждающих конструкций не менее $m_{\text{р}} = 0{,}80$. Повышение коэффициента $m_{\text{р}}$ для конкретного региона должно быть обосновано экономическим расчетом.

Формально нормирование по формулам (1) с приведенными значениями $m_{\text{р}}$ не отличается от принятого СНиП [1]. Реальное ужесточение поэлементных требований в актуализированной редакции СНиП заключается в том, что в качестве обязательного приложения представлен значительно модернизированный метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций. Дело в том, что метод расчета приведенного сопротивления теплопередаче, представленный в СП 23-101—2004 «Проектирование тепловой защиты зданий», является, по существу, полуэмпирическим и зачастую дает завышенные результаты вследствие неполного учета всех теплопроводных включений, имеющихся в современных ограждающих конструкциях. Теоретическое обоснование модернизированного метода расчета (давно применяемого в НИИСФ) приведено в [4]. Также этот метод расчета гармонизирован с методами, применяемыми в ФРГ, что позволяет проверять данные об удельных потерях теплоты через линейные теплопроводные включения, имеющиеся в [5].

К поэлементным требованиям в актуализированной редакции СНиП относятся также санитарно-гигиенические требования невыпадения конденсата на внутренней поверхности ограждающих конструкций в местах расположения теплопроводных включений и ограничения температуры на поверхностях заполнения светопроемов.

Требование к оболочке здания. Обоснование нормирования теплозащиты оболочки здания выполнено в [6]. Потери теплоты через оболочку здания описываются при небольшом упрощении формулой

$$Q = \left(\sum \frac{A_i}{R_{\text{о},i}^{\text{пр}}} \right) \text{ГСОП} \cdot 24/1000. \qquad (2)$$

Преобразование уравнения (2) дает:

$$Q = 0{,}024\ \text{ГСОП}\ V_{\text{от}}\ K_{\text{комп}}\ K_{\text{общ}} = 0{,}024\ \text{ГСОП}\ V_{\text{от}}\ k_{\text{об}}, \qquad (3)$$

здесь

$$k_{\text{об}} = K_{\text{комп}}\ K_{\text{общ}}, \qquad (4)$$

где $K_{\text{комп}} = \dfrac{A_{\text{н}}^{\text{сум}}}{\text{V}_{\text{от}}}$, $K_{\text{общ}} = \left(\sum \dfrac{A_i}{R_{\text{о},i}^{\text{пр}}} \right) \Big/ A_{\text{н}}^{\text{сум}}$, (5)

где Q — потери теплоты через оболочку здания за отопительный период, кВт·ч/год; A_i — площади наружных ограждений, м^2; $R_{o,i}^{пр}$ — приведенные сопротивления теплопередаче соответствующих наружных ограждений, м^2·°С/Вт; ГСОП — градусо-сутки отопительного периода, °С·сут./год; $V_{от}$ — отапливаемый объем здания, ограниченный рассматриваемой совокупностью ограждающих конструкций, м^3; $A_н^{сум}$ — суммарная площадь всех наружных ограждающих конструкций, м^2.

Величина $k_{об}$, определяемая уравнением (4), — удельная характеристика, которую предложено называть «теплозащитной», Вт/(м^3·°С). Физический смысл этого параметра заключается в том, что он численно равен количеству тепловой энергии, теряемой одним м^3 отапливаемого объема здания в единицу времени (в секунду) посредством теплопередачи через оболочку здания при перепаде температуры воздуха в 1 °С. Если умножить удельную теплозащитную характеристику на ГСОП и на размерный коэффициент 0,024, то получится количество тепловой энергии, кВт·ч, которое теряется через оболочку здания одним м^3 отапливаемого объема за отопительный период, т. е. «удельный расход энергии на отопление здания», обусловленный теплопотерями через оболочку здания, отнесенный к одному м^3. Если это количество умножить на высоту этажа h, то получится «удельный расход тепловой энергии на отопление здания», обусловленный теплопотерями через оболочку здания, измеряемый в кВт·ч/(м^2·год). Эти значения удельного расхода энергии можно использовать в последующих сравнениях. Однако для нормирования удельного расхода энергии через оболочку здания следует использовать удельную теплозащитную характеристику, поскольку она не зависит от климатических параметров.

Удельную теплозащитную характеристику здания (под другим названием) было предложено использовать для нормирования теплопотерь через оболочку здания еще в 30-х гг. XX в. [7]. Можно отметить, что попытки нормировать общий коэффициент теплопередачи оболочки здания $K_{общ}$ (например, в МГСН 2.01-99) или коэффициент компактности здания $K_{комп}$ (рекомендации п. 5.14 в [1]) нельзя признать состоятельными, поскольку они не полностью характеризуют теплозащитные свойства оболочки здания, в отличие от удельной теплозащитной характеристики здания $k_{об}$.

Нормирование удельной теплозащитной характеристики здания в актуализированной редакции СНиП осуществляется путем сравнения: расчетная величина должна быть не больше нормируемой (требуемой): $k_{об} \le k_{об}^{тр}$. Предложенные значения требуемой удельной теплозащитной характеристики рассчитываются по формуле:

$$k_{об}^{тр} = \begin{cases} \dfrac{4{,}74}{0{,}00013\,ГСОП + 0{,}61}\,\dfrac{1}{\sqrt[3]{V_{от}}} & V_{от} \le 960, \\ \dfrac{0{,}16 + \dfrac{10}{\sqrt{V_{от}}}}{0{,}00013\,ГСОП + 0{,}61} & V_{от} > 960. \end{cases} \qquad (6)$$

Если здание имеет форму, близкую к эталонной, и сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций здания близки к нормируемым значениям, то его теплозащитная характеристика не превысит требуемое значение, определенное по формуле (6). Если же здание будет иметь более сложную форму, например развитую поверхность стен, то его теплозащитная характеристика может превосходить требуемое значение. Тогда для удовлетворения рассматриваемого требования необходимо будет увеличить сопротивления теплопередаче отдельных ограждающих конструкций здания.

Требование к расходу тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания. В актуализированной редакции СНиП выполнено совершенствование расчета показателя энергоэффективности здания, при этом сохранена сама методика расчета. Анализ методики расчета «удельного расхода тепловой энергии на отопление здания», используемой в СНиП 23-02—2003, показал, что расчетная величина $q_{от}^{р}$ фактически может измеряться в Вт/(м3·°С) и представляется в виде:

$$q_{от}^{р} = \left[k_{об} + k_{вент} - \left(k_{быт} + k_{рад} \right) \nu \zeta \right] (1 - \xi) \beta_h, \qquad (7)$$

где $k_{об}$ — удельная теплозащитная характеристика здания, Вт/(м^3·°С), определяемая по формуле (4); $k_{вент}$ — удельная вентиляционная характеристика здания, Вт/(м^3·°С); $k_{быт}$ — удельная характеристика бытовых тепловыделений в здании, Вт/(м^3·°С); $k_{рад}$ — удельная характеристика теплопоступлений в здание от солнечной радиации, Вт/(м^3·°С); β_h, ν, ζ — коэффициенты, определенные в прил. Г СНиП 23-02—2003, которые характеризуют систему отопления и не связаны со свойствами ограждающих конструкций; ξ — коэффициент, учитывающий снижение теплопотребления жилых зданий при наличии поквартирного учета тепловой энергии на отопление, принимается до получения статистических данных фактического снижения ξ =0,1.

Расчетные формулы для $k_{вент}$, $k_{быт}$ и $k_{рад}$ выводятся из формул методики расчета в приложении Г СНиП 23-02—2003 [1] (вследствие ограниченного объема в статье не приводятся).

Параметр $q_{от}$ назван в актуализированной редакции СНиП «удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания». Требование к значению параметра $q_{от}$ здания выглядят традиционно: расчетное значение должно быть не больше нормируемой величины: $q_{от}^{р} \le q_{от}^{тр}$.

Таблица нормируемых значений удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания (табл.) получена умножением на 0,0116 соответствующих значений табл. 9 из [1]. Пересчет осуществлялся исходя из следующего соотношения единиц измерения: $\text{кДж/(м}^3 \cdot \text{°С} \cdot \text{сут)} = \frac{1000}{24 \cdot 3600} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^3 \cdot \text{°С}} = 0{,}0116 \text{ Вт/(м}^3 \cdot \text{°С)}$.

По рассчитанному по (7) значению удельной характеристики расхода тепловой энергии вычисляется удельный расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию по формулам:

$$q = 0{,}024 \text{ ГСОП } q_{от}^{р}, \text{ кВт ч/(м}^3\text{·год)}; \qquad (8)$$

$$q = 0{,}024\ \text{ГСОП}\ q_{\text{от}}^{\text{р}}\ h\ ,\ \text{кВт ч/(м}^2\cdot\text{год)}. \qquad (9)$$

Нормируемая (базовая) удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий за отопительный период $q_{\text{от}}^{\text{тр}}$ зданий, Вт/(м³·°С)

Тип здания	Этажность здания							
	1	2	3	4, 5	6, 7	8, 9	10, 11	12 и выше
1. Жилые многоквартирные, гостиницы, общежития	0,455	0,414	0,372	0,359	0,336	0,319	0,301	0,290
2. Общественные, кроме перечисленных в столбцах 3—6 таблицы	0,487	0,440	0,417	0,371	0,359	0,342	0,324	0,311
3. Поликлиники и лечебные учреждения, дома-интернаты	0,394	0,382	0,371	0,359	0,348	0,336	0,324	—
4. Дошкольные учреждения, хосписы	0,521	0,521	0,521	—	—	—	—	—
5. Сервисного обслуживания, культурно-досуговой деятельности, технопарки, склады	0,266	0,255	0,243	0,232	0,232	—		
6. Административного назначения (офисы)	0,417	0,394	0,382	0,313	0,278	0,255	0,232	0,232

Расход тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания зависит от климатических характеристик региона строительства (ГСОП), в отличие от удельной характеристики. Подробнее данная методика описана в [8].

Формула (7) показывает, что удельная характеристика расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию здания является линейной комбинацией четырех удельных характеристик здания. При этом используется четыре коэффициента, значения которых назначены с неизвестной погрешностью и из соображений, практически не связанных с ограждающими конструкциями. Кроме этого, три из четырех удельных характеристик в правой части (4) существенно зависят от особенностей эксплуатации здания и не могут быть адекватно рассчитаны на стадии проектирования. На этом фоне удельная теплозащитная характеристика здания может быть достаточно точно спрогнозирована на стадии проектирования, поскольку в расчет этой характеристики не входят климатические показатели, особенности поведения жильцов дома, надежность работы системы отопления и т. д. Это обстоятельство явилось предпосылкой для ее отдельного нормирования, что и было реализовано в актуализированной редакции СНиП, как описано выше.

Заключение. В описанной системе нормирования теплозащиты и удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий в актуализированном СНиП «Тепловая защита зданий» повышение требований к энергетической эффективности зданий осуществляется за счет:

нормирования метода расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций;

нормирования удельной теплозащитной характеристики здания.

Эти мероприятия позволят задействовать резервы повышения теплозащиты зданий в основном за счет:

проектирования конструкций с пониженным влиянием теплотехнических неоднородностей;

проектирования зданий с оптимальными архитектурно-планировочными решениями.

В то же время они не вызовут существенного удорожания стоимости строительства.

Методика расчета удельной характеристики расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию зданий по своему содержанию практически соответствует методике в СНиП 23-02—2003 (с небольшими изменениями, в частности, ликвидирована ошибка определения площади), но по форме видоизменена с целью удобства использования ее в практических расчетах и анализах расхода тепловой энергии.

Система нормирования обладает потенциалом для развития. Наиболее важным при этом представляется переход зависимости от этажности при нормировании показателя энергетической эффективности к зависимости от объема здания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 23-02—2003. Тепловая защита зданий.

2. *Citterio M., Cocco M., Erhorn-Kluttig H.* Thermal bridges in the EBPD context: overview on MS approaches in regulations // EBPD Buildings Platform. P64, 28-4-2008.

3. Bygningsreglementet 2010. URL : http://www.ebst.dk/bygningsreglementet.dk/forside/0/2 / (дата обращения: 06.01.2013).

4. *Гагарин В. Г., Козлов В. В.* Теоретические предпосылки расчета приведенного сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций // Строительные материалы. 2010. № 12. С. 4—12.

5. DIN 4108 Beiblatt 2. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden-Wärmebrücken-Planungs- und Ausführungsbeispiele.

6. *Гагарин В. Г., Козлов В. В.* О комплексном показателе тепловой защиты оболочки здания // Журнал АВОК. 2010. № 4. С. 52—60.

7. Нормы определения теплопотерь через ограждения зданий и расчетных температур. ОСТ 90008-39 / Комитет по делам строительства при СНК Союза ССР. М. — Л., 1939.

8. *Гагарин В. Г., Козлов В. В.* Требования к теплозащите и энергетической эффективности в проекте актуализированного СНиП «Тепловая защита зданий» // Жилищное строительство. 2011. № 8. С. 2—6.

1. SNiP 23-02—2003. Teplovaya zashchita zdaniy.

2. *Citterio M., Cocco M., Erhorn-Kluttig H.* Thermal bridges in the EBPD context: overview on MS approaches in regulations // EBPD Buildings Platform. P64, 28-4-2008.

3. Bygningsreglementet 2010. URL : http://www.ebst.dk/bygningsreglementet.dk/forside/0/2 / (data obrashcheniya: 06.01.2013).

4. *Gagarin V. G., Kozlov V. V.* Teoreticheskie predposylki rascheta privedennogo soprotivleniya teploperedache ograzhdayushchikh konstruktsiy // Stroitel'nye materialy. 2010. № 12. S. 4—12.

5. DIN 4108 Beiblatt 2. Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden-Wärmebrücken-Planungs- und Ausführungsbeispiele.

6. *Gagarin V. G., Kozlov V. V.* O kompleksnom pokazatele teplovoy zashchity obolochki zdaniya // Zhurnal AVOK. 2010. № 4. S. 52—60.

7. Normy opredeleniya teplopoter' cherez ograzhdeniya zdaniy i raschetnykh temperatur. OST 90008-39 / Komitet po delam stroitel'stva pri SNK Soyuza SSR. M. — L., 1939.

8. *Gagarin V. G., Kozlov V. V.* Trebovaniya k teplozashchite i energeticheskoy effektivnosti v proekte aktualizirovannogo SNiP «Teplovaya zashchita zdaniy» // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2011. № 8. S. 2—6.

© Гагарин В. Г., Козлов В. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Гагарин В. Г., Козлов В. В. О нормировании теплозащиты и требованиях расхода энергии на отопление и вентиляцию в проекте актуализированной редакции СНиП «Тепловая защита зданий» // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 468—474.

УДК 332.834

В. А. Езерский, П. В. Монастырев, Р. Ю. Клычников

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ОПТИМИЗАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОМОДЕРНИЗАЦИИ ЖИЛЫХ ЗДАНИЙ В МАСШТАБЕ ГОРОДА

Рассмотрены методологические аспекты разработки имитационной модели оптимизации параметров термомодернизации жилых зданий в масштабе города.

К л ю ч е в ы е с л о в а: программная симуляция, оптимизация, термомодернизация зданий, экономическая эффективность, тепловая защита.

The article deals with methodological aspects of the development of simulation model of optimization of thermal modernization parameters of residential buildings in cities.

K e y w o r d s: program simulation, optimization, thermal modernization of buildings, economical efficiency, thermal protection.

Введение. Наиболее трудной задачей при реализации политики повышения энергетической эффективности существующих жилых зданий, заложенной в ФЗ № 261 «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» от 23.11.2009 г., является поиск источников финансирования теплозащитных мероприятий. Разрабатываемые и утверждаемые муниципальные и региональные целевые программы энергосбережения и повышения энергетической эффективности отводят ведущее место малозатратным и поверхностным по своей сути мероприятиям, которые способны устранить проблемы неграмотной эксплуатации, но не реально повысить энергетическую эффективность.

Проведенные исследования [1, 2, 3] четко свидетельствуют о необходимости комплексного подхода к реализации теплозащитных работ, затрагивающего все элементы зданий. Только таким путем можно достичь реального энергосберегающего эффекта. Однако эти же исследования показывают высокую затратность работ по термомодернизации зданий, что серьезно снижает перспективность развития энергосервисных отношений в этой сфере, особенно когда речь заходит о желаемых и требуемых объемах, на которые делаются основные ставки в упомянутых целевых программах.

В связи с этим, учитывая большую ресурсоемкость сферы ЖКХ, в виде отдельной подпрограммы необходима разработка стратегии термомодернизации жилищного фонда, устанавливающей оптимальную последовательность термомодернизации зданий в выбранном градостроительном образовании. В данной работе представлены концептуальные положения построения такой стратегии на основе имитационной модели оптимизации параметров термомодернизации и оптимальной последовательности ее реализации в масштабе города.

Постановка задачи оптимизации параметров термомодернизации. При разработке программы термомодернизации в условиях дефицита инвестиций приоритеты необходимо отдавать наиболее оправданным и эффективным мероприятиям, для чего требуется последовательно решить локальную (первого рода) и глобальную (второго рода) задачи ее оптимизации.

Стадии непосредственного решения двух обозначенных задач должен предшествовать системный анализ опорного жилищного фонда, подлежащего термомодернизации, в ходе которого вся масса зданий разделяется на характерные типы и оценивается перспективность модернизации их тепловой защиты. Принципы оценки безубыточности термомодернизации существующих зданий подробно рассмотрены в [4].

Внутри каждого выделяемого типа зданий конструктивные различия наружных ограждающих конструкций либо незначительны, либо несущественно отличаются по своим фактическим теплотехническим свойствам. Дальнейшее разделение производится по геометрическим показателям, поскольку компоновка зданий одного типа из различного числа секций может существенно повлиять на результаты оптимизации первого рода.

В самом общем случае подлежащий термомодернизации опорный жилищный фонд рассматриваемого градостроительного образования разделяется на i различных зданий. Однако учитывая, что существующие жилые здания, не отвечающие современным требованиям по энергосбережению, построены в советское время, можно и целесообразно производить первичное разделение их по типовым сериям.

Локальную задачу оптимизации можно сформулировать как поиск наиболее эффективного с экономической точки зрения сочетания параметров тепловой защиты того или иного отдельного здания, обеспечивающих при этом уровень теплопотребления не выше требуемого. Производить оптимизацию первого рода удобнее с помощью численных методов анализа математических моделей. Подробно данная методика рассмотрена авторами в [5] и с учетом корректировки экономических расчетов, согласно [6], может быть рекомендована для решения вышеуказанной задачи.

В качестве факторов, влияющих на чистую дисконтируемую экономию средств (отклик Y_i), целесообразно рассматривать: толщину слоя дополнительной теплоизоляции наружных стен $\delta_{стен}^{доп}$, м; число секций N; год проведения термомодернизации T, год; толщину слоя дополнительной теплоизоляции чердачного ($\delta_{стен}^{доп}$, м) и, при необходимости, цокольного ($\delta_{стен}^{доп}$, м) перекрытий; сопротивление теплопередаче вновь устанавливаемых оконных и балконных заполнений термомодернизируемого здания $R_{ок}^{нов}$, м².°С/Вт.

Необходимо отметить, что помимо указанных параметров тепловой защиты, следует учитывать такой фактор, как модернизация системы отопления, которая способна повысить ее эффективность. Однако учитывая его дискретный характер, в саму модель данный фактор лучше не включать.

Отметим, что подход к нормированию удельного теплопотребления существующих жилых зданий на отопление и вентиляцию в документе [7] несколько изменен по сравнению с [8] и предполагает его планомерное снижение на 15 % с 2016 и еще 15 % с 2020 г., что необходимо учитывать в ходе локальной оптимизации.

Глобальная оптимизация, или оптимизация термомодернизации жилищного фонда второго рода, заключается в поиске наиболее оптимальной последовательности ее реализации в масштабе города.

Математически данная задача описывается выражением

$$\text{ЧДЭС}_{tot} = \max \sum_{t=0}^{T_0} \sum (n_{ti} \cdot \text{ЧДЭС}_{ti}^{opt}), \quad (1)$$

где ЧДЭС_{tot} — суммарная ЧДЭС, достигаемая от реализации всей программы термомодернизации на конец рассматриваемого периода времени, тыс. р.; n_{ti} — количество термомодернизируемых зданий одного типа за один шаг (год), шт.; ЧДЭС_i^{max} — оптимальная ЧДЭС для здания выбранного типа и для выбранного шага (года), определяемая в ходе решения локальной задачи, тыс. р.; T_0 — время, на протяжении которого оценивается эффективность реализуемой программы термомодернизации, год.

Искомым в данном случае выступает параметр n_{ti} для каждого типа зданий и каждого расчетного шага (года).

Очевидно, что решение данной задачи в общем виде может и не иметь практического смысла. Таким образом, первоначально необходимо задание граничных условий, которые можно выделить в три группы:

I рода — время проведения программы термомодернизации T_0 и ее активной фазы T_{act};

II рода — общая интенсивность проведения программы термомодернизации на каждом шаге n_t, равная суммарному числу термомодернизируемых зданий всех типов за один год ($n_t = \sum n_{ti}$);

III рода — ограниченность инвестиционного пакета.

Очевидно, что указанные граничные условия могут применяться не только в чистом виде, но и в парном сочетании.

Метод решения задачи оптимизации параметров термомодернизации. Рассмотрим алгоритм реализации глобальной термомодернизации в случае, если заданы граничные условия I и II рода, т. е. срок ее проведения T_0 и общая шаговая интенсивность n_t, разложение которой по временной шкале может быть описано любой функциональной зависимостью $n_t = f(T)$ или получено на основе случайного распределения. При этом начало и конец активной фазы термомодернизации выбираются произвольно в рамках срока проведения программы T_0, либо вновь при помощи генератора случайных чисел.

Обоснование перечисленных граничных условий при решении той или иной конкретной задачи планирования термомодернизации является достаточно ответственным этапом подготовки исходных данных.

Общая шаговая интенсивность n_t термомодернизации определяется возможностями материально-технической базы строительной отрасли рассматриваемого региона. Интенсивность может быть как постоянной, так и изменяться во времени по определенному закону. На рис. 1 представлены некоторые из возможных вариантов интенсивности проведения термомодернизации с течением времени, так называемые *траектории термомодернизации*.

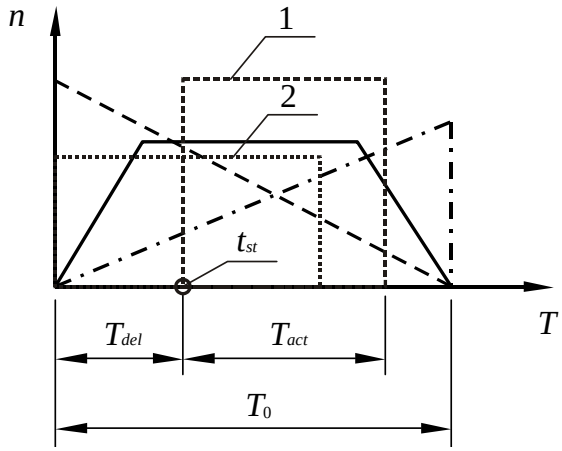


Рис. 1. Варианты интенсивности проведения термомодернизации (траектории термомодернизации)

Начало проведения термомодернизации может и не совпадать с текущим моментом времени. Данный вариант иллюстрирует интенсивность *1* на рис. 1. Время, проходящее в этом случае от текущего момента до момента начала реализации теплозащитных мероприятий в зданиях первой партии t_{st}, называется временем отсрочки термомодернизации T_{del}. Время, проходящее от момента начала реализации теплозащитных мероприятий до их завершения, называется временем активной фазы термомодернизации T_{act}. Это время может как совпадать со временем реализации программы T_0, так и не совпадать. В последнем случае с момента завершения активной фазы до подведения итогов всей программы остается временной интервал, называемый разбегом термомодернизации, который позволяет внести свой вклад в суммарную чистую дисконтируемую экономию средств ЧДЭС$_{tot}$ для зданий, утепляемых в последний год активной фазы.

Очевидно, что наиболее объективным временем оценки программы термомодернизации конкретной группы жилых зданий T_0 является наибольший временной интервал от текущего момента времени до достижения срока службы, еще обеспечивающего безубыточность термомодернизации одного из выделенных случайным образом в данной группе типов жилых зданий. В данном случае сравнение типов зданий происходит по их максимально возможной энергетической эффективности за весь оставшийся жизненный цикл.

Однако в реальной действительности начало термомодернизации существующих зданий зависит от многих факторов и часто откладывается на весьма длительный срок. Прогнозирование экономических показателей, а также уровня снижения нормируемого теплопотребления на длительные сроки (60…80 лет) является крайне субъективным мероприятием. Таким образом, при всей низкой информативности такого подхода к обоснованию величины T_0 его использование в реальных расчетах сложно признать оправданным. В связи с этим с учетом нестабильности отечественной экономики целесообразнее ограничивать временную оценку сроком службы наименее долговечных теплозащитных мероприятий по термомодернизации наружной оболочки зданий, осуществляемых в первые годы программы.

При обосновании времени активной фазы термомодернизации T_{act} следует исходить, в первую очередь, из возможности объективного прогнозирования развития норм энергоэффективного теплопотребления, а также реальных возможностей строительных подрядных организаций.

В сущности алгоритм предполагает многократное воспроизведение на ЭВМ поведения исследуемой системы на основе результатов анализа взаимосвязей между ее элементами. При этом конечный результат нельзя заранее вычислить или предсказать как при традиционном математическом моделировании, поэтому для предсказания результата необходим численный эксперимент (имитация) на модели при заданных исходных данных. Такой подход называется имитационным моделированием. В нем анализ характеристик системы выполняется на основе информации, получаемой с помощью выборок статистического эксперимента. Выборка производится на основе случайных чисел из интервала [0, 1], которые появляются с одинаковой вероятностью и являются независимыми и некоррелированными в этом интервале [9].

Первый шаг к построению имитационной модели состоит в описании реально существующей системы с использованием временных точек, так как изменения в системе происходят, когда заканчивается один процесс и начинаются другие. За единицу времени в данной имитационной модели выбран 1 год. Моделируя работу системы в течение, например, 10 лет, работа с данными начинается с 1-го года и отмечается соответствующими событиями на шкале времени в хронологическом порядке. Модель функционирует, перепрыгивая от одного события к другому, непосредственно за ним следующему. Каждое событие сопровождается корректировкой протокола, отражающей возможные изменения в показателях функционирования.

Структурная реализация рассматриваемого алгоритма представлена в виде укрупненной блок-схемы на рис. 2.

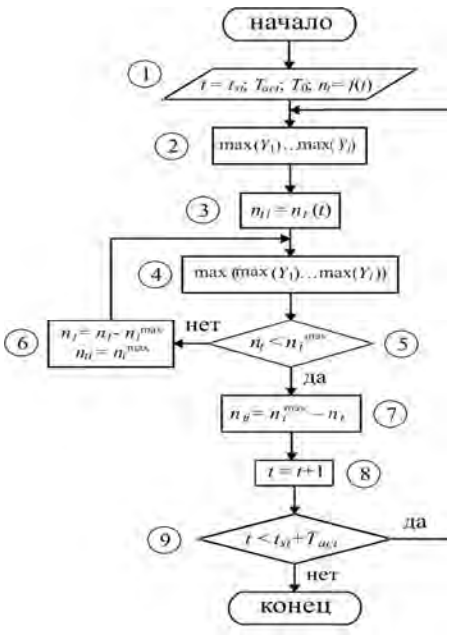


Рис. 2. Обобщенный алгоритм решения глобальной задачи оптимизации при заданных условиях I и II рода

Принимая во внимание, что приведенная блок-схема составлена с некоторым укрупнением, рассмотрим ее реализацию подробнее:

1) аргументу времени t присваивается или генерируется начальное значение t_{st}, задается или определяется случайным образом время активной фазы T_{act}, вводится время реализации всей программы T_0, функциональная зависимость или случайное распределение суммарной пошаговой интенсивности по временной шкале активной фазы $n_t(t)$;

2) для текущего значения t решается задача локальной оптимизации для зданий каждого из рассматриваемых типов;

3) определяется значение суммарной интенсивности для текущего шага t;

4) определяется тип зданий с максимальным значением ЧДЭС для текущего шага;

5) сравнивается количество типов зданий с максимальным значением ЧДЭС с суммарной интенсивностью для текущего шага t. В случае отрицательного результата осуществляется переход к 6 шагу, положительного — к 7;

6) переменной интенсивности рассматриваемого типа зданий с максимальным значением ЧДЭС на текущем шаге присваивается их количество, а величина суммарной интенсивности соразмерно уменьшается, затем указанный тип зданий из дальнейшего рассмотрения исключается;

7) переменной интенсивности рассматриваемого типа зданий с максимальным значением ЧДЭС на текущем шаге присваивается разность их количества и суммарной интенсивности;

8) к аргументу времени t прибавляется величина расчетного шага (в данном случае 1 год);

9) аргумент времени t сравнивается со временем окончания активной фазы термомодернизации. В случае положительного результата возвращаемся ко 2 шагу, отрицательного — оптимизация заканчивается.

Задача оптимизации в имитационном моделировании существенно отличается от оптимизации в традиционном математическом моделировании. Имитационная модель строится вне рамок оптимизационного процесса с максимизацией или минимизацией целевой функции. Оптимизационный процесс в рамках имитационной модели реализуется при помощи систематического изменения значений управляемых переменных с последующим получением результатов прогона модели. Спецификой такого рода моделирования является то, что результаты достигают стационарных значений только после многократного повторения эксперимента.

Реализация статистического эксперимента с использованием имитационной модели. Как в каждом эксперименте, в имитационном моделировании получаемые наблюдения должны быть статистически независимы и одинаково распределены, с тем чтобы была обеспечена возможность правильной статистической интерпретации моделируемой системы [9]. Однако получение независимых наблюдений при имитационном моделировании намного сложнее, чем при обычном лабораторном эксперименте. Принципиальным вопросом является выбор числа повторных наблюдений. При имитационном моделировании на первом этапе результаты моделирования обычно имеют неустойчивый характер (переходное состояние), устойчивость (стационарность) достигается, как правило, при достаточно продолжительном прогоне модели. Тогда выборочная ошибка, измеряемая средним квадратическим отклонением, уменьшается, и, следовательно, результаты становятся более точными.

Получение наблюдений с возможно меньшей ошибкой можно достичь с помощью повторения прогонов модели с различными последовательностями случайных чисел, каждый из которых дает одно наблюдение. Использование различных последовательностей случайных чисел обеспечивает независимость наблюдений и уменьшает выборочную ошибку.

Несмотря на реализацию при моделировании описанной выше процедуры уменьшения выборочной ошибки, при выполнении пробных прогонов модели оказалось, что достижение стационарного состояния требует, с одной стороны, больших затрат машинного времени, а с другой — связано с трудностью определения перехода в стационарный режим.

Для точного определения достижения стационарного состояния использован один из методов прерывающих процедур — метод повторения [9], в котором фиксируется продолжительность начального периода моделирования, заканчивающегося раньше, чем начинается получение наблюдений.

При использовании метода повторения каждое наблюдение получается при помощи отдельного прогона модели, причем все прогоны начинаются при одних и тех же начальных условиях, но используются различные последовательности случайных чисел. По достижении стационарных состояний получены наблюдения $y_1, y_2, y_3, \ldots, y_n$ в виде значений чистой дисконтируемой экономии средств. Лучшая оценка этой характеристики рассчитывалась как среднее значение отдельных прогонов для принятых условий моделирования:

$$\overline{Y} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Y_i. \qquad (2)$$

Также рассчитывались их дисперсии i по формулам:

$$S_i^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \overline{Y})^2 , \qquad (3)$$

где i — номер прогона; n — число прогонов.

Точное значение среднего с надежностью 95 % рассчитывалось как

$$\overline{Y} - t_{\gamma, n}(\mathrm{S}/n^{1/2}) < Y < \overline{Y} + t_{\gamma,n}(\mathrm{S}/n^{1/2}), \qquad (4)$$

где $\overline{Y}$ — среднее значение максимальной чистой дисконтируемой экономии средств; S — среднеквадратическое отклонение; n — число прогонов; $t_{\gamma,n}$ — t-статистика при уровне вероятности $\gamma = 0{,}05$.

Приведенные статистические характеристики позволили формализовать процесс моделирования и сократить затраты машинного времени на выполнение прогонов.

Реализация программы термомодернизации по предлагаемой схеме позволила достигнуть максимальной чистой дисконтируемой экономии средств в рамках выбранного градостроительного образования.

С использованием предложенной методики была произведена оптимизация последовательности термомодернизации жилых зданий в масштабе города. В ходе реализации данной программы предполагается, что дополнительному утеплению подвергнутся 4-х и 5-этажные здания серии 1—447 со сте-

нами из кирпича, 5-этажные здания серии 1—464 и 9-ти и 10-этажные серии 111—90 с крупнопанельными стенами.

В качестве теплозащитных мероприятий, способных дать реальный энергосберегающий эффект, рассматривались:

утепление наружных стен;

утепление чердачного перекрытия;

замена оконных заполнений;

модернизация системы отопления с повышением ее эффективности и установкой прибора учета.

Время активной фазы принималось равным 10 годам, поскольку спрогнозировать динамику развития энергосберегающей политики на больший срок достаточно сложно, а значит, сложно предугадать уровни ужесточения нормируемого энергопотребления.

Траектория термомодернизации была принята равномерной с началом в настоящий момент времени и соответствует кривой *2* на рис. 1.

Расчеты проводились согласно алгоритму, приведенному на рис. 2.

*Результаты оптимизации параметров термомодернизации жилых зданий в масштабе города***.** Результаты расчетов для заданных граничных условий представлены в виде гистограммы на рис. 3.

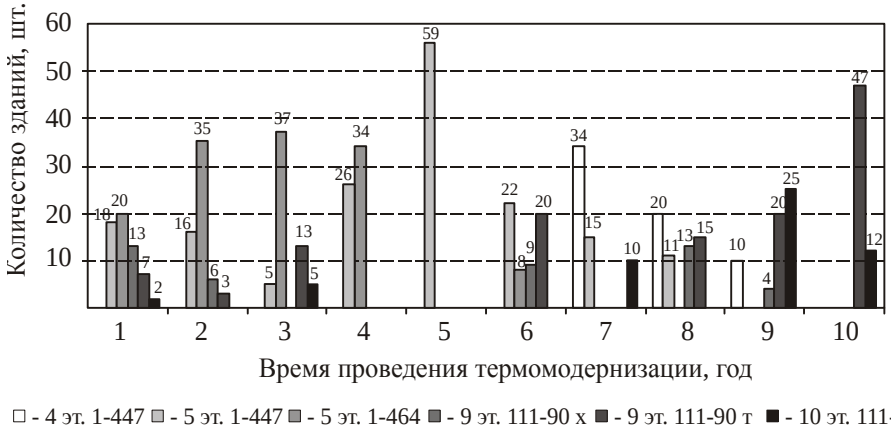


Рис. 3. Оптимизированная последовательность термомодернизации рассмотренных зданий для заданных граничных условий

Анализ гистограммы, представленной на рис. 3, позволяет сделать вывод, что для принятых граничных условий оптимальная траектория и последовательность модернизации исследуемых типов зданий имеет достаточно плавную характеристику в отношении изменения числа секций модернизируемых домов. При этом можно выделить три волны в подходе к термомодернизации различных типов зданий.

Для принятых граничных условий начинать термомодернизацию целесообразно с протяженных многосекционных жилых зданий всех рассматриваемых типов за исключением 4-этажных домов серии 1—447. Несмотря на различие в теплотехнических и геометрических характеристиках, особенности их компоновочного решения обусловливают примерно одинаковую экономическую эффективность. В последующем необходимо плавно понижать число

секций и постепенно увеличивать долю 5-этажных домов, полностью перейдя к модернизации только этих зданий на 4-й год программы.

В середине программы возникает вторая волна массовости модернизируемых типов домов, после которой доля 5-этажных зданий значительно убывает, что связано с постепенным завершением их термомодернизации, а их место занимают 4-этажные дома 1—447 серии.

Завершать программу термомодернизации целесообразно домами серии 111—90 с теплым чердаком. Как показали исследования, данный результат объясняется меньшим абсолютным эффектом от утепления домов этого типа.

Проведение программы термомодернизации жилых зданий рассмотренных серий при заданных условиях с учетом данных рекомендаций позволит достичь максимальной экономической эффективности. При этом суммарные затраты на ее реализацию за 10 лет активной фазы составят чуть больше 11 млрд р., которые обеспечат по ее итогам около 3,5 млрд р. чистой экономии при индексе доходности 1,32. Это говорит о том, что каждый вложенный рубль принесет 32 копейки чистой экономии.

В целом можно сказать, что разработанный авторами подход, представленный в данной статье, позволяет гибко планировать реализацию программы термомодернизации опорного жилищного фонда. Найденные с его помощью оптимизированные решения позволяют разумно направлять денежные потоки на термомодернизацию зданий в условиях дефицита инвестиционных средств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Езерский В. А., Монастырев П. В., Клычников Р. Ю.* Влияние параметров тепловой защиты здания на удельный расход тепловой энергии // Жилищное строительство. 2010. № 1. С. 43—45.

2. Пути повышения энергоэффективности эксплуатируемых зданий / Ю. А. Табунщиков, В. И. Ливчак, В. Г. Гагарин, Н. В. Шилкин // АВОК. 2009. № 5.

3. *Самарин О. Д.* Теплофизика. Энергосбережение. Энергоэффективность. М. : АСВ, 2009. 296 с.

4. *Езерский В. А., Монастырев П. В., Клычников Р. Ю.* Методика определения предельного срока службы здания, обеспечивающего безубыточность его термомодернизации // Academia. Архитектура и строительство. 2010. № 3. М. : НИИСФ РААСН. С. 357—361.

5. *Езерский В. А., Монастырев П. В., Клычников Р. Ю.* Оптимизация параметров тепловой защиты здания по экономическому критерию // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 3. С. 13—16.

6. *Езерский В. А., Монастырев П. В., Клычников Р. Ю.* Особенности экономической оценки термомодернизации зданий в условиях современных рыночных отношений // Жилищное строительство. 2010. № 8. С. 9—12.

7. Приказ Министерства регионального развития РФ от 28 мая 2010 г. № 262 «О требованиях энергетической эффективности зданий, строений, сооружений».

8. СНиП 23-02—2003 Тепловая защита зданий / Госстрой России. М. : ФГУП ЦПП, 2004. 26 с.

9. *Таха Х.* Введение в исследование операций : в 2-х кн. Кн. 2. Пер. с англ. М. : Мир, 1985. 495 с.

1. *Ezerskiy V. A., Monastyrev P. V., Klychnikov R. Yu.* Vliyanie parametrov teplovoy zashchity zdaniya na udel'nyy raskhod teplovoy energii // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2010. № 1. S. 43—45.

2. Puti povysheniya energoeffektivnosti ekspluatiruemykh zdaniy / Yu. A. Tabunshchikov, V. I. Livchak, V. G. Gagarin, N. V. Shilkin // AVOK. 2009. № 5.

3. *Samarin O. D.* Teplofizika. Energosberezhenie. Energoeffektivnost'. M. : ASV, 2009. 296 s.

4. *Ezerskiy V. A., Monastyrev P. V., Klychnikov R. Yu.* Metodika opredeleniya predel'nogo sroka sluzhby zdaniya, obespechivayushchego bezubytochnost' ego termomodernizatsii // Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo. 2010. № 3. M. : NIISF RAASN. S. 357—361.

5. *Ezerskiy V. A., Monastyrev P. V., Klychnikov R. Yu.* Optimizatsiya parametrov teplovoy zashchity zdaniya po ekonomicheskomu kriteriyu // Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2010. № 3. S. 13—16.

6. *Ezerskiy V. A., Monastyrev P. V., Klychnikov R. Yu.* Osobennosti ekonomicheskoy otsenki termomodernizatsii zdaniy v usloviyakh sovremennykh rynochnykh otnosheniy // Zhilishchnoe stroitel'stvo. 2010. № 8. S. 9—12.

7. Prikaz Ministerstva regional'nogo razvitiya RF ot 28 maya 2010 g. № 262 «O trebovaniyakh energeticheskoy effektivnosti zdaniy, stroeniy, sooruzheniy».

8. SNiP 23-02—2003 Teplovaya zashchita zdaniy / Gosstroy Rossii. M. : FGUP TsPP, 2004. 26 s.

9. *Takha Kh.* Vvedenie v issledovanie operatsiy : v 2-kh kn. Kn. 2. Per. s angl. M. : Mir, 1985. 495 s.

© Езерский В. А., Монастырев П. В., Клычников Р. Ю., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Езерский В. А., Монастырев П. В., Клычников Р. Ю. Имитационная модель оптимизации параметров термомодернизации жилых зданий в масштабе города // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 475—484.

УДК 621.6.05:005

А. И. Еремкин, М. Г. Зиганшин, Г. И. Беляева, И. Р. Гимранов

РАЗРАБОТКА И ИННОВАЦИОННЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ ОЧИСТНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СИСТЕМ ГАЗОСНАБЖЕНИЯ

Разработана инновационная система очистки природного газа от дисперсных примесей. Предложена возможная схема управления внедрением инноваций по ключевым технологиям транспорта газа.

К л ю ч е в ы е с л о в а: природный газ, компрессорная станция, газораспределительная станция, очистная обработка, управление внедрением инновации.

Developed is an innovative system of natural gas cleaning from disperse impurities. Proposed is the possible scheme of management of innovations introduction for key gas transport technologies.

K e y w o r d s: natural gas, compressor station, gas distribution stations, cleaning, management of innovation.

Добытый на промысле газ перед подачей в магистральный газопровод освобождают от дисперсных загрязнителей: влаги, конденсата тяжелых углеводородов, посторонних механических примесей в виде твердых частиц. Однако часть взвеси проходит через очистную систему промысловых газораспределительных станций (ГРС) и транспортируется по газопроводу. Частицы пыли, оксидов и гидрооксидов железа в доставленном потребителю газе могут послужить причиной аварийного выхода из строя компримирующих установок и газоиспользующего оборудования, быстрого износа уплотнений запорных деталей и других элементов арматуры, контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) на обвязочных газопроводах. Поэтому на промежуточных компрессорных станциях (КС) и ГРС населенных пунктов производится очистная обработка принимаемого газа до его поступления к абонентам. Обеспечение ее надлежащей эффективности является таким же ответственным звеном технологической цепи доставки природного газа потребителю, как надлежащее содержание и совершенствование газотранспортной системы, газооборудования, КИПиА. Между тем регламентация по эксплуатации установок очистки газа (УОГ) не столь жесткая. В настоящее время многие из проблем очистной обработки газов решаются на основании опыта исследований и эксплуатации соответствующего оборудования. Эксплуатация УОГ осуществляется в соответствии со стандартом организации [1], который также разработан на основании программы НИОКР. Указанным стандартом жестко регламентируется только соответствие инструкции по эксплуатации УОГ с требованиями Правил устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением (ПБ 03-576-03). При оперативном обслуживании УОГ предписывается выполнение обычных типовых операций внешнего осмотра, контроля параметров и работоспособности элементов, удаления из аппарата жидкости и шлама.

Широка и номенклатура применяемого оборудования систем очистной обработки газа. Одна из причин разнообразия в том, что пока еще отсутствуют универсальные аппараты, которые могли бы применяться в широком диапазоне параметров загрязнителей, в первую очередь — дисперсного состава взвешенных частиц. Один из распространенных типов УОГ на КС и ГРС —

двухступенчатая система, представляющая собой блок из пылеуловителя для очистки газа от крупных механических примесей и фильтра-сепаратора для тонкой очистки, со вспомогательными емкостями, арматурой, КИПиА. На первой ступени часто используют циклонные аппараты [2].

Существующие конструкции отечественных и зарубежных циклонов имеют низкую степень очистки фракций средней и мелкой пыли (размером менее 15…20 мкм) [3]. Инерционное осаждение взвеси из вращающегося потока растет с увеличением его скорости и уменьшением диаметра циклона. Однако каждый тип циклона имеет оптимальное значение скорости, превышение которого ведет к быстрому абразивному износу. Уменьшение же поперечного размера при оптимальной скорости означает снижение пропускной способности. Поэтому циклоны используют на начальной ступени обработки, а для осаждения тонкодисперсной взвеси дополняют систему очистки фильтрующими устройствами. Самостоятельные или выносные фильтрующие элементы увеличивают габариты и представляют неудобство при размещении.

С целью уменьшения габаритов УОГ, интенсификации циклонной обработки и повышения степени очистки путем увеличения скорости дисперсного потока при условии предотвращения абразивного износа внутренних поверхностей аппарата, предложено и испытано циклонно-фильтрующее устройство (рис. 1). Дисперсный поток подают тангенциально через патрубок *1* со скоростью, соответствующей диаметру отсекания 1 мкм (т. е. инерционному осаждению частиц такого размера на 50 %), что значительно выше оптимальной скорости для обычных циклонов. Частицы указанного диапазона после схода с линий тока попадают на ткань *7*, драпирующую внутреннюю поверхность цилиндрической части корпуса *2*. Драпировка, сохраняя корпус от абразивного износа, позволяет увеличить скорость до 20…30 м/с. Частицы меньшего (субмикронного) диапазона продолжают движение по линиям тока и оседают на плотном фильтровальном материале *6*, закрепленном на сварном цилиндрическом каркасе *5*. Очищенный газ удаляют в атмосферу через штуцер *4*. Ткань драпировки *7* регенерируют обратной продувкой через штуцеры *8*. Сброшенные загрязнения удаляют через коническое днище *3* циклона и затвор.

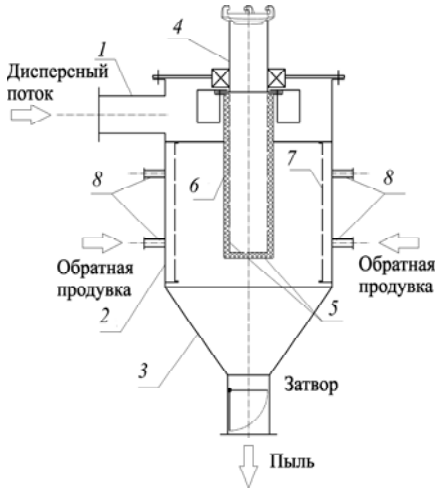


Рис. 1. Циклон-фильтр [4]

Согласно с расчетами и проведенными испытаниями модельного образца, при переоборудовании серийного циклона ЦН-24 и увеличении скорости потока с оптимального для этого типа циклона значения 4,5 до 18 м/с диаметр отсекания уменьшается с 8,5 до 0,4 мкм, что соответствует максимальному проникающему диаметру частиц через тканые фильтры [5].

С целью оценочного определения оптимальных параметров аппарата на стадии конструирования применен расчетный метод степени осаждения взвеси при циклонировании [6, 7]. Для получения расчетных зависимостей использовались упрощения, соответствующие условиям эксплуатации разрабатываемых аппаратов: входная скорость $u_0 \approx 3…20$ м/с, время пребывания в кольцевом канале $\tau \approx 0{,}5…3$ с, динамический коэффициент вязкости $\eta \approx 2\cdot10^{-5}$ Па·с, плотность газа $\rho_G \approx 1$ кг/м^3, ускорение силы тяжести $g \approx 9{,}8$ м/с^2. В уравнении движения $\rho_G\, du/d\tau = \rho_G g - \nabla p + \eta\nabla^2 u$ пренебрежимо гидростатическое давление $\rho_G g$, в кольцевом канале — изменение аксиальной и тангенциальной компоненты давления: потеря на трение Δp не превышает 1…2 % величины входного давления. Существенно влияющей на поток в аппарате радиусом R остается радиальная компонента лапласиана ∇p в виде grad $p = dp/dR$:

$$\rho_G\, du/d\tau = -\text{grad}\, p + \eta\nabla^2 u\,. \qquad (1)$$

При описании движения частиц не учитывались их взаимодействия в потоке между собой, фазовые превращения, различия размеров и форм, влияние присутствия частиц на объем и плотность потока, диффузионный эффект сепарации. Вследствие множества упрощений результаты расчетов рассматривались только на уровне оценочной и сравнительной информации. Поэтому в дальнейшем был выполнен ряд численных и натурных экспериментов.

Создание испытательного стенда (рис. 2) потребовалось и в связи с наличием ступени тонкой фильтрационной очистки. Накопление взвеси в пористом слое при фильтрации — сложный стохастический процесс, вызывающий изменения аналогичного характера в структуре фильтрующего материала. Поэтому оптимальные режимы фильтрации могут быть найдены только после накопления достаточной статистики опытных исследований.

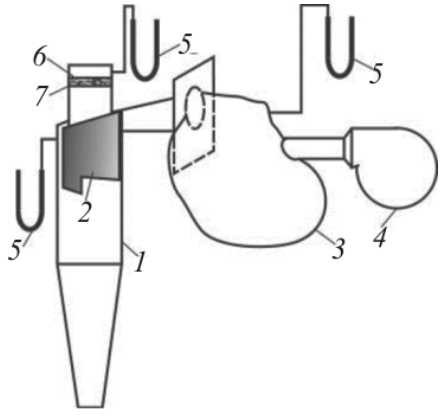
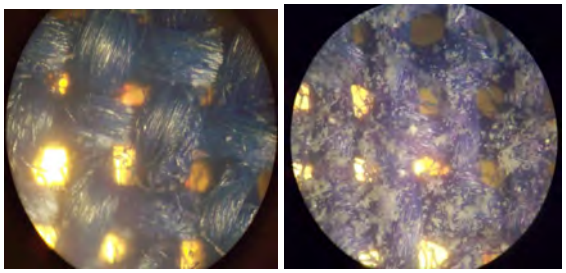


Рис. 2. Стенд для испытания фильтрующего циклонного сепаратора: *1* — циклон; *2* — тканевый фильтр; *3* — контейнер с пылью; *4* — нагнетатель; *5* — U-образные манометры; *6* — патрон с сеткой; *7* — выходной фильтр с тканью Петрянова

В данной установке воздух нагнетателем *4* подавался через контейнер с пылью *3* (тальк с медианным диаметром частиц 10 мкм и дисперсией 3,5 — определение методом седиментации в дистиллированной воде) в циклонный элемент *1*. Пыль осаждалась инерционно на фильтре *2*. Далее поток проходил патрон с тканью Петрянова *7* и металлической сеткой *6* в выхлопной трубе циклона. Фильтры *2*, *7* и сетка *6* взвешивались в начале и конце испытания. С начала, середины и конца фильтровальной ткани *7* вырезались образцы для сравнительного определения эффективности осаждения по счетной концентрации уловленных частиц, которая устанавливалась при изучении образцов под микроскопом с 25-кратным увеличением (рис. 3). Масса контейнера с пылью определялась в начале и конце серий опытов с одинаковым расходом.



а *б*

Рис. 3. Типичное состояние поверхности входного фильтра: *а* — в начальный период фильтрации; *б* — по завершении опыта

На выходном фильтре *7* запыление оставляло спиральный след, что свидетельствует об интенсивной закрутке потока в выхлопной трубе и наличии низкочастотных прецессий его ядра, характерных для работы обычных циклонов возвратно-поточного типа. Этим установлено, что примененный комплекс фильтрующих вставок не нарушает аэродинамику спирально-возвратного течения. По результатам испытаний, на входной фильтрующей вставке улавливается около 80 % пыли, на фильтре выхлопной трубы — до 20 %.

Дальнейшее совершенствование конструкции проводится на основе моделирования методами вычислительной гидродинамики (CFD, Computational Fluid Dynamics). Изучение подходов к CFD-моделированию потоков в циклонах показало, что высокие скорости крутки потока вызывают затруднения для распространенных статистических моделей турбулентности, таких как *k*-ε, используемых при замыкании осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье-Стокса (Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation, RANS). При наличии кривизны линий тока простые линейные напряженно-деформационные корреляции этих моделей приводят к эпюрам скорости, близким к квазитвердому вращению [8]. Меньше ошибок дает техника моделирования LES (Large-Eddy Simulation). В ней крупномасштабные вихри, несущие основную часть кинетической энергии, разрешаются напрямую, а влияние мелких вихрей учитывают через математические модели подсеточных масштабов. Стандартная модель Смагорински (standard Smagorinsky model, SM), использующая технику LES, определяет напряжения для уравнений Рейнольдса как:

$$\tau = -2\nu_t S\,, \qquad (2)$$

где $\overline{S} = \left[\nabla\overline{u} + (\nabla\overline{u})^T \right] / 2$ — усредненный тензор скорости деформации; $\nabla\overline{u}, (\nabla\overline{u})^T$ — градиенты средней и усредненной по Рейнольдсу пульсационной скорости; $v_t \approx lv = \left(C_s \overline{\Delta}\right)^2 \left|\overline{S}\right|$ — константа в виде произведения масштабов пульсаций по длине $l = \overline{\Delta}$ и скорости $v = \overline{\Delta} \cdot \left|S\right|$, и квадрата константы Смагорински C_s [9].

Общие затраты на реализацию LES оцениваются с учетом того, что шаг интегрирования по времени не должен превышать временного масштаба наименьших разрешимых масштабов турбулентного движения (временной масштаб обратно пропорционален линейному масштабу и шагу сетки), а область интегрирования по времени ограничивается интегральным масштабом.

Техника LES представляет больше информации по сравнению с решением на основе RANS. Кроме полей скорости, концентрации, температуры, давления и распределения рейнольдсовых напряжений, определяются спектральные характеристики пульсаций скорости и давления, двухточечные моменты, а также временные и пространственные масштабы турбулентности. Такая информация важна при инновационном конструировании — к примеру, пульсации давления, плотности, температуры могут быть причиной аварийного или усталостного повреждения элементов. В принципе, на основе LES можно находить параметры когерентных вихревых структур, которые ответственны за дисперсию примеси. Однако результаты 3*d*-расчетов циклонной сепарации показали, что при доступном вычислительном ресурсе они имеют такой же оценочный уровень, как и использованный выше метод расчета степени осаждения по [6, 7]. Для результата более высокой точности необходимо увеличение числа узлов на два и более порядка по сравнению с максимумом, определяемым ресурсом доступного персонального компьютера.

Вместе с тем, при всей сложности обеспечения современного уровня исследований традиционная часть разработки инновационной технологии в конечном итоге все же является разрешимой, тогда как получения решения сейчас еще недостаточно для его использования. Процессы внедрения завершенных инновационных работ сложны настолько, что требуют самостоятельных исследований управления внедрением по каждой конкретной ситуации. При рыночных отношениях интерес инвестора и производственников к рискованному инновационному инвестированию весьма ограничен и не может быть как-то навязан. Для управления внедрением необходимо найти мотивации, вплетающиеся в круг интересов инвестора и насущных производственных задач.

С целью определения оптимальной схемы внедрения параллельно с исследовательской разработкой технологии очистной обработки газа было проведено исследование управления внедрением инновационного решения в ООО «Газпром трансгаз Казань» на основе новой технологии ремонта дефектных сварных стыков газопроводов. В настоящее время для предприятий ОАО «Газпром» наиболее важна разработка технических и организационных мероприятий по поддержанию надежности, безопасности и бесперебойности поставки газа потребителям. Выбор объекта исследования вызван вхождением его в основу технологической цепи поддержания работоспособности газо-

транспортных систем, в которую, как отмечено ранее, входит и надлежащее поддержание состояния систем очистной обработки доставляемого газа. Следовательно, задачи внедрения инновационных технических средств и технологий на газопроводах, КС и ГРС затрагивают основные производственные и экономические интересы предприятия и могут рассматриваться как аналоги.

Проанализирована деятельность организации с целью выявления проблем в управлении внедрением новых технологий. Выявлен тренд на нарастание в последние годы затрат по внедряемой сфере деятельности. Разработаны рекомендации, содержащие алгоритм оценки проекта, поэтапная модель организационно-управленческих мероприятий и перечень ключевых показателей эффективности (KPI) по внедрению инновации в деятельность ООО «Газпром трансгаз Казань». На рис. 4 в качестве примера приведен разработанный алгоритм оценки проекта.

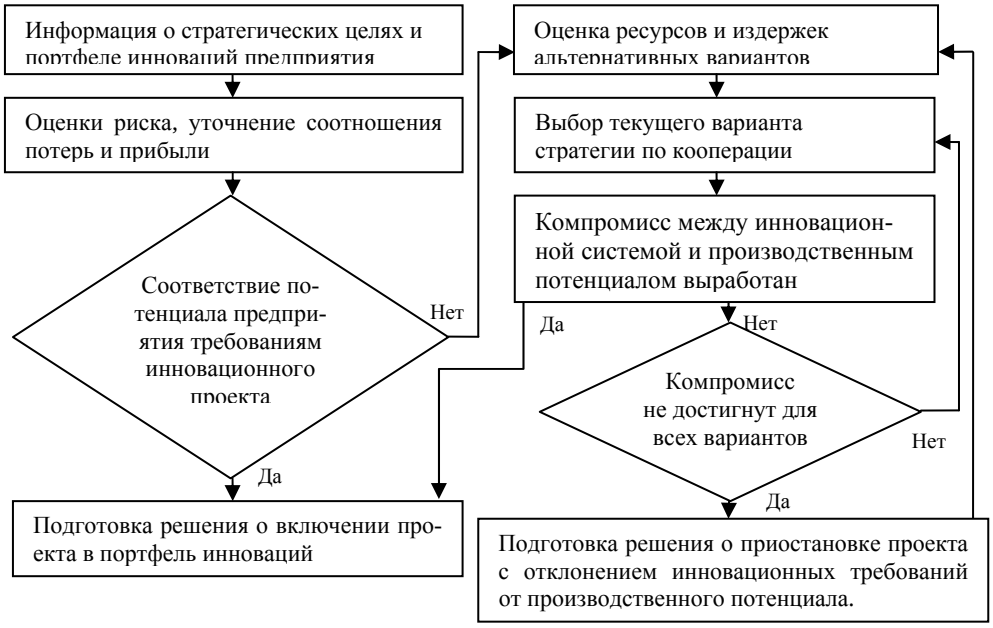


Рис. 4. Алгоритм оценки проекта по внедрению новой технологи или инновации в деятельность ООО «Газпром трансгаз Казань»

Таким образом, в целом комплекс разработок, представленных в данной работе, может рассматриваться в качестве стратегии дополнения инженерного моделирования на базе CAD (Computer Aided Design)- и CAE (Computer Aided Engineering)- систем, сводящегося к 3 этапам автоматизированной разработки инновационной конструкции, алгоритмизированным этапом менеджмента инновации. Схема инженерного моделирования на базе CAD- и CAE- систем все чаще становится обязательной частью инновационной конструкторской разработки, и включение в него внедренческого алгоритма может служить логическим венцом всего инновационного цикла (от стадии НИОКР до начала сооружения объекта инновации), позволяющим во многом исключить из него элемент произвола.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ОАО «Газпром». Стандарт организации. Правила эксплуатации магистральных газопроводов СТО Газпром 2-3.5-454-2010 (ПЭМГ). Введен в действие распоряжением ОАО «Газпром» от 24.05.10 № 130. М. : ОАО «Газпром», 2010. 189 с.

2. *Цигельник А. Д.* Монтаж, наладка и ремонт ГПА с ГТП. Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2003. 112 с.

3. Справочник по пыле- и золоулавливанию / под общ. ред. А. А. Русанова. М. : Энергоатомиздат, 1983. 312 с.

4. Циклон-фильтр / М. Г. Зиганшин, И. С. Алещенко, Л. В. Павлов, А. М. Зиганшин. Патент РФ на изобретение № 2361678, опубл. 20.07.2009, Бюл. № 20.

5. *Белоусов В. В.* Теоретические основы процессов газоочистки. М. : Металлургия, 1988. 256 с.

6. *Еремкин А. И.* Степень инерционного осаждения взвешенных частиц в циклонных и вихревых сепараторах. Безразмерные параметры эффективности сепарации взвешенных частиц // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Воронеж. 2009. № 2(14). С. 64—71.

7. *Еремкин А. И.* Степень инерционного осаждения взвешенных частиц в циклонных и вихревых сепараторах. Верификация параметров эффективности // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. № 3 (15). С. 137—145

8. *Hoffmann* A., *Stein L.* Gas Cyclones and Swirl Tubes. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer, 2002. 422 p.

9. *Blackburn H., Schmidt S.* Spectral element filtering techniques for large eddy simulation with dynamic estimation // J. Comput. Phys. S. 186, 610—629 (2003).

1. OAO «Gazprom». Standart organizatsii. Pravila ekspluatatsii magistral'nykh gazoprovodov STO Gazprom 2-3.5-454-2010 (PEMG). Vveden v deystvie rasporyazheniem OAO «Gazprom» ot 24.05.10 № 130. M. : OAO «Gazprom», 2010. 189 s.

2. *Tsigel'nik A. D.* Montazh, naladka i remont GPA s GTP. Ekaterinburg : UGTU-UPI, 2003. 112 s.

3. Spravochnik po pyle- i zoloulavlivaniyu / pod obshch. red. A. A. Rusanova. M. : Energoatomizdat, 1983. 312 s.

4. Tsiklon-fil'tr / M. G. Ziganshin, I. S. Aleshchenko, L. V. Pavlov, A. M. Ziganshin. Patent RF na izobretenie № 2361678, opubl. 20.07.2009, Byul. № 20.

5. *Belousov V. V.* Teoreticheskie osnovy protsessov gazoochistki. M. : Metallurgiya, 1988. 256 s.

6. *Eremkin A. I.* Stepen' inertsionnogo osazhdeniya vzveshennykh chastits v tsiklonnykh i vikhrevykh separatorakh. Bezrazmernye parametry effektivnosti separatsii vzveshennykh chastits // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Voronezh. 2009. № 2(14). S. 64—71.

7. *Eremkin A. I.* Stepen' inertsionnogo osazhdeniya vzveshennykh chastits v tsiklonnykh i vikhrevykh separatorakh. Verifikatsiya parametrov effektivnosti // Nauchnyy vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. 2009. № 3 (15). S. 137—145

8. *Hoffmann A., Stein L.* Gas Cyclones and Swirl Tubes. Berlin, Heidelberg, N.Y.: Springer, 2002, 422 p.

9. *Blackburn H., Schmidt S.* Spectral element filtering techniques for large eddy simulation with dynamic estimation // J. Comput. Phys. S. 186, 610—629 (2003).

© Еремкин А. И., Зиганшин М. Г., Беляева Г. И., Гимранов И. Р., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Разработка и инновационный менеджмент очистных технологий систем газоснабжения / А. И. Еремкин, М. Г. Зиганшин, Г. И. Беляева, И. Р. Гимранов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 485—491.

УДК 534.83:621.43.065

В. А. Земцов, Е. В. Гагарина

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ НОРМИРОВАННОГО РЕГЛАМЕНТА ПО ЕСТЕСТВЕННОМУ ОСВЕЩЕНИЮ НА ПРИМЕРЕ ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ ШКОЛ

Проведены исследования световой среды помещений общеобразовательных школ на примере трех гипотетических генпланов городской застройки. Изучалась зависимость световой среды помещений школ от степени закрытия небосвода противостоящими зданиями, типа городской застройки, отделки фасадов зданий, планировочного решения помещений. Разработаны предложения, которые позволят в практике проектирования и реконструкции градостроительных образований по заданному предполагаемому расположению зданий определить требуемые значения всех параметров, необходимых для соблюдения удовлетворительных условий естественного освещения помещений в условиях максимального уплотнения застройки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: световая среда помещений, коэффициент естественной освещенности, относительная видимость небосвода, городская застройка.

The authors carry out studies of the light environment of the premises of comprehensive schools by the example of three hypothetical master plans of urban construction. The dependence of the light environment of the premises of comprehensive schools on the closing degree of the sky opposing the buildings, type of city building, decoration of facades of buildings, the design decision of the premises is studied. The authors develop proposals which will allow in the practice of design and reconstruction of urban planning formations on a specified intended location of buildings determine the required values for all parameters necessary to meet satisfying conditions of natural lighting of premises under condition of maximum compaction of the construction.

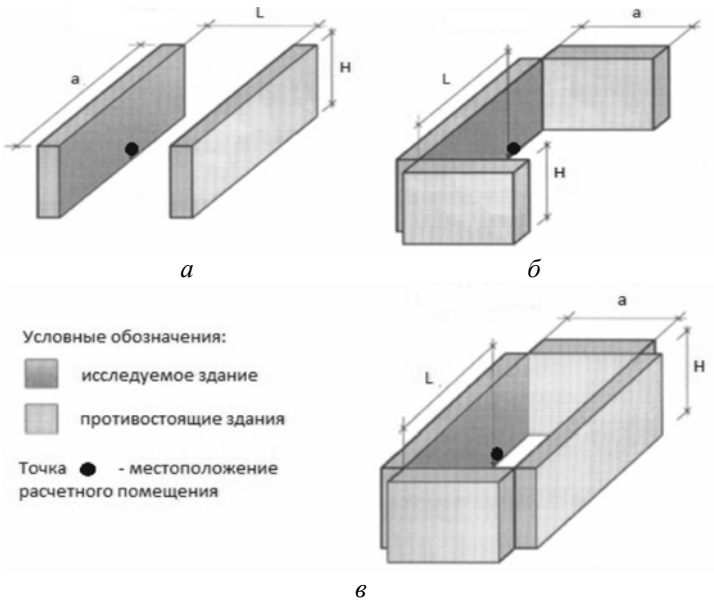
K e y w o r d s: light environment, coefficient of natural lighting, relative visibility of the sky, urban construction.

1. Введение

Нормативные требования к естественному освещению помещений общеобразовательных школ (ОШ) приведены в санитарно-эпидемиологических правилах и нормативах [1]. С учетом специфических особенностей школьных учреждений нормируемые значения естественного освещения в их помещениях сравнительно высокие. Например, в классах ОШ нормированное значение коэффициента естественной освещенности (КЕО) составляет 1,5 %. По сравнению с комнатами жилых домов требуемое значение КЕО в помещениях ОШ в три раза выше. Методы расчета нормируемых параметров естественного освещения помещений жилых и общественных зданий изложены в своде правил по проектированию и строительству [2]. Результаты исследования, приведенные в статье, получены на основании методики, представленной в своде правил для помещений с боковой системой естественного освещения. Исследования были проведены на примере трех гипотетических генпланов городской застройки, отражающих многообразие градостроительных решений (рис.).

Средневзвешенный коэффициент отражения фасадов зданий варьировался в пределах от 0,34, что соответствует коэффициенту отражения отделочного материала фасада, равному 0,70. В качестве базового помещения было принято помещение, имеющее глубину 7,00, ширину 7,00, высоту 3,60 м и один световой проем 2,40 (высота)×6,00 м. Переплеты приняты с общим коэффициентом

светопропускания 0,56 из ПВХ с однокамерными стеклопакетами. Средний коэффициент отражения подстилающей поверхности между зданиями был принят равным 0,20 (сухой асфальт, покрытый пылью, трава).



а *б* *в*

Варианты генпланов городской застройки: *а* — параллельно стоящие здания; *б* — застройка в виде полузамкнутого двора; *в* — застройка в виде замкнутого двора

2. Определение приоритетных параметров застройки, влияющих на световую среду помещений общеобразовательных школ

2.1. Зависимость световой среды помещений ОШ от степени закрытия небосвода противостоящими зданиями. Главным параметром, негативно влияющим на световую среду помещений при уплотненной городской застройке, является закрытие небосвода противостоящими зданиями. При затенении небосвода в помещениях, расположенных на нижних этажах зданий, резко снижается уровень естественной освещенности, а при высокой плотности застройки практически исключается прямая видимость небосвода, являющаяся показателем качества световой среды помещения. Чтобы получить закономерность изменения световой среды и количественно оценить влияние экранирования небосвода противостоящими зданиями, были исследованы две функции:

$$e_p = f_1(H / l)\ ,\ V_н = f_2(H / l), \qquad (1)$$

H/l= 0,15; 0,20; 0,35; 0,50; 1,00; 2,00; 3,00; $\rho_ф$= 0,34; 0,41; 0,48; 0,55; a/l = 4,00,

где e_p — расчетное значение КЕО для ОШ, определяется в точке на уровне условной рабочей поверхности в плоскости характерного разреза помещения на расстоянии 1,20 м от стены, противоположной световому проему; H/l — тангенс угла затенения небосвода противостоящим зданием высотой H, м, находящимся на расстоянии l, м, от рассматриваемых помещений; $V_н$ — относительная видимость небосвода (ОВН) из середины помещения, которая условно принимается при открытом горизонте равной 100 %.

При выбранных исходных данных расчетное значение КЕО удовлетворяет требованиям санитарных норм СанПиН 2.2.1./2.1.1.1278-03 для помещений ОШ в пограничной области между частичным и полным экранированием небосвода. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость КЕО ($e_р$) и ОВН ($V_н$) от тангенса угла экранирования небосвода противостоящим зданием ($\rho_{вн}$ =0,55, $\rho_ф$ =0,41, *a*/*l* = 4,00)

Тип здания	Экранирование небосвода	*H*/*l*	Варианты застройки					
			а		*б*		*в*	
			$e_р$	$V_н$	$e_р$	$V_н$	$e_р$	$V_н$
ОШ	Частичное	0,15	2,33	79	2,33	79	2,33	79
		0,20	2,29	72	2,30	72	2,30	72
		0,35	2,05	52	2,05	52	2,11	52
	Полное	0,50	1,49	0	1,25	0	1,73	0
		1,00	1,18	0	0,86	0	1,43	0
		2,00	0,73	0	0,79	0	0,69	0
		3,00	0,50	0	0,74	0	0,33	0

Приведенные результаты позволяют выявить следующие закономерности изменения световой среды по поведению функций (1). В таблице четко выделяются три зоны, скорость изменения в которых существенно различается: первая зона $0<H/l\leq0{,}20$ незначительного изменения КЕО; вторая зона $0{,}20<H/l\leq0{,}50$ резкого изменения КЕО; третья зона $0{,}50<H/l\leq3$ плавного изменения КЕО.

В первой зоне КЕО снижается всего на 0,01…0,02 %, а видимость небосвода составляет не менее 72 %, т. е. противостоящие здания практически не оказывают влияния на световую среду помещений. Во второй зоне вследствие затенения небосвода происходит резкое уменьшение КЕО (на 30 % и более) во всех вариантах застройки и типах зданий, но, несмотря на это, естественная освещенность в помещениях создается главным образом за счет прямого света небосвода. Из табл. 1 следует, что ОВН в диапазоне $0{,}20\leq H/l\leq0{,}35$ сохраняется не ниже 50 %. На границе между второй и третьей зонами требования норм естественного освещения ($e_н$=1,5 %) выполняется во всех трех вариантах. В третьей зоне ($0{,}50<H/l$) при полном закрытии небосвода противостоящими зданиями КЕО создается в основном за счет света, отраженного от фасадов противостоящих зданий, яркость которых плавно убывает по мере уплотнения застройки. В этой зоне при $H/l>1$ (высокая плотность застройки) требования норм не выполняются во всех трех вариантах застройки даже при высоких значениях коэффициента отражения фасада ($\rho_ф$=0,55). В реальных условиях средневзвешенный коэффициент отражения фасада (с учетом остекления) выше 0,50 обеспечить в большинстве случаев практически невозможно. Поэтому плотность застройки является предельно допустимой при H/l=0,50. Видимость небосвода в третьей зоне полностью исключается ($V_н$=0). В связи с этим качество световой среды в этой зоне уплотнения будет неудовлетворительным.

2.2. Влияние типа городской застройки на естественное освещение помещений. Для оценки влияния типа городской застройки и ее геометрических параметров на естественное освещение помещений была изучена зависимость

$$e_{\text{р}} = f_1(H / l; l / a); \qquad (2)$$

где H/l=0,15,…, 3; l/a=0,15,…, 3; a — длина противостоящего здания, м.

Результаты исследования приведены в табл. 2.

Рассмотрение данных, приведенных в табл. 2, показывает, что влияние геометрических пропорций в пределах каждого варианта застройки обнаруживает устойчивую закономерность: умеренное воздействие на световой режим помещений при частичном закрытии небосвода и более существенное при полностью закрытом небосводе при наблюдении из расчетной точки.

Таблица 2

Влияние геометрических пропорций и типа городской застройки на естественное освещение помещений ($\rho_{\text{ф}}$=0,41, $\rho_{\text{вн}}$=0,55)

Тип здания	Экранирование небосвода	Геометрические пропорции застройки		Значения КЕО в вариантах застройки		
		H/*l*	*l*/*a*	*а*	*б*	*в*
ОШ	Частичное	0,15	3,00	2,33	2,33	2,33
		0,20	2,00	2,31	2,29	2,29
		0,35	1,50	2,11	2,03	2,04
	Полное	0,50	1,00	1,65	1,19	1,38
		1,00	0,50	1,28	0,82	1,11
		2,00	0,25	0,73	0,79	0,69
		3,00	0,15	0,49	0,76	0,42

При полном закрытии небосвода тип городской застройки оказывает более сильное воздействие на естественное освещение помещений, чем при частичном закрытии. При переходе от варианта *а* к варианту *в* при частично закрытом небосводе снижение КЕО не превышает 3 %, в то время как при полном закрытии небосвода оно достигает 35 % и более (за 100 % в обоих случаях принято исходное значение КЕО в пределах каждого интервала изменения геометрических пропорций).

2.3. Роль отделки фасадов зданий при уплотнении городской застройки. Общеизвестна роль отделки фасадов зданий в решении архитектурных задач. Однако ее значимость как фактора, создающего возможность уменьшить или даже преодолевать полностью негативное влияние, недооценивается вследствие недостаточной изученности вопроса, связанного с количественной оценкой влияния отделки фасадов на естественное освещение помещений в различных вариантах городской застройки. Для решения этого вопроса были исследованы зависимости:

$$e_{\text{р}} = f_a(\rho_{\text{ф}}, G);\ e_{\text{р}} = f_б(\rho_{\text{ф}}, G);\ e_{\text{р}} = f_{\text{в}}(\rho_{\text{ф}}, G);$$

$\rho_{\text{вн}}$=0,55; $\rho_{\text{ф}}$=0,34; 0,41; 0,48; 0,55,

где $G=Ha/l(H+a)$ — комплексный геометрический показатель застройки.

Результаты исследований, приведенные в табл. 3, позволяют сделать следующие выводы:

1. Наибольший эффект от увеличения светлости отделки наблюдается при полном закрытии небосвода противостоящими зданиями ($0{,}333<G<2$).

2. Если условно принять значение КЕО при $\rho_ф$=0,34 во всех вариантах застройки за 100 %, то при частичном экранировании небосвода (G<0,333) средний прирост КЕО при переходе к отделке фасадов $\rho_ф$=0,55 составит: в варианте *а* — 5,0 %, в варианте *б* — 7,5 %, в варианте *в* — 7,5 %, тогда как в зоне полной закрытости небосвода противостоящими зданиями (G>0,333) при аналогичных условиях средний прирост КЕО имеет следующие значения: в варианте *а* — 82,0 %, в варианте *б* — 71,0 %, в варианте *в* — 88,0 %. При этом относительный прирост КЕО по мере возрастания плотности застройки увеличивается. Используя установленные закономерности, за счет применения светлой отделки фасадов можно в значительной мере компенсировать снижение КЕО в случаях уплотнения городской застройки.

Таблица 3

Зависимость значений КЕО в помещении от коэффициента отражения фасадов зданий $\rho_ф$ и комплексного геометрического показателя застройки G

Вариант застройки	$\rho_ф$	Частичное закрытие небосвода			Полностью закрытый небосвод			
		Значение КЕО в помещении для комплексного геометрического показателя застройки G						
		0,103	0,143	0,230	0,333	0,667	1,333	2,067
а (ОШ)	0,34	2,33	2,29	2,05	1,48	1,08	0,60	0,39
	0,41	2,33	2,31	2,11	1,65	1,28	0,73	0,49
	0,48	2,34	2,32	2,16	1,81	1,47	0,87	0,59
	0,55	2,34	2,33	2,21	1,96	1,65	1,02	0,71
б (ОШ)	0,34	2,32	2,28	1,98	1,06	0,67	0,64	0,62
	0,41	2,32	2,29	2,03	1,19	0,82	0,79	0,76
	0,48	2,33	2,31	2,07	1,32	0,99	0,95	0,90
	0,55	2,33	2,32	2,12	1,45	1,16	1,11	1,06
в (ОШ)	0,34	2,33	2,28	1,99	1,22	0,90	0,55	0,34
	0,41	2,33	2,29	2,04	1,38	1,11	0,69	0,42
	0,48	2,33	2,31	2,09	1,54	1,33	0,85	0,52
	0,55	2,33	2,32	2,14	1,71	1,58	1,04	0,64

2.4. Роль планировочного решения помещений в условиях уплотненной городской застройки. Одним из важнейших параметров, влияющих на световой режим помещения, является его относительная глубина D, равная отношению глубины помещения к его ширине: $D = d_п / b_п$.

Для количественной оценки степени влияния относительной глубины помещения на его естественное освещение выполнены расчетные исследования в помещении класса ОШ площадью 49 м^2. Для решения этого вопроса были исследованы зависимости $e_р = f(D,G)$, $\rho_{вн}$=0,55; $\rho_ф$=0,41; D=1,24, 1,00, 0,73, 0,55; G=0,10…2,00.

Результаты исследований приведены в табл. 4. Рассмотрены четыре типа помещений с одинаковой площадью, но отличающиеся конфигурацией в плане. За опорный вариант принято помещение квадратное в плане, у которого относительная глубина равна единице. Результаты исследований показывают, что с увеличением относительной глубины помещения происходит снижение расчетных значений КЕО во всех вариантах застройки.

Таблица 4

Зависимость значений КЕО в помещении от его относительной глубины D и комплексного геометрического показателя застройки G

Вариант застройки	Относительная глубина помещения *D*	Значение КЕО в помещении для комплексного геометрического показателя застройки *G*						
		Частичное закрытие небосвода			Полностью закрытый небосвода			
		0,103	0,143	0,230	0,333	0,667	1,333	2,067
а (ОШ)	1,24	1,92	1,89	1,69	1,36	1,06	0,60	0,40
	1,00	2,33	2,31	2,11	1,65	1,28	0,73	0,49
	0,73	3,00	2,98	2,79	2,29	1,57	0,94	0,63
	0,55	3,69	3,67	3,51	3,01	3,81	1,13	0,78
б (ОШ)	1,24	1,91	1,88	1,59	0,82	0,70	0,68	0,65
	1,00	2,32	2,29	2,03	1,19	0,82	0,79	0,76
	0,73	2,99	2,97	2,74	2,01	1,00	0,97	0,93
	0,55	3,69	3,67	3,47	2,85	1,17	1,13	1,08
в (ОШ)	1,24	1,91	1,88	1,61	1,07	0,92	0,58	0,34
	1,00	2,32	2,29	2,04	1,38	1,11	0,69	0,42
	0,73	2,99	2,97	2,74	2,10	1,32	0,85	0,55
	0,55	3,69	3,67	3,47	2,89	1,49	0,99	0,66

Наибольший эффект достигается при показателях относительной глубины помещений в городской застройке как с полностью, так и с частично закрытым небосводом. В вариантах *а* и *б* городской застройки расчетные значения КЕО увеличиваются на 50…60 % при переходе с помещения квадратной формы (*D*=1) к помещению, вытянутому вдоль наружной стены (*D*=0,55). С учетом результатов исследований при проектировании ОШ целесообразно использовать планировочные решения, при которых основные помещения имеют вытянутую вдоль наружной стены форму («лежачие» помещения). Это позволит при уплотнении городской застройки обеспечивать высокие требования санитарных норм, предъявляемые к классным помещениям в ОШ.

Выводы

1. Анализ закономерностей изменения световой среды в помещении в процессе уплотнения городской застройки позволил разработать параметрическую систему, которая устанавливает приоритет и функциональные связи между следующими параметрами застройки:

степенью экранирования небосвода противостоящими зданиями *H*/*l*;

светлотой отделки или коэффициентом отражения фасадов зданий $\rho_ф$;

геометрическими размерами и пропорциями пространства, образуемого окружающими зданиями (варианты застройки).

2. Не менее важную роль в реализации гигиенических норм СанПиН играет улучшенная отделка внутренних поверхностей помещений. В настоящих нормативных документах рекомендуется применять материалы со средневзвешенным коэффициентом отражения стен, пола, потолка, равным 0,50. Расчеты показывают, что применение более светлых материалов позволит увеличить средневзвешенный коэффициент отражения внутренних поверхностей помещений до 0,65.

3. Результаты зарубежных исследований показали, что для удовлетворительного визуального контакта с наружным пространством в небольших помещениях, к которым относятся классные комнаты и кабинеты в ОШ, площадь окон должна составлять не менее 30 % площади наружной стены помещения, а ширина окна (или суммарная ширина всех окон) — не менее 50 % глубины рабочей зоны. Анализ результатов исследований показывает, что принятые в отечественной практике габариты помещений и световых проемов в ОШ в большинстве случаев удовлетворяют этим требованиям.

4. Зарубежная практика показывает, что проектирование световой среды в помещениях должно включать наряду с обеспечением количественных показателей естественного освещения (КЕО) и выполнение ряда требований, связанных с качеством освещения (визуальная связь с наружным пространством, ощущение достаточности освещения, видимости небосвода).

Исследования показывают, что одним из главных параметров, влияющих на визуальную связь с пространством, является высота оконных проемов. В основных помещениях ОШ целесообразно применять окна высотой не менее 2,40 м. В этом случае повышается угол раскрытия небосвода, что положительно сказывается на качестве освещения, а также повышается яркость светового проема и увеличивает количество естественного освещения при равной площади окон.

5. Использование разработанных предложений в реализации гигиенических норм СанПиН, которые включают вышеуказанную систему параметров, позволит в практике проектирования и реконструкции градостроительных образований по заданному предполагаемому расположению зданий определить требуемые значения всех параметров, которые при реализации проекта будут гарантировать удовлетворительные условия естественного освещения помещений в условиях максимального уплотнения застройки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278—03. Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещенному освещению жилых и общественных зданий.

2. СП 23-102—2003. Естественное освещение жилых и общественных зданий.

1. SanPiN 2.2.1/2.1.1.1278—03. Gigienicheskie trebovaniya k estestvennomu, iskusstven-nomu i sovmeshchennomu osveshcheniyu zhilykh i obshchestvennykh zdaniy.

2. SP 23-102—2003. Estestvennoe osveshchenie zhilykh i obshchestvennykh zdaniy.

© Земцов В. А., Гагарина Е. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Земцов В. А., Гагарина Е. В. Методические принципы обеспечения нормированного регламента по естественному освещению на примере общеобразовательных школ // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 492—498.

УДК 628.511.12

Н. В. Мензелинцева*, *В. Н. Азаров*, *Н. Ю. Карапузова*, *Е. О. Фомина*, *Е. В. Гладков

ОСОБЕННОСТИ АСПИРАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЙ ПО ПРОИЗВОДСТВУ ЦЕМЕНТА

Рассмотрены особенности аспирации вспомогательного оборудования предприятий по производству цемента. Предложена установка для локализации и обеспыливания пылевыделений от оборудования.

К л ю ч е в ы е с л о в а: цементная пыль, воздух рабочей зоны, аспирация.

The article deals with the peculiarities of aspiration of auxiliary equipment at enterprises manufacturing cement. Proposed is the setting for localization and dedusting of dust released by the equipment.

K e y w o r d s: cement dust, the air of the working zone, aspiration.

Производство цемента характеризуется значительным выделением пыли в воздух рабочей зоны как от основного технологического, так и от вспомогательного оборудования, в частности от узлов пересыпки сырьевых материалов, транспортеров, упаковочных машин и т. д. [1].

Традиционными и достаточно эффективными способами снижения запыленности воздуха от вспомогательного оборудования являются: увлажнение пересыпаемых и транспортируемых материалов, уменьшение высоты их падения, охлаждение пылящих материалов, герметизация мест транспортирования и упаковки [2]. Однако применение этих мероприятий для отдельных видов оборудования не всегда возможно. Так, например, для снижения запыленности воздуха рабочей зоны оператора упаковочной машины цемента увлажнение материала недопустимо, т. к. при загрузке в мешки цемент должен иметь нормируемую влажность, ее увеличение может привести к слеживанию или комкованию готового продукта.

На рис. 1 приведены результаты исследования запыленности воздуха рабочей зоны оператора карусельной машины в зависимости от влажности упаковываемого материала.

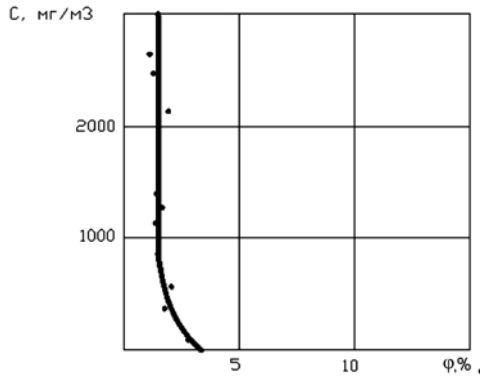


Рис. 1. Зависимость степени запыленности воздуха от влажности материала

Зависимость изменения концентрации цементной пыли в воздухе от влажности материала может быть описана следующим выражением:

$$c = 17837e^{-0,913\varphi_n}.$$

Анализ зависимости позволяет сделать вывод о том, что при работе линии упаковки в стационарном режиме и при максимально допустимой влажности цемента запыленность воздуха значительно превышает $ПДК_{рз}$. Ситуация существенно ухудшается при случайных падениях мешков и их разрывах. Однако подобное обстоятельство практически не учитывается при выборе систем аспирации. Поэтому снижение запыленности воздуха в подобных случаях может быть достигнуто посредством внедрения эффективного аспирационного оборудования, подобранного на основе исследования фракционного состава пыли, ее свойств и нештатных ситуаций, связанных с разрывами мешков.

На рис. 2 представлены результаты исследования дисперсного состава пыли в воздухе рабочей зоны оператора упаковочной линии на одном из предприятий по производству цемента Волгоградской области, которые показали, что пыль, поступающая в воздух рабочей зоны, является мелкодисперсной, диапазон изменения крупности составляет 1,8...18 мкм, средний медианный диаметр d_{50} = 9,5 мкм.

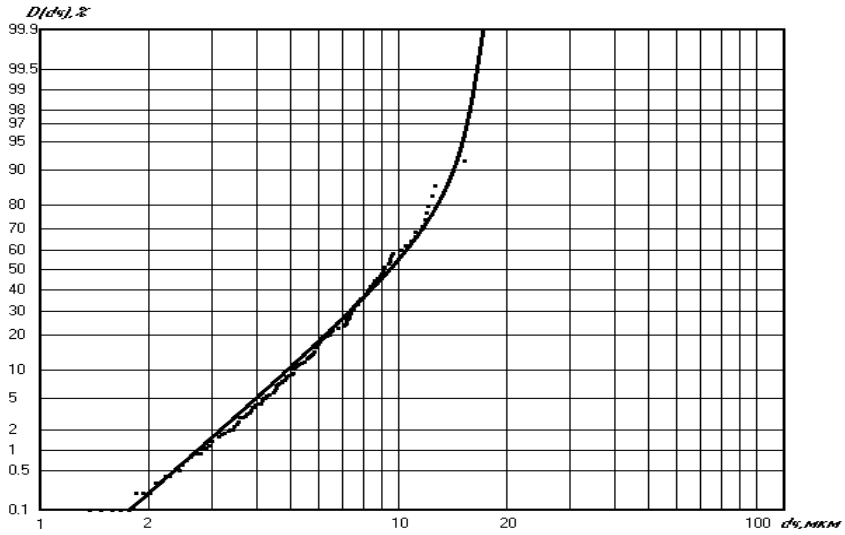


Рис. 2. Интегральная кривая распределения массы частиц по диаметрам в вероятностно-логарифмической сетке в воздухе рабочей зоны у питателя карусельной машины цемента

Анализ запыленности воздуха рабочей зоны позволяет сделать вывод о том, что встроенный местный отсос карусельной машины упаковки цемента не обеспечивает нормативные требования к качеству воздушной среды. Для определения требуемой интенсивности местного отсоса были проведены экспериментальные исследования по методу, рекомендуемому профессором В. Н. Посохиным [3], результаты исследований представлены на рис. 3.

Как показали исследования, концентрация пыли в воздухе рабочей зоны достигает значения ПДК при расходах отсасываемого воздуха от карусельной машины упаковки цемента L= 5700 м^3/ч. Для обеспечения нормативных требований к качеству воздуха рабочей зоны требуется установка дополнительного местного отсоса производительностью L= 1200 м^3/ч.

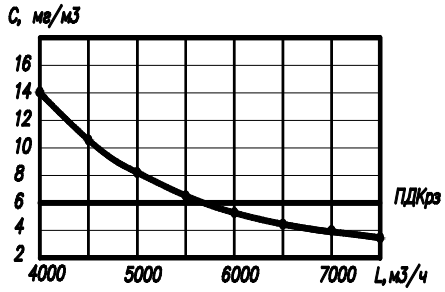


Рис. 3. Зависимость концентрации пыли в воздухе рабочей зоны от объемов воздуха, удаляемого местными отсосами от карусельной машины упаковки цемента

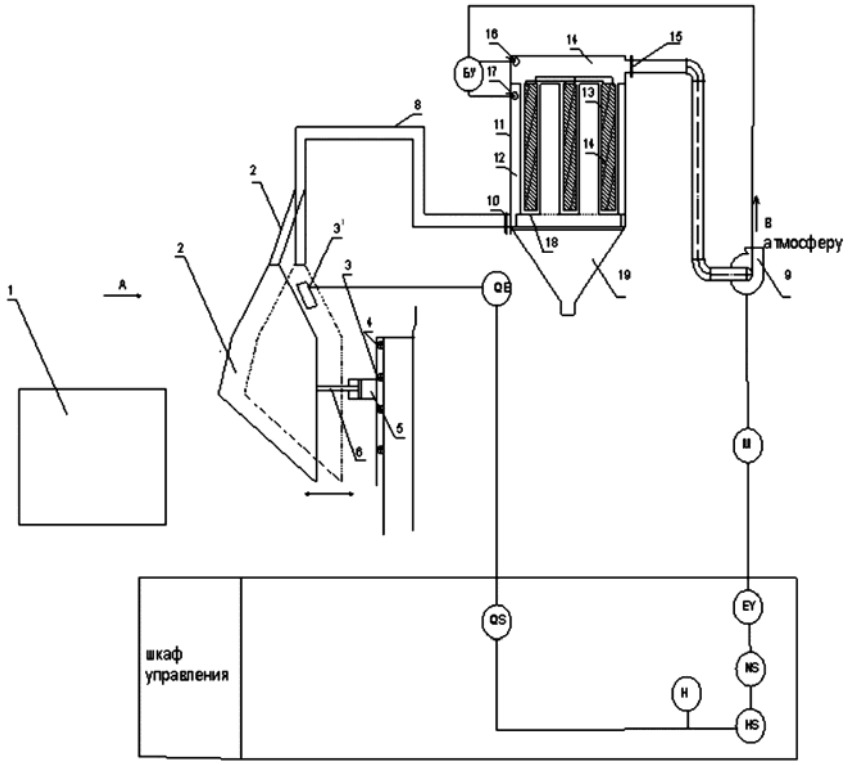


Рис. 4. Схема установки для локализации и очистки пылевых выбросов от технологического оборудования: *1* — технологическое оборудование; *2* — местный отсос; *3* — ролики; *3*[1] — датчик запыленного воздуха; *4* — направляющие; *5* — поршневой пневмопривод; *6* — шток; *7* — гибкий участок; *8* — газоход; *9* — вытяжной вентилятор; *10* — входной патрубок; *11* — рукавный фильтр; *12* — камера загрязненного воздуха; *13* — фильтровальные рукава; *14* — камера очищенного газа; *15* — выходной патрубок; *16, 17* — датчики аэродинамического сопротивления; *18* — перфорированная пластина; *19* — бункер

Для решения данной задачи было предложено устройство для локализации и очистки пылевыделений от технологического оборудования, которое состоит из местного отсоса, выполненного в виде зонта, газохода и рукавного фильтра (рис. 4) [4]. Местный отсос устанавливается на уровне, необходимом для эффективного улавливания пыли, выбивающейся из технологического оборудования. В случае падения или разрыва мешка уровень расположения местного отсоса можно изменять. Затем уловленная пыль по газоходу поступает для очистки в рукавный фильтр. С целью экономии электроэнергии предусмотрено регулирование расхода воздуха, удаляемого местным отсосом. Увеличение расхода воздуха в системе достигается изменением частоты оборотов вытяжного вентилятора с помощью частотного преобразователя EY (поз. 3), запрограммированного для нештатного режима. В момент, когда происходит резкое увеличение концентрации пыли в воздухе (например, в момент падения и разрыва мешка), сигнал от датчика QE (поз. 1) поступает на пылевой сигнализатор QS (поз. 2), затем передается на универсальный переключатель HS (поз. 5), который приводит в действие магнитный пускатель NS (поз. 4), и через частотный преобразователь изменяется расход воздуха в системе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Невский А. В., Васючкова Г. К.* Борьба с пылью на заводах ЖБИ, ЖБК : учеб. пособие. М. : ЦМИПКС, 1987. 37, [1] с.

2. *Сатарин В. И., Перли С. Б.* Движение и обеспыливание газов в цементном производстве. М. : Госстройиздат, 1960. 305 с.

3. *Посохин В. Н.* Местная вентиляция : учеб. пособие. Казань : КГАСУ, 2005. 73 с.

4. Экспериментальные исследования эффективности улавливания пыли системами аспирации / Н. В. Мензелинцева, Н. Ю. Карапузова, С. И. Стефаненко, Е. О. Фомина // Вестник ВолгГАСУ. Сер. : Стр-во и архит. 2011. Вып. 25 (44). С. 249—252.

1. *Nevskiy A. V., Vasyuchkova G. K.* Bor'ba s pyl'yu na zavodakh ZhBI, ZhBK : ucheb. posobie. M. : TsMIPKS, 1987. 37, [1] s.

2. *Satarin V. I., Perli S. B.* Dvizhenie i obespylivanie gazov v tsementnom proizvodstve. M. : Gosstroyizdat, 1960. 305 s.

3. *Posokhin V. N.* Mestnaya ventilyatsiya : ucheb. posobie. Kazan' : KGASU, 2005. 73 s.

4. Eksperimental'nye issledovaniya effektivnosti ulavlivaniya pyli sistemami aspiratsii / N. V. Menzelintseva, N. Yu. Karapuzova, S. I. Stefanenko, E. O. Fomina // Vestnik VolgGASU. Ser. : Str-vo i arkhit. 2011. Vyp. 25 (44). S. 249—252.

© Мензелинцева Н. В., Азаров В. Н., Карапузова Н. Ю., Фомина Е. О., Гладков Е. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Особенности аспирации технологического оборудования предприятий по производству цемента / Н. В. Мензелинцева, В. Н. Азаров, Н. Ю. Карапузова, Е. О. Фомина, Е. В. Гладков // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 499—502.

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 551.515.1

П. А. Аббасов, А. С. Петрашень

РАСЧЕТ ЛИВНЕВЫХ СТОКОВ ВО ВРЕМЯ ТАЙФУНОВ НА ПРИМЕРЕ ГОРОДА ВЛАДИВОСТОКА И ПРИМОРСКОГО КРАЯ

Приводятся характерные разрушения объектов городского хозяйства от действия ливневых стоков во время прохождения тайфунов на примере города Владивостока, даются предложения по расчету параметра *A* в нормах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: тайфуны, разрушения объектов города, ливневые стоки, предложения по расчету.

The authors describe typical destructions of object of municipal facilities derived from rain run-offs during typhoon by the example of Vladivostok. They provide proposals on calculation of A parameter in norms.

K e y w o r d s: typhoons, destruction of objects of municipal facilities, rain run-off, proposals on calculation.

Почти ежегодно на территорию Дальнего Востока воздействуют тропические циклоны, которые в России принято называть тайфунами. За период с 1951 по 2012 г. из более чем 1600 тропических циклонов, зародившихся в районе Филиппинских островов, 160 достигло районов Приморского края и Сахалинской области, что составляет около 10 %.

При прохождении тайфунов постоянно наблюдается затопление улиц и площадей городов и поселков, которые располагаются в пониженных участках местности. В 2012 г. южные районы Приморского края посетили тайфуны: Bolaven (29 августа) и Sanda (14 сентября). Последний тайфун вызвал подъем уровня воды от 1 до 1,5 м в реках Уссури, Арсеньевки, Илистой, Раздольной и др. В результате проливных дождей во Владивостоке было затоплено 10 улиц.

Рис. 1. Подтопление стадиона «Динамо»

Подтопление наблюдалось в районе стадиона «Строитель» на улицах Магнитогорская, Русская, Спортивная, Толстого, Калинина, Пограничная (около стадиона «Динамо») (рис. 1), в тупике Шевченко, на проспекте Красного Знамени и на площади Луговая.

Рассмотрим, почему это происходит, на примере города Владивостока.

Город располагается на сопках, что позволяет обеспечивать быстрый сброс ливневой воды поверхностным стоком. Можно предположить, что количество установленных дождеприемников на улицах незначительно. Для анализа наличия дождеприемников на улицах, проходящих по сопкам, выберем южные смежные склоны сопок Орлиное Гнездо и Буссе. Улицы, проходящие по этим склонам, имеют участки террасного типа, которые местами переходят в участки со значительными уклонами.

В основании склонов этих сопок проходит улица Светланская. Как показали исследования, на этой улице на участке от стадиона «Авангард» до сквера Пушкина имеется 81 дождеприемник. Выше по склону проходит улица Пушкина, на которой имеется 23 дождеприемника. Еще выше, на склоне сопки Орлиное Гнездо, проходят часть улицы Суханова и улица Всеволода Сибирцева, которые имеют 13 дождеприемных решеток. На склоне сопки Буссе выше улицы Пушкинской находятся улицы: Володарского с тремя дождеприемниками, Шкипера Гека, где решетки отсутствуют, и проспект Красоты с одним дождеприемником.

Можно сделать вывод, что улицы в верхней части сопок имеют очень мало дождеприемников, поэтому ливневые потоки, которые формируются на склонах, устремляются на ниже расположенные улицы, набирая значительную массу воды и приобретая большую скорость. Ливневые стоки превращаются в селевые потоки, несущие в своей струе размытый грунт и мусор. Толщина селевых отложений в конусах выноса после прошедшего тайфуна в местах концентрации потоков доходит до 0,5 м, при этом засоряется ливневая канализация. Поэтому после прошедших тайфунов для уборки селевых отложений, ликвидации размывов и засоров труб коммунальным службам города требуются значительные средства и ресурсы. Для примера на рис. 2 показаны конусы выноса селевых потоков после тайфуна «Джуди» возле стадиона «Строитель» во Владивостоке.

Рис. 2. Состояние улицы у стадиона «Строитель» после тайфуна

Винить проектировщиков в такой расстановке дождеприемников нельзя, поскольку она соответствует имеющимся нормам СНиП 2.04.03—85 «Канализация. Наружные сети», которые создавались для равнинных городов центральной России. Сложный рельеф местности учитывается нормами при определении предельной интенсивности дождя через период однократного превышения расчетной интенсивности дождя, который для особо неблагоприятных участков рельефа принимается равным 5, 10 или 20 годам. Такой подход увеличивает интенсивность дождя для низинных участков по сравнению с участками на вершинах сопок в 2…3 раза, где проектировщики и ставят основную массу дождеприемников, хотя интенсивность дождя в реальных условиях не зависит от расположения дождеприемников. Занижая интенсивность дождя для участков территории, расположенной у линии водораздела, т. е. для вершины сопки, проектировщики устанавливают меньше дождеприемников, а зачастую принимают более простое решение: не устанавливают их вообще, обеспечивая поверхностный сток. Таким образом, мы практически не улавливаем ливневые стоки на верхних ярусах, а сбрасываем их вниз, а когда они достигнут максимальной концентрации, стараемся их отводить, но это плохо получается. Дождевые стоки в условиях горного рельефа, накапливая энергию, оказывают разрушающее воздействие на конструкции инженерных сооружений и дороги. На рис. 3 показано разрушение подпорной стенки города, построенной из бетонных блоков.

Рис. 3. Разрушение подпорной стенки из бетонных блоков

Очень сильно страдают от ливневых стоков насыпи автомобильных и железных дорог. Например, в 2012 г. в июле даже от несильного ливня, вызванного южным циклоном, разрушилась вновь построенная автомобильная дорога «Седанка-Патрокл», которая являлась объектом саммита АТЭС 2012 г. во Владивостоке. Разрушение произошло из-за проникновения дождевой воды в насыпь дороги, отсыпанной скальным грунтом из нагорной канавы, что вызвало осадку основания асфальтового покрытия, а также поверхностного стока воды по самой дороге с последующим его попаданием на крутой откос, закрепленный габионами (рис. 4).

По данным администрации Приморского края, проведение восстановительных работ Тихоокеанской мостостроительной компанией потребовало вложения дополнительных денежных средств в размере тридцати миллионов рублей.

Как правило, тайфуны оставляют после себя в городах, поселках и сельской местности разрушенные объекты коммунального хозяйства, мосты, дороги, размытые и затопленные угодья. В табл. 1 приведена структура ущербов по сферам хозяйственной деятельности города Владивостока для трех тайфунов, прошедших в 1992, 1993 и 1994 гг.

Рис. 4. Разрушение дороги «Седанка-Патрокл» во Владивостоке

Согласно таблице, наибольшие ущербы наносятся дорогам и благоустройству (56 %), жилищно-коммунальному хозяйству (24 %), а на остальные сферы деятельности приходится только 20 %.

Таблица 1

Структура ущерба хозяйству г. Владивостока от воздействия тайфунов (в ценах соответствующих лет)

Сфера городского хозяйства	Полли (1992 г.)		Робин 2 (1993 г.)		Мелисса (1994 г.)		Средний процент
	ущерб		ущерб		ущерб		
	тыс. руб.	%.	тыс. руб.	%	тыс. руб.	%	
Просвещение	12590	1,3	—	—	1864	1,4	1,3
ЖКХ	178416	18,6	2310,6	37,3	21513	16,7	24
Транспорт	50157,2	5,2	—	—	517,3	0,4	2,7
Дороги и благоустройство	506019,3	52,7	3013,8	48,7	85663,3	66,3	56
ВКХ	21642,2	2,3	243,6	3,9	9687,6	7,5	4
Тепловые сети	3693	0,4	15,3	0,3	2923,6	2,3	1
Прочие объекты	183776,6	19	605,4	9,8	7022,5	5,4	11
Всего по городу	959987,3	100	6188,7	100	129209,9	100	100

Обеспечить защиту низинных участков территории города от затопления, размыва и селевых потоков можно полным сбором воды на каждом ярусе и отведением ее по трубам закрытой ливневой канализации с использованием максимальных скоростей воды. Для этого надо использовать стальные трубы, укладываемые нормально к горизонталям рельефа.

Можно усовершенствовать расчет расходов дождевых вод по нормам СНиП 2.04.03—85. Для этого предлагается отказаться от расчета параметра A с использованием формулы:

$$A = q_{20}\, 20^{n} (1 + \lg P/\lg m_{\text{г}})^{\gamma}, \qquad (1)$$

а определять его можно по формуле:

$$A = (q\, t_r^{0,44})^{0,833}, \quad (2)$$

которая получена из формулы норм:

$$q = A^{1,2} / t_r^{1,2\,n-0,1}. \quad (3)$$

В качестве интенсивности дождя q можно использовать интенсивность, полученную по полусуточному максимуму для любого населенного пункта, которая соответствует обеспеченности интенсивности осадков во время тайфунов с вероятностью 0,95, что было установлено ранее выполненными исследованиями [1].

Величина параметра A по формуле (2) определена для городов Приморского края и приведена в табл. 2, интенсивность дождя определялась по полусуточному максимуму.

Использование данной методики позволит более точно определить расчетные расходы дождевых вод, которые соответствуют проходящим над Приморским краем тайфунам, поскольку из расчета исключается интенсивность осадков в диапазоне двадцати минут, которая имеется в формуле 1. Определение данной интенсивности сопряжено с большими трудностями, так как необходимы длинные ряды наблюдений (более 20 лет) по самопишущим дождемерам, которые на метеостанциях Приморского края и Сахалинской области имеются в ограниченном количестве.

Таблица 2

Город	A, л/с·га	Город	A, л/с·га
Владивосток	452	Спасск-Дальний	543
Находка	452	Арсеньев	370
Артем	476	Дальнегорск	370
Уссурийск	446	Партизанск	484
Лесозаводск	454	Дальнереченск	327

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аббасов П. А., Петрашень А. С.* Тайфуны с позиции строителя. Владивосток : Дальнаука, 2008. 168 с.

1. *Abbasov P. A., Petrashen' A. S.* Tayfuny s pozitsii stroitelya. Vladivostok : Dal'-nauka, 2008. 168 s.

© Аббасов П. А., Петрашень А. С., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Аббасов П. А., Петрашень А. С. Расчет ливневых стоков во время тайфунов на примере города Владивостока и Приморского края // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 503—507.

УДК 628.35

Л. Н. Губанов, Д. В. Бояркин

ОСОБЕННОСТИ ОБЕЗВРЕЖИВАНИЯ ОСАДКОВ СТОЧНЫХ ВОД МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Рассмотрены особенности обезвреживания осадков сточных вод, образующихся на очистных сооружениях малых населенных пунктов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: осадок сточных вод, обезвреживание, малый населенный пункт.

Приведен пример проекта обезвреживания осадков малого населенного пункта с использованием аминокислотных композиций.

The authors consider peculiarities of neutralization of sewage sludge in small settlements using amino-acid composites.

K e y w o r d s: sewage sludge, neutralization, small settlements.

На кафедре экологии и природопользования Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета (ННГАСУ) разработана технология обезвреживания и утилизации осадков сточных вод [1, 2]. Данная технология в основном адаптирована к крупным промышленным городам, характеризующимся большим объемом осадков, наличием в них тяжелых металлов и других токсичных веществ, т. е. требующим одновременно дегельминтизации и детоксикации.

В этой связи большой интерес представляют исследования по обезвреживанию осадков очистных сооружений малых населенных пунктов (МНП): малых городов и поселков, крупных, больших и средних сельских поселений. Данные административные образования с численностью населения до 50 тысяч человек составляют большинство населенных пунктов страны. При этом, на очистных сооружениях МНП образуется до 30 % всех осадков сточных вод (СВ), проблема обработки и утилизации которых стоит не менее остро, чем в крупных промышленно развитых городах. МНП, находясь на большом удалении от крупных городов, как правило, имеют недостаточно эффективно работающие, морально и технически устаревшие системы очистки СВ.

Промышленность в МНП обычно представлена предприятиями агропромышленного профиля: хлебозаводы, молокозаводы, консервные заводы и т. д., сточные воды которых по составу близки к бытовым. Иногда в МНП присутствуют предприятия машиностроительного профиля, СВ которых содержат токсичные соединения, главным образом — ионы тяжелых металлов. Однако концентрации тяжелых металлов в осадках СВ могут оставаться незначительными или находиться на уровне ПДК металлов в почвах.

Осадки СВ, образующиеся на очистных сооружениях МНП, по составу, характеру загрязнений и бактериальной обсемененности значительно отличаются от осадков промышленных городов. Практически во всех МНП выпуск СВ осуществляется в малые реки либо на рельеф местности. Малые реки обладают низкой буферной емкостью, поэтому попадание в них даже небольшого количества необезвреженных СВ или осадков СВ может привести к экологической катастрофе. Выделенные осадки СВ складируются в непо-

средственной близости от сельскохозяйственных угодий или в поймах водоемов, не вывозятся и не утилизируются. Складирование выделенных осадков в непосредственной близости от сельхозугодий создает предпосылки для несанкционированного использования их в качестве удобрений, что может привести к заражению и отчуждению пахотных почв. Вместе с тем, использование осадков СВ, обезвреженных в соответствии с современными природоохранными и техническими требованиями, помогает решить ряд вопросов, связанных с увеличением плодородия почв, снижения площади полигонов, занятых под осадки СВ, без негативных последствий для человека и окружающей среды. В связи с этим проблема обезвреживания таких осадков имеет свою специфику. Она заключается в следующем:

небольшой объем образующихся осадков;

высокая концентрация микроорганизмов, в том числе яиц гельминтов, что делает их в санитарном отношении более опасными, чем осадки СВ крупных промышленных городов;

возможность наличия в осадках отходов животноводческих ферм и продуктов переработки сырья агропромышленного комплекса;

осадки нуждаются только в обеззараживании, дегельминтизации;

приближенность очистных сооружений к сельскохозяйственным угодьям;

большая возможность несанкционированного использования необезвреженных осадков в качестве удобрения в частном и государственном хозяйстве;

более высокая удобрительная ценность осадков;

возможность производства аминокислотных композиций из местных отходов агропромышленного комплекса (пух, перо, кожа и т. д.) с минимальными затратами;

небольшой объем реагентов, необходимых для обезвреживания осадков (10—20 л/сут в зависимости от количества осадка и его бактериальной загрязненности);

незначительные затраты на транспортирование обезвреженного осадка (почвоулучшающей композиции) к месту потребления.

В связи с этим, основные задачи обработки и утилизации осадков очистных сооружений малых населенных пунктов могут быть сведены к следующему:

разработка высокоэффективных, экологически безопасных, комплексных технологий переработки осадков: очистка сточных вод — производство реагента — обезвреживание осадка (получение почвоулучшающей композиции) — утилизация полученной композиции в качестве удобрения в сельском хозяйстве, для улучшения плодородия почвы;

создание блочно-модульной унифицированной технологии с оптимизацией систем обработки осадков на каждом уровне;

обеспечение высокой степени надежности установок, низкая стоимость строительства и эксплуатации.

В соответствии с данными задачами ННГАСУ разработан проект узла обезвреживания и переработки в почвоулучшающую композицию осадков сточных вод города Сергача (Нижегородская область), позволяющий использовать осадки в качестве удобрения на сельскохозяйственных угодьях.

Очистка сточных вод и обработка осадков осуществляется на очистных сооружениях города, введенных в эксплуатацию в 1989 г.

Сточная вода, поступающая на очистку, состоит из хозяйственно-бытовых стоков жилищного сектора, общественно-административных зданий, бани, а также стоков прачечной г. Сергача. Возможно поступление поверхностных стоков через горловины колодцев на самотечных участках сети. Также на очистные сооружения автотранспортом вывозятся отходы из выгребных колодцев в сливную станцию, расположенную на площадке очистных сооружений. Сточные воды промпредприятий отсутствуют. Очищенные стоки по трубопроводу, а далее каналу сбрасываются в р. Пьяна.

Проектная производительность сооружений 4200 $м^3$/сут. БПК до и после очистки — соответственно 200 и 15 мг/л.

Очистка сточных вод и обработка осадков осуществляется по следующей схеме: сточные воды города от главной насосной станции поступают в приемную камеру, туда же насосами периодически подается сточная вода из сливной станции, в которую автотранспортом вывозят отходы из выгребных колодцев неканализованной части г. Сергача. Далее сточная вода проходит песколовки с круговым движением воды (2 шт.). Осадок из песколовок удаляется гидроэлеваторами с использованием воды после вторичных отстойников, которая подается насосом на песковую площадку. В лотке после песколовок установлены три решетки с ручной очисткой для удержания сора. После решеток установлен измерительный водослив.

Сточная вода из лотка распределяется на четыре аэротенка (переоборудованные двухъярусные отстойники). Сжатый воздух в аэротенки подается из компрессорной, в которой установлены пять компрессоров (ВК-12М1, четыре рабочих и один резервный). Распределение воздуха в аэротенки происходит через стальные дырчатые трубы.

Избыточный активный ил из вторичных отстойников подается в осадкоуплотнитель, где происходит его дополнительное уплотнение. Уплотненный осадок периодически выпускается на иловые площадки для подсушивания. Дренажные воды иловых площадок насосами направляются в приемную камеру очистных сооружений.

Осадок, направляемый на иловые площадки, является экологически опасным отходом, что определяется в первую очередь наличием в нем патогенной микрофлоры и яиц гельминтов. В то же время осадок содержит в своем составе ценную органическую и минеральную составляющую, обуславливающую высокую удобрительную способность осадка. Поэтому наиболее целесообразным методом утилизации осадка является его использование в качестве удобрения, для чего необходимо провести антибактериальную обработку и дегельминтизацию осадка.

В соответствии с проектом узла обезвреживания обработка осадков производится следующим образом.

Для обеззараживания осадка в помещении существующей компрессорной станции очистных сооружений предусмотрен узел приготовления и дозирования антибактериального реагента — гидроксоаминокислотных комплексов меди — получаемого из белоксодержащих отходов производств.

Дозирование реагента производится в иловый трубопровод перед осадкоуплотнителем, что позволяет обеспечить надлежащее перемешивание и время контакта реагента с осадком.

Расчетная доза одномолярной аминокислотной композиции 0,4…0,5 л/м^3 осадка влажностью 99,3 %. Расход реагента при этом составит 7,84…9,8 л/сут.

В качестве расходных баков предусматриваются две пластмассовые емкости по 0,205 м^3 каждая (рабочая и резервная). Для подачи аминокислотной композиции из расходных баков устанавливаются два насоса марки НД 1,0 Р 6,3/100 (рабочий и резервный).

В зависимости от кислотности осадка, в расходных баках композиции, предусматривается корректировка pH раствором NaOH.

Следует отметить, что в результате обработки осадков часть аминокислотных реагентов остается в жидкой фазе и с иловой водой после иловых карт или с фугатом после механического обезвоживания осадка возвращается в голову очистных сооружений и может оказывать ингибирующее действие на биохимические процессы в аэротенках. Однако исследования, проведенные ННГАСУ в полупромышленных условиях, показали, что остаточные количества аминокислотных композиций не оказывают негативного, ингибирующего действия на активный ил, а в некоторых случаях, напротив, приводят к увеличению окислительной способности активного ила, и, как следствие, к повышению эффективности очистки сточной жидкости.

В результате обработки с помощью аминокислотной композиции осадок превращается из биологически зараженного, экологически-опасного отхода в безопасное сырье. Применение аминокислотных композиций позволило принять для обезвоживания образующихся осадков менее трудоемкие и более дешевые иловые площадки на естественном основании с поверхностным отводом воды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Губанов Л. Н., Бояркин Д. В.* Обезвреживание и утилизация осадков городских очистных сооружений. Н. Новгород : Нижегород. гос. арх.-стр. ун-т, 2006. 362 с.

2. *Губанов Л. Н., Бояркин Д. В., Филин В. А.* Технология обезвреживания и утилизации осадков городских сточных вод // Инновации. 2009. № 3(125), март. С. 32—35.

1. *Gubanov L. N., Boyarkin D. V.* Obezvrezhivanie i utilizatsiya osadkov gorodskikh ochistnykh sooruzheniy. N. Novgorod : Nizhegorod. gos. arkh.-str. un-t, 2006. 362 s.

2. *Gubanov L. N., Boyarkin D. V., Filin V. A.* Tekhnologiya obezvrezhivaniya i utilizatsii osadkov gorodskikh stochnykh vod // Innovatsii. 2009. № 3(125), mart. S. 32—35.

© Губанов Л. Н., Бояркин Д. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Губанов Л. Н., Бояркин Д. В. Особенности обезвреживания осадков сточных вод малых населенных пунктов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 508—511.

УДК 550.344.42-047.43

Г. Л. Кофф

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РИСКА ЦУНАМИ НА ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЯХ (НА ПРИМЕРЕ ГОРОДОВ И НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ ДАЛЬНЕВОСТОЧНОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА РФ)

Последствия землетрясения и последовавшего за ним цунами, обрушившегося на северо-восточное побережье Японии в марте 2011 г., в очередной раз напомнили о необходимости учитывать возможные риски, связанные с этим явлением, при планировании деятельности в прибрежной зоне. В отличие от оценки опасности цунами, оценивание риска цунами производится в России впервые. В мировой практике подобные оценки достаточно редки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оценки риска, цунами, землетрясение, наводнение, глубинное строение и сейсмотектоника территорий.

The consequences of the earthquake and the following tsunami that struck the north-east coast of Japan in March 2011 reminded of the need to consider possible risks associated with this process when planning activities in the coastal zone. Unlike the tsunami hazard evaluation, evaluation of tsunami risk is carried out in Russia for the first time. In the world practice such assessments are quite rare.

K e y w o r d s: risk evaluation, tsunami, earthquake, flood, deep structure and seismotectonics of territories.

По данным ЮНЕСКО, на побережьях океанов и морей проживают примерно 70 % жителей планеты. К этому числу следует добавить посетителей многочисленных курортов, любителей встречать Новый Год на экзотических океанских островах и искателей экваториального экстрима. Все эти люди могут оказаться в зоне действия одной из океанических катастроф, среди которых волны цунами являются наиболее изученными.

Сегодня во многих странах Тихоокеанского региона — в России, Японии, США, Чили — действуют службы предупреждения о цунами. Российская система включает два Центра цунами, расположенные в Петропавловске-Камчатском и Южно-Сахалинске и подчиненные соответствующим Управлениям Госкомитета по гидрометеорологии России. Оперативную сейсмическую информацию центры цунами получают от сейсмостанций, которые осуществляют круглосуточные наблюдения в рамках Геофизической службы Российской академии наук. В СССР на Дальневосточном побережье функционировало 6 таких специализированных сейсмических станций.

Вот главные, первоочередные задачи ближайших лет по оценке риска цунами: исследование глубинного строения и сейсмотектоники территорий, в том числе сейсмоактивных глубинных разломов; детальное районирование прибрежных территорий по опасности цунами (в масштабе 1:200 000…1:500 000); составление кадастров морских берегов; картирование и анализ инфраструктуры морских территорий; разработка рекомендаций по строительству, долгосрочному развитию и освоению территорий в цунамиопасных районах; разработка нормативно-правового обеспечения для проектов цунамибезопасности; создание средств цунамизащиты.

В отличие от оценки опасности цунами, оценивание риска цунами производится в России впервые, да и в мировой практике подобные оценки достаточно редки.

Величина ущерба при затоплении зависит от плотности населения, экономической развитости территорий, т. е. практически от величины проживающего населения. При оценке ущерба от наводнения при цунами обычно различают прямые и косвенные потери.

Виды прямого ущерба: повреждения и разрушения жилых и производственных зданий, железных и автомобильных дорог, линий электропередач и связи, складов, свалок, хранилищ топлива; гибель скота и урожая сельскохозяйственных культур, уничтожение сырья, топлива, продуктов питания, кормов, удобрений и т. д.; затраты на эвакуацию населения и перевозку материальных ценностей, на приобретение и доставку в пострадавшие районы продуктов питания, строительных материалов и т. д.; затраты на восстановление смытого слоя почвы.

Виды косвенного ущерба: сокращение выработки продукции, ухудшение условий жизни населения, увеличение расходов на содержание зданий и т. д.

Прямой и косвенные ущербы могут находиться в соотношении 1:10.

Устойчивость геологической среды в береговой зоне определяется рядом факторов, в число которых входят: тектоническая позиция участка, литолого-петрографическая характеристика пород, проницаемость и трещиноватость пород (в том числе подстилающих придонную терригенную толщу). Проницаемость и трещиноватость пород (в том числе литогенетическая, тектоническая и связанная с гидродинамическим и сейсмогенным перемещением наносов) определяют, в частности, интенсивность газопроявлений.

Наряду с перечисленными факторами устойчивости большую роль играют особенности рельефа, в том числе приуроченность той или иной зоны к мульдам; локальные повышения, определяющиеся характером складчатости и близостью ко дну неогеновых пород; эрозионные палеодолины; склоны; выровненные поверхности.

Опасность цунами H оценивается совокупностью региональных и субрегиональных факторов [1] и локальных факторов (морфоструктурного типа береговой зоны и др.).

Уязвимость береговой зоны $v(H)$ характеризуется плотностью населения (a, чел./км^2), плотностью застройки (c, м^2/км^2), плотностью основных производственных фондов (млн р./км^2), балансовой стоимостью имущества, жилья, дорог, мостов и т. д.

Риск R определяется как вероятностная мера потерь, установленная для участка береговой зоны за определенное время:

$$R = P(H) \cdot P(F/H),$$

где $P(H)$ — вероятность опасности; $P(F/H)$ — вероятность потерь (уязвимость) участка береговой зоны при реализации опасности.

Риск может оцениваться как усредненный среднемноголетний ущерб Y:

$$Y(H) = P(H) \cdot v(H) \cdot V(H) \cdot D,$$

где $v(H)$ — интенсивность опасности для участка береговой зоны (уязвимость участка); $V(H)$ — степень уязвимости (вероятность разрушения объектов); D — балансовая стоимость объектов на участке береговой зоны.

С целью выявления и ранжирования природных факторов реализации опасностей сейсмогенных волн цунами нами в 1962—1966 гг. (г. Усть-Камчатск), в 1994—1995 гг. (Курильские острова Кунашир, Итуруп, Шикотан), в 2002—2004 гг. (г. Вилючинск) и в 2006 г. (о. Шикотан) изучались природные факторы береговой зоны, определяющие реализацию риска сейсмогенных волн цунами. В результате была выделена система зональных и локальных факторов риска [2, 3].

В числе первых, как наиболее значимые, были выделены характер подводного берегового склона (обрывистый, крутой или пологий), наличие подводной аккумулятивной отмели (в контексте отчета не рассматривается) и экспозиция соответствующего берегового участка по отношению к расположению эпицентра цунамигенного землетрясения (выделяются участки, расположенные по отношению к эпицентру под углами: 0, 0…90, >90°).

В числе локальных факторов риска наиболее значимы: наличие или отсутствие пляжа и (или) широкой первой морской террасы, наличие или отсутствие прорезающих бухту речных долин, степень открытости бухты по отношению к свободной акватории. При априорных оценках риска цунами последний может определяться соотношением

$$R = 2\ (kco),$$

где k — коэффициент значимости зонального или локального фактора при формировании риска, co — вес вклада конкретной разновидности фактора в формирование риска для всех факторов.

При априорных оценках риска цунами последний может определяться соотношением

$$R = \sum(k\ ώ),$$

где k — коэффициент значимости зонального или локального фактора при формировании риска; ώ — вес вклада конкретной разновидности фактора в формирование риска для всех факторов.

Устанавливается достаточно четкая линейная (или слабовыраженная параболическая) зависимость между значениями $\sum$ и высотами заплеска. Подобная зависимость еще более явна при анализе связи между значениями $\sum$ и величинами горизонтального заплеска волн цунами.

Оценка риска цунами производилась по методике, предложенной [4]. При этом учитывались следующие характеристики: характер подводного берегового склона, экспозиция берега по отношению к цунами, наличие пляжа или первой морской террасы, наличие речных долин в тыловой части бухты, степень открытости бухты.

В целом залив Находка и залив Восток имеют одинаковые показатели цунамиопасности — 28,2 балла. Однако в пределах этих заливов выделяются отдельные бухты, имеющие повышенные оценки риска цунами. В заливе Находка к ним относятся бухты Попова, Новицкого и Мусатого. В заливе Восток наибольшую цунамиопасность имеют бухты Гайдамак, Средняя, Подосенова. Необходимо отметить, что бухты в заливе Восток имеют более высокие значения показателей опасности проявления цунами. Из бухт, не входящих в данные заливы, следует отметить бухты Врангеля, Ливадия, Анны, Открытая. С нашей точки зрения максимального проявления волн цунами следует ожидать в бухтах Гайдамак, Подосенова.

Условно по степени цунамиопасности можно выделить три группы бухт: низкая (до 26 баллов), средняя (26…34 балла) и высокая (более 34 баллов) опасность. К первой группе относится бухта Находка, что связано с ее закрытостью от предполагаемого направления распространения волны. Ко второй группе относятся бухты Козьмино, Тунгус, Попова, Прогулочная, Прозрачная, Козина, Литовка, Восток, Рифовая и оз. Лебединое. В третью группу входят бухты Врангеля, Подосенова, Средняя, Гайдамак, Ливадия, Анна, Открытая. Определяющими факторами их повышенной цунамиопасности являются крутой подводный склон и открытость бухт к предполагаемому направлению распространения волн цунами.

Авторами выполнена оценка значимости зональных и локальных факторов формирования параметров риска цунами: высоты заплеска волны цунами над урезом и величины горизонтального заплеска. Работа выполнена с помощью корреляционного и регрессионного анализа по пяти выборкам: выборка 1 включает все семнадцать бухт, исследованные авторами в июне 2009 г., выборка 2, так называемый первый кластер, включающий бухты в заливе Петра Великого, выборка 3 — второй кластер бухты на восточном, северо-восточном побережье Приморского края, расположенные ближе всего к эпицентрам цунамегенных землетрясений, выборка 4 — бухты третьего кластера, расположенные на удаление от эпицентров цунамигенных землетрясений, выборка 5 — группа бухт, характеризующихся наиболее существенными значениями высоты заплеска и горизонтального заплеска (Валентин, Моряк-Рыболов, Рудная Пристань, Каменка и Пластун, Терней и Джигит).

Первая выборка включает бухты, существенно различные по сейсмологическим, геоморфологическим, тектоническим и гидрогеографическим параметрам. Естественно, что коррелятивные зависимости оказались невысокими. Более яркими оказались зависимости между факторами риска цунами и параметрами цунами. Здесь наибольшую роль играет наличие на фронте бухты пляжа или широкой первой террасы, а также экспозиция берегового участка по отношению к коэффициенту цунамигенного землетрясения.

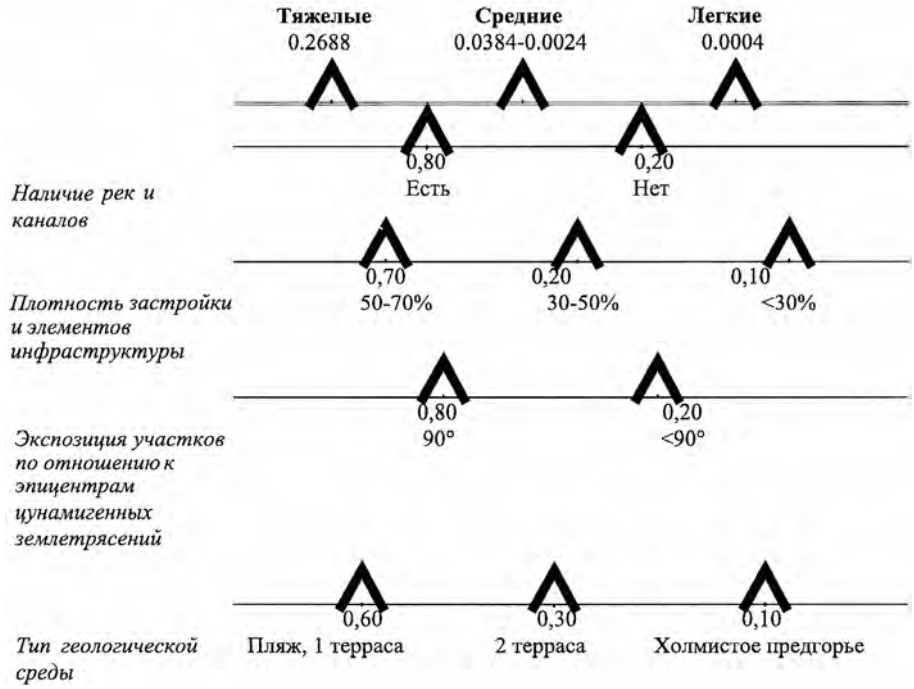
Впервые для указанных территорий выполнена характеристика цунамиопасности побережий. Анализ полученных материалов позволил выделить наиболее цунамиопасные зоны и рекомендовать использование определенных участков из планируемой застройки.

Наличие плоской низкой морской террасы и многочисленных устьев рек безусловно способствовало высокому и широкому заплеску волны цунами. Склоны, прорезанные оползневыми распадками, провоцировали повышенную сотрясаемость территории. Речные долины таких рек, как Нанокита, Натори, Фунаока и др. способствовали углублению и лучшему распространению волн цунами. Многочисленные болота в долинах р. Абукумы, Манакиты и других рек ухудшали инженерно-геологические условия местности. Обилие населенных пунктов на низкой голоценовой террасе, покрытой крупными озерами (Огаваро, Такахоко и др.) повышало ущерб от волн цунами. Близость Японского желоба определила быстроту распространения волн цунами и их повышенное количество в единицу времени.

Эти факторы непременно следовало учесть при разработке территориальных планов застройки территории и планировании защиты от опасных процессов и готовности к спасению населения при землетрясениях и цунами. Таким образом, столь сильные разрушения и столь многочисленные

человеческие жертвы были бы предотвращены, если бы перед застройкой было выполнено районирование территории по риску цунами с выделением участков распространения наиболее ущербообразующих факторов, к числу которых относятся: пологий береговой склон, неблагоприятная экспозиция береговых участков по отношению к эпицентру цунамигенного землетрясения, наличие пляжа и широкой первой террасы, наличие речных долин, а также высокая степень открытости залива.

Цунами и землетрясения при формировании ущерба испытывают влияние управляющих признаков: литогенной основы, физико-географического положения населенных пунктов, поверхностной гидросферы, а также типа застройки и элементов инфраструктуры, включая дороги, плотность застройки, экспозицию застройки и линейных объектов по отношению к эпицентрам цунамигенных землетрясений. При проведении статистической обработки данных авторы использовали метод генератора гипотиз [5]. Исходные данные были представлены в бинарной системе, что позволило упростить поиск вероятности определенных событий в зависимости от сочетаний управляющих признаков — причин. В качестве событий рассматривалась степень разрушений зданий и сооружений, в том числе трубопроводов. Диагностическая матрица представлена в виде вероятностного дерева (рис.).



Вероятностное дерево факторов риска цунами на восточном побережье о. Хонсю

Из факторов риска ущерба цунами для исследуемой территории на данном этапе рассматривались следующие: тип геологической среды, экспозиция берега по отношению к эпицентру цунами, плотность застройки и инфраструктуры, наличие русел рек и каналов, способствующих продвижению волны вглубь суши.

На изученной территории выделено 3 основных типа геологической среды: первая аккумулятивная морская терраса, морфологически представляющая пляж; вторая аккумулятивная морская терраса, превышающая пляж на 2…4 м. Эта терраса делится на участки шириной от 15…40 до 50…100 м, ширина и высота участков зависят от аккумуляции переносимого вдоль берега песчано-галечникового материала, а также от степени размыва и разрушения берега волнами. К третьему типу геологической среды относятся низкогорья, характеризующиеся холмистым рельефом.

Террасовый комплекс и низкогорья прорезаются речными долинами и искусственными каналами. Пространственное расположение элементов вероятностного дерева сопровождается указанием вероятности проявления соответствующих признаков. Последовательность выделения на вероятностном дереве управляющих признаков — от наиболее влиятельных до наименее влиятельных с позиции ущербообразования. Каждый признак оценивается вероятностями встречаемости в пределах тех или иных территорий. Так, с вероятностью 0,6 деформированные здания расположены на пляже и первой морской террасе, а с вероятностью 0,8 — вблизи реки или канала. Вероятностное дерево завершается «кроной» — подразделенной вероятностной характеристикой распространения разрушенных или поврежденных объектов: зданий, фрагментов трубопроводов, а также движимыми объектами (автомашинами, кораблями и др.). Перемножение вероятностей проявления различных факторов подразделяет разрушения и повреждения объектов на тяжелые, средние и слабые.

Качественный анализ соотношения вероятности влияния ущербообразующих факторов на проявление деформаций показал следующий убывающий по степени влиятельности ряд: тип геологической среды —► плотность застройки и коммуникаций, в том числе дорог —► амортизация (физический износ) —► влияние близости подземных сооружений —► режим грунтовых вод —► влияние сейсмичности.

Таким образом, анализ вероятностных графов показывает, что среди многочисленных природных и техногенных ущербообразующих признаков к числу наиболее влиятельных относятся тип геологической среды, плотность застройки и плотность коммуникаций, наличие на участке рек или каналов. Весьма значащим признаком является возраст здания, определяющий амортизацию сооружения. При этом ущербообразующая роль геологической среды возрастает при сильных деформациях типа крена. Средние деформации во многих случаях, вероятно, сглаживаются под влиянием амортизации (износа).

При дальнейших, более крупномасштабных исследованиях в природные характеристики должны входить качественные и количественные оценки рельефа, подземных вод, геологического строения. Важным фактором, определяющим прохождение цунами, является характер подводного склона (обрывистый, крутой или пологий), а также степень открытости участка берега (бухты).

В градостроительные характеристики могут быть включены площадные показатели (плотность застройки), линейные (дороги, подземные коммуникации, трубопроводы) и локальные (точечные — отдельные источники загрязнения, подземные сооружения). Интегральным выражением градостроительных нагрузок является функциональное зонирование территории: историче-

ская, селитебная, промышленная зоны, дорожная сеть, незастроенная территория (в ячейку введено соотношение площадей различного назначения). В характеристики застройки входят также: материал, возраст, плотность и этажность, наличие и тип фундамента, элементы подземной инфраструктуры города (газо-, водо-, теплопроводы, электро- и канализационная сеть, ливневая канализация, тоннельные коллекторы, пешеходные переходы).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оценка риска цунами и сейсмического риска береговых зон Сахалинской области / Г. Л. Кофф, Б. В. Левин, Е. Н. Морозов, О. В. Борсукова. М. — Южно-Сахалинск, 2005.

2. *Кофф Г. Л.* Оценка риска цунами Южно-Сахалинска. Южно-Сахалинск, 2005.

3. *Кофф Г. Л., Иванова А. М.* Оценка риска цунами морской береговой зоны Сахалинской области (1 этап). Матрица оценки риска цунами и предварительная карта-схема типизации берегов (на примере морской береговой зоны о. Шикотан). Южно-Сахалинск — М., 2006.

4. *Кофф Г. Л., Ганзей К. С.* Оценка риска цунами. Владивосток : Дальнаука, 2007.

5. *Кофф Г. Л., Чеснокова И. В., Борсукова О. В.* Анализ и последствия разрушительного цунами и землетрясения на восточном побережье острова Хонсю в Японии и зонирование территории по факторам риска. Владивосток : Дальнаука, 2011.

1. Otsenka riska tsunami i seysmicheskogo riska beregovykh zon Sakhalinskoy oblasti / G. L Koff, B. V. Levin, E. N. Morozov, O. V. Borsukova. M. — Yuzhno-Sakhalinsk, 2005.

2. *Koff G. L.* Otsenka riska tsunami Yuzhno-Sakhalinska. Yuzhno-Sakhalinsk, 2005.

3. *Koff G. L., Ivanova A. M.* Otsenka riska tsunami morskoy beregovoy zony Sakhalinskoy oblasti (1 etap). Matritsa otsenki riska tsunami i predvaritel'naya karta-skhema tipizatsii beregov (na primere morskoy beregovoy zony o. Shikotan). Yuzhno-Sakhalinsk — M., 2006.

4. *Koff G. L., Ganzey K. S.* Otsenka riska tsunami. Vladivostok : Dal'nauka, 2007.

5. *Koff G. L., Chesnokova I. V., Borsukova O. V.* Analiz i posledstviya razrushitel'nogo tsunami i zemletryaseniya na vostochnom poberezh'e ostrova Khonsyu v Yaponii i zonirovanie territorii po faktoram riska. Vladivostok : Dal'nauka, 2011.

© Кофф Г. Л., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Кофф Г. Л. Методика оценки риска цунами на городских территориях (на примере городов и населенных пунктов Дальневосточного федерального округа РФ) // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 512—518.

УДК 628.543

И. И. Павлинова, А. С. Крупский

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИЗБЫТОЧНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ФОСФОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ

Описан путь создания высокоэффективной системы биологического удаления избыточного фосфора из городских и промышленных сточных вод культивированием микроорганизмов активного ила.

К л ю ч е в ы е с л о в а*:* фосфор, биологическая очистка сточных вод, активный ил.

In this article the authors describe the development of highly effective biological methods of urban and industrial sewage treatment from odd phosphorus compounds by cultivating of microorganisms of activated sludge.

K e y w o r d s: phosphorus, biological sewage treatment, activated sludge.

В настоящее время актуальной проблемой является защита водных бассейнов от загрязнения и истощения, что требует достижения высокого качества очистки городских и производственных сточных вод. Основными видами их загрязнений являются углеродные, азотные и фосфорные соединения. Особо неблагоприятное воздействие на водные бассейны оказывают фосфорные составляющие загрязнений, приводящие к эвтрофикации водоемов. Вследствие чего для оздоровления водных объектов требуется разработка приемов совершенствования очистки коммунальных и производственных сточных вод по снижению содержания фосфора. Наиболее предпочтительным с этой точки зрения является биотехнологический способ дефосфатации [1, 2, 3]. Сущность этого способа состоит в том, что отдельные виды микроорганизмов активного ила в определенных условиях их культивирования поглощают фосфаты из сточной воды и выводят их из очистных сооружений вместе с избыточной биомассой. Способ дефосфатации с использованием активного ила не требует дополнительных капитальных и эксплуатационных затрат, что дает большие преимущества перед другими способами. Однако технология этого вида очистки в промышленных масштабах до настоящего времени не отработана и применяемые способы недостаточно эффективны.

В исходных сточных водах, подаваемых на очистку, фосфор находится в форме полифосфатов и ортофосфатов. В основном это полифосфаты в виде моющих растворов и ортофосфаты, которые являются производными процессов гидролиза полифосфатов и составляют 20…35 % от общего фосфора. Концентрация общего фосфора для производственных сточных вод составляет от 5 до 16 %, но в основном 8 %.

В ходе экспериментальных исследований было установлено, что бактерии рода Acinetobacter, Arthrobacter, Hyphomicrobium и Sphaerotilus natans (P-бактерии) обладают повышенной способностью к аккумулированию фосфатов.

Исследования по определению путей биологического удаления избыточного фосфора из сточных вод проводились в серии аэрационных бассейнов различного объема — от лабораторных до промышленных.

В работе использовались практически все применяемые в настоящее время типы диффузоров, различающихся размерами, образующихся в момент отрыва пузырей воздуха, подаваемого в воду (от 1 до 6 мм).

Перенос кислорода в бассейнах характеризовался коэффициентом массопереноса кислорода *Kla*, при этом определялась корреляционная зависимость этого фактора от геометрических параметров бассейна и расхода воздуха, подаваемого на аэрацию.

Критерии экстраполяции циркуляции и переноса кислорода сравнивались с известными критериями, используемыми в настоящее время при проведении исследований.

Ввиду того что температура воды в процессе испытаний аэрационных бассейнов была различной, полученные результаты *Kla* приводились к температуре 20 °С с использованием уравнения:

$$Kla.20\ ^\circ C = Kla_{(T)} \cdot 1{,}024^{(20-T)}. \quad (1)$$

Для определения концентрации растворенного кислорода использовались два датчика: один располагался на глубине 10…15 см от поверхности, другой — на половине глубины $H/2$.

При выполнении работы был проведен комплекс экспериментально-технологических исследований с целью определения функционирования аэрационных сооружений, определения влияния на гидродинамические и массообменные процессы различного рода воздействий и оценки эффективности предлагаемых технологических и конструктивных решений по повышению эффективности изучаемых процессов.

Полученная информация с целью определения ее надежности подвергалась проверке по ряду критериев: возможности объединения нескольких выборок, однородности полученных данных и исключения их выбросов, определения полей допуска с заданной вероятностью риска не менее 95 %. Результаты экспериментальных работ использовались для анализа только в тех случаях, когда полученные статистические оценки удовлетворяли требованиям совмещенности, эффективности и состоятельности.

Биологическое удаление фосфора связано с двумя явлениями:

1) классическое удаление фосфора бактериальной ассимиляцией (1…2 % *P* по массе летучих взвешенных веществ);

2) биологическая дефосфатация, основанная на накоплении фосфора биомассой сверх метаболической необходимости роста (рис. 1).

Принцип биологического сверхнакопления основан на массопереносе фосфора из исходного стока к активному илу. Это накопление осуществляется фосфорпогощающими микроорганизмами.

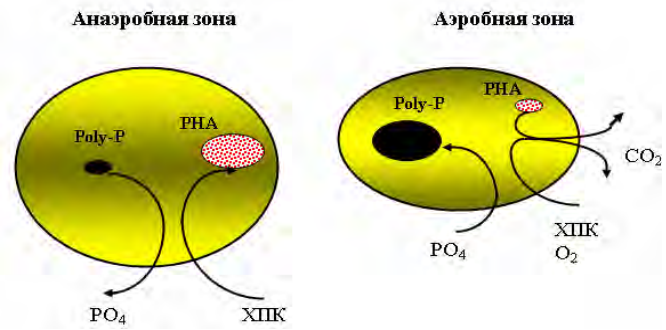


Рис. 1. Биологические механизмы в процессе различных фаз дефосфатации

Изменение концентраций фосфора зависит от температурных условий. Увеличение температуры до 40 °С приводит к более значительному снижению концентрации фосфора, которое достигает 0,30 мг/л в течение первых 3 часов кинетики.

Могут быть выделены следующие заключения:

процесс показывает минимальную степень удаления фосфора в 40 % и достигает процента удаления порядка 90 % при накоплении аммония в реакторе. Этот результат можно объяснить образованием фосфатов кальция и струвита;

анализы и расчеты химических равновесий демонстрируют сильное влияние pH на тип образовывающегося осадка. Фосфаты кальция формируются при pH 7…8,5. Расчеты показывают их присутствие на всей гамме изученного pH (7…9).

Таким образом, возможен контроль формирования частиц в аэробном бассейне, чтобы пользоваться более простой рекуперацией взвешенных веществ в зоне осаждения и частичным разделением органических и минеральных веществ. В ходе исследований было определено, что большинство осадков оказывается агломерированно в активном иле, что ведет к удалению смеси, состоящей из 50 % минеральных веществ.

Процесс биологического удаления фосфора может быть описан следующим образом (рис. 2):

в анаэробиозном бассейне дефосфатирующие бактерии синтезируют продукт запаса фосфора, начиная с легко биоразлагаемых органических загрязнений сточных вод. Освободившийся запас энергии обеспечивает гидролиз полифосфатов. Результатом является высаливание фосфатов во внешнюю среду.

в аэробном бассейне фосфор и органические вещества, содержащиеся в сточных водах, окисляются бактериями. Респирация кислорода производит энергию, необходимую бактериям для восстанавливения своего запаса полифосфатов и для роста.

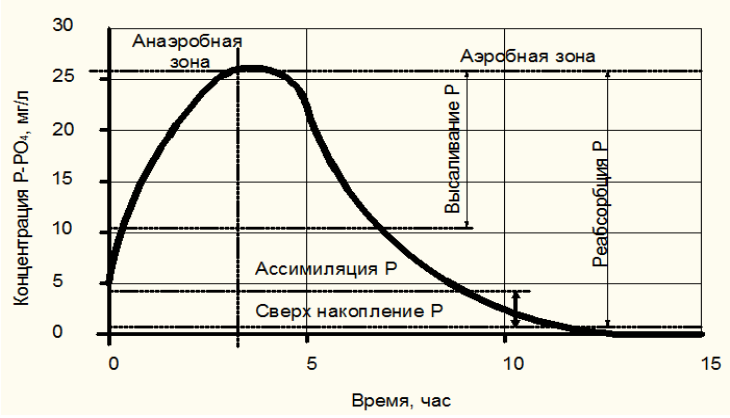


Рис. 2. Выделение и потребление фосфора в зависимости от времени

Эффективность биологической дефосфатации главным образом связана:

с концентрацией простых, легко биоразлагаемых субстратов, содержавшихся в сточных водах, которые могут производиться в анаэробной фазе;

соотношением биохимического окисления органических веществ к количеству фосфора, содержащегося в сточных водах, которое оказывает воздействие на степень эффективности ассимиляции;

наличием реальных анаэробных и аэробных условий в биореакторе;

соблюдением достаточного времени пребывания в анаэробном и аэробном биореакторах, для того чтобы реакции выделения и потребления были полными и завершенными;

возрастом активного ила;

окислительно-восстановительным потенциалом еН.

В результате анализа проведенных исследований было получено следующее уравнение для удаления дополнительного фосфора, основанное на устойчивом состоянии модели активно-илового процесса, представленной в виде:

$$\Delta P_s = S_{ti}\left[\frac{\left(1-f_{us}-f_{up}\right)}{1+b_{hT}\mathrm{R}_S}\left(\gamma+f_p\, fb_{hT}R_S\right)+\frac{f_p\cdot f_{up}}{\mathrm{P}_V}\right], \qquad (2)$$

где ΔP_s — удаление фосфора; S_n — концентрация разлагаемой микроорганизмами органических загрязнений; f_{us}, f_{up}, f_p — биоразлагаемая органика по величине биохимической потребности в кислороде; γ — коэффициент корреляции, определяющий долю фосфора в активном иле; R_s — константа идеальных газов, P_V — остаточное содержание фосфора в объеме очищаемых сточных вод.

Результаты моделирования биологической дефосфатации сточных вод (рис. 3) были использованы, чтобы проверить адекватность модели относительно экспериментальных результатов.

Рис. 3. Зависимость коэффициента сверхнакопления фосфора (гамма) от фактора удаления фосфора (Pf)

Полученные из выведенных уравнений расчетные данные показали высокую степень сходимости с экспериментальными результатами — коэффициент корреляции составил приемлемую величину 0,93.

В целом результаты работы показали, что математические модели обеспечили удовлетворительное отражение исследованных условий и хорошую сходимость с экспериментальными данными.

Выводы

1. Разработаны физические модели комбинированного процесса биологического удаления соединений фосфора с помощью доминирующих видов микроорганизмов из коммунальных и промышленных сточных вод.

2. Определены оптимальные технологические режимы культивирования фосфорпоглощающего биоценоза активного ила путем чередования анаэробной, аноксидной и аэробной зон обработки, обеспечивающих повышенную интенсивность процесса удаления загрязнений сточных вод от фосфора.

3. Идентифицированы доминирующие виды фосфорпоглощающих бактерий, основными из которых являются Acinetobacter, Arthrobacter, Hyphomicrobium и Sphaerotilus natans, обладающие повышенной способностью к аккумулированию фосфатов.

4. Определены основные виды фосфорсодержащих соединений (P-ортофосфата, P-струвита, P-гидрооксиапатита), их содержание в сточных водах различного происхождения и динамика изменения их процентного содержания в зависимости от величины pH.

5. Максимальное выделение фосфатов в анаэробной зоне требует проведения следующих мероприятий:

поддержания eH в анаэробной зоне для реализации эффективного выделения, совместимого с дефосфатацией в диапазоне от 100 до 500 мв;

обеспечения достаточного контакта дефосфатирующих бактерий с органическими загрязнениями при помощи перемешивания доминирующей массы потока (Re = 800…1600) в течение анаэробной фазы.

6. Максимальное поглощение ортофосфатов в аэробной секции требует проведения следующих мероприятий:

аэрация должна обеспечивать концентрацию растворенного кислорода в диапазоне 0,2…2,0 мг/л по окончании периода аэрации;

поддержание возраста активного ила на уровне 5…10 суток;

исключение выделения фосфатов при выводе гомогенного отстоявшегося активного ила и наличие достаточного уровня рециркуляции в зоне денитрификации ($r \geq 100…150$ %).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. «*Degremont*». Технический справочник по обработке воды : в 2 т. : пер. с фр. СПб : Новый журнал, 2007.

2. Очистка сточных вод / М. Хенце, П. Армоэс, Й. Ля-Кур-Янсен, Э. Арван ; пер. с англ. М. : Мир, 2004. 480 с.

3. *Roche Y., Niel P.* Analyse en microbiologie Produits non steriles // Techniques de l’Ingenier. 2006. P. 3352.

1. «Degremont». Tekhnicheskiy spravochnik po obrabotke vody : v 2 t. : per. s fr. SPb : Novyy zhurnal, 2007.

2. Ochistka stochnykh vod / M. Khentse, P. Armoes, Y. Lya-Kur-Yansen, E. Arvan ; per. s angl. M. : Mir, 2004. 480 s.

3. *Roche Y., Niel P.* Analyse en microbiologie Produits non steriles // Techniques de l’Ingenier. 2006. P. 3352.

© Павлинова И. И., Крупский А. С., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Павлинова И. И., Крупский А. С. Совершенствование очистки сточных вод от избыточных соединений фосфора с использованием биотехнологических приемов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 519—523.

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

УДК 629.7

А. В. Вавилов

РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СТРОИТЕЛЬСТВА ПУТЕМ ПРИМЕНЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕХНИКИ

Для реализации перспективных технологий строительства необходимо разрабатывать систему строительных машин.

К л ю ч е в ы е с л о в а: строительство, машины строительные и дорожные.

It is necessary to develop the system of construction machines for realization of perspective construction technologies.

K e y w o r d s: construction, construction and road machines.

Белорусскими учеными постоянно предлагаются новые перспективные технологии строительства для внедрения в различных отраслях строительного комплекса (промышленное и гражданское строительство, дорожное и гидромелиоративное строительство, жилищно-коммунальное хозяйство и т. д.). Как известно, успешная реализация технологий осуществляется путем использования эффективных технических средств, учитывающих все требования этих технологий. Однако строители-производственники часто запаздывают с приобретением техники под современные технологии строительства, в связи с чем и сегодня имеет место применение устаревших технологий, что приводит к снижению качества и повышению затрат на строительство [1]. В качестве примера приведем технологию выполнения подготовительных работ в строительстве, в частности расчистки строительной площадки от нежелательной древесно-кустарниковой растительности (ДКР).

В соответствии с ранее известными технологиями расчистка площадок от ДКР выполнялась с помощью кусторезов и корчевателей. В учебной литературе для строительных вузов приводились и приводятся конструкции двухотвальных кусторезов коробчатой формы и корчевателей возвратно-поступательного действия, с помощью которых с большими энергозатратами осуществлялось срезание надземной части ДКР, выкорчевывание пней, сгребание удаляемой биомассы в кучи вместе с верхним плодородным почвенным слоем для последующего сжигания ДКР. Несгоревшая часть ДКР закапывалась в заранее приготовленные котлованы и траншеи. К сожалению, по такой технологии и сегодня расчищаются строительные площадки, полосы отвода и лесозащитные полосы вдоль автомобильных и железных дорог.

Сегодня требования по подготовке строительных площадок под строительство возросли, прежде всего в направлении сохранения верхнего плодородного слоя почвы и использования удаляемой ДКР в энергетике. В Беларуси

в 2010 г. вышло Постановление Совета министров республики № 1076 «Об утверждении Государственной программы строительства энергоисточников на местных видах топлива в 2010—2015 годах», в соответствии с которым намечается ввод в эксплуатацию энергоисточников, работающих на местных видах топлива, с суммарной тепловой мощностью более 1000 МВт. Для работы запроектированных энергоустановок топливной щепы, поступающей от лесного комплекса республики, будет недостаточно, и этот недостаток можно восполнить, организовав производство щепы из ДКР, удаляемой при выполнении подготовительных работ во всех отраслях строительного комплекса Беларуси. Только выполняя мелиоративное строительство можно ежегодно для энергетических целей заготавливать около 500 тыс. $м^3$ ДКР.

Для реализации требуемой перспективной технологии необходимо приобретение принципиально новой строительной техники [2—4]. Так, срезание ДКР целесообразно выполнять сменными срезающе-пакетирующими рабочими органами, присоединяемыми к имеющимся в строительных организациях одноковшовым гидравлическим экскаваторам. Приобретение таких сменных рабочих органов не так накладно, как приобретение полностью новых машин. Такие агрегаты позволяют срезать ДКР, собирать ее для погрузки на транспортные агрегаты и доставлять к мобильным рубильным машинам для измельчения на топливную щепу. Мозырский машиностроительный завод (Республика Беларусь) выпускает мобильные рубильные машины, в том числе МР-25, которая не только измельчает, но и накапливает получаемую топливную щепу в собственном бункере-перегрузчике для перегрузки ее в съемные контейнеры к тягачам-топливовозам (типа МАЗ), оборудованным системой «мультилифт» для погрузки груженых контейнеров и доставки щепы к энергетическим установкам. Отсутствие даже одной из описанных выше эффективных машин не позволяет реализовать рассматриваемую эффективную технологию. Отдельные крупные деревья с явными пороками предлагается перед измельчением расщеплять на более тонкие куски [4]. Оставшиеся пни можно выкорчевывать, отряхивать, собирать сменным корчующим рабочим органом, присоединяемым к тому же экскаватору, и измельчать на топливную щепу, предварительно расколов (подготовив) на удобные куски. Измельчение пневой древесины возможно выполнять на той же мобильной рубильной машине, предварительно заменив ножевой барабан на барабан молоткового типа. Важно найти вблизи рассматриваемого строительного объекта энергетическую установку (котельную или мини-ТЭЦ), способную принять полученную топливную щепу и эффективно ее использовать.

К сожалению, не все проектные организации, работающие на строительство, а также подрядные организации обладают необходимой информацией, чтобы для конкретного случая выбрать оптимальный технологический вариант. Помощь им в этом вопросе уже сегодня оказывает кафедра строительных и дорожных машин Белорусского национального технического университета. С нашим участием проводится учеба строителей, в том числе проектировщиков, на семинарах по повышению квалификации и на ежегодно проводимой научно-технической конференции «Научно-технические проблемы использования альтернативных видов топлива в строительном комплексе Республики Беларусь», организуемой республиканским Министерством архитектуры и строительства.

Приведенный выше пример показывает, что для реализации перспективных технологий строительства необходимо разрабатывать систему машин для комплексной механизации, прежде всего учитывая все требования современных и перспективных технологий строительства, предварительно выполняя экономические расчеты всех их возможных вариантов и выбирая самый эффективный. Причем работа должна вестись непрерывно, в тесной связи технологов-строителей с конструкторами, совместно создающими конструктивные схемы машин, их параметры и режимы работы.

В Беларуси предстоит в сложившуюся систему машин включать башенные краны и строительные подъемники для осуществления высотного строительства, которое уже ведется в крупных белорусских городах (рис.). Сегодня краны для высотного строительства Беларусь вынуждена закупать за рубежом, хотя все необходимое для их создания и производства в республике имеется.

Высотное строительство в Минске

То же можно сказать и о реализации машинной технологии производства современных дорожно-строительных материалов [5, 6]. Для повышения надежности и долговечности работы асфальтобетонных покрытий ученымидорожниками рекомендуется использовать битумы, модифицированные полимерами. Это требует создания и производства установок для модификации битума. В систему дорожно-строительных машин необходимо включать также диспергаторы, установки для производства битумной катионной эмульсии, линии фасовки холодного асфальта и т. д.

Появление новых машин и оборудования для реализации современных технологий строительства, а также наличие прежних машин для реализации устоявшихся технологий может привести к значительному увеличению номенклатуры выпускаемой техники и ее численности в сложившихся машинных парках. И поскольку машины для реализации отдельных технологий не могут использоваться круглогодично, существует возможность снижения их эксплуатационных показателей и машинного парка в целом. Поэтому разра-

ботчики системы машин, их конструктивных схем и параметров должны это иметь в виду и использовать уже известные приемы повышения эффективности создаваемой строительной техники.

Вот некоторые из них. К специальным строительным шасси необходимо создавать большой набор легкосъемного рабочего оборудования различного функционального назначения. В этом случае дорогое базовое шасси будет задействовано круглогодично. Целесообразно при этом также навешивание оборудования, позволяющего выполнять совмещение операций, предусмотренных технологией. Например, машина для распределения противогололедных материалов, кроме традиционного оборудования, может оснащаться манипулятором с захватом для погрузки противогололедного материала прямо у дороги из резервов, исключив использование для этих целей другой машины, например одноковшового фронтального погрузчика.

В случае финансовых затруднений у обладателей машинного парка разработчики системы машин должны предусмотреть создание технических средств, позволяющих придавать новые возможности уже имеющимся в парке машинам. Например, наличие специального ротатора между рукоятью и ковшом обычного одноковшового гидравлического экскаватора может сделать из него экскаватор с полноповоротным ковшом, обеспечить неограниченное вращение ковша, а также его наклон. Создание специальных навесок сможет обычный колесный трактор сельскохозяйственного назначения типа МТЗ-80/82, имеющийся в машинных парках республики, адаптировать для успешной его работы с набором рабочих органов строительного назначения.

Если в системе машин появляются технические средства, потребность в которых невелика (небольшой тираж), для их создания и производства можно рекомендовать отдельным заводам применение метода субконтрактации. По такому методу завод-контрактор осуществляет сборку созданных им машин мелкой серии из узлов, поступающих от заводов-субконтракторов. Примером заводов-контракторов в Республике являются предприятия МАЗ-МАН и ВМЕ-Дизель, выпускающие грузовые автомобили, многофункциональные фронтальные погрузчики серии «ВМЕ» и др. Этот метод показал достаточную эффективность и на машиностроительных предприятиях «Святовит», «Дорэлектромаш», работающих в Беларуси.

Итак, предлагаемый механизм реализации перспективных технологий строительства осуществляется следующим образом. Расписывается вся перспективная технология по технологическим операциям и процессам. Каждый технологический процесс защищается конкретным техническим средством, которое необходимо создать (машиной), причем для машины, выполняющей основной технологический процесс, задается производительность, обеспечивающая наибольшую эффективность, а для машин, «закрывающих» остальные технологические операции и процессы рассматриваемой технологии, закладываются производительности, увязанные с производительностью главной машины. При этом в комплекте машин на одну главную машину может приходиться как одна, так и несколько вспомогательных машин. При этом, как уже отмечалось выше, одна машина может выполнять несколько процессов, совмещая их выполнение. Это достигается ее многофункциональностью, снабжением легкосъемным рабочим оборудованием различного функционального назначения. Производительность определяет остальные параметры

и режимы работы машин: выбор базового шасси (если машина мобильная), его мощность, тип ходовой системы, ширину захвата, глубину обработки, тип рабочего органа и его параметры (например, вместимость ковша) и т. д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология, механизация и автоматизация строительства / С. С. Атаев, С. Я. Луцкий, В. А. Бондарик, И. Н. Громов, Л. И. Бланк и др. М. : Высш. шк., 1990. 591 с.

2. *Вавилов А. В.* Выбор машин и оборудования для заготовки топливной щепы в Беларуси // Строительные и дорожные машины. 2009. № 8. С. 20—22.

3. *Вавилов А. В.* Факторы, определяющие эффективность производства и использование в Беларуси конкретного вида древесного топлива // Энергоэффективность. 2010. № 5. С. 8—9.

4. *Вавилов А. В.* Заготовка топливной щепы из крупногабаритных дефектных бревен для рассредоточенных энергоустановок на базе стационарной рубильной машины // Энергоэффективность. 2011. № 5. С. 22—23.

5. Строительные материалы / В. Г. Микульский, Г. Н. Горчаков, В. В. Козлов, В. Н. Куприянов, Л. П. Орентлихер и др. М. : АСВ, 1996. С. 322—333.

6. *Бердов Г. И.*, *Зырякова В. Н.*, *Машкин А. Н.* Нанопроцессы в технологии строительных материалов // Строительные материалы. 2008. № 6. С. 76—80.

1. Tekhnologiya, mekhanizatsiya i avtomatizatsiya stroitel'stva / S. S. Ataev, S. Ya. Lutskiy, V. A. Bondarik, I. N. Gromov, L. I. Blank i dr. M. : Vyssh. shk., 1990. 591 s.

2. *Vavilov A. V.* Vybor mashin i oborudovaniya dlya zagotovki toplivnoy shchepy v Belarusi // Stroitel'nye i dorozhnye mashiny. 2009. № 8. S. 20—22.

3. *Vavilov A. V.* Faktory, opredelyayushchie effektivnost' proizvodstva i ispol'zovanie v Belarusi konkretnogo vida drevesnogo topliva // Energoeffektivnost'. 2010. № 5. S. 8—9.

4. *Vavilov A. V.* Zagotovka toplivnoy shchepy iz krupnogabaritnykh defektnykh breven dlya rassredotochennykh energoustanovok na baze statsionarnoy rubil'noy mashiny // Energoeffektivnost'. 2011. № 5. S. 22—23.

5. Stroitel'nye materialy / V. G. Mikul'skiy, G. N. Gorchakov, V. V. Kozlov, V. N. Kupriyanov, L. P. Orentlikher i dr. M. : ASV, 1996. S. 322—333.

6. *Berdov G. I.*, *Zyryakova V. N.*, *Mashkin A. N.* Nanoprotsessy v tekhnologii stroitel'nykh materialov // Stroitel'nye materialy. 2008. № 6. S. 76—80.

© Вавилов А. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Вавилов А. В. Реализация перспективных технологий строительства путем применения эффективной техники // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 524—528.

УДК 69.003

С. Г. Головнев

ЗИМНЕЕ БЕТОНИРОВАНИЕ: ЭТАПЫ СТАНОВЛЕНИЯ И РАЗВИТИЯ

Содержит основные этапы развития зимнего бетонирования в России. Прослежены пути развития основных методов зимнего бетонирования, вклад ученых и экспериментаторов во внедрение новых методов. Отмечен решающий вклад российских ученых в развитие теории и методов зимнего бетонирования. Материалы статьи основаны в основном на публикациях, монографиях и книгах, опубликованных и изданных с 1932 до 2010 гг.

К л ю ч е в ы е с л о в а: технология зимнего бетонирования, история, нормативные документы.

This article deals with the main stages of development of winter concreting in Russian. The author traces the main methods of winter concreting, the contribution of scientists and experimenters in implementation of new methods. A decisive contribution of Russian scientists in the development of theory and methods of winter concreting is marked. The material of the article is derived from publications, monographs and books, published in the period since 1932 till 2010.

K e y w o r d s: technology of winter concreting, history, standard documents.

Приоритет российских ученых, производственников в разработке технологии зимнего бетонирования закреплен многочисленными публикациями и решениями международных симпозиумов [1]. Вместе с тем, произошедшие за последнее время существенные изменения в технологии бетона не нашли должного отражения в нормативных документах, а число публикаций по этой многогранной и серьезной проблеме резко уменьшились. Поэтому, с нашей точки зрения, будет полезным проанализировать этапы развития зимнего бетонирования, отдавая при этом себе отчет, что обзор будет не полным, требующим дальнейшего развития и уточнения.

Разработанные методы зимнего бетонирования позволяют возводить различные здания и сооружения круглогодично, хотя 90 лет назад ведение работ при отрицательных температурах категорически запрещалось, и строительство в России, да и в зарубежных странах, было сезонным. Так, в «Нормах для проектирования и устройства железобетонных сооружений» в разделе «Технические условия производства бетонных и железобетонных работ» отдел II посвящен общим правилам производства бетонных и железобетонных работ. В нем отмечено: «…при установившейся температуре ниже 0 °С ведение работ на открытом воздухе безусловно воспрещается, а потому при наступлении сплошных морозов, ровно как и при отсутствии сплошных морозов, но если температура при заморозках падает ниже –5 °С, производство работ допускается только в «тепляках» (Н.К.П.С. Высший технический комитет, Петроград, 1992). Значительные масштабы строительства в годы первых пятилеток поставили перед строителями и учеными задачу ликвидировать сезонность производства работ, что, в свою очередь, привело к разработке технологии бетонных работ в зимних условиях — технологии зимнего бетонирования.

Ликвидации сезонности во многом способствовали работы советских ученых по развитию и применению электропрогрева, внешнего обогрева, противоморозных добавок, была доказана возможность бетонирования

конструкций без «тепляков» с применением «термосного» выдерживания бетона. С 1931 г. при возведении на морозе монолитных конструкций стал применяться метод «термоса», заключающийся в укладке бетонных смесей из подогретых материалов и защите конструкций теплоизоляционными материалами на срок, устанавливаемый теплотехническими расчетами. В этом же году опубликованы «Временные технические условия на производство бетонных и железобетонных работ в зимнее время».

В 1932—1933 гг. осуществлен электропрогрев железобетонных конструкций при строительстве промышленного здания, а уже с 1933 г. применение электропрогрева регламентируется техническими условиями на производство бетонных и железобетонных работ в зимних условиях и он становится одним их основных методов.

В 1932 г. вышла книга «Зимние строительные работы», имеющая подзаголовок «Руководство по производству зимних строительных работ: бетонных, железобетонных, каменных и земляных». Авторы М. В. Вавилов и И. Г. Совалов не только привели результаты собственных исследований по основным вопросам зимнего бетонирования, но и обобщили имеющийся в тому времени небольшой производственный опыт. Они стремились, и это им во многом удалось, разъяснить смысл физических явлений, происходящих при низких температурах, описать их влияние на прочность бетонов на различных стадиях твердения. Особо отмечается необходимость правильного ухода за бетоном при его твердении для получения заданной прочности, что помогло ввести непрерывный производственный год в практику строительства.

Вместе с этим авторы подчеркивают, что разработать «…точные технические рекомендации, обязательные для всего огромного строительства нашего Союза, не представляется возможным…». Интересным и заслуживающим внимания и сегодня является положение, что «…проектирование организации работ и быстрый темп строительства, сильно снижающие размеры прямых зимних расходов, являются главными условиями, предопределяющими как технический, так и экологический эффект зимней стройки».

Конечно, в России вопросы учета особенностей климата рассматривались и раньше. Еще в 1842 г. впервые на русском языке был издан «Курс строительного искусства». Эту работу М. С. Волкова можно с полным основанием назвать первым учебником по строительному производству, в котором удачно сочетались элементы научных основ и практические рекомендации. Вот так отзывались современники об этой работе: «Сочинители курса пользовались сочинениями в ученом свете по этой части, имея в виду климат России и, руководствуясь собственным изысканиями и опытностью, сообразно с тем совершенством, в котором находится строительное искусство в наше время».

Одной из первых публикаций, охватывающей ряд вопросов воздействия отрицательных температур на бетон, была работа Н. И. Богданова «О влиянии низкой температуры на цементные растворы» (1899 г.). В 1912 г. Н. А. Житкевич отмечал влияние морозов на бетон. В 1919 г. И. А. Киреенко выпустил книгу «Бетонные работы на морозе».

Применение любого метода зимнего бетонирования связано с задачей определения влияния как отрицательных, так и положительных температур на твердение и свойства бетонов. Исследованиями, в первую очередь

выполненными в нашей стране, установлена зависимость между нарастанием прочности бетона на разнообразных цементах и температурой твердения от 0 до 100 °С. Полученные закономерности внесены в нормативные документы и использовались при разработке проектной документации, а также при контроле качества бетона. Составлены также рекомендации по режимам твердения и срокам выдерживания бетона для получения распалубочной прочности или прочности, достаточной для нагружения конструкции. Проводятся исследования по изучению влияния на свойства бетонов отрицательных температур, которые были начаты еще в 1930-е годы И. А. Киреенко, С. А. Мироновым, И. Г. Соваловым и др. Это — твердение бетона на морозе, прочность бетона в замороженном состоянии, нарастание прочности бетона на морозе, прочность бетона в замороженном состоянии, нарастание прочности бетона, подвергшегося в раннем возрасте замораживанию, а затем твердеющего при положительных температурах.

В годы Великой Отечественной войны (1941—1945), когда потребовалось срочно возводить здания и промышленные сооружения для немедленного использования оборудования перебрасываемых на Восток предприятий, методы зимнего бетонирования, разработанные в годы первых пятилеток, сыграли большую роль. В частности, при возведении фундаментов завода в Чебаркуле Челябинской области зимой 1941—1942 гг. применен периферийный электропрогрев. После нагрева конструкции ток был отключен и остывание фундамента продолжались более 8 суток, в течение которых бетон приобрел достаточную прочность. Этот случай явился и примером того, как следует использовать длительное естественное охлаждение конструкций.

Несмотря на военное время, продолжались исследования по вопросам зимнего бетонирования, в этот период выходят публикации, полный список которых можно найти в библиографическом указателе отечественной и иностранной литературы за 1925—1962 гг. «Теория и практика зимнего бетонирования».

В 1975 г. вышло 3-е издание монографии С. А. Миронова «Теория и методы зимнего бетонирования». В книге обобщены результаты многолетних исследований автора по вопросам твердения бетона при отрицательных и положительных температурах, дана оценка влияния раннего замораживания на формирование структуры и основных физико-механических свойств бетонов. Довольно подробно описаны методы производства бетонных и железобетонных работ, рекомендованных для применения в зимних условиях («термос», электротермообработка, пропаривание, применение бетонов, твердеющих на морозе, монтаж железобетонных изделий и конструкций с омоноличиванием стыков).

В книге значительное внимание уделено специфике применения бетонов в суровых климатических условиях Крайнего Севера и Восточной Сибири. В ряде случаев, для сравнения, описываются технологии зимнего бетонирования и опыт строительства при отрицательных температурах в зарубежных странах.

В октябре 1975 г. в Москве состоялся Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию, организованный Международным союзом лабораторий по испытанию и исследованию материалов и конструкций (РИЛЕМ) и Госстроем СССР.

С генеральными декларациями выступили С. А. Миронов (СССР), Б. А. Крылов (СССР), С. Бергстрем (Швеция), Х. Пойярви (Финляндия) и др.

В докладе Б. А. Крылова «Методы производства бетонных работ с применением прогрева и обогрева конструкций» отмечено, что среди методов выдерживания бетона в зимнее время особое место занимает прогрев конструкций, поскольку температурное воздействие на бетон относится к наиболее эффективным способам его ускорения.

Первые публикации Б. А. Крылова относятся к началу шестидесятых годов прошлого века и охватывют многие вопросы зимнего бетонирования. В них рассматривалось влияние отрицательных температур на бетоны с разной степенью зрелости и происходящие в них процессы. Выделены три группы причин структурных нарушений в бетоне. Первая — это переход воды в лед с увеличением в объеме, приводящий к разрыхлению структуры или частичному разрушению формирующегося кристаллического сростка, вторая — массоперенос в процессе замерзания бетона и при выдерживании на морозе и третья — нарушение монолитности многокомпонентной системы. Результаты исследований по замораживанию бетонов с разной степенью зрелости позволили определить значение прочности бетонов различных марок, по достижении которой можно прекращать электротермообработку и подвергать конструкции замораживанию без негативных последствий. На этой основе в СНиП были включены дифференцированные требования по «критической прочности», отвечающие новым требованиям в строительстве [2]. Также разработаны теоретические положения, объясняющие приэлектродные явления, возникающие при электропрогреве бетона, показана взаимосвязь между электрическими и тепловыми полями. Значительное влияние уделено изучению физико-механических свойств бетонов, подвергающихся электротермообработке.

В 1982 г. было издано «Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока и Крайнего Севера» (общая редакция «Руководства» осуществлена В. Д. Топчием, Б. А. Крыловым, В. Я. Гендиным, И. В. Коротковым). В разработке «Руководства» приняли участие сотрудники НИИЖБА, ЦНИОМТП, МИСИ, ЧПИ и др. организаций. В нем приведены материалы по всем известным на тот период способам зимнего бетонирования, применяемым в нашей стране, — как безобогревным, так и с термообработкой, — прежде всего по способам электротермообработки, которые обусловливают меньшие затраты топливно-энергетических ресурсов на 1 $м^3$ бетона, чем другие виды теплового воздействия. Рассмотрены вопросы выдерживания бетона способом «термоса», предварительного электроразогрева бетонной смеси, электропрогрева бетона, обогрева бетона в греющей опалубке, индукционного нагрева бетона, бетонирование в «тепляках», паропрогрева бетона, замоноличивание стыков. Освещены особенности производства работ в районах Северной климатической зоны, электрооборудования, контроля за производством работ и качеством бетона, дано экономическое обоснование выбора способа зимнего бетонирования.

В 1983 г. Ленинградское отделение Стройиздата выпустило монографию С. Г. Головнева «Оптимизация зимнего бетонирования». Она является первой работой, к которой на основе системного подхода выработаны принципы

определения технико-экономических показателей и оптимальные области применения методов зимнего бетонирования. В монографии дан анализ существующей технологии производства бетонных работ в зимнее время на объектах Южного Урала и Западной Сибири. Изложены теоретические и методические основы выбора способа бетонирования в зимних условиях, сформулированы задачи оптимизации, составлены алгоритмы и программы расчетов, реализация которых осуществлена с применением ЭВМ третьего поколения (ЕС-1022, ЕС-1030). Рассмотрены примеры проектирования технологических процессов и опыт их внедрения при возведении монолитных конструкций зимой.

Однако за последнее время число работ, освещающих те или иные вопросы зимнего бетонирования с достаточной аргументацией, вышло очень мало. Здесь уместно отметить книги А. И. Гныри, В. В. Молодина и выделить монографию Б. М. Красновского «Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования» (2004 г.). В ней при рассмотрении «термоса», электропрогрева, индукционного и инфракрасного нагрева, прогрева греющими проводами, методов предварительного разогрева бетонных смесей и «холодного» бетонирования раскрывается физический механизм процессов, лежащих в основе методов, с последовательным переходом к определению основных расчетно-технологических параметров. Отдельная глава посвящена динамике термонапряженного состояния остывающих после термообработки бетонных и железобетонных конструкций, а также термонапряженному состоянию бетона в окрестностях линейного источника.

За последнее время технология монолитного бетона претерпела существенные изменения, связанные с применением современных опалубочных систем, автобетононасосов и автобетоносмесителей, легких теплоизоляционных материалов, нагревательных проводов, приборов для измерения температуры и контроля прочности бетона. Практически не применяются бетоны без добавок, да и физико-механические свойства тяжелых бетонов значительно повышены. Но вместе с этим нет заметных изменений в технологии зимнего бетонирования, основные исследования направлены на изучение свойств бетона невысоких классов при отрицательных температурах. Мало используются возможности компьютерного моделирования и контроля за процессами зимнего бетонирования, часто не учитываются конструктивные особенности здания, последовательность возведения как отдельных конструкций, так и этажей, составы бетонов и т. п. [3].

Следует отметить и необходимость приведения нормативной базы-регламенты, стандарты, актуализированные СНиП и т. д. в соответствии современному уровню техники с обязательным обеспечением качества и безопасности возводимых зданий и сооружений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Второй международный симпозиум по зимнему бетонированию. М. : Стройиздат, 1978. 266 с.

2. СНиП 3.03.01—87. Несущие и ограждающие конструкции. М. : Стройиздат, 1988. 192 с.

3. Современные строительные технологии / под ред. С. Г. Головнева. Челябинск : ЮУрГУ, 2010. 268 с.

1. Vtoroy mezhdunarodnyy simpozium po zimnemu betonirovaniyu. M. : Stroyizdat, 1978. 266 s.
2. SNiP 3.03.01—87. Nesushchie i ograzhdayushchie konstruktsii. M. : Stroyizdat, 1988. 192 c.
3. Sovremennye stroitel'nye tekhnologii / pod red. S. G. Golovneva. Chelyabinsk : YuUrGU, 2010. 268 s.

© Головнев С. Г., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Головнев С. Г. Зимнее бетонирование: этапы становления и развития // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 529—534.

УДК 69.057.4

Т. А. Суэтина, И. Х. Наназашвили, А. А. Плешивцев

ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА ЭКОЛОГИЧНЫХ БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ ЗДАНИЙ

Рассмотрены вопросы организации строительства быстровозводимого здания, монтируемого в значительно более короткие сроки, чем это предусмотрено СНиП 1.04.03—85*.

К л ю ч е в ы е с л о в а: быстровозводимое здание, экологичность, энергоэффективность.

Issues of organization of construction of a high-quickly-mounted building which is mounted in mush more shorter time than it is provided in SNaR 1.04.03—85* are considered.

K e y w o r d s: high-quickly-mounted building, ecology, energy efficiency.

Во всем мире все более широкое распространение получают быстровозводимые строительные конструкции. Строят не только производственные и промышленные объекты, но и торговые, офисные и административные здания, складские помещения, автосервисы, общежития, спортивно-развлекательные комплексы, частные жилые дома и многое другое.

Идея быстровозводимого и мобильного здания возникла у людей еще в древности. В качестве примера можно привести обычную юрту. По сути, это предшественник всех быстровозводимых зданий: она легко собирается в течение нескольких часов, является полноценным жилищем, при необходимости ее демонтируют и перевозят на новое место.

В процессе создания современного быстровозводимого здания, отвечающего возросшим требованиям комфортности, возник целый ряд проблем. Главная из них — определение новых оптимальных форм здания и их элементов, решение которых должно быть основано на новейших достижениях науки и техники и неразрывно связано с использованием прогрессивных направлений, совершенствованием конструкций. Применяемые строительные материалы должны быть долговечными, иметь высокий коэффициент конструктивного качества (ККК) в условиях эксплуатации, обладать высокой технологичностью.

Основными критериями оптимальности конструктивной формы быстровозводимого здания являются: соответствие технологическим требованиям производственного процесса строительства, низкий вес, невысокая трудоемкость и стоимость изготовления и монтажа, быстрая окупаемость вложенных средств, а также удобство и, что особенно важно, высокая скорость возведения.

Задача снижения веса конструкций решается путем использования следующих приемов: концентрации материала в основных несущих элементах; создания эффективных конструкций, совмещающих несущие и ограждающие функции; использования тонколистовых растянутых поверхностей; применения типизации, унификации и стандартизации отдельных элементов и сооружений в целом; использования ресурсосберегающих и устойчивых конструкций.

Снижение трудоемкости изготовления в сочетании с повышением заводской готовности деталей является основным направлением повышения эффективности конструкции и требует создания конструктивных форм, которые позволили бы перейти к массовому серийному производству типизированных

и стандартизированных конструкций. В свою очередь, переход к выпуску серийных конструкций возможен только при такой конструктивной форме, которая обеспечит максимальную унификацию параметров зданий, сведет к минимуму количество типоразмеров, элементов применяемых материалов для монтажа здания. Поэтому современное производство требует существенного изменения, с одной стороны, общих схем сооружений, а с другой, — формы сечений элементов и типов соединений, которые должны быть технологичными в изготовлении и монтаже, соответствовать современному поточному высокомеханизированному и автоматизированному способу производства.

В связи с расширением строительства в труднодоступных районах и на Крайнем Севере, для быстрого освоения новых территорий, например при передислокации военнослужащих, особое значение приобретают упрощение перевозки и сокращение трудоемкости монтажа, при этом здания принятого конструктивно-технологического решения должны быть не только быстровозводимыми, но и сборно-разборными. Одним из путей решения этой задачи является изготовление конструкции до максимальной готовности на заводе. Увеличить величину коэффициента застройки можно за счет наличия мансарды в быстровозводимом здании.

Еще одним важным параметром экономичного жилья являются эксплуатационные затраты, большая часть которых приходится на энергопотребление для обогрева жилья, поэтому вновь проектируемые жилые здания должны максимально учитывать возросшие требования по энергосбережению, отраженные в Федеральном законе от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении, о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ».

Стремление удовлетворить перечисленные требования в одной конструктивной форме привело к созданию современных быстровозводимых зданий. Однако современные быстровозводимые здания не обладают близкими к идеальным характеристиками. Сроки возведения по-прежнему остаются довольно большими: щитовые дома строятся, в лучшем случае, в среднем за 10 дней. К тому же такие дома не являются жилыми в полном смысле слова, а предназначены только для летнего проживания; каркасно-щитовые здания, пригодные для круглогодичного проживания, возводятся за 2...3 месяца. Такие темпы строительства не могут удовлетворять растущие потребности населения в жилье, тем более в случаях чрезвычайных происшествий, землетрясений, наводнений и др.

Согласно СНиП 1.04.03—85* «Нормы продолжительности строительства и задела в строительстве предприятий, зданий и сооружений» время, отведенное на строительство одноэтажного жилого здания общей площадью до 100 м^2, составляет от 1,5 до 4 месяцев в зависимости от принимаемого конструктивного решения (крупнопанельное, крупноблочное, объемно-блочное, кирпичное из мелких блоков, панельное, каркасное деревянное брусчатое). Такие невысокие темпы считаются нормой, но и они не всегда выполняются.

Известные конструктивные решения быстровозводимых зданий хотя и обеспечивают повышенную компактность складываемого в пакет здания при транспортировке и хранении, но не позволяют увеличить полезный объем и площадь такого малоэтажного складного здания (предлагаемые одноэтажные дома без мансарды) в пределах выделенной под застройку площади. Резуль-

таты исследования показывают, что предлагаемые конструктивные решения шарнирно соединенных частей здания не обеспечивают устойчивость и надежность таких зданий при их возведении и эксплуатации, имеет место сложность конструктивно-технологического варианта, здания имеют громоздкие транспортные габариты, их транспортировка и монтаж вызывают большие трудности.

Таким образом, дальнейшее усовершенствование быстровозводимых конструктивных решений зданий с целью создания предпосылок скорейшего обеспечения нуждающихся в жилье граждан России для круглогодичного комфортабельного проживания на сегодняшний день является наиболее приоритетным и востребованным направлением в строительстве. Для решения поставленной задачи необходимо разработать научно обоснованное конструктивно-технологическое решение быстровозводимого самомонтируемого малоэтажного складываемого жилого здания с мансардой, монтируемого в значительно более короткие сроки, чем это предусмотрено СНиП 1.04.03—85* и существующей практикой строительства; разработать систему важных оценочных критериев для выбора экологически чистых строительных материалов; для снижения трудозатрат и стоимости здания разработать эффективный вариант конструктивно-технологического решения возведения (строительства) быстровозводимого здания.

Предлагаемый алгоритм возведения быстровозводимого самомонтируемого малоэтажного складываемого жилого здания предусматривает разделение строительства малоэтажного жилого здания на два самостоятельных этапа: 1. Изготовление всех его составляющих на заводах деревянного домостроения и деревоперерабатывающих предприятиях, выпускающих энергосберегающие сэндвич-панели в варианте сборно-разборного дома. 2. Возведение здания строительно-монтажной организацией.

В предлагаемом конструктивно-технологическом решении возведение сборно-разборного здания, сложенного в пакет два штабеля, содержащих левую и правую части дома, соединенные штырем, осуществляется путем поднятия грузовым краном за силовой коньковый элемент здания. При этом отдельные его части, скрепленные шарнирно между собой, под действием силы тяжести раскрываются вертикально вниз. Традиционно устраиваемый многодельный бетонный фундамент заменен винтовыми сваями, ввинчиваемыми в грунт в течение 4...6 ч (рис. 1), в соответствии с привязкой проекта, что позволяет обеспечить устройство фундамента без производства земляных работ. Это позволяет обеспечить возведение здания малым количеством рабочих, 4...5 человек, благодаря точности размеров частей здания с учетом принятых допусков и посадок. На изобретение получен патент № 2445423, опубликованный Федеральной службой по интеллектуальной собственности (бюллетень № 8 от 20.03.2012).

Сэндвич-панели, наряду с древесиной, являются наиболее эффективным конструктивным материалом для производства таких быстровозводимых зданий, поскольку легко обрабатываются режущим инструментом, экологичны, не горючи, долговечны (рис. 2, 3). Наладить промышленное производство таких зданий можно на действующих деревообрабатывающих предприятиях и, прежде всего, на предприятиях клееных деревянных конструкций, а также на предприятиях, выпускающих сэндвич-панели, в результате дооснастки их деревообрабатывающими станками.

Таким образом, предлагаемое техническое решение позволит:

в сжатые сроки обеспечить граждан доступным и комфортным жильем (рис. 4—7), на рис. 8 представлены возможные архитектурные решения;

для строительства на селе задействовать местные трудовые ресурсы и в значительной степени услуги парка строительных машин, что позволяет не отвлекать ресурсы от строительства в мегаполисах и больших городах;

экономить средства как на трудовых, так и на материальных ресурсах. Это связано, в первую очередь, со скоростью возведения здания, простотой монтажа и использованием современных экологичных материалов;

быстровозводимое здание является наиболее привлекательным техническим решением для инвестора-заказчика, так как дом, готовый к эксплуатации, возводится в крайне сжатые сроки и позволяет получить оплату за реализацию возведенного объекта, что повышает эффективность оборотного капитала.

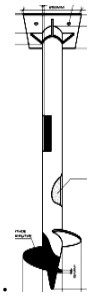


Рис. 1

Рис. 2

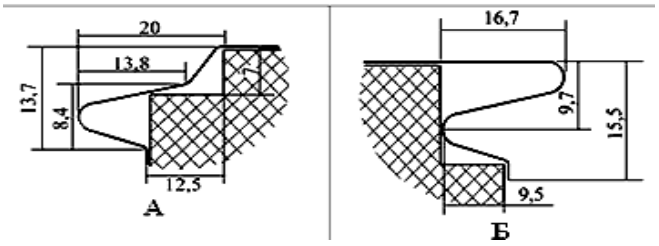


Рис. 3

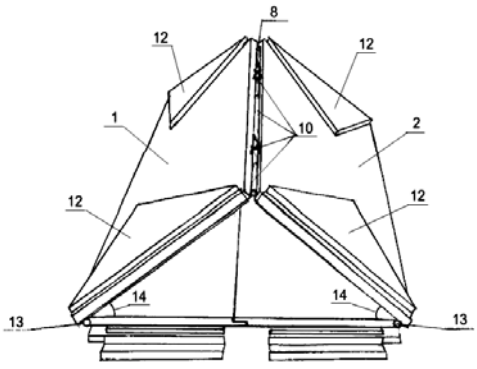


Рис. 4

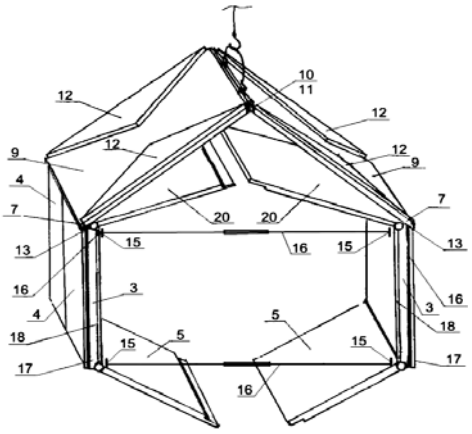


Рис. 5

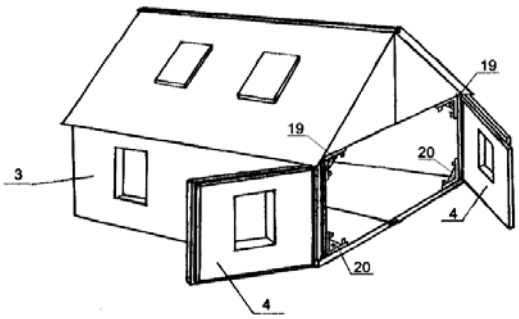


Рис. 6

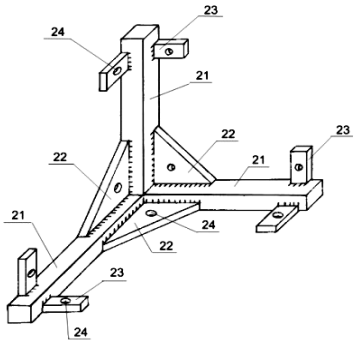


Рис. 7

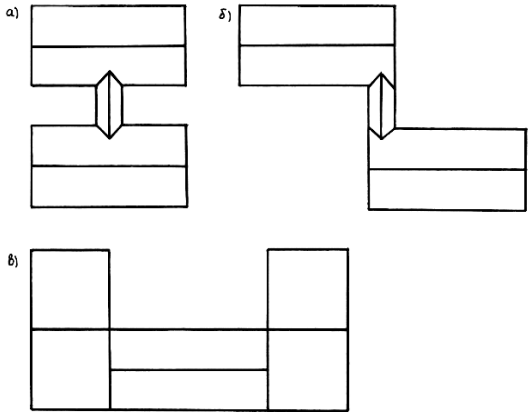


Рис. 8

© *Суэтина Т. А., Наназашвили И. Х., Плешивцев А. А., 2013*

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Суэтина Т. А., Наназашвили И. Х., Плешивцев А. А. Организация строительства экологичных быстровозводимых зданий // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 535—539.

ИННОВАЦИИ В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ, ИНТЕНСИФИКАЦИЯ, ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ

УДК 620.9

К. З. Галустов

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ (посвящается памяти армянского ученого Д. Б. Давидяна)

Описываются проблемы современной энергетики, выявляются их недостатки и предлагается путь их преодоления.

К л ю ч е в ы е с л о в а: объекты энергетики (ОЭ), АЭС, ГЭС, ГАЭС, НГПС, водохранилища, аварии на ОЭ, атомная энергетика, ядерный синтез, сверхпроводимость, наплавной способ строительства АЭС, альтернативные источники энергии, тарифы на энергию, альтернативная энергетика.

The problems of modern power industry are described and their limitations and possible solutions are proposed.

K e y w o r d s: Energy facilities (EF), NPP, HPP, PSH, OGFB, water reservoir, accidents at the EF, nuclear energetic, nuclear fusion, superconductivity, pontoon way to nuclear power plant construction, alternative energy sources, energy tariffs, alternative energetics.

После развала СССР в РФ сложилась неэффективная структура производства и потребления энергии, что приводит к росту тарифов на энергию. Используя связи в Правительстве РФ, частные и государственные энергетические корпорации свои расходы покрывают за счет повышения тарифов на энергию, что вызывает недовольство народа. Д. А. Медведев заявил, что к 2014 г. электричество в РФ станет дороже, чем в США, но цена на энергию в РФ уже выше, чем в США. РФ — поставщик энергоносителей — продает энергию в Китай по цене на 60 % ниже, чем жителям Благовещенска.

С целью снижения тарифов Минэнерго РФ изучает предложение, по которому планируется соединить энергосистемы Европейской России и Сибири, что требует строительства 2500 километров сетевой инфраструктуры, а также новых электростанций. Стоимость такого проекта составит примерно 20 млрд долларов.

Цены на электроэнергию в РФ пока контролирует государство, но в результате реформы энергетики ценообразование перейдет на рыночный механизм. Опыт России показал, что у населения страны нет доверия к чиновникам и рыночному механизму регулирования любых тарифов.

НССОЭ предлагает разработать новую концепцию тарифов на энергию в РФ с учетом особенностей и условий страны. Новая концепция тарифов должна учитывать, что:

1. РФ — мировой поставщик энергоносителей и тарифы в РФ *не могут быть выше тарифов* стран-импортеров энергоносителей, например США.

2. Проект объединения ценовой зоны необходимо передать на экспертизу независимым экспертам.

3 Переселению граждан РФ на Восток служит разделение ценовых зон энергетического рынка.

4. Цена экспорта энергии из РФ в Китай и др. не должна вызывать недовольство жителей ближайших приграничных районов РФ.

Энергетика — наукоемкая область, требующая финансирования науки, иначе она потеряет конкурентную способность проектов объектов энергетики (ОЭ), где ОЭ — АЭС, ГЭС, ГАЭС, ТЭС, ПЭС, НГПС и др. Значение науки для энергетики в СССР хорошо понимали.

Положение науки и ученых в СССР было выше в сравнении с их положением в современной РФ, где наука утратила стимул творчества. Для молодежи нет перспективы, это она видит и уезжает из РФ.

Во время кризиса в экономике крупные энергетические компании усиленно финансируют развитие науки и энергетики, создавая конкурентные преимущества для своих проектов, что позволяет им выигрывать тендеры на мировом энергетическом рынке.

Эту аксиому в РФ не понимают, поэтому российские проекты ОЭ теряют конкурентоспособность и инвестиционную привлекательность. Результат известен — мы будем проигрывать мировые тендеры. Это как в спорте, где без базы для тренировок побеждать на мировых соревнованиях невозможно. Власть в РФ это поняла и заставила бизнес финансировать спорт.

Изучив проект ЗаГАЭС и ряда недостроенных ГЭС, НССОЭ предлагает разработать проект ЗаГАЭС-3, включающий изготовление железобетонного наплавного блока на заводе, расположенном на берегу водохранилища ГАЭС; наплавной способ доставки блок-модулей и установки их в створ ЗаГАЭС-3. Это позволит сочетать достоинства ПЭС и ГАЭС. Использование патента № 2216644 позволит получить дополнительную энергию. Предложение НССОЭ применимо и для недостроенных ГЭС.

После распада СССР развитие науки и энергетики в РФ остановлено, заморожен ряд крупных строек. Уникальные строительные организации, такие как ОАО «Братскгэсстрой», ОАО «Красноярскгесстрой» и др., развалились, опыт строительства крупных гидроузлов, накопленный в СССР, потерян. Высокие цены на углеводородное сырье заставили страны, располагающие гидроресурсами, ускоренно их осваивать. Китай, Бразилия, Индия, Вьетнам, Лаос и др. для привлечения частных инвесторов гарантируют им возврат вложенных инвестиций в энергетику.

НССОЭ разработал предложения, стимулирующие привлечение инвестиций в энергетику, которые были направлены в Госдуму, Минэнерго и Минфин РФ, но ответа пока нет. Ждем реакции чиновников на предложения ученых НССОЭ.

Проблемы атомной энергетики и создание новых типов АЭС. Развалом СССР был нанесен удар по проектно-изыскательскому комплексу и энергетической науке. Например, проекты АЭС с реактором ВВЭР 1000-1200 оказались неконкурентоспособными. Об этом говорится в докладе Б. И. Нигматулина: «Картина по конкурентоспособности со строящимися (наиболее передовой — американо-японский АР-1000 (1170 МВт(е)) и перспективными (наиболее передовой из находящихся в лицензировании — ESBWR (1600 МВт(е)) следующая:

1. ВВЭР-ТОИ уступает АР-1000 по удельным расходам бетона и стали на сооружение «ядерного острова» приблизительно в 3 и 1,5 раза соответственно.

2. ВВЭР-ТОИ уступает проектам АР-1000 и ESBWR по удельному объему реакторных зданий в 2 и 3 раза соответственно.

3. По сравнению с ВВЭР-ТОИ АР-1000 имеет приблизительно на 40 % меньше длину трубопроводов и количество запорной арматуры. Длина трубопроводов систем безопасности и кабелей — в 4—5 раз меньше.

4. Удельная площадь размещения АЭС с ВВЭР-ТОИ приблизительно в два раза больше, чем для АЭС АР-1000 и ESBWR».

Развитию атомной энергетики в мире мешают крупные аварии на АЭС. С другой стороны, известно, что реальной альтернативы АЭС в мире нет. Если даже использовать все возможности ветра, солнца, гейзеров, приливов, сжигать органику — в энергобалансе мира растущий дефицит энергии закрыть будет нечем.

Аварии на крупных АЭС в Гаррисберге (США, 28.03.1979), Чернобыле (СССР, 1985 г.), а также на станции Фукусима (Япония, 2011 г.) изменили отношение людей и политиков к атомной энергетике. После аварии на АЭС в Японии Германия решила закрыть все свои действующие АЭС.

Согласно интервью Е. П. Велихова [2]: « Развитие газовой промышленности и дешевый газ убили атомную энергетику в Германии. Именно российский газ, а не Чернобыль, хотя и он сыграл свою роль. Другие страны решили не строить у себя новые АЭС. Это решение они обосновывают следующим: уран U-235, основное топливо АЭС, заканчивается, а технология замкнутого цикла и быстрые реакторы, на которых ожидалось получать U-235 из U-238, в нужных объемах обеспечить существующие АЭС не может. Есть проблемы, которые, кроме НИЦ им И. В Курчатова, никто не решает. Во-первых, есть атомная энергетика. Нужно, чтобы она функционировала разумно и гармонично в реальных экономических условиях современной России».

В мире эксплуатируется до 500 ядерных энергоблоков, 260 из которых расположены на берегу морей и океанов, а 114 из 260 прибрежных АЭС подлежат выводу из эксплуатации в связи с исчерпанием ресурса реакторов. Разработан метод по замене блоков-модулей реакторного отделения для прибрежной АЭС [4].

В. В. Жириновский по ТВ объявил, что у ЛДПР есть предложение по строительству подводных АЭС. Он опоздал на 25 лет, напоминаю, о подводных АЭС я докладывал ядерному обществу СССР в 1989 г. и США (Сан-Франциско) в 1991 г. [7]. Описание некоторых патентов и сертификата США приведено в моей книге [4]. Работы по новым типам АЭС интересовали производства СССР и США. Был разработан НИОКР для двух типов АЭС с использованием оборудования СССР и США. Распад СССР остановил эти работы. Считаю, что человечеству придется строить АЭС на берегу морей, на шельфе моря, размещать АЭС под водой. Без наплавного метода строительства возведение таких АЭС невозможно. Они имеют неоспоримые преимущества перед существующими типами. Наш совместный с академиком Е. П. Велиховым патент [2] не реализован, хотя идея [4—8] озвучена даже В. В. Жириновским. Авария на АЭС в Японии доказывает необходимость создания подводных АЭС. Иностранные заказчики готовы финансировать

проект прибрежных АЭС. Но для реализации этого нужно иметь реферативный объект, который без РОСАТОМ сделать невозможно. Такие АЭС требуют дистанционного мониторинга (ДМ) и наличия специальных маркеров.

01.02.2012 РОСАТОМ и РААСН подписали Соглашение о сотрудничестве, а РААСН создал независимый Научный совет «Строительство объектов энергетики» (НССОЭ), в который избраны специалисты-энергетики, рекомендованные РОСАТОМом, РусГидро, ГАЗПРОМом и др. Задача НССОЭ — повысить конкурентную способность и безопасность ОЭ. Соглашение подписано, а финансирования нет, надежда на использование оставшегося в РФ творческого потенциала утрачена. Соглашение с РААСН дает возможность чиновникам формально отчитаться о привлечении науки, но фактических изменений нет. Изучив проблемы атомной энергетики, НССОЭ предложил решения, повышающие конкурентную способность проектов АЭС. Эти ноу-хау нужно патентовать, они направлены в АЭП, но консерватизм не позволяет быстро оформлять патенты.

Перспектива ядерной энергетики и новые типы АЭС. Энергия, выделяемая при делении тяжелого ядра (в виде цепной неуправляемой реакции), сначала имела военное применение, а потом ее стали использовать в гражданском секторе экономики в АЭС и др.

То же происходит с использованием энергии синтеза легких ядер. Сначала была создана и испытана ядерная (в 1953 г. водородная) бомба, а вот мирное использование энергии синтеза легких ядер дейтерия в гелий пока не удалось.

Эддингтон (в 1920 г.) высказал гипотезу: «Давление и температура в недрах Солнца настолько высоки, что там могут идти термоядерные реакции, при которых ядра водорода сливаются в ядро гелия, выделяя энергию, излучаемую Солнцем». Эту гипотезу оспаривают И. В. Савельев, В. Ф. Власов, Д. Б. Давидян и др. [10, 11, 12]. Энергию управляемого термоядерного синтеза (УТЯС) физики пытаются получить давно. На установках ТОКАМАК получена плазма (70 млн °С). Синтез дейтерия и трития УТЯС получить пока не удалось.

Ученые Англии в реакторе JET (1997 г.) достигли мощности энергетического выделения [1] 16 МВт. Известно, что дейтерий, содержащийся в стакане воды, энергетически равен 60 л бензина. Перспектива заманчива, поэтому Евросоюз, США, РФ, Китай и другие страны финансируют проекты ITER и DEMO. Отсутствие практического результата в реакции УТЯС привело к поиску других направлений ядерного синтеза. В ядерной физике возникли два конкурирующих направления: УТЯС и УНЯС (управляемый низкотемпературный ядерный синтез).

Ядерный синтез признается осуществленным, если в процессе его произведено энергии больше, чем затрачено.

Ученые Италии считают, что в произведенном ими опыте синтез получен. От реактора 10...12 кВт на входе система требовала в среднем 600…700 Вт (вход — это электричество из розетки, а выход — тепловая энергия, которая шла на испарение воды). Получалось, что производство энергии выше затрат: реактор выдавал до 15 «тепловых» кВт при 400 «электрических» Вт на входе.

В работе [9] приведен обзор 131 публикаций по УНЯС. Предложение Д. Б. Давидяна ученые РАН не признали, а принять деньги Ирана на изготовление малой демонстрационной модели МДУ и других инвесторов рекомендовали, что для Армении соответствует запрету на НИОКР. Д. Б. Давидян не выдержал этого и в декабре 2012 г. скончался.

Если гипотезы Д. Б. Давидяна точны, то результат ядерного синтеза методом УНЯС будет получен другими, а не РФ и Арменией. Убежден, что наука Армении потеряла ученого, ставшего жертвой принципа: «Существует два мнения — мое и ошибочное». Суть предложения Д. Б. Давидяна в следующем Современная ядерная теория считает ядерный синтез легких ядер атома возможным при удовлетворении критерия Лоусона:

1. Скорость соударения ядер соответствует температуре плазмы: $T > 10^8$ К, по этому требованию нужно греть материал синтеза до температуры в многие миллионов градусов.

2. Время удержания температуры плазмы: $D - Tn\tau > 10^{14}$см$^{-3}$·с, где n — плотность высокотемпературной плазмы, а T — время ее удержания.

Для удержания температуры плазмы используются различные реакторы, например, ТОКОМАК и реактор ITER, задача которого [1] — получение технического решения, позволяющего запустить горение смеси ДТ (температурой до 100 млн °С) длительность 1000 с. Задача состоит в том, чтобы «растянуть» термоядерный взрыв с уровня микросекунд в бомбе до часов и дней [1].

Д. Б. Давидян [10, 11, 12] указывает на препятствия получения УТЯС:

1) не учитывалось наличие у легких атомных ядер собственного спина (гипотеза П. Дирака). Знак (векторное направление) поляризации спина сильно влияет на реакцию синтеза. Высокая температура не может изменить знак поляризации спина только одному из компонентов связи;

2) между частицами одной спиновой поляризации будет и электрическое, и магнитное отталкивание. Наоборот, для частиц с разной спиновой поляризацией нет ни электрического (кулоновского), ни магнитного отталкивания, а есть только притяжение;

3) эффективное сталкивание элементов синтеза гелия в плазме создает сильное взаимодействие.

В экспериментах по УТЯС уже получена плазма с температурой до 70 млн °С [1], но синтез дейтерия и трития не происходит.

В статье В. А. Царева [9] анализируется 131 публикация. В связи с тем, что теории ядреных сил пока не существует, в рамках стандартных представлений ядерной физики не удается объяснить результаты экспериментов в том числе и по УНТЯС.

Д. Б. Давидян считает возможным наличие:

1) принципа втягивания электрона водорода в структуру нейтрона;

2) объяснения, каким образом протон заряжается положительно;

3) принципа спиновой поляризации, влияние спина на сильное взаимодействие;

4) связи дейтериев, которая организуется по позитронным сторонам нейтронов дейтерия;

5) тепловой энергии, выделяемой при синтезе гелия, что происходит за счет активации позитронной часть дейтерия.

УНЯС можно получить, если активацию позитронной части дейтерия проводить с разнополяризованными спинами, потому что электроны гелия уже разно поляризованы по спинам.

Д. Б. Давидян разработал *два типа МДУ (реактора):*

I. Реактор заполнен дейтерием одной спиновой поляризации, в него (дозированно) пускается дейтерий другой спиновой поляризации. Управление процессом УНЯС осуществляется дозированием поступающего дейтерия.

II. Реактор одновременно (порционно) заполняется дейтерием разной спиновой поляризации. Управление реакцией УНЯС производится на каждой линии подачи дейтерия одной поляризации.

Сегодня активацию реакции проводят при помощи возбуждения электронной части дейтерия и ничего не получается, так как нужно активировать позитронную часть дейтерия.

Почему физики не провели эксперимент по делению гелия? Согласно теории слияние двух ядер дейтерия, $D + D = {}^3He + n + 3{,}25$ МэВ.

Если в результате деления гелия ^{3}He получили бы дейтерий разного спинового знака, значит, прав Давидян и нужно исследовать другие его гипотезы. Построив и запустив МДУ в Москве, можно было бы доказать или опровергнуть его гипотезы. Известно, что критерий точности любой теории — это эксперимент. Использование ядерного синтеза в ядерных электростанциях ЯЭС, в отличие от существующих АЭС, обеспечит:

1) получение энергии на ЯЭС в условиях ограниченных запасов природного урана путем синтеза дейтерия, добываемого из морской воды;

2) получение энергии без радиоактивных отходов, что не требует создания заводов по их переработке и хранилищ для их хранения;

3) экологическую неизменность среды при работе ЯЭС. Размещение ЯЭС в городах как источника тепла и электричества, не нарушающего экологию;

4) беспрерывную работу электростанции, так как ЯЭС не требует остановки для перегрузки топлива. Ресурс ЯЭС выше ресурса существующих АЭС.

Альтернатива атомной энергетике. Предложений по альтернативным источникам энергии, энергосберегающим технологиям много, но нет реально способных компенсировать такое количество выпадающих мощностей.

В мире построено несколько тысяч морских нефтегазопромысловых сооружений — наплавных платформ (НГПС) для бурения и эксплуатации нефтяных и газовых скважин, а также проложены тысячи километров подводных трубопроводов (ПТ). На НГПС и ПТ возникают аварии, приводящие к экологическим катастрофам. Известны 1138 аварии на НГПС [16]. В РФ, на арктическом шельфе разведаны большие запасы нефти и газа, их добыча связана с опасностью загрязнения моря. В мире нет опыта и технологии борьбы с нефтяными разливами в морях, покрытых льдами и др.

В проекте Штокмановского газоконденсатного месторождения (ШГКМ) добыча газа планируется с глубин в 350 м. В статье не приводятся наши патенты и методы расчета подводных сооружений. Опыт показал, что безопасность и качество ОЭ зависит от использования новых инновационных технологий.

Опасность для городов РФ от водохранилищ. Причиной более серьезных катастроф могут быть аварии на водохранилищах, не связанных с энергетикой. Такие водохранилища расположены выше городов и населенных пунктов, построены местной властью или образовались в результате сейсмики и дождевых селей. Они находятся в ведении региональной власти. Для исключения катастроф (фильтрация воды, волна, прорыв дамб и др.) на водохранилищах необходимо провести мониторинг их по специальной методике, для чего нужно разработать новую концепцию и программу дистанционного наблюдения, используя специальные маркеры и спутниковую систему ГЛОНАС.

НССОЭ разрабатывает [17] концепцию мониторинга, на базе которой будут предложены технические условия и техническое задание (ТЗ) на разработку инновационного проекта, использующего систему ГЛОНАС и специального оборудования. В рамках этого проекта необходимо разработать федеральную целевую программу (ФЦП) безопасности малых городов, включающую строительство регионального центра дистанционного наблюдения. Такая работа должна быть выполнена в два этапа: на первом этапе разрабатывается концепция метода, технические условия и техзадание (ТЗ), после чего — проект, который проверяется на одном из водохранилищ.

Строительство ЛЭП и сверхпроводимость. Известно, что линии электропередачи ЛЭП создают в прилегающем пространстве магнитное поле (вредное для человека), которое распространяется на десятки метров от ЛЭП. Воздушные линии (ВЛЭП) занимают много места. Давидян предложил метод, позволяющий получить сверхпроводимость. Считается, что существует взаимодействие между источниками тепловых адсорбционных и электрических взаимодействий. Для ликвидации якобы омического сопротивления необходимо выключить адсорбционное взаимодействие. Это происходит при снижении температуры взаимодействия валентных и координационных взаимодействиях. Получение высокотемпературной сверхпроводимости при помощи структур, обладающих нестехиометрическим составом показало, что эти соединения организуются *координационным взаимодействием*. Давидян считает: координационные соединения — дорога к получению сверхпроводимости.

Перспективы развития энергетики в России. НССОЭ предлагает начать в РФ реальную реформу в энергетике. Администрация Президента РФ с предложением НССОЭ согласилось, а Минэнерго предложило НССОЭ принять участие в экспертной работе по инвестиционным программам. НССОЭ разработало предложение по стимулированию инвестиций в энергетику и направило его в Минфин РФ.

В структуре РАН существует «Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления» (ОЭММПУ), состоящее из трех секций: секция механики (СМ); секция проблем машиностроения и процессов управления (СПМПУ); секция энергетики (СЭ), не связанная с НССОЭ РААСН. К сожалению, связи между НССОЭ, РААСН и РАН пока нет. Влияние качества строительных сооружений часто бывает причиной многих известных аварий на ОЭ, поэтому в РААСН был создан НССОЭ с целью повысить конкурентную способность и безопасность ОЭ.

Заключение. Для создания в РФ эффективной энергетики нужна ее реформа:

1. Разработать (в 2013 г.) концепцию реформы с учетом приоритетов развития видов ОЭ. Концепию реформы энергетики нужно поручить разработать РАН и РААСН. Концепция должна пройти независимую экспертизу специальных наученных советов и сообществ.

2. Неизвестен реальный срок использования энергии ядерного синтеза первых ядерных электростанций (ЯЭС).

3. Для разработки проекта ЯЭС нужно построить в РФ МДУ, чего добивался Д. Б. Давидян, и доказать или опровергнуть его гипотезы. Это наиболее простой и дешевый путь решения проблемы ядерной энергетики.

Науке станет ясно, какие типы ЯЭС, в отличие от существующих АЭС, нужно строить.

4. В статье В. В. Путина «Россия сосредотачивается» [17] определено, что нужно делать за рамками выборов, после выборов. Для реализации поставленных целей нужно реформировать энергетику РФ, от которой зависит экономика, качество жизни народа, стабильность в России. План реформирования энергетики РФ нужно поручить независимым научным сообществам, а не чиновникам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Велихов Е П., Мирнов С. В.* Управляемый термоядерный синтез выходит на финишную прямую.

2. *Велихов Е. П.* Наследство Курчатова // Литературная газета. 2003. № 1. С. 12.

3. *Велихов Е. П., Галустов К. З., Кузнецов В. П.* и др. Патент № 219553.1. Способ возведения крупноблочного сооружения (наплавных АЭС) в прибрежной зоне водоема и плавкомплекс для осуществления способа.

4. *Галустов К. З.* Нелинейная теория ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций. М., 2006.

5. *Галустов К. З.* Принцип Вольтера и принцип Гвоздева А. А. — Галустова К. З. в теории ползучести бетона // Вестник ОСН РААСН. Вып. № 13. Т. 1. 2009.

6. *Галустов К. З.* О влиянии ползучести бетона на изменении частот собственных колебания многоэтажных (высотных) железобетонных сооружений // Вестник ОСН РААСН. Т. 1. 2011.

7. *Galustov K. Z.* Underwater nucler power plans: improved safety environmental compatibility, and efficiency // American Nuclear Society. AUTHOR RECOGNITION THIS CERTIFICATE Presenter at the ANS Meeting, San Francisco, CA nov. 1991.

8. *Галустов К. З.* Наплавной метод строительства в энергетике 21 века // Вестник ОСН РААСН. Вып. № 16. Т. 2. М. 2012.

9. *Царев В. А.* Низкотемпературный ядерный синтез // Успехи физических наук. 1990. Т. 160.

10. *Давидян Д. Б.* Дейтериевая модель структуры ядер элементов и соответствующая ей таблица для 120 элементов // Вестник МАНЭБ. 1999. Т. 5.

11. *Давидян Д. Б.* Новые представления о природе нейтрино и модель мезонной структуры нейтрона. Явления, гипотезы, прогнозы // Вестник МАНЭБ. 2003. Т. 8. № 7.

12. *Давидян Д. Б.* О принципиальной невозможности осуществления термоядерного синтеза гелия.

13. *Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М.* Теория поля. М. : Наука, 1973.

14. *Савельев И. В.* Курс общей физики. Т. 3. М. : Физматлит, 1982.

15. *Мухин К. Н.* Экспериментальная ядерная физика. Физика элементарных частиц. Т. 2. 1974.

16. *Мирзоев Д. А.* Основы морского нефтегазопромыслового дела. День серебра, 2009.

17. *Путин В. В.* Россия сосредотачивается // Российская газета. 2012.

1. *Velikhov E P., Mirnov S. V.* Upravlyaemyy termoyadernyy sintez vykhodit na finishnuyu pryamuyu.

2. *Velikhov E. P.* Nasledstvo Kurchatova // Literaturnaya gazeta. 2003. № 1. S. 12.

3. *Velikhov E. P., Galustov K. Z., Kuznetsov V. P.* i dr. Patent № 219553.1. Sposob vozvedeniya krupnoblochnogo sooruzheniya (naplavnykh AES) v pribrezhnoy zone vodoema i plavkompleks dlya osushchestvleniya sposoba.

4. *Galustov K. Z.* Nelineynaya teoriya polzuchesti betona i raschet zhelezobetonnykh konstruktsiy. M., 2006.

5. *Galustov K. Z.* Printsip Vol'tera i printsip Gvozdeva A. A. — Galustova K. Z. v teorii polzuchesti betona // Vestnik OSN RAASN. Vyp. № 13. T. 1. 2009.

6. *Galustov K. Z.* O vliyanii polzuchesti betona na izmenenii chastot sobstvennykh kolebaniya mnogoetazhnykh (vysotnykh) zhelezobetonnykh sooruzheniy // Vestnik OSN RAASN. T. 1. 2011.

7. *Galustov K. Z.* Underwater nucler power plans: improved safety environmental compatibility, and efficiency // American Nuclear Society. AUTHOR RECOGNITION THIS CERTIFICATE Presenter at the ANS Meeting, San Francisco, CA nov. 1991.

8. *Galustov K. Z.* Naplavnoy metod stroitel'stva v energetike 21 veka // Vestnik OSN RAASN. Vyp. № 16. T. 2. M. 2012.

9. *Tsarev V. A.* Nizkotemperaturnyy yadernyy sintez // Uspekhi fizicheskikh nauk. 1990. T. 160.

10. *Davidyan D. B.* Deyterievaya model' struktury yader elementov i sootvetstvuyushchaya ey tablitsa dlya 120 elementov // Vestnik MANEB. 1999. T. 5.

11. *Davidyan D. B.* Novye predstavleniya o prirode neytrino i model' mezonnoy struktury neytrona. Yavleniya, gipotezy, prognozy // Vestnik MANEB. 2003. T. 8. № 7.

12. *Davidyan D. B.* O printsipial'noy nevozmozhnosti osushchestvleniya termoyadernogo sinteza geliya.

13. *Landau L. D., Lifshits E. M.* Teoriya polya. M. : Nauka, 1973.

14. *Savel'ev I. V.* Kurs obshchey fiziki. T. 3. M. : Fizmatlit, 1982.

15. *Mukhin K. N.* Eksperimental'naya yadernaya fizika. Fizika elementarnykh chastits. T. 2. 1974.

16. *Mirzoev D. A.* Osnovy morskogo neftegazopromyslovogo dela. Den' serebra, 2009.

17. *Putin V. V.* Rossiya sosredotachivaetsya // Rossiyskaya gazeta. 2012.

© Галустов К. З., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Галустов К. З. Современные проблемы энергетики и пути их решения // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 541—548.

УДК 697.1:697.9:697.13:697.14:697.91

Ю. А. Табунщиков, Ю. В. Миллер

ПРИНЦИПЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГОДОВОГО ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ НА КЛИМАТИЗАЦИЮ ЗДАНИЙ

Приведено описание математической модели здания как единой энергетической системы, рассмотрены подсистемы данной математической модели и требования к ним. Предложен метод учета эффективности энергосберегающих мероприятий в теплоэнергетическом балансе помещений зданий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: математическая модель, расход энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха зданий в годовом цикле, тепловой баланс зданий, энергосберегающие мероприятия, экспертная оценка.

The mathematical model of the building as a unified power system is described, the subsystems of this mathematical model and their requirements are presented in the article. It suggests the method for estimating the efficiency of power-saving measures in the heat balance of the building.

K e y w o r d s: mathematical model, energy use for heating, ventilation and air conditioning in the annual cycle, heat balance of a building, power-saving measures, expert assessment.

В существующих нормативных документах установлены требования к расходу энергии на отопление и вентиляцию зданий за отопительный период [1]. Вместе с тем, в последние годы законодательство устанавливает требования к расходу энергии в течение всего года, что предполагает учет расхода энергии в теплый период на систему кондиционирования воздуха. Например, Постановление Правительства РФ [2] содержит указания по учету удельного годового расхода энергоресурсов, включая расход электроэнергии на кондиционирование во вне отопительного периода. В ГОСТ Р 54954—2012 [3], разработанном при участии НП «АВОК», содержатся минимальные экологические требования к годовому удельному расходу электроэнергии на кондиционирование.

Несмотря на установленные законодательством требования к расходу энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха зданий в течение года, нормативные документы для расчета этого показателя отсутствуют. В связи с этим необходимо создать методологию расчета годового потребления энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха зданий различного технологического назначения. В основе методологии должно быть системное представление здания как единой энергетической системы с разработкой математической модели и возможностью определения энергопотребления здания в годовом цикле.

В качестве предпосылки была принята математическая модель [4], позволяющая определить максимальные значения теплопоступлений в помещение и время их достижения в течение суток, а также среднесуточные значения и амплитуду колебания теплопоступлений в помещения для проектирования системы кондиционирования воздуха.

Возникла необходимость доработки вышеуказанной математической модели для реализации возможности расчета расхода энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха зданий в годовом цикле.

Принципиальной особенностью создаваемой математической модели является то, что здание как единая энергетическая система должно быть представлено тремя основными взаимосвязанными энергетическими подсистемами:

1) энергетическим воздействием наружного климата на оболочку здания;

2) энергией, содержащейся в оболочке здания, то есть в наружных ограждающих конструкциях;

3) энергией, содержащейся внутри объема здания, то есть во внутреннем воздухе, внутреннем оборудовании, внутренних ограждающих конструкциях и т. д.

Рассмотрим требования каждой подсистемы более подробно.

Для учета энергетического воздействия наружного климата в первой подсистеме прежде всего необходимо сформулировать и математически описать требования к входным параметрам наружного воздуха. Приведенные в действующих нормативных документах, например [5], параметры наружного воздуха ограничены среднемесячными значениями, использование которых не представляется возможным для моделирования расхода энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха здания в годовом цикле, т. к. не будет обеспечена требуемая точность расчетов. В связи с этим было принято решение использовать параметры наружного воздуха для «типового метеорологического года» (typical metrological year, TMY), который состоит из двенадцати «типовых метеорологических месяцев» (typical meteorological months, TMM), выбранных из многолетней климатической базы [6]. Условием выбора «типовых метеорологических месяцев» является близость их параметров к среднестатистическим данным. Таким образом, «типовой метеорологический год» состоит из месяцев разных годов и содержит почасовые значения следующих параметров: значения температуры наружного воздуха по сухому термометру, прямой и рассеянной солнечной радиации на горизонтальную поверхность, относительной влажности воздуха, скорости и направления ветра, температуры точки росы и др. Такой подход позволяет адекватно и с необходимой точностью учесть влияние наружного климата на тепловой баланс помещений здания.

Для учета во второй подсистеме энергии, содержащейся в оболочке здания, необходимо определить тепловые потоки через светонепроницаемые ограждающие конструкции (стены, покрытия, пол и т. п.):

теплопоступления или теплопотери вследствие разности температур внутреннего и наружного воздуха;

теплопоступления вследствие поглощения теплоты солнечной радиации наружной поверхностью ограждающих конструкций, а также через светопроницаемые ограждающие конструкции;

теплопоступления в результате солнечной радиации, поглощаемой заполнением светового проема и непосредственно проникающей в помещение, с учетом наличия светозащитных устройств;

теплопоступления или теплопотери вследствие фильтрации воздуха через притворы и по контуру примыкания заполнения светового проема к стене, обусловленные разницей давления и температуры внутри и снаружи помещения.

Третья подсистема есть уравнение теплового баланса воздуха помещений с учетом внутренних явных и неявных источников теплоты и влаговыделений, лучистого и конвективного теплообмена с ограждающими конструкциями, технологическими и бытовыми тепловыделениями.

Важным параметром третьей подсистемы является раздельный учет лучистого и конвективного теплообмена. Согласно результатам исследований, приведенных в [7], особенно важно раздельно учитывать конвективный и лучистый теплообмен в помещении при определении расхода энергии на кондиционирование. Если расчет проводится без такого учета, то полученное значение расхода энергии на кондиционирование может превышать требуемое в 2...2,5 раза. Кроме того, в помещениях с наружными ограждающими конструкциями, рассчитанными в соответствии с [1] (где коэффициент теплоотдачи внутренней поверхности принят постоянным), не обеспечивается нормативный санитарно-гигиенический перепад между температурами воздуха и внутренней поверхности наружной стены. Превышение расчетного перепада над нормативным составляет для рядового помещения 25...30 %, углового — 40...45 %, верхнего углового — 50...55 %.

Особенностью современных зданий является увеличение бытовых и внутренних тепловыделений: в жилых зданиях источниками внутренних тепловыделений являются люди, бытовая техника, компьютер и т. д.; в общественных зданиях источниками внутренних тепловыделений являются люди, оргтехника, освещение, компьютеры, технологическое оборудование и т. д. Например, в офисных зданиях внутренние тепловыделения в рабочее время от различных источников представлены в табл. [8].

Внутренние тепловыделения в офисных зданиях, Вт/м^2

Источники тепловыделений	Площадь, приходящаяся на 1 сотрудника, м^2		
	6	8	10
Тело человека (90 Вт)	15,0	11,3	9,0
Компьютер с периферией (150...250 Вт)	25...43	19...31	15...25
Освещение	15...25	15...25	15...25
Общая оргтехника (принтеры, копиры, плоттеры, куллеры и т. п.)	5...10	4...8	3...6
Всего	60...90	50...75	40...65

Внутренние тепловыделения в значительной мере влияют на расход энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование в годовом цикле.

Как правило, величина внутренних тепловыделений в помещениях не постоянна в течение суток, поэтому необходимо иметь возможность учитывать переменные внутренние тепловыделения в тепловом балансе здания.

Кроме того, необходимо учитывать, что реальное помещение есть совокупность не только теплоемких ограждающих конструкций, но и теплоемкого внутреннего оборудования и мебели. Оборудование и мебель можно рассматривать как дополнительную теплоемкость, повышающую теплоаккумулирующую способность помещения. Это обстоятельство особенно важно при устройстве теплоаккумуляционных систем отопления и охлаждения помещений [9], а также при «прерывистом» режиме отопления [10].

Для правильного определения энергии, содержащейся внутри объема здания, необходимо учитывать воздухообмен в помещениях. Организованный воздухообмен является основным способом обеспечения качества воздуха в помещениях зданий. Нормы требуемого воздухообмена в помещениях жилых и общественных зданий приведены в [11]. Вместе с тем, расход энергии на вентиляцию и кондиционирование зависит от величины воздухообмена. Существенное сокращение воздухообмена может обеспечить адекватное повышение энергоэффективности систем вентиляции и кондиционирования, однако это не должно вызывать снижения уровня комфортности помещения. Например, в некоторых общественных зданиях допускается уменьшение кратности воздухообмена в нерабочее и ночное время. Поэтому необходимо реализовать возможность учета переменного воздухообмена в помещениях в течение суток.

Разработанная нами математическая модель учитывает все вышеуказанные подсистемы и требования к ним. Путем суммирования в каждый момент времени значений теплопотерь и теплопоступлений в помещение определяется расход энергии, требуемый для поддержания установленных параметров внутреннего воздуха, на отопление, вентиляцию и кондиционирование в течение года.

Стратегически важным направлением в учете расхода энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование является снижение этой величины за счет применения энергосберегающих мероприятий. К таким мероприятиям относятся: утилизация теплоты вытяжного воздуха посредством пластинчатого теплообменника, устройство автоматизированного узла управления, установка термостатических клапанов, «прерывистый» режим отопления, гибридная вентиляция, применение «ночных» штор и т. д.

В связи с существующим на сегодняшний день многообразием энергосберегающих мероприятий на стадии предпроектных исследований возникает необходимость определения расхода энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха зданий с учетом эффективности выбранных энергосберегающих мероприятий.

Сейчас разработка универсальной математической модели определения расхода энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование воздуха зданий в годовом цикле, которая включала бы математическое описание всех энергосберегающих мероприятий, не представляется возможной. Не все существующие энергосберегающие мероприятия поддаются прямой количественной оценке: в силу сложности или отсутствия математической модели, описывающей их, или необходимости проведения широкомасштабных исследований, неизбежно связанных с большими временными затратами. Несмотря на это, в отечественной и частично зарубежной практике накоплен опыт применения энергосберегающих мероприятий, на основании которого можно оценить их эффективность.

Наша задача состоит в том, чтобы оценить, как применение того или иного энергосберегающего мероприятия в среднем влияет на расход энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование в течение года.

Нами разработана специальная математическая модель, позволяющая косвенным образом учесть влияние различных энергосберегающих мероприятий на теплоэнергетический баланс зданий. Данная математическая модель бази-

руется на приведенной выше математической модели, но теперь уже на новом уровне позволяет учитывать эффективность более тридцати различных энергосберегающих мероприятий.

Учет эффективности энергосберегающих мероприятий в математической модели предлагается осуществлять посредством коэффициентов, определяемых путем экспертной оценки. С этой целью в качестве экспертов были приглашены ведущие специалисты в строительной отрасли: профессора, кандидаты технических наук, проектировщики и другие специалисты с большим опытом разработки, проектирования и применения различных энергосберегающих мероприятий в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха зданий. По результатам экспертной оценки были определены коэффициенты энергосберегающих мероприятий для жилых и общественных зданий, таких как устройство механической вентиляции с утилизацией теплоты вытяжного воздуха посредством теплообменников с промежуточным теплоносителем, персональная вентиляция, установка квартирного теплового пункта, комнатного контроллера и т. д. Кроме того, в математической модели имеется возможность учета совместного влияния энергосберегающих мероприятий на тепловой баланс зданий.

Нами были проведены расчеты расхода энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование в годовом цикле для жилого многоквартирного здания, расположенного в Москве. Расчеты показали, что устройство индивидуальной механической приточно-вытяжной вентиляции с утилизацией теплоты вытяжного воздуха для подогрева/охлаждения приточного в перекрестноточном воздухо-воздушном пластинчатом теплообменнике позволяет сократить расход энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование в годовом цикле на 43 %.

Таким образом, разработанная математическая модель позволяет определить расход энергии на отопление, вентиляцию и кондиционирование в годовом цикле с учетом эффективности энергосберегающих мероприятий и может быть использована для определения класса энергоэффективности зданий, для рейтинговой оценки зданий в системе «зеленого» строительства и исследования теплового баланса зданий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 23-02—2003. Тепловая защита зданий. С. 10—11.

2. Постановление Правительства РФ от 25 января 2011 г. № 18 «Об утверждении Правил установления требований энергетической эффективности для зданий, строений, сооружений и требований к правилам определения класса энергетической эффективности многоквартирных домов».

3. ГОСТ Р 54954—2012. Оценка соответствия. Экологические требования к объектам недвижимости. С. 29.

4. *Табунщиков Ю. А., Бродач М. М.* Математическое моделирование и оптимизация тепловой эффективности зданий. М. : АВОК-ПРЕСС, 2012. С. 54—78.

5. СНиП 23-01—99*. Строительная климатология. С. 181—248.

6. *Marion W., Urban K.* User's Manual for TMY2s — Typical Meteorological Years: Derived from the 1961—1990 National Solar Radiation Data Base. National Renewable Energy Laboratory, 1995. P. 2—5.

7. *Колубков А. Н., Шилкин Н. В.* Новые подходы к кондиционированию. Опыт Германии // АВОК. 2009. № 1. С. 25—32.

8. *Наумов А. Л.* Оценка и роль теплозащиты общественных зданий // АВОК. 2009. № 7. С. 30—36.

9. *Табунщиков Ю. А.* Расчет теплопотерь помещения и требуемого сопротивления теплопередаче наружных ограждающих конструкций при раздельном учете лучистого и конвективного теплообмена // АВОК. 2009. № 4. С. 20—23.

10. *Табунщиков Ю. А., Бродач М. М.* Минимизация затрат энергии при прерывистом режиме отопления // АВОК. 2001. № 1. С. 14—20.

11. СТО НП «АВОК» 2.1-2008. Здания жилые и общественные. Нормы воздухообмена. С. 5—8.

1. SNiP 23-02—2003. Teplovaya zashchita zdaniy. S. 10—11.

2. Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 25 yanvarya 2011 g. № 18 «Ob utverzhdenii Pravil ustanovleniya trebovaniy energeticheskoy effektivnosti dlya zdaniy, stroeniy, sooruzheniy i trebovaniy k pravilam opredeleniya klassa energeticheskoy effektivnosti mnogokvartirnykh domov».

3. GOST R 54954—2012. Otsenka sootvetstviya. Ekologicheskie trebovaniya k ob"ektam nedvizhimosti. S. 29.

4. *Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M.* Matematicheskoe modelirovanie i optimizatsiya teplovoy effektivnosti zdaniy. M. : AVOK-PRESS, 2012. S. 54—78.

5. SNiP 23-01—99*. Stroitel'naya klimatologiya. S. 181—248.

6. *Marion W., Urban K.* User's Manual for TMY2s — Typical Meteorological Years: Derived from the 1961—1990 National Solar Radiation Data Base. National Renewable Energy Laboratory, 1995. P. 2—5.

7. *Kolubkov A. N., Shilkin N. V.* Novye podkhody k konditsionirovaniyu. Opyt Germanii // AVOK. 2009. № 1. S. 25—32.

8. *Naumov A. L.* Otsenka i rol' teplozashchity obshchestvennykh zdaniy // AVOK. 2009. № 7. S. 30—36.

9. *Tabunshchikov Yu. A.* Raschet teplopoter' pomeshcheniya i trebuemogo soprotivleniya teploperedache naruzhnykh ograzhdayushchikh konstruktsiy pri razdel'nom uchete luchistogo i konvektivnogo teploobmena // AVOK. 2009. № 4. S. 20—23.

10. *Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M.* Minimizatsiya zatrat energii pri preryvistom rezhime otopleniya // AVOK. 2001. № 1. S. 14—20.

11. STO NP «AVOK» 2.1-2008. Zdaniya zhilye i obshchestvennye. Normy vozdukhoobmena. S. 5—8.

© *Табунщиков Ю. А., Миллер Ю. В., 2013*

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Табунщиков Ю. А., Миллер Ю. В. Принципы определения годового энергопотребления на климатизацию зданий // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 550—554.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И АРХИТЕКТУРЕ

УДК 691.539.216

В. В. Белов, И. В. Образцов

ОПТИМИЗАЦИЯ СТРУКТУРЫ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО КАРБОНАТНОГО БЕТОНА С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Подобран оптимальный зерновой состав заполнителя для бетона и построена компьютерная модель его полидисперсной структуры. Методом математического моделирования с применением трехфакторного планированного эксперимента исследованы реологические характеристики бетонной смеси и прочностные свойства бетона. Установлены экстремумы выходных свойств бетона.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оптимальная гранулометрия, плотная упаковка зерен, оптимальная рецептура, карбонатный наполнитель, компьютерное моделирование, планированный эксперимент.

Optimal aggregate grain-size distribution for concrete was chosen and computer model of its polydisperse structure was created. Rheological features of concrete mixture and strength properties of concrete were studied by mathematical modeling method using three-way planned experiment. Extreme points of output concrete properties were determined.

K e y w o r d s: optimal gradation, tight grain packing, optimal composition, carbonade distribution, computer modeling, planned experiment.

Одним из способов улучшения свойств композиционных материалов является подбор оптимального гранулометрического состава заполнителей. Оптимальный с точки зрения формирования свойств бетонной смеси и бетона гранулометрический состав достигается, если обеспечивается наиболее плотная упаковка зерен [1]. В работах [2—5] рассматривается и совершенствуется метод оптимизации гранулометрического состава заполнителя путем приближения его к эталонной кривой просеивания минеральной части тяжелого бетона. Проектируя состав бетонной смеси с оптимальной гранулометрией, пористость зернисто-дисперсной системы сводят к минимуму, что дает возможность сократить расход цемента [6, 7].

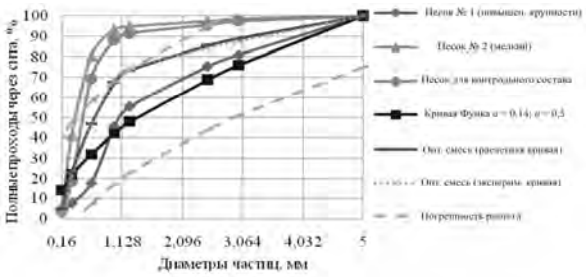
В работе [8] изложена методика оптимизации упаковки частиц заполнителя с использованием компьютерного моделирования и разработанной программы, дающей количественную оценку полученной упаковки. В данной программе использован алгоритм перекатывающихся частиц, который относится к типу «drop and roll» [9]. С помощью данной программы, задавая начальные параметры, можно получить количественную оценку упакованного массива сферических частиц. В работе [10] приведена методика получения высокопрочного бетона с высоким коэффициентом уплотнения за счет использования эффективной гранулометрии составляющих компонентов бетона и силовых технологических приемов.

При составлении рецептур содержание наполнителя часто рассчитывается исходя из рекомендуемой концентрации без учета геометрических особенностей их частиц и гранулометрии. Последний параметр обычно принимают во внимание для крупных наполнителей, но для мелких его учитывают не так часто. В работе [11] акцент сделан на наполнителях со сравнительно малыми размерами отдельных частичек, которые находятся в пределах 2…90 мкм. В работе [12] предложена новая схема фракционирования мелкого заполнителя для получения растворов с меньшим объемом межзерновых пустот. Экспериментальная проверка показала, что плотность повысилась на 10 %, водонепроницаемость — с марки W2 до W6, прочность — в 2 раза.

Как правило, в строительных смесях используется несколько заполнителей (или наполнителей) с разным гранулометрическим составом. В таком случае часто необходимо вручную подбирать количество того или иного компонента смеси для приближения ее гранулометрического состава к «идеальной» кривой. Разработанная нами [13] программа подбора гранулометрического состава заполнителя по принципу генерирования случайных величин объемных долей [14] позволяет рассчитать оптимальный количественный состав смеси, включающей до 100 исходных компонентов.

Цель данной работы заключается в разработке рецептуры для получения оптимального состава мелкозернистого бетона с применением карбонатного наполнителя. Задача рассматривалась последовательно по структурным элементам бетона: оптимизация гранулометрии инертного заполнителя, подбор состава вяжущей части и нахождение оптимальной дозировки гиперпластификатора. Применялись методы компьютерного расчета зернового состава, 3D-моделирования дисперсной структуры, планирования факторного эксперимента и математической статистики. В качестве исследуемых материалов применялись: природный песок Старицкого месторождения Тверской области (мелкий, средний и повышенной крупности), портландцемент М-500 ($R_{Ц28}$ = 53,9 МПа), молотый известняк с удельной поверхностью 400 м^2/кг, гиперпластификатор Melflux 1641F.

Работа строилась следующим образом: были определены зерновые составы и модули крупности исходных песков, после чего гранулометрические данные вводились в специально разработанную компьютерную программу «Подбор оптимальной гранулометрии заполнителя» (свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010617267 от 29.10.2010 г.), в которой был произведен расчет оптимальной смеси для двух песков, наиболее различающихся по крупности (рис., табл. 1). В дальнейшем фракция мельче 0,16 мм была отсеяна и не применялась в составе заполнителя при приготовлении бетонной смеси.



Гранулометрические данные заполнителя

Пустотность оптимизированной смеси составила 38,5 %.

Таблица 1

Зерновой состав оптимизированной смеси

Сито, мм	0,0	0,16	0,315	0,63	1,0	1,25	2,5	3,0	5,0
Проход, %	0	4,5	23	46,5	67,5	73,5	85,5	89	100

Далее требовалось смоделировать полученный зерновой состав заполнителя в трехмерной декартовой системе координат, при этом для более объективной оценки упаковки была принята идеальная сферическая форма частиц. Задача алгоритма была сформулирована следующим образом: «Последовательно разместить в ограниченном кубическом объеме *n*-е количество сферических частиц, при условии, что каждая новая частица будет занимать свободную позицию, не пересекая поверхности ранее созданных частиц». В целях приближения 3D-модели к реальной полидисперсной системе в основу принципа было заложено хаотичное распределение частиц, получаемое случайной генерацией начальной позиции каждой частицы. В процессе добавления новых частиц в систему их координаты пересчитываются при обнаружении пересечения поверхностей. Расчет пересечений поверхностей частиц производился в цикле последовательно для каждой новой частицы, что позволило добиться высокой скорости вычислений.

В целях повышения точности моделирования зерновой структуры в зерновом составе по гранулометрическому графику были выделены промежуточные фракции (табл. 2).

Таблица 2

Зерновой состав оптимизированной смеси с промежуточными фракциями

№ фр	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ячейка сита, мм	0,16	0,24	0,32	0,47	0,63	0,82	1,0	1,13	1,25	1,88	2,5	2,75	3,0	4,0	5,0
Проход, %	4,5	13,5	23	34,5	46,5	57	67,5	71,5	73,5	80	85,5	87,5	89	94,5	100
Остаток, %	9	9,5	11,5	12	10,5	10,5	4	2	6,5	5,5	2	1,5	5,5	5,5	0

Так как для построения 3D-модели упаковки частиц требуется количество сфер каждой фракции, необходимо перейти от суммарных объемных долей фракций к количеству сфер через объем одной сферы каждой фракции. Поскольку трехмерная модель реализуется методом расчета случайных координат частиц известного радиуса (при этом изначально отсутствует плотная укладка сфер, а плотность конечной упаковки достигается максимальным заполнением межзернового пространства последующими мелкими фракциями), необходимо учитывать пустотность сферических частиц для наименее плотной упаковки, равную 47,6 %. Объем одной сферы *i*-й фракции составляет

$$V_{\text{сф}.i} = \frac{\pi}{6} D_i^3.$$

Тогда количество сфер *i*-й фракции в кубическом объеме $V_{\text{емк}}$ с учетом пустотности

$$N_i = \frac{V_{\text{фр.}\,i} V_{\text{емк}}}{\frac{\pi}{6} D_i^3} 0,476,$$

где $V_{\text{фр.}\,i}$ — объемная доля фракции, %; $V_{\text{емк}}$ — объем емкости, мм^3; D_i — размер *i*-й фракции, мм.

По полученным формулам были рассчитаны количественные составы моделей для различных ограниченных объемов (табл. 3).

Таблица 3

Исходные данные для построения 3D-модели

Объем бункера, мм^3	Количество сфер в модели по фракциям, шт.															Все го
	0,16	0,24	0,32	0,47	0,63	0,82	1,0	1,13	1,25	1,88	2,5	2,75	3,0	4,0	5,0	
5 × 5 × 5=125	2497	781	418	131	48	22	5	2	4	1	0	0	0	0	0	3908
10 × 10 × 10=1000	19975	6247	3345	1051	382	173	36	13	30	8	1	1	2	1	0	31264

Рассчитанная по модели пустотность системы составила 41,2 %. Характер распределения зерен равномерный, упаковка частиц соответствует реальной. Превышение пустотности в сравнении с реальным составом объяснимо идеализированной формой зерен (рис. 2).

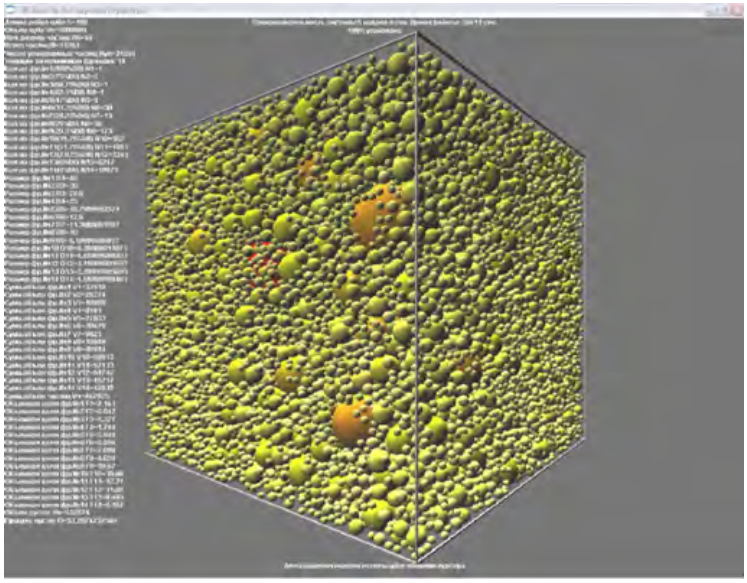
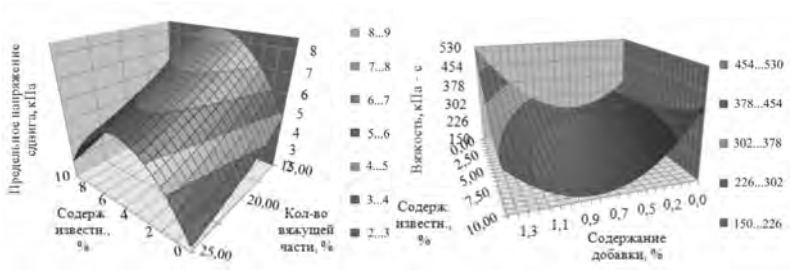


Рис. 2. 3D-модель упаковки зерен заполнителя (масштаб модели 10×10×10 мм)

Для дальнейшего исследования и получения функциональных зависимостей свойств бетона от рецептурных параметров был выбран трехфакторный планированный эксперимент типа B-D_{13}. Обработка данных эксперимента проводилась с применением специального программного продукта, разработанного на кафедре ПСК ТвГТУ. В качестве переменных факторов были выбраны: количество вяжущей части (G, %), содержание известняка в вяжущей части (L, %), количество добавки по массе вяжущей части (A, %). Контролировались следующие выходные свойства бетона: изменение водовяжущего отношения (W/G) при равной удобоукладываемости смесей, предельное напряжение сдвига (τ_0, кПа), пластичная вязкость (η, кПа · с), плотность бетонного камня ($\rho_б$, кг/м^3), прочность бетона в марочном возрасте ($R_{сж}$, МПа). Согласно рассчитанному плану эксперимента были изготовлены 10 опытных и 1 контрольный состав бетона. По рассчитанным математическим моделям были построены функциональные поверхности для всех исследуемых свойств (рис. 3, 4).



а *б*

Рис. 3. Зависимости предельного напряжения сдвига (*а*) и пластичной вязкости (*б*) от рецептурных параметров

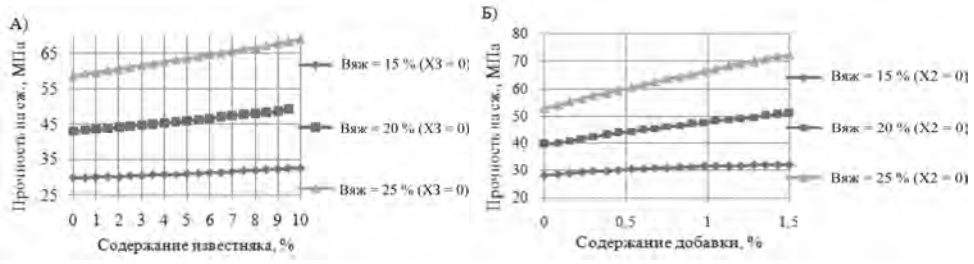


Рис. 4. Зависимости прочности бетона от рецептурных параметров

Результаты эксперимента показали, что для достижения оптимальной удобоукладываемости смеси, не вызывающей расслоения, необходимо увеличивать содержание гиперпластификатора. Гиперпластификатор Melflux 1641F значительно снижает водопотребность бетонной смеси, при этом количества воды хватает для реакции гидратации вяжущего, что в результате дает прирост прочности бетона. Анализ реологических характеристик показал, что снижение пластичной вязкости наблюдается при концентрации добавки порядка 0,8 % от массы вяжущей части, что улучшает перемешиваемость и удобоукладываемость бетонной смеси. Предельное напряжение сдвига снижается при увеличении дозировки добавки, что согласуется с данными других исследователей [15, 16]. Увеличение общей доли вяжущей части значительно способствует повышению прочности и плотности бетона, а также уменьшению водопотребности смеси, но в то же время повышает вязкость системы. Оптимальным количеством вяжущего в системе является 25 %, максимальная плотность бетона наблюдается при доле вяжущего 20…22 %.

Введение в систему карбонатного наполнителя — тонкомолотого известняка — незначительно влияет на водопотребность смеси (в сравнении с действием гиперпластификатора), способствует снижению вязкости и предельного напряжения сдвига, тем самым уменьшая структурную прочность смеси. Полученные данные подтверждают пластифицирующее действие карбонатного наполнителя [17, 18, 19]. Карбонатный наполнитель имеет химическое сродство с цементом, что при естественном твердении ведет к образованию плотного контакта между зернами вяжущей части и срастанию продуктов гидратации цемента с наполнителем. При этом карбонатные наполнители образуют в контактной зоне кристаллогидраты, по форме и свойствам отличающиеся от обычного цементного камня [20], в результате с увеличением содержания молотого известняка прочностные характеристики бетона возрастают. Максимальная плотность структуры характерна для содержания известняка порядка 4…6 % от доли вяжущей части.

Таким образом, решая задачи подбора состава бетона для различных критериев оптимальности (экономия сырьевых материалов или повышение технико-эксплуатационных показателей материалов), необходимо направленно варьировать рецептурные параметры, подбирая требуемые соотношения компонентов, и согласовывать их с выходными свойствами материала. В данном исследовании методом математического моделирования установлены функциональные взаимосвязи между рецептурными параметрами и выходными свойствами бетона. Полученные данные не противоречат существующим независимым исследованиям.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Баженов Ю. М.* Технология бетона. М. : АСВ, 2011. 528 с.

2. *Белов В. В., Смирнов М. А.* Формирование оптимальной структуры композиций для изготовления безобжиговых строительных конгломератов // Вестник Центрального регионального отделения РААСН. Воронеж : ВГАСУ, 2010. С. 65—72.

3. *Белов В. В., Смирнов М. А.* Оптимизация гранулометрического состава сырьевых смесей для получения прессованных бетонов на цементной связке // Материалы XV Академических чтений РААСН. Международная науч.-техн. конф. «Достижения и проблемы материаловедения и модернизации строительной индустрии». Т. 1. Казань, 2010. С. 297—302.

4. *Белов В. В., Смирнов М. А.* Оптимизация гранулометрического состава сырьевых смесей для получения прессованных бетонов на цементной связке // Нанотехнологии в строительстве. 2010. № 2(6). С. 7—18.

5. *Белов В. В., Смирнов М. А.* Формирование оптимальной макроструктуры строительной смеси // Строительные материалы. 2009. № 9. С. 88—90.

6. Нелинейные модели помогают сократить расход цемента путем улучшения уплотнения заполнителей // CPI — Международное бетонное производство. 2008. № 4. С. 28—35.

7. *Bulsari A., Kylmametsa H., Juvas K.* Нелинейные модели удобоукладываемости и прочности на сжатие помогают снизить затраты // CPI — Международное бетонное производство. 2009. № 6. С. 26—32.

8. *Белов В. В., Образцов И. В., Реунов А. Г.* Пат. 201610796 Рос. Федерации. Программа для моделирования хаотичной упаковки двухфракционной смеси гранул ; зарег. 25.01.10.

9. Исследование структуры пор в компьютерных моделях плотных и рыхлых упаковок сферических частиц / В. П. Волошин, Н. Н. Медведев, В. Б. Фенелонов, В. Н. Парман // Журнал структурной химии. 1999. Т. 40. № 4. С. 46—60.

10. Исследование процессов наноструктурирования в мелкозернистых бетонах с добавкой наночастиц диоксида кремния / Б. В. Гусев и др. // Нанотехнологии в строительстве. 2009. № 3. С. 8—14.

11. *Свидерский В. А., Миранюк А. В.* Влияние гранулометрических параметров наполнителя на структуру композиционного материала // Сухие строительные смеси. 2008. № 4. С. 46—48.

12. *Беленцов Ю. А.* Формирование оптимального гранулометрического состава заполнителя растворов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 9. С. 36—37.

13. *Белов В. В., Образцов И. В.* Пат. 2010617267 Рос. Федерации. Подбор оптимальной гранулометрии заполнителя строительного композита ; зарег. 29.10.10.

14. *Статюха Г. А., Телицына Н. Е., Суруп И. В.* Оптимизация гранулометрического состава наполнителей для сухих строительных смесей // Хімічні технології і екологія. Вісник ЧДТУ. 2008. № 4. С. 57—61.

15. *Несветаев Г. В., Давидюк А. Н.* Гиперпластификаторы «Melflux» для сухих строительных смесей и бетонов // Строительные материалы. 2010. № 3. С. 38—39.

16. *Шершев П. А.* Структурообразование цементно-водных систем с добавками ПАВ // Научный вестник ВГАСУ. 2009. № 5. С. 124—127.

17. *Копаница Н. О., Аниканова Л. А., Макаревич М. С.* Тонкодисперсные добавки для наполненных вяжущих на основе цемента // Строительные материалы. 2002. № 9. С. 2—3.

18. *Морозов Н. М., Морозова Н. Н.* Влияние наполнителей различной природы на структурообразование цементных систем // Материалы международного конгресса «Наука и инновации в строительстве SIB-2008». Т. 1. Современные проблемы строительного материаловедения и технологии. Кн. 1 (А—Н). Воронеж, 2008. С. 338—341.

19. Влияние карбонатсодержащих добавок на свойства композиционных цементов / В. К. Козлова, А. М. Маноха, А. А. Лихошерстов, Е. В. Мануйлов, Е. Ю. Малова // Цемент и его применение. 2012. № 3. С. 53—57.

20. Мелкозернистый бетон высокой прочности / С. В. Федосов, М. В. Акулова, А. М. Краснов, О. В. Кононова, В. Д. Черепов // Известия КазГАСУ. 2010. № 2(14). С. 286—291.

1. *Bazhenov Yu. M.* Tekhnologiya betona. M. : ASV, 2011. 528 s.

2. *Belov V. V., Smirnov M. A.* Formirovanie optimal'noy struktury kompozitsiy dlya izgotovleniya bezobzhigovykh stroitel'nykh konglomeratov // Vestnik Tsentral'nogo regional'nogo otdeleniya RAASN. Voronezh : VGASU, 2010. S. 65—72.

3. *Belov V. V., Smirnov M. A.* Optimizatsiya granulometricheskogo sostava syr'evykh smesey dlya polucheniya pressovannykh betonov na tsementnoy svyazke // Materialy XV Akademicheskikh chteniy RAASN. Mezhdunarodnaya nauch.-tekhn. konf. «Dostizheniya i problemy materialovedeniya i modernizatsii stroitel'noy industrii». T. 1. Kazan', 2010. S. 297—302.

4. *Belov V. V., Smirnov M. A.* Optimizatsiya granulometricheskogo sostava syr'evykh smesey dlya polucheniya pressovannykh betonov na tsementnoy svyazke // Nanotekhnologii v stroitel'stve. 2010. № 2(6). S. 7—18.

5. *Belov V. V., Smirnov M. A.* Formirovanie optimal'noy makrostruktury stroitel'noy smesi // Stroitel'nye materialy. 2009. № 9. S. 88—90.

6. Nelineynye modeli pomogayut sokratit' raskhod tsementa putem uluchsheniya uplotneniya zapolniteley // CPI — Mezhdunarodnoe betonnoe proizvodstvo. 2008. № 4. S. 28—35.

7. *Bulsari A., Kylmametsa H., Juvas K.* Nelineynye modeli udoboukladyvaemosti i prochnosti na szhatie pomogayut snizit' zatraty // CPI — Mezhdunarodnoe betonnoe proizvodstvo. 2009. № 6. S. 26—32.

8. *Belov V. V., Obraztsov I. V., Reunov A. G.* Pat. 201610796 Ros. Federatsii. Programma dlya modelirovaniya khaotichnoy upakovki dvukhfraktsionnoy smesi granul ; zareg. 25.01.10.

9. Issledovanie struktury por v komp'yuternykh modelyakh plotnykh i rykhlykh upakovok sfericheskikh chastits / V. P. Voloshin, N. N. Medvedev, V. B. Fenelonov, V. N. Parman // Zhurnal strukturnoy khimii. 1999. T. 40. № 4. S. 46—60.

10. Issledovanie protsessov nanostrukturirovaniya v melkozernistykh betonakh s dobavkoy nanochastits dioksida kremniya / B. V. Gusev i dr. // Nanotekhnologii v stroitel'stve. 2009. № 3. S. 8—14.

11. *Sviderskiy V. A., Miranyuk A. V.* Vliyanie granulometricheskikh parametrov napolnitelya na strukturu kompozitsionnogo materiala // Sukhie stroitel'nye smesi. 2008. № 4. S. 46—48.

12. *Belentsov Yu. A.* Formirovanie optimal'nogo granulometricheskogo sostava zapolnitelya rastvorov // Stroitel'nye materialy, oborudovanie, tekhnologii XXI veka. 2005. № 9. S. 36—37.

13. *Belov V. V., Obraztsov I. V.* Pat. 2010617267 Ros. Federatsii. Podbor optimal'noy granulometrii zapolnitelya stroitel'nogo kompozita ; zareg. 29.10.10.

14. *Statyukha G. A., Telitsyna N. E., Surup I. V.* Optimizatsiya granulometricheskogo sostava napolniteley dlya sukhikh stroitel'nykh smesey // Ximichni tekhnologiï i ekologiya. Visnik ChDTU. 2008. № 4. S. 57—61.

15. *Nesvetaev G. V., Davidyuk A. N.* Giperplastifikatory «Melflux» dlya sukhikh stroitel'nykh smesey i betonov // Stroitel'nye materialy. 2010. № 3. S. 38—39.

16. *Shershev P. A.* Strukturoobrazovanie tsementno-vodnykh sistem s dobavkami PAV // Nauchnyy vestnik VGASU. 2009. № 5. S. 124—127.

17. *Kopanitsa N. O., Anikanova L. A., Makarevich M. S.* Tonkodispersnye dobavki dlya napolnennykh vyazhushchikh na osnove tsementa // Stroitel'nye materialy. 2002. № 9. S. 2—3.

18. *Morozov N. M., Morozova N. N.* Vliyanie napolniteley razlichnoy prirody na strukturoobrazovanie tsementnykh sistem // Materialy mezhdunarodnogo kongressa «Nauka i innovatsii v stroitel'stve SIB-2008». T. 1. Sovremennye problemy stroitel'nogo materialovedeniya i tekhnologii. Kn. 1 (A—N). Voronezh, 2008. S. 338—341.

19. Vliyanie karbonatsoderzhashchikh dobavok na svoystva kompozitsionnykh tsementov / V. K. Kozlova, A. M. Manokha, A. A. Likhosherstov, E. V. Manuylov, E. Yu. Malova // Tsement i ego primenenie. 2012. № 3. S. 53—57.

20. Melkozernistyy beton vysokoy prochnosti / S. V. Fedosov, M. V. Akulova, A. M. Krasnov, O. V. Kononova, V. D. Cherepov // Izvestiya KazGASU. 2010. № 2(14). S. 286—291.

© Белов В. В., Образцов И. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Белов В. В., Образцов И. В. Оптимизация структуры мелкозернистого карбонатного бетона с применением компьютерного моделирования // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 555—562.

УДК 691.533

В. В. Белов, В. Б. Петропавловская, Ю. Ю. Полеонова, И. В. Образцов

ПОЛУЧЕНИЕ ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕЗОБЖИГОВЫХ ГИПСОВЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО И КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СОСТАВА СЫРЬЕВОЙ СМЕСИ

Методами компьютерного моделирования разработана математическая модель процесса формирования оптимальной структуры гипса. Экспериментально получен оптимальный состав сырьевой смеси и обнаружен экстремум прочности образцов гипса, соответствующий модели.

К л ю ч е в ы е с л о в а: оптимальная кристаллизационная структура, дисперсный материал, трехмерная реконструкция.

The authors develop mathematical model of formation process of optimal gypsum structure by methods of computer modeling. Optimal raw mixture composition was created experimentally and extreme point of gypsum resistibility corresponding to the model was revealed.

K e y w o r d s: optimal crystallization structure, dispersive material, dimensional reconstruction.

Вопросы экологии, ресурсосбережения и энергосбережения в промышленности строительных материалов выходят на первый план. Использование для производства строительных изделий безобжиговых гипсовых вяжущих веществ, полученных на основе гипсовых отходов, в том числе в виде отработанных форм для литья фаянсового производства, значительно повышает их эффективность за счет снижения стоимости сырья, исключения операции получения гипсового вяжущего и сушки готовых изделий, экономии энергозатрат на помол. Обеспечение строительства ресурсосберегающими экологически чистыми материалами и изделиями — главная задача промышленности строительных материалов XXI в.

В настоящее время одну из новых и перспективных областей строительного материаловедения составляют исследования структуры дисперсных систем. При создании материалов на стадии их разработки требуется проведение большого объема дорогостоящих лабораторных исследований. В связи с этим изучение структуры дисперсных систем вызывает необходимость применения современных методов математического моделирования, создания вычислительных моделей с использованием компьютерных технологий. Разработка математической модели, позволяющей комплексно описать процесс структурообразования данных систем, является актуальной, современной и необходимой задачей.

Системы негидратационного твердения — системы двуводный гипс — вода, образуемые формированием первичной кристаллизационной структуры вследствие искусственного сближения крупных и мелких частиц двугидрата на расстояния межмолекулярного взаимодействия, при котором и возникают контакты. Дисперсионная среда присутствует в виде тончайших пленок на поверхности твердой фазы. Формирование фазовых контактов может происходить за счет достижения пресыщения в результате перекрывания приповерхностных слоев частиц двуводного гипса разных размеров, который лежит в основе образования первичной структуры.

Вопросы уровней организации структур топологического беспорядка в дисперсных системах рассмотрены в работах [1], [2]. Исследования показывают, что для грубодисперсных частиц оптимальность структуры определяется плотностью упаковки кристаллов. Физика поведения тонкодисперсных частиц носит другой характер и обусловлена, в основном, силами поверхностного взаимодействия частиц. В данном случае в качестве критерия оптимальности может выступать количество «эффективных» кристаллизационных контактов, образующих кристаллическую структуру гипса. Получение более плотной упаковки кристаллов гипса связано с использованием смесей разных фракций, что позволяет повысить прочность получаемого материала. Установлено, что прочность дисперсных систем определяется прочностью частиц материала, числом контактов между частицами твердой фазы и прочностью каждого отдельного контакта. Число контактов, в свою очередь, зависит от размера частиц и способа их упаковки [3, 4].

Распространенным подходом к исследованию дисперсных материалов является трехмерная реконструкция их свойств и структуры с помощью системы твердых сфер. В рамках такой модели задача нахождения состава заполнителя композиционного материала, обладающего наибольшей плотностью, связана с плотностью пространственной упаковки сферических частиц. Наибольшая плотность укладки частиц сферической формы будет достигаться при определенном упорядоченном расположении сфер в масштабах всего заполняемого объема. Максимальная плотность упаковки достигается при расположении центров сфер в узлах гранецентрированной кубической решетки (рис. 1) или при плотной гексагональной укладке [5].

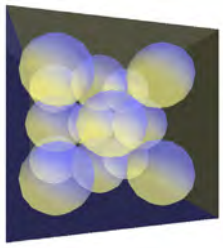


Рис. 1. Гранецентрированная кубическая упаковка

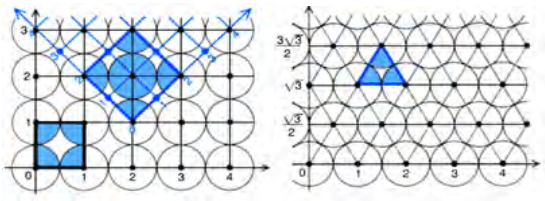
Структурная топология определяет координацию ближайшего окружения частицы в трехмерном пространстве координационным числом и плотностью их упаковки в системе [1]. Координационное число определяется количеством зерен (частиц) вокруг центрального зерна, соприкасающихся с ним. Данное исследование проводилось с использованием двуводного техногенного гипса. Все контакты между частицами двуводного техногенного гипса образуют кристаллическую структуру, т. е. являются «эффективными». Количество «эффективных» кристаллизационных контактов определяется соотношением размеров сблизившихся частиц и количественным содержанием частиц разного размера в составе дисперсной системы. Необходимо использовать бинарные смеси определенного типа, позволяющие получать максимальное количество контактов крупных и мелких частиц в упаковке [6].

Установлено, что распределение частиц в составе порошков отвечает нормальному закону распределения. Кроме того, гипсовые порошки могут состоять не только из отдельных минеральных исходных частиц, но и агрегатов, образующихся в процессе помола. Влияние таких агрегатов и собственно частиц на свойства порошков, в том числе на способности к уплотнению, далеко не одинаково. Эти различия еще более отчетливо проявляются при многофракционности системы, возникающей в результате смешивания порошков с различной удельной поверхностью для получения наиболее плотной упаковки материала после прессования.

Задача решалась путем создания математической модели, описывающей распределение твердых частиц в единице объема (элементарной ячейке) при условии образования максимального количества «эффективных» контактов. Так, согласно механизму негидратационного твердения, мелкая частица должна располагаться в промежутке между двумя крупными частицами. Для построения количественной модели микроструктуры бинарной смеси и ее изучения была разработана компьютерная программа с возможностью задания соотношения размеров частиц, а также исходного количества мелкой фракции [2, 7, 8]. В основу пространственной компьютерной модели была положена гранецентрированная кубическая упаковка крупных частиц.

При разработке компьютерной программы был произведен обзор существующих подходов к моделированию систем частиц. Были установлены обязательные требования к программному продукту: динамическое 3D-моделирование систем многих элементов, расчет объемных долей сырьевых компонентов, аналитическая оценка свойств конечных строительных материалов. Было выявлено, что существует ряд аналогов зарубежного технологического строительного программного обеспечения: EDEM, PFC 3D, Chute maven, ELFEN, Passage, Ascalaph, Yade, LAMMPS, Pasimodo, Esys-Particle (институт IFF, г. Веймар, Германия). Технические особенности программ: применяются современные алгоритмы 3D-моделирования (DEM, алгоритм перекатывающихся частиц «Drop and Roll», твердотельное моделирование), основанные на уравнениях Эйлера и Ньютона, позволяющие описывать физику поведения зернистых сред (плотные упаковки под действием гравитационных сил, капиллярное структурообразование, раздвижку зерен и др).

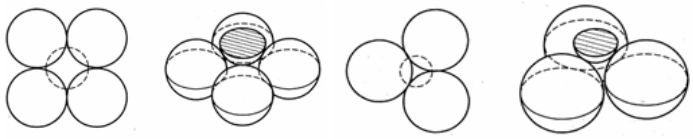
В ходе мониторинга рынка научного программного обеспечения было принято решение разработать аналогичный программный продукт, отличающийся простотой метода и позволяющий произвести 3D-реконструкцию дисперсной структуры. Для формулировки алгоритма были рассмотрены основные принципы упаковки твердых сфер (рис. 2, 3).



а *б*

Рис. 2. Плотные упаковки шарообразных частиц: *а* — при кубической упаковке; *б* — при гексагональной упаковке

Теоретически объем пустот в заполнителе не зависит от крупности его зерен. В первом случае число шаров, помещающихся по одной стороне куба, составляет $n = 1/d$, количество шаров во всем объеме $N = n^3 = 1/d^3$, а объем всех шаров $V_ш = N\pi d^3/6 = \pi/6$. Следовательно, относительный объем пустот (пустотность) не зависит от диаметра шаров и при кубической упаковке равен $V_п = 1 – \pi/6 = 1 – 3{,}14 / 6 = 0{,}476$, или 47,6 %.



а *б*

Рис. 3. Схемы двумодальных упаковок: *а* — бимодальная кубическая упаковка; *б* — бимодальная гексагонально-призматическая упаковка

В разработанной компьютерной модели укладка мелких частиц осуществляется по алгоритму перекатывающихся частиц «Drop and Roll» (рис. 4). В основу модели заложена гранецентрированная кубическая упаковка крупных частиц.

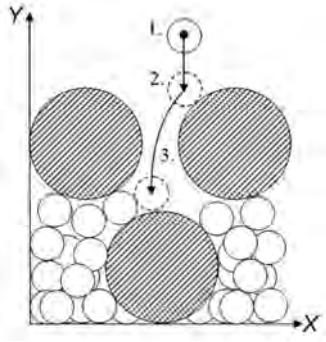


Рис. 4. Алгоритм «Drop and Roll»: *1* — начальное положение частицы; *2* — положение частицы при первом контакте; *3* — устойчивое положение в точке пересечения трех поверхностей

На рис. 5 представлен процесс заполнения мелкими частицами порового пространства, образованного крупными частицами, уложенными в гранецентрированную кубическую упаковку.

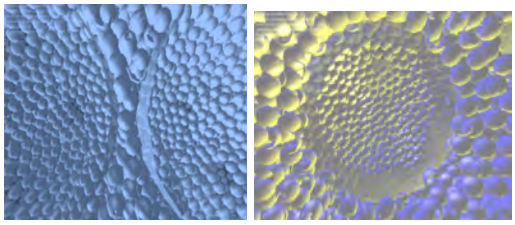


Рис. 5. Моделирование процесса формирования внутренней структуры дисперсной системы негидратационного твердения в единичном объеме

Модель имитирует распределение твердых частиц в единице объема (элементарной ячейке) с учетом образования максимального количества «эффективных» контактов, при этом мелкие частицы располагаются в промежутках между крупными частицами.

Количество контактов, образующихся на поверхности крупной частицы:

$$B = \frac{S_{\text{пов. кр. ч}}}{d^2_{\text{мал. ч}}} = \frac{4\pi R^2_{\text{кр. ч}}}{d^2_{\text{мал. ч}}}.$$

Количество контактов мелких частиц на единичной поверхности крупной частицы и соотношение диаметров частиц:

$$F = \frac{l_{\text{кр. ч}}}{2r_{\text{мал. ч}}} = \frac{\pi D_{\text{кр. ч}}}{d_{\text{мал. ч}}} = \frac{\pi\left(md_{\text{мал. ч}} + d_{\text{мал. ч}}\right)}{d_{\text{мал. ч}}},$$

$$m = \frac{D_{\text{кр. ч}}}{d_{\text{мал. ч}}}.$$

Программа позволяет исследовать процесс упаковки массива частиц, с возможностью задания их размеров и количества, что позволяет получать различные структуры дисперсных систем (рис. 6). Результатом работы программы стала построенная трехмерная модель упаковки частиц. При этом были рассчитаны следующие параметры: объем засыпанных частиц; объем пор; число контактов, образующихся на поверхности крупной частицы; количество контактов мелких частиц на единичной поверхности крупной частицы.

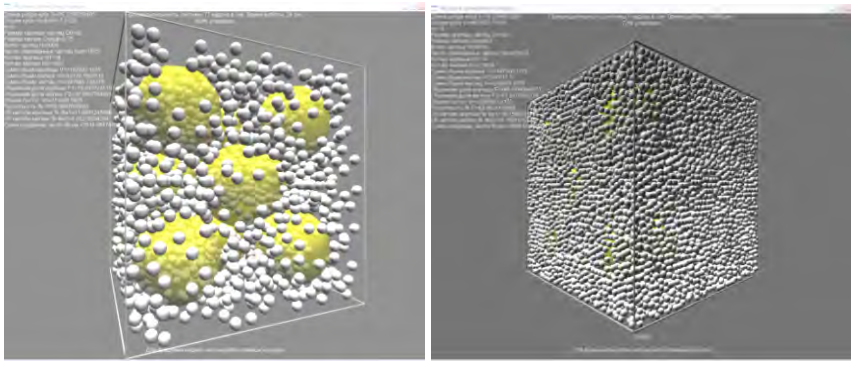


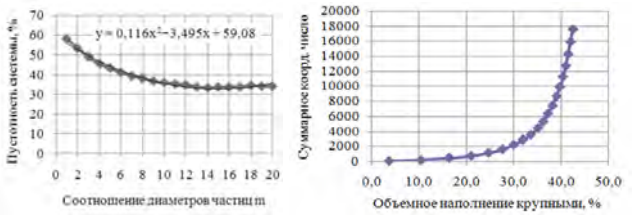
Рис. 6. Модели упаковок дисперсных систем

Разработанный программный продукт позволяет моделировать плотные упаковки полидисперсных систем, рассчитывать гранулометрические характеристики (пустотность, объемные доли фракций, координационное число), формулировать закон распределения частиц. С помощью данного продукта можно решать задачи подбора оптимального зернового состава заполнителей или моделировать составы с известной гранулометрией.

С помощью разработанной модели дисперсной системы была выведена математическая зависимость суммы координационных чисел от соотношений объемных наполнений и диаметров частиц бимодальной смеси (рис. 7):

$$\sum B = f(\varphi_1 / \varphi_2), \qquad y = 43{,}982x^2 + 791{,}69x + 3478{,}6;$$

$$\sum B = f(D_{\text{кр. ч}} / d_{\text{мал. ч}}), \qquad y = 43{,}98x^2 + 0{,}015x - 84{,}11.$$



а *б*

Рис. 7. Аналитические зависимости: *а* — плотности упаковки от соотношения диаметров частиц; *б* — суммарного координационного числа от объемной доли крупных частиц в системе

Исследования проводились на кафедре ПСК ТвГТУ. В работе использовался двуводный техногенный гипс — отработанные формы Конаковского фаянсового завода Тверской области. Применялись сырьевые смеси, приготовленные из порошков дигидрата сульфата кальция разной степени измельчения. Зерновой состав порошков двуводного техногенного гипса оценивали по результатам дисперсионного анализа с помощью лазерного анализатора типа Fritsch Particle Sizer «analysette 22» на базе МГСУ. Порошки были получены дроблением на щековой дробилке отработанных форм для литья с последующим помолом в лабораторной шаровой мельнице. Удельную поверхность порошков двуводного техногенного гипса оценивали фильтрационным методом на приборе ПСХ-11. Перемешивание порошков при приготовлении бинарных сырьевых смесей производилось вручную.

С целью исследования физико-механических характеристик, отражающих структурные свойства дисперсной системы негидратационного твердения, образцы были заформованы методом полусухого прессования на лабораторном гидравлическом прессе. Исследования прессованных материалов на основе двуводного техногенного гипса проводились на образцах-цилиндрах размером 25×25 мм. Твердение гипсовых образцов осуществлялось при нормальной температуре в эксикаторе при влажности среды более 95 %.

Исследования прочности композитов, получаемых на основе бидисперсных систем, показали наличие экстремума в области смесей с содержанием грубодисперсного порошка от 30 до 40 %. При оптимальной упаковке наибольшее количество контактов образуется за счет регулирования зернового состава бидисперсной системы.

Оптимальная структура с точки зрения обеспечения максимального количества контактов формируется при условии наличия одного зерна с

малым диаметром между зернами с большими диаметрами. Образование структуры такого типа возможно в бинарной смеси при определенном соотношении диаметров. Чем больше это соотношение, тем легче получить бинарную смесь «квазибазального» типа при минимальном времени перемешивания, поскольку зерна с малыми размерами заполняют объем пустот подобно жидкости, так как свободно проходят между зернами больших размеров.

По результатам исследований с применением компьютерной модели формирования оптимальной структуры дисперсной системы негидратационного твердения на основе двуводного техногенного гипса получена математическая зависимость, которая позволяет теоретически рассчитать оптимальный зерновой состав сырьевой смеси из порошков различной тонкости измельчения, обеспечивающий максимально плотную упаковку в объеме при максимальном количестве контактов зерен разного размера. Оптимальность состава подтверждена экспериментально (рис. 8).

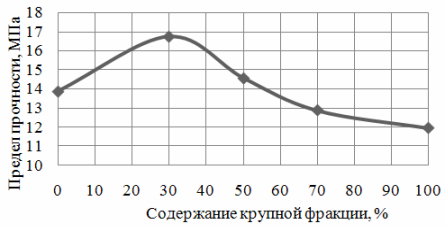
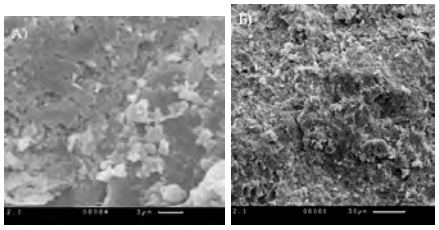


Рис. 8. Зависимость прочности гипсового композита от содержания крупной фракции смеси порошков двуводного гипса техногенного генезиса с $S_{уд}$ = 667 м^2/кг и $S_{уд}$ = 1006 м^2/кг на 7-е сутки твердения

Полученные в результате исследования опытные данные по растворимости, насыпной плотности монофракционных порошков и бифракционных смесей техногенного генезиса на их основе, а также прочности гипсовых композитов совпадают с расчетами компьютерной модели. Доказана правомерность и адекватность математической оценки процесса структурообразования гипсовых композитов. Оптимальное содержание порошка грубого помола по результатам исследований составляет 30 %, с помощью модели получено оптимальное соотношение — 30…40 % (рис. 9).



а *б*

Рис. 9. Микроструктура композита, полученного на основе бинарной смеси нормированного гранулометрического состава: *а* — непосредственно после прессования; *б* — на 7-е сутки твердения

Оптимизация гранулометрического состава сырьевых смесей на основе двуводного техногенного гипса позволяет повысить прочность получаемого композита вследствие увеличения активных центров кристаллизации в твердеющей системе, что подтверждается экспериментально. Регулирование зернового состава и увеличение дисперсности двуводного гипса являются основными факторами получения высокопрочного гипсового камня, высокого качества материалов и изделий на его основе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Хархардин А. Н., Топчиев А. И.* Уравнения для координационного числа в неупорядоченных системах // Успехи современного естествознания. 2003. № 9. С. 47—53.

2. *Белов В. В.* Оптимизация гранулометрического состава композиций для изготовления безобжиговых строительных конгломератов // Вестник МГСУ. 2009. № 3. С. 117—125.

3. *Петропавловская В. Б., Белов В. В., Новиченкова Т. Б.* Регулирование свойств безобжиговых гипсовых материалов // Строительные материалы. 2008. № 8. С. 14—15.

4. *Петропавловская В. Б., Белов В. В., Бурьянов А. Ф.* Твердеющие кристаллизационные системы на основе порошков двуводного гипса // Строительные материалы. 2007. № 12. С. 46—47.

5. *Королев Л. В., Лупанов А. П., Придатко Ю. М.* Плотная упаковка полидисперсных частиц в композиционных строительных материалах // Современные проблемы науки и образования. 2007. № 6.

6. *Петропавловская В. Б.* Оптимизация внутренней структуры дисперсных систем // Строительные материалы. 2010. № 6. С. 22—23.

7. *Белов В. В., Новиченкова Т. Б., Образцов И. В.* Пат. 2011615905 Рос. Федерации. Расчет топологических параметров сыпучих дисперсных систем.

8. *Белов В. В., Образцов И. В., Реунов А. Г.* Компьютерная трехмерная модель хаотичной упаковки частиц композиционного материала // Материалы IV Всероссийской конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Пенза : ПГУАС, 2009. С. 4.

1. *Kharkhardin A. N., Topchiev A. I.* Uravneniya dlya koordinatsionnogo chisla v neuporyadochennykh sistemakh // Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya. 2003. № 9. S. 47—53.

2. *Belov V. V.* Optimizatsiya granulometricheskogo sostava kompozitsiy dlya izgotovleniya bezobzhigovykh stroitel'nykh konglomeratov // Vestnik MGSU. 2009. № 3. S. 117—125.

3. *Petropavlovskaya V. B., Belov V. V., Novichenkova T. B.* Regulirovanie svoystv bezobzhigovykh gipsovykh materialov // Stroitel'nye materialy. 2008. № 8. S. 14—15.

4. *Petropavlovskaya V. B., Belov V. V., Bur'yanov A. F.* Tverdeyushchie kristallizatsionnye sistemy na osnove poroshkov dvuvodnogo gipsa // Stroitel'nye materialy. 2007. № 12. S. 46—47.

5. *Korolev L. V., Lupanov A. P., Pridatko Yu. M.* Plotnaya upakovka polidispersnykh chastits v kompozitsionnykh stroitel'nykh materialakh // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2007. № 6.

6. *Petropavlovskaya V. B.* Optimizatsiya vnutrenney struktury dispersnykh sistem // Stroitel'nye materialy. 2010. № 6. S. 22—23.

7. *Belov V. V., Novichenkova T. B., Obraztsov I. V.* Pat. 2011615905 Ros. Federatsii. Raschet topologicheskikh parametrov sypuchikh dispersnykh system.

8. *Belov V. V., Obraztsov I. V., Reunov A. G.* Komp'yuternaya trekhmernaya model' khaotichnoy upakovki chastits kompozitsionnogo materiala // Materialy IV Vserossiyskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh. Penza : PGUAS, 2009. S. 4.

© Белов В. В., Петропавловская В. Б., Полеонова Ю. Ю., Образцов И. В., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Получение высокопрочных безобжиговых гипсовых материалов на основе техногенных отходов с применением математического и компьютерного моделирования состава сырьевой смеси / В. В. Белов, В. Б. Петропавловская, Ю. Ю. Полеонова, И. В. Образцов // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 563—570.

УДК 625.08

А. И. Доценко, А. А. Соколов

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ АСФАЛЬТОБЕТОННОЙ СМЕСИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Рассмотрены принципы управления температурой асфальтобетонной смеси на выходе с асфальтобетонного завода, в процессе ее транспортировки и при укладке в полотно автомобильной дороги.

К л ю ч е в ы е с л о в а : температура асфальтобетонной смеси, транспортные средства, система автоматического управления.

Principles of management of road concrete mix temperature at the output from road concrete factory, during transportation and at road construction are envisaged.

K e y w o r d s: the temperature of asphalt-concrete mixture, means of transport, system of automatic control.

Температура асфальтобетонной смеси оказывает существенное влияние на технологические процессы ее укладки и уплотнения, а также на качество готового асфальтобетонного покрытия [1]. В настоящее время отсутствуют САУ оперативного управления температурой асфальтобетонной смеси на выходе АБЗ. Из-за этого отсутствует компенсация причин, вызывающих вариацию температуры смеси в месте ее укладки и уплотнения.

Одной из важнейших проблем в обеспечении качественного покрытия автомобильных дорог является температурная сегрегация асфальтобетонной смеси при ее транспортировке от завода до места укладки. Поэтому даже идеальная работа САУ температурой готовой асфальтобетонной смеси на выходе АБЗ не обеспечит стабильную температуру смеси при ее укладке в полотно дороги и уплотнении.

В работе [2] представлены данные по рекомендуемым режимам укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси. В качестве примера рассмотрим график (рис. 1), на котором представлены рекомендуемые диапазоны температур начала и конца процесса в зависимости от этапа уплотнения для асфальтобетонной смеси типа А.

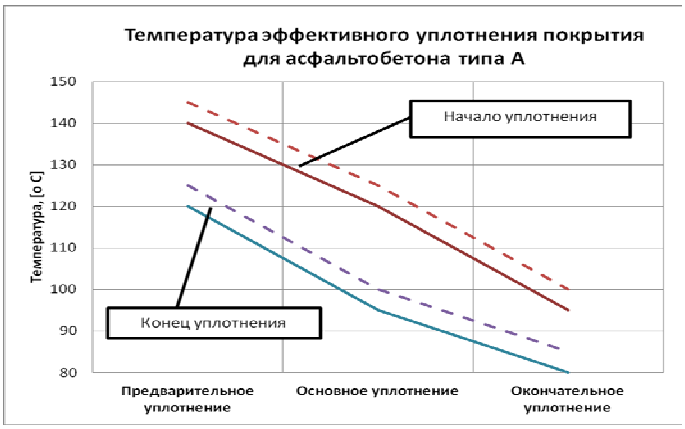


Рис. 1. Температура эффективного уплотнения для асфальтобетонной смеси типа А

Как видно, для эффективного уплотнения температура уложенной асфальтобетонной смеси должна быть на момент начала процесса уплотнения не ниже 140…145 ^{o}C. Располагая этой температурой, можно оценить необходимую температуру на выходе АБЗ, которая обеспечит требуемую температуру с учетом параметров окружающей среды, времени доставки асфальтобетонной смеси к месту ее укладки, времени ее укладки. При расчетах необходимо учитывать естественную нестабильность параметров.

Известные на настоящий момент времени САУ АБЗ [3, 4, 5] обеспечивают заданную стабильную температуру асфальтобетонной смеси на выходе предприятия. В этих системах реализуется принцип работы САУ по отклонению управляемого параметра от заданного значения.

В процессе работы АБЗ изменяются основные факторы, оказывающие влияние на требуемую температуру смеси на выходе АБЗ:

параметры окружающей среды (температура, скорость, направление ветра);

время доставки асфальтобетонной смеси к месту ее укладки из-за изменения дорожных условий — «пробок» на пути следования самосвалов;

АБЗ может поставлять асфальтобетонную смесь не в одну точку ее укладки, а в несколько точек. Причем эти поставки могут осуществляться и последовательно, и параллельно во времени.

Таким образом, для решения поставленной задачи — обеспечения требуемого значения температуры асфальтобетонной смеси к месту ее укладки и уплотнения — необходимо не просто стабилизировать температуру смеси на выходе АБЗ, но оперативно управлять этой температурой для компенсации влияния рассмотренных факторов.

При строительстве новых магистральных автомобильных трасс вне города и в стороне от существующей дорожной сети, особенно при условии, что АБЗ находится рядом с трассой, эта задача не столь актуальна в части необходимости компенсации вариации времени доставки асфальтобетонной смеси. При строительстве и ремонте асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог в условиях большого города вариация времени доставки асфальтобетонной смеси к месту ее укладки из-за изменения дорожных условий — «пробок» на пути следования самосвалов — приобретает особую актуальность.

В соответствии с поставленной задачей обобщенная структура САУ АБЗ имеет следующий вид (рис. 2).

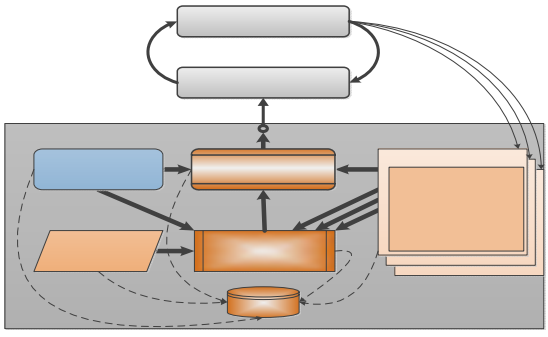


Рис. 2. Обобщенная структура подсистемы САУ АБЗ управления температурой асфальтобетонной смеси

Подсистема оперативного управления температурой асфальтобетонной смеси формирует заданное значение температуры асфальтобетонной смеси на выходе АБЗ, а традиционная САУ АБЗ обеспечивает поддержание требуемой температуры смеси на заданном уровне.

Подсистема оперативного управления температурой асфальтобетонной смеси получает информацию об объектах, на которые доставляется асфальтобетонная смесь для ее последующей укладки. В зависимости от текущей ситуации таких объектов может быть несколько. О каждом из объектов необходима следующая информация:

общая характеристика объекта;

координаты объекта. Данная характеристика относительно стабильна, во всяком случае для решения задач оперативного управления;

дорожная обстановка (время в пути);

текущая оценка. Может быть получена в реальном масштабе времени с использованием программного продукта «Яндекс. Карты», взаимодействие с которым возможно как на программном уровне, так и в «ручном режиме», особенно на начальном этапе внедрения САУ;

прогноз ситуации на период планирования. Прогноз осуществляется с использованием возможностей программного продукта «Яндекс. Карты» и на основе анализа данных из собственной базы данных;

характеристики требуемой асфальтобетонной смеси;

тип асфальтобетонной смеси, которая должна быть доставлена;

требуемый объем поставки асфальтобетонной смеси на период планирования;

дисциплина поставок асфальтобетонной смеси. Желаемое распределение во времени поставки асфальтобетонной смеси на период планирования;

фактическая температура смеси в момент доставки. Эти данные необходима для оперативной коррекции модели теплообмена. Эта информация может быть собрана автоматически от соответствующего оснащения транспортных средств [2] и вручную, особенно на начальном этапе внедрения САУ.

Подсистема сбора данных о параметрах окружающей среды обеспечивает сбор данных, оказывающих существенное влияние на теплообмен транспортируемой асфальтобетонной смеси с окружающей средой. Среди основных контролируемых факторов следует выделить:

температурные показатели. Для эффективной работы САУ требуются данные о температуре окружающей среды;

фактическая температура воздуха в текущий момент времени;

подробный прогноз погоды на период управления. Необходимо отметить, что процесс изменения температуры асфальтобетонной смеси на выходе АБЗ весьма инерционный. Поэтому для эффективного управления процессом требуется своевременная информация об изменении температуры;

ветровые характеристики. Скорость и направление ветра оказывают влияние на процессы теплообмена, поэтому их необходимо контролировать. Относительно частоты контроля справедливы все вышеуказанные факторы.

База данных «Нормативные документы» необходима для обеспечения соблюдения ограничений, которые накладываются требованиями стандартов.

В этой базе данных содержится информация о рекомендуемых и допустимых значениях температуры асфальтобетонной смеси как на выходе АБЗ, так и в месте ее укладки и уплотнения.

Модель теплообмена обеспечивает расчет изменения температуры асфальтобетонной смеси в процессе ее транспортировки. Это позволяет оценить изменения температуры смеси внутри кузова самосвала. Обобщенно структура модели транспортировки асфальтобетонной смеси имеет следующий вид (рис. 3).

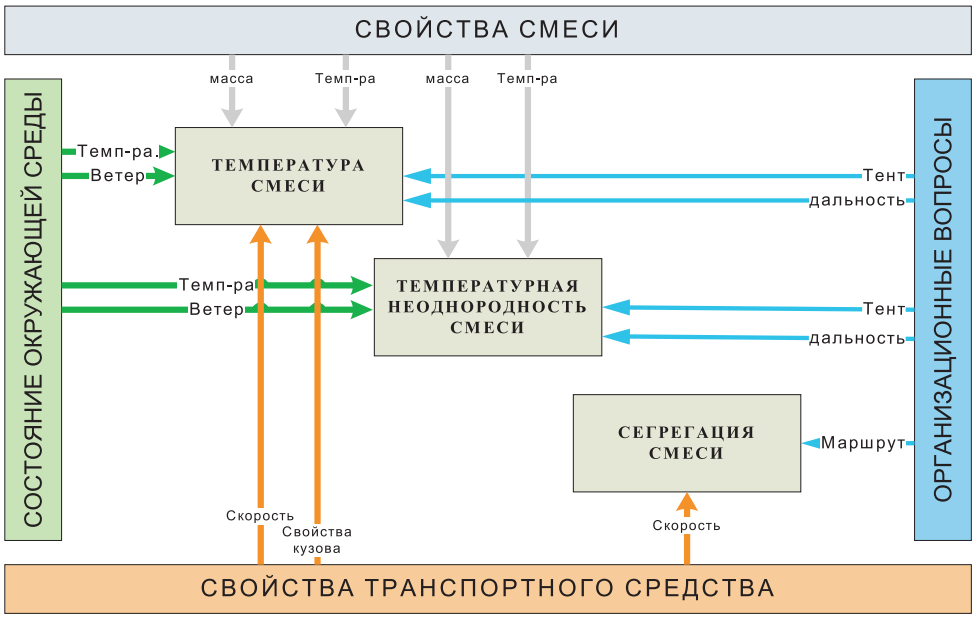


Рис. 3. Структура модели транспортировки асфальтобетонной смеси

На вход модели поступают основные теплофизические характеристики асфальтобетонной смеси, температура воздуха, скорость и направление ветра, скорость и свойства транспортного средства и расстояние перевозки.

Выходами модели являются:

распределение температуры по толщине смеси;

изменение температуры во времени.

База данных обеспечивает упорядоченную фиксацию всех необходимых данных. Это позволяет решать задачи прогнозирования и проводить последующую обработку данных для получения новых данных и моделей.

На основе собранных данных, результатов моделирования и нормативных требований контур оперативного управления рецептурой формирует задание (требуемую температуру асфальтобетонной смеси) для подсистемы стабилизации температуры асфальтобетонной смеси, которая входит в состав стандартной САУ АБЗ.

На начальном этапе внедрения разрабатываемой системы оперативного управления температурой асфальтобетонной смеси задание в стандартную САУ может вноситься вручную. Это обеспечивает дополнительный контроль на этапе начальной эксплуатации.

В работе [1] представлена структура САУ температурой асфальтобетонной смеси на выходе АБЗ и на месте ее укладки с использованием комбинированного (по отклонению и возмущению) принципа управления (рис. 4).

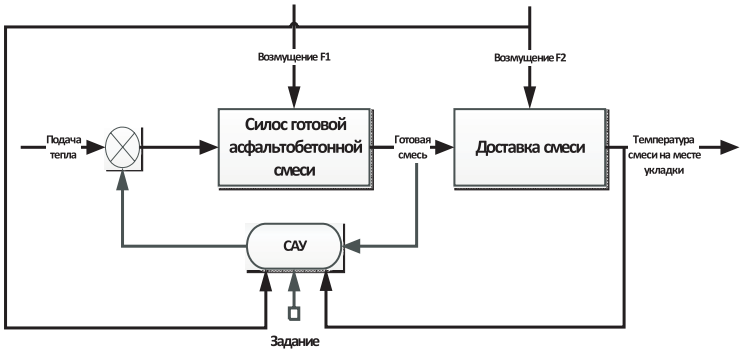


Рис. 4. Структура САУ температурой асфальтобетонной смеси на выходе АБЗ и на месте ее укладки: комбинированный принцип управления

Для данной структуры САУ управляющее воздействие может быть представлено следующей функцией:

$$U(t) = U^{\text{АБЗ}}(t) + U^{\text{укл}}_{\text{откл}}(t) + U^{\text{укл}}_{\text{возм}}(t) =$$
$$= \vartheta\left\{\Delta\left[T^{\text{АБЗ}}_{\text{см}}(t) - T^{\text{АБЗ}}_{Z}\right]\right\} + \vartheta\left\{\Delta\left[T^{\text{укл}}_{\text{см}}(t) - T^{\text{укл}}_{Z}\right]\right\} +$$
$$+ \omega\left\{t^{\circ}_{\text{ф.см}}, t^{\circ}_{\text{ф.пог}}, t_{\text{дост.}}, t_{\text{прогн.}}\left[x, y, z\right], V_{\text{ср}}\right\},$$

где $U^{\text{укл}}_{\text{откл}}(t)$ — управляющее воздействие контура стабилизации температуры асфальтобетонной смеси в месте ее укладки и уплотнения для контура управления по отклонению; $U^{\text{укл}}_{\text{возм}}(t)$ — управляющее воздействие контура стабилизации температуры асфальтобетонной смеси в месте ее укладки и уплотнения для контура управления по возмущению; $t^{\circ}_{\text{ф.см}}$ — фактическая температура асфальтобетонной смеси в кузове самосвала. Эта температура контролируется в одной точке и на ее основе корректируется модель распределения температуры в кузове самосвала; $t^{\circ}_{\text{ф.пог}}$ — фактическая температура воздуха в том месте, где находится самосвал; $t_{\text{дост.}}$ — время доставки (прошедшее с момента погрузки смеси в кузов на АБЗ); $t_{\text{прогн.}}$ — прогнозируемое время доставки смеси к месту укладки. Прогноз делается на основе анализа текущего положения самосвала и загрузки автомобильных дорог (Яндекс. Пробки); [*x*,*y*,*z*] — текущие координаты самосвала представляемые системой спутниковой навигации ГЛОНАСС и/или GPS; $V_{\text{ср}}$ — средняя скорость движения самосвала.

Таким образом, основой разрабатываемой подсистемы оперативного управления температурой асфальтобетонной смеси на выходе АБЗ является модель теплообмена.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Доценко А. И., Соколов А. А.* Система управления температурой асфальтобетонной смеси на выходе АБЗ // Механизация строительства. 2012. № 7.

2. Компьютерное моделирование в автоматизации производства асфальтобетонной смеси. Кн. 2. Практические разработки / В. А. Воробьев, Д. Н. Суворов, Э. В. Котлярский, В. И. Доценко, В. А. Попов. М. : Изд-во Российской инженерной академии, 2008. 6 с.

3. Система автоматического управления асфальтобетонными заводами АБЗ-08 [Электронный ресурс]. URL : http://vershina.tomsk.ru/?a=micro / (дата обращения: 21.12.2012).

4. Инжиниринговая компания ЗАО «Научно-технический центр "Информационные системы"». Система автоматизированного управления участком приготовления асфальтобетона (САУ УПА) [Электронный ресурс]. URL : http://www.is.pl.ua/saupa.php?menu=2 / (дата обращения: 21. 12. 2012).

5. Система автоматизации производства «Крутой Замес». ООО «АВС-МК» [Электронный ресурс]. URL : http://www.avs-mk.ru/asu/systems/kruz/ (дата обращения: 21.12.2012).

1. *Dotsenko A. I., Sokolov A. A.* Sistema upravleniya temperaturoy asfal'tobetonnoy smesi na vykhode ABZ // Mekhanizatsiya stroitel'stva. 2012. № 7.

2. Komp'yuternoe modelirovanie v avtomatizatsii proizvodstva asfal'tobetonnoy smesi. Kn. 2. Prakticheskie razrabotki / V. A. Vorob'ev, D. N. Suvorov, E. V. Kotlyarskiy, V. I. Dotsenko, V. A. Popov. M. : Izd-vo Rossiyskoy inzhenernoy akademii, 2008. 5 s.

3. Sistema avtomaticheskogo upravleniya asfal'tobetonnymi zavodami ABZ-08 [Elektronnyy resurs]. URL : http://vershina.tomsk.ru/?a=micro / (data obrashcheniya: 21.12.2012).

4. Inzhiniringovaya kompaniya ZAO «Nauchno-tekhnicheskiy tsentr "Informatsionnye sistemy"». Sistema avtomatizirovannogo upravleniya uchastkom prigotovleniya asfal'tobetona (SAU UPA) [Elektronnyy resurs]. URL : http://www.is.pl.ua/saupa.php?menu=2 / (data obrashcheniya: 21.12.2012).

5. Sistema avtomatizatsii proizvodstva «Krutoy Zames». OOO «AVS-MK» [Elektronnyy resurs]. URL : http://www.avs-mk.ru/asu/systems/kruz/ (data obrashcheniya: 21. 12. 2012).

© Доценко А. И., Соколов А. А., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Доценко А. И., Соколов А. А. Принципы управления температурой асфальтобетонной смеси при строительстве автомобильных дорог // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31(50). Ч. 2. Строительные науки. С. 571—576.

УДК 502.5 : 519.816

Б. Х. Санжапов, Н. П. Садовникова

ПОДДЕРЖКА ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ НА ОСНОВЕ ЭКОСИСТЕМНОГО ПОДХОДА

Рассмотрен подход к оценке стратегий развития территорий на основе теории нечетких множеств и возможностей. Построена модель оценки устойчивого развития города в виде ориентированного функционально-взвешенного графа, которая может быть применена для корректировки планов и программ развития, сравнения альтернативных стратегий, выбора управляющих воздействий.

К л ю ч е в ы е с л о в а: устойчивое развитие, территориальное планирование, системы поддержки принятия решений, нечеткие множества, теория возможностей, экспертная оценка, комплексные системы.

The approach to the evaluation of territorial development strategies based on fuzzy sets and possibilities theory is considered. The evaluation model of sustainable city development in form of functional-weighted oriented graph, which can be used to correct development plans and programs, was carried out, as well as the comparison of alternative strategies and the choice of managing impacts.

K e y w o r d s: sustainable development, territorial planning, decision support systems (DSS), fuzzy sets, theory of possibilities, expert estimation, complex systems.

Городская территория представляет собой ресурс, распоряжение которым, с одной стороны, дает возможность в случае эффективного его использования получать прибыли и преференции городу как субъекту конкурентной среды. С другой стороны, городская территория — основа существования и функционирования городского сообщества. Удовлетворение потребностей городских жителей в качественном жилье, социальных объектах, транспортной, инженерной инфраструктуре и других системах жизнеобеспечения — основная цель функционирования города. При планировании развития территорий учитываются физико-географические, инженерно-геологические и экологические характеристики, которые совместно определяют градостроительную ценность территории.

Основные задачи, решаемые в ходе реализации территориального планирования развития города:

1) определение главных целей и задач развития города;

2) сбор данных о градостроительной деятельности, выявление ресурсов;

3) анализ информации и определение стратегического направления развития;

4) принятие генерального плана развития города, определяющего последовательные пути пространственных преобразований, реализующих мероприятия по различным направлениям развития города.

Смена тенденций в концепции управления городскими территориями обусловлена новыми условиями, сложившимися в результате изменения общих подходов к вопросам взаимодействия природы и общества, связанных с необходимостью учитывать условия и особенности, позволяющие повысить эффективность использования имеющихся ресурсов, снизить нагрузку на окружающую среду.

Базовым документом территориального планирования является генеральный план. Основополагающими принципами при его разработке являются принципы зональности, экологической безопасности, рациональной организации территории. Принцип зональности подразумевает разделение всей территории города, входящей в планируемое пространство, на четыре блока — промышленный, жилой, культурно-бытовой, рекреационный. Задачи оценки и функционального зонирования территории решаются, как правило, на основе опыта и интуиции проектировщиков с привлечением в ряде случаев экспертных методических подходов, прежде всего — различных версий балльного подхода к оценке территории. Применение этого подхода на практике является недостаточным для обоснования проектных решений, поскольку позволяет лишь отсечь заведомо непригодные территории, но не дает более определенных оснований для принятия проектных решений [1].

В последнее время в международной практике широкую популярность получил другой вид представления планировочной деятельности — мастер-план, который отличается от генерального плана большим временным отрезком планирования, меньшей детализацией, но при этом большей степенью концептуализации. Кроме того при разработке мастер-плана особое внимание уделяется анализу ресурсного потенциала территории. При отсутствии понимания за счет каких ресурсов (финансовых, людских, энергетических) будут развиваться заявленные проекты, любой план развития обречен быть документом-утопией, который в принципе не может быть реализован в расчетные сроки. Потому особенно важно при разработке планов развития города и анализе их реализации иметь механизм оценки принимаемых решений, с помощью которого можно прогнозировать будущие состояния города как среды формирующей все системы жизнеобеспечения.

Основные этапы процесса поддержки принятия решений при планировании развития городских территорий могут быть определены следующим образом (рис. 1).

Рис. 1. Стратегический уровень принятия решений в процессе управления территориальным развитием города

В условиях, когда исходная информация о характеристиках исследуемой системы и показателях критериев оценки эффективности ее функционирования является нечеткой, целесообразно использовать подход, основанный на теории нечетких множеств и возможностей [2].

Цель развития города формализуется путем задания нечетких ограничений на значения показателей качества функционирования города, которые определены как экономическая эффективность Q_1, экологическая безопасность Q_2, социальная устойчивость Q_3. Значения показателей качества q_1, q_2, q_3 определяются значениями характеристик системы, которые формируют информационную модель состояния системы. Зависимости между значениями показателей определяются на основе статистического анализа (факторный, корреляционный и регрессионный анализ). В случае отсутствия необходимой статистической информации применяется технология экспертного анализа.

Модель отношений между характеристиками системы задается с помощью графа $G = (X, E, F)$, где X — множество вершин (характеристики, описывающие состояние системы); множество дуг $E = \{(X_i, X_j)\}$, причем $(X_i, X_j) \in E$, только если значение x_i характеристики X_i непосредственно зависит от значения x_j характеристики X_j; $F = \{f_i\}$ — множество функций связи между характеристиками системы $x_i = f_i(x_{i1},..., x_{in})$.

Функции f_i являются неубывающими по каждому из своих аргументов.

Множество вершин, в которые направлены дуги из вершины X_i, есть

$$\Gamma_{X_i} = \{X_{i1},...,X_{in}\}.$$

Значения показателей качеств заданы в виде нечетких множеств $\tilde{Q}_1,..., \tilde{Q}_3$

$$\tilde{Q}_i = \left\{\left(q_i, \mu_{\tilde{Q}_i}(q_i)\right)\right\},\ i = \overline{1,...,3}.$$

Предполагается, что показатели качества независимы, т. е. вместо совокупности этих требований рассматривается одно — декартово произведение $\tilde{Q}_1 \times ... \times \tilde{Q}_3$.

Возможность реализации значений характеристик $X_j \in V_M \{X_{j1},..., X_{jm}\}$ нижнего уровня графа G моделируется в виде распределения нечетких множеств

$$\tilde{X}_j = \left\{\left(x_j, \mu_j(x_j)\right)\right\}, x_j \in R^1,\ j = j_1,..., j_m,$$

где $\mu_j(x_j)$ — возможность того, что характеристика X_j может принимать значение x_j.

Значения $q_1,..., q_3$ показателей качества $\tilde{Q}_1,..., \tilde{Q}_3$ зависят только от значений характеристик верхнего уровня. Ограничения на значения характеристик $X_j \in V_M = (X_{j1},..., X_{jm})$ нижнего уровня (технологические, экономические, экологические) представлены неравенствами [3]:

$$R_t(x_{j1},..., x_{jm}) \le R_t^0,\ t = \overline{1,T} \quad (1)$$

или $R_t(x_{j1},..., x_{jm}) \ge R_t^0,\ t = \overline{1,T}.$ (2)

Метод поэлементной декомпозиции предполагает [4], начиная с характеристик $X_i \in V_{M-1}$, вычисление возможности $\tilde{X}_i$ в соответствии с принципом обобщения Л. Заде на основании возможности $\tilde{X}_j$ для всех $X_j \in \Gamma_{X_i}$.

Возможность достижения требуемых значений характеристик для всех $X_j \in \Gamma_{X_i}$ определяется из

$$\mu_i(x_i) = \max_{x_{i_1},\ldots,x_{i_t}: x_i = f_i(x_{i_1},\ldots,x_{i_t})} \mu_{i_1}(x_{i_1}) \wedge \ldots \wedge \mu_{i_t}(x_{i_t}),\ x_i \in R^1, \quad (3)$$

где $a \wedge b = \min(a, b)$.

Возможность достижения цели $\Pi\tilde{Q}_1 = \left\{\left(q_l, \mu_{\Pi\tilde{Q}_l}(q_l)\right)\right\},\ l = 1, 2, 3$

$$\mu_{\Pi\tilde{Q}_l}(q_l) = \max_{x_{k_1},\ldots,x_{k_p}: q_l = Q_l(x_{k_1},\ldots,x_{k_l})} \mu_{k_1}(x_{k_1}) \wedge \ldots \wedge \mu_{k_p}(x_{k_p}),\ q_l \in R^1. \quad (4)$$

Оптимальные требования к характеристикам системы, показателям качества и оценка степени достижения цели находятся в результате решения задачи:

$$\mu_{\tilde{Q}_1}(q_1) \wedge \ldots \wedge \mu_{\tilde{Q}_3} \wedge \mu_{\Pi Q_1}(q_1) \wedge \ldots \wedge \mu_{\Pi Q_3}(q_3) \to \max. \quad (5)$$

Задача (5) решается при следующих предположениях:

1. Функции принадлежности характеристик последнего уровня являются непрерывными, квазивогнутыми и достигают максимального значения 1 в своих областях значений, и соответствующие универсальные множества-отрезки.

2. Все связи в системе являются монотонно возрастающими, т. е. $Q_l \in (l = 1, 2, 3)$ и f_i, F, R_t — монотонно возрастающие функции.

3. Необходимо выполнение одного из типов согласования:

если при решении задачи $\lambda_l = \mu_{Ql} \wedge \mu_{\Pi Ql} \to \max$ ($l = 1, 2, 3$), все нечеткие множества $\Pi Q_l \cap \widetilde{Q_l}$ слева от λ_l определяются возможностями ΠQ_l, а справа от λ_l — нечеткими показателями качества $\widetilde{Q_l}$, то имеет место согласование первого типа, если наоборот — согласование второго типа.

Рассмотрим пример реализации данной методологии в решении задачи оценки сценариев развития г. Волгограда с позиций экосистемного подхода. В качестве исходных данных для построения модели использовалась официальная информация Федеральной службы государственной статистики РФ, материалы Генерального плана развития г. Волгограда, стратегического плана, инвестиционного паспорта г. Волгограда. Для определения значений качественных показателей использовалась методология сценарного моделирования [5].

Отношение между целевыми показателями и значениями факторов заданы в виде графа (рис. 2).

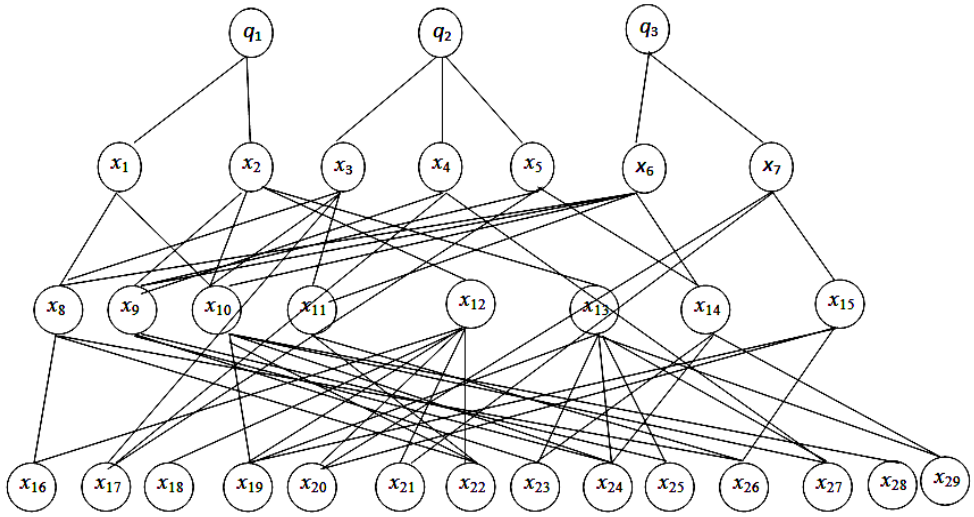


Рис. 2. Граф отношений между характеристиками системы

В качестве характеристик системы, значения которых могут быть скорректированы в результате тех или иных управляющих воздействий (характеристики нижнего уровня), выбраны $x_1 \ldots x_{16}$ (табл. 1).

Таблица 1

Характеристики нижнего уровня

Обозначение	Название фактора
x_{16}	Доля озелененных территорий рекреационного назначения
x_{17}	Уровень материального благополучия
x_{18}	Доля «зеленых» объектов
x_{19}	Доля утилизируемых отходов
x_{20}	Эффективность экологического менеджмента
x_{21}	Уровень развития ресурсосберегающих технологий
x_{22}	Уровень озеленения
x_{23}	Обеспеченность объектами социального, культурного и спортивного назначения
x_{24}	Жилищный фонд
x_{25}	Протяженность дорог
x_{26}	Рекреационный потенциал территории
x_{27}	Прирост автомобильного транспорта
x_{28}	Общий объем выбросов загрязняющих веществ(без учета автотранспорта, тыс. т)
x_{29}	Численность населения

Виды связей описываются набором функций, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Описание связей переменных моделей

Обозначение	Название	Описание
q_1	Качество городской среды	$q_1 = 0{,}3\ x_1 + 0{,}7x_2$
q_2	Уровень социального благополучия	$q_2 = 0{,}2\ x_3 + 0{,}3x_4 + 0{,}5x_5$
q_3	Экономическая эффективность	$q_3 = 0{,}4\ x_6 + 0{,}6x_7$
x_1	Уровень физического комфорта	$x_1 = 0{,}2\ x_8 + 0{,}4x_9 + 0{,}4/x_{10}$
x_2	Уровень экологической безопасности	$x_2 = x_{12} - x_{10} + 1/x_{13}$
x_3	Уровень психологического комфорта	$x_3 = x_8 + x_{17} + 1/x_{10} + x_{11}$
x_4	Уровень потребления	$x_4 = x_9 + x_{17} + x_{27}$
x_5	Уровень социальной безопасности	$x_5 = x_9 + x_{17} + x_{24}$
x_6	Конкурентоспособность территории	$x_6 = x_8 + x_9 + x_{11} + x_{14} + 1/x_{10}$
x_7	Эффективность использования ресурсов	$x_7 = x_{20} + x_{21} + x_{15}$
x_8	Уровень развития общественных пространств	$x_8 = 0{,}3x_{16} + 0{,}4\ x_{22} + 0{,}3x_{26}$
x_9	Уровень развития инфраструктуры	$x_9 = 0{,}2x_{23} / \max x_{23} + 0{,}5\ x_{24} /$ $/ \max x_{24} + 0{,}3x_{25} / \max x_{25}$, max x — максимальное значение среди городов с площадью 500...800 км^2
x_{10}	Общий уровень загрязнения	$x_{10} = 0{,}2x_{24} / N + 0{,}5\ (x_{27}x_{29}) /$ $/ 1000 + 0{,}3x_{28} / N - x_{19} - x_{22}$, N — площадь территории, га
x_{11}	Эстетическая привлекательность территории	$x_{11} = x_{22} + x_{26}$
x_{12}	Уровень биосферосовместимости	$x_{12} = x_{16} + x_{18} + x_{19} + x_{21} + x_{22}$
x_{13}	Эконагрузка	$x_{13} = x_{23} / N + x_{24} / N + x_{25} / N +$ $+ (x_{27}x_{29}) / 1000 + x_{28} / N +$ $+ (EFx_{29}) / N$, N — площадь территории, га; EF — экол. след чел. (ср. по России, га)
x_{14}	Обеспеченность трудовыми ресурсами	$x_{14} = x_{23} + x_{24} + x_{29}$
x_{15}	Эффективность использования территории	$x_{15} = x_{19} + x_{20} + x_{26}$

Решая оптимизационную задачу (5), получим следующие значения переменных (табл. 3).

Вывод. Данный подход может быть использован для предварительного анализа возможных альтернативных стратегий развития города и оценки последствий принимаемых решений. Выбранная модель оценки устойчивого развития в виде ориентированного функционально-взвешенного графа обеспечивает возможность учета взаимодействия различных характеристик и позволяет анализировать степень достижения целей.

Таблица 3

Результаты решения задачи согласования целей

Название	Результат
Степень достижения генеральной цели (λ_0)	0,76
Степень достижения высокого качества городской среды (λ_1)	0,80
Степень достижения высокого уровня социального благополучия (λ_2)	0,76
Степень достижения желаемой экономической эффективности (λ_3)	0,82
Доля озелененных территорий рекреационного назначения, %	60
Уровень материального благополучия	0,3
Доля «зеленых» объектов строительства	0,3
Доля утилизируемых отходов	0,5
Эффективность экологического менеджмента	0,6
Уровень развития ресурсосберегающих технологий	0,4
Уровень озеленения, $м^2$/чел	22
Обеспеченность объектами социального, культурного и спортивного назначения, ед.	1714
Жилищный фонд, млн $м^2$	32
Протяженность дорог, км	1800
Рекреационный потенциал территории	0,6
Прирост автомобильного транспорта, %	6
Общий объем выбросов загрязняющих веществ (без учета автотранспорта), тыс. т	71
Численность населения, чел.	1 030 000

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ПМК LANDUSE-2003. Территориальное развитие городов, рациональное землепользование и стоимость городских земель (методические основы. Инструментальные средства. Приложения). URL: http://landuse.serif.ru/ (дата обращения: 19.12.2012).

2. *Беллман Р., Заде Л.* Принятие решений в расплывчатых условиях // Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М. : Мир, 1976. С. 172—215.

3. *Санжапов Б. Х., Садовникова Н. П.* Согласование целей при эколого-экономическом обосновании градостроительного проекта с учетом ограничений на значения характеристик, входящих в систему средств, в условиях нечеткой информации // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2011. № 21. С. 151—159.

4. *Макеев С. П., Пицык В. В., Полуденко В. А.* Согласование целей развития больших технических систем с возможностями реализации их характеристик при нечеткой исходной информации // Изв. АН СССР, Техническая кибернетика. 1991. № 5. С. 124—132.

5. *Садовникова Н. П., Парыгин Д. С., Жидкова Н. П.* Построение траекторий территориального развития на основе методов сценарного прогнозирования [Электронный ресурс] // Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строит. информатика. 2012. № 8 (24). URL : http://vestnik.vgasu.ru/?source=4&articleno=1114

1. PMK LANDUSE-2003. Territorial'noe razvitie gorodov, ratsional'noe zemlepol'zovanie i stoimost' gorodskikh zemel' (metodicheskie osnovy. Instrumental'nye sredstva. Prilozheniya). URL: http://landuse.serif.ru/ (data obrashcheniya: 19.12.2012).

2. *Bellman R., Zade L.* Prinyatie resheniy v rasplyvchatykh usloviyakh // Voprosy analiza i protsedury prinyatiya resheniy. M. : Mir, 1976. S. 172—215.

3. *Sanzhapov B. Kh., Sadovnikova N. P.* Soglasovanie tseley pri ekologo-ekonomicheskom obosnovanii gradostroitel'nogo proekta s uchetom ogranicheniy na znacheniya kharakteristik, vkhodyashchikh v sistemu sredstv, v usloviyakh nechetkoy informatsii // Vestnik Volgogr. gos. arkhit.-stroit. un-ta. Ser.: Str-vo i arkhit. 2011. № 21. C. 151—159.

4. *Makeev S. P., Pitsyk V. V., Poludenko V. A.* Soglasovanie tseley razvitiya bol'shikh tekhnicheskikh sistem s vozmozhnostyami realizatsii ikh kharakteristik pri nechetkoy iskhodnoy informatsii // Izv. AN SSSR, Tekhnicheskaya kibernetika. 1991. № 5. S. 124—132.

5. *Sadovnikova N. P., Parygin D. S., Zhidkova N. P.* Postroenie traektoriy territorial'nogo razvitiya na osnove metodov stsenarnogo prognozirovaniya [Elektronnyy resurs] // Internet-vestnik VolgGASU. Ser.: Stroit. informatika. 2012. № 8 (24). URL : http://vestnik.vgasu.ru/?source=4&articleno=1114

© Санжапов Б. Х., Садовникова Н. П., 2013

Поступила в редакцию
в январе 2013 г.

Ссылка для цитирования:

Санжапов Б. Х., Садовникова Н. П. Поддержка принятия решений при планировании развития городских территорий на основе экосистемного подхода // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр-во и архит. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 577—584.

НАШИ АВТОРЫ

Аббасов Пулат Аббасович
Abbasov Pulat Abbasovich
действительный член РААСН, д-р техн. наук, проф., Дальневосточный федеральный университет, Pulat.abbasov@mail.ru
Full member of RAACS, Doctor of Engineering Science, Professor, Far Eastern Federal University

Абрамов Валерий Васильевич
Abramov Valeriy Vasilevich
д-р техн. наук, проф., советник РААСН, зав. кафедрой машин и оборудования заводов строительных материалов, изделий и конструкций, Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС) , valabramov@rambler.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Counselor of RAACS, the Head of Machinery and Equipment for Factories Producing Construction Materials, Products and Structures Department, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Аверьянов Владимир Константинович
Averyanov Vladimir Konstantinovich
д-р техн. наук, проф., член-кор. РААСН, зам. генерального директора, заведующий Отделом развития систем энергоснабжения в г. Санкт-Петербурге, ОАО «Газпром промгаз», V.Averyanov@spb.promgaz.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Corresponding member of RAACS, Deputy Director General, the Head of the Department on Energy Supply Systems Development in St. Petersburg, JSC “Gazprom promgaz”

Азаров Валерий Николаевич
Azarov Valeriy Nikolaevich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой безопасности жизнедеятельности в техносфере, ВолгГАСУ
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Life Safety in Technosphere Department, VSUACE

Акулова Марина Владимировна
Akulova Marina Vladimirovna
д-р техн. наук, проф., советник РААСН, зав. кафедрой строительных материалов и изделий, Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, k_psm@igasu.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Counselor of RAACS, the Head of Construction Materials and Products Department, Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering

Акчурин Талгать Кадимович
Akchurin Talgat Kadimovich
канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных материалов и специальных технологий, ВолгГАСУ
Candidate of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Materials and Special Technology Department, VSUACE

Алоян Роберт Мишаевич
Aloyan Robert Mishaevich
д-р техн. наук, проф., член-кор. РААСН, ректор, Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, rektor@igasu.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Corresponding member of RAACS, Rector, Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering

Алферов Иван Валерьевич
Alferov Ivan Valerevich
аспирант кафедры строительной механики, Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС), ialferov@bk.ru
Postgraduate student of Structural Mechanics Department, Moscow State University of Railroads

Андреев Владимир Игоревич
Andreev Vladimir Igorevich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой сопротивления материалов, Московский государственный строительный университет (МГСУ), asv@mgsu.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Strength of Material Department, Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)

Бакиров Раиф Османович
Bakirov Raif Osmanovich
д-р техн. наук, проф., член-кор. РААСН, 8-499-197-74-27
Doctor of Engineering Science, Professor, Corresponding member of RAACS

Балбалин Алексей Владимирович
Balbalin Alexey Vladimirovich
аспирант кафедры строительных конструкций, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
Postgraduate student of Building Structures Department, Mordovian State University named after N.P. Ogarev

Баранов Александр Сергеевич
Baranov Alexandr Sergeevich
специалист транспортного развития территории, ООО «Лаборатория градопланирования», Санкт-Петербург, baranov.alex.spb@gmail.com
transport development researcher, “Laboratory for urban planning”, ltd., Saint-Petersburg

Барменкова Елена Вячеславовна
Barmenkova Elena Vyacheslavovna
канд. техн. наук, доц. кафедры сопротивления материалов, Московский государственный строительный университет (МГСУ), elena_yurs@mail.ru
Candidate of Engineering Science, Docent of Strength of Material Department, Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)

Баталин Борис Семенович
Batalin Boris Semenovich
советник РААСН, д-р техн. наук. проф., Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), bobata@list.ru
Counselor of RAACS, Doctor of Engineering Science, Professor, Perm National Research Polytechnic University

Батдалов Батыр Мухтаритдинович
Batdalov Batyr Mukhtaritdinovich
канд. техн. наук, начальник лаборатории неразрушающего контроля, ООО «Каспийгазстрой», 8-988-309-00-81
Candidate of Engineering Science, the Head of the Laboratory for Non-destructive Testing, "Kaspiygazstroy", ltd.

Батдалов Мухтаритдин Магомедович
Batdalov Mukhtaritdin Magomedovich
д-р техн. наук, член-кор. РААСН, проф. кафедры сейсмостойкого строительства, Дагестанский государственный институт народного хозяйства, akajdgef@gmail.com
Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAACS, Professor of Earthquake Engineering Department, Dagestan State Institute of National Economy

Батищев Владимир Владимирович
Batishchev Vladimir Vladimirovich
Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС), kafedra411@mail.ru
Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Бахолдин Б.В.
Bakholdin B.V.
почетный член РААСН, Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова
Honorary member of RAACS, R&D, Planning and Surveying and Design-Engineering Institute of Foundations and Underground Structures named after N.M. Gersevanov

Безуглова Екатерина Вячеславовна
Bezuglova Ekaterina Vyacheslavovna
канд. техн. наук, доц. кафедры строительных материалов и конструкций, Кубанский государственный аграрный университет, nebo7@list.ru
Candidate of Engineering Science, Docent of Construction Materials and Structures Department, Kuban State Agricultural University

Белов Владимир Владимирович
Belov Vladimir Vladimirovich
д-р техн. наук, проф., проректор по инновационной и научно-образовательной деятельности, зав. кафедрой производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, vladim-bel@yandex.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Vice-Principal for Innovative, Scientific and T&E Activity, the Head of Production of Construction Products and Structures Department, Tver State Technical University

Беляева Гульназ Ильхамовна
Belyaeva Gulnaz Ilkhamovna
инженер производственно-технического отдела, ООО «Газпром трансгаз Казань», info@tattg.gazprom.ru
Engineer of Industrial Engineering Department, "Gazprom transgaz Kazan", Ltd.

Богомолов Александр Николаевич
Bogomolov Alexandr Nikolaevich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, ВолгГАСУ; проф. кафедры технологии строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), banzaritcyn@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, VSUACE; Professor of Technology of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnical University

Богомолова Оксана Александровна
Bogomolova Oxana Alexandrovna
канд. техн. наук, доц. кафедры прикладной математики и вычислительной техники, ВолгГАСУ
Candidate of Engineering Science, Docent of Application Mathematics and Computer Science Department, VSUACE

Бондарев Александр Борисович
Bondarev Alexandr Borisovich
канд. техн. наук, ООО «ЛипецкНИЦСтройпроект», Talex_86@mail.ru
Candidate of Engineering Science, "LipetskNITsStroyproject", ltd.

Бондарев Борис Александрович
Bondarev Boris Alexandrovich
д-р техн. наук, проф. кафедры строительных материалов и конструкций, Липецкий государственный технический университет, kaf-st@stu.lipetsk.ru
Doctor of Engineering Science, the Head of Construction Materials and Structures Department, Lipetsk State Technical University

Бондаренко А.С.
Bondarenko A.S.
Тольяттинский государственный университет
Tolyatti State University

Бондаренко Александра Игоревна
Bondarenko Alexandra Igorevna
инженер кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Engineer of Construction Material Science, Products and Structures Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Бондаренко В.М.
Bondarenko V.M.
академик РААСН, Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС)
RAACS academician, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Бочаров Юрий Петрович
Bocharov Yuriy Petrovich
д-р арх., проф., действительный член РААСН, Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС), 8(499)7832501
Doctor of Architecture, Professor, Full Member of RAACS, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Бояркин Денис Викторович
Boyarkin Denis Viktorovich
канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры экологии и природопользования, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, eco-nngasu@yandex.ru
Candidate of Engineering Science, Senior Lecturer of Ecology and Nature Management Department, Nizhniy Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

Бузулуков Виктор Иванович
Buzulukov Viktor Ivanovich
д-р техн. наук, проф., проф. кафедры физической химии, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, buzulukov-v@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Physical Chemistry Department, Mordovian State University named after N.P. Ogarev

Вавилов Антон Владимирович
Vavilov Anton Vladimirovich
иностранный член РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных и дорожных машин, Белорусский национальный технический университет (БНТУ), ftk@bntu.by
Foreign Member of RAACS, Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Road Machines Department, Belorussian National Technical University (BNTU)

Вавренюк Светлана Викторовна
Vavrenyuk Svetlana Viktorovna
д-р техн. наук, член-кор. РААСН, зам. директора по научной работе, Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству РААСН, Владивосток, dalniis@mail.primorye.ru
Doctor of Engineering Science, Corresponding member of RAACS, Deputy Director for Science, Far Eastern R&D, Design and Technological Institute for the construction of the RAACS, Vladivostok

Вайнштейн Евгений Викторович
Vaynshteyn Evgeniy Viktorovich
доц. кафедры автомобильных дорог, Поволжский государственный технологический университет, VajnstejnEV@volgatech.net
Docent of Road Department, Volga State Technological University

Ведяков Иван Иванович
Vedyakov Ivan Ivanovich
д-р техн. наук, проф., советник РААСН, ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко, vedykov@gmail.com
Doctor of Engineering Science, Professor, RAACS Counselor, CNIISK to V.A. Kucherenko

Ветренко Татьяна Григорьевна
Vetrenko Tatyana Grigorevna
канд. техн. наук, доц., доц. кафедры гидравлики, водоснабжения, водоотведения, Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, k_vm@igasu.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Hydraulics, Water Supply, Water Disposal Department, Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering

Веюков Евгений Валерианович
Veyukov Evgeniy Valerianovich
ассистент кафедры автомобильных дорог, Поволжский государственный технологический университет, VeukovEV@volgatech.net
Assistant of Road Departament, Volga State Technological University

Воронков Алексей Геннадьевич
Voronkov Alexey Gennadevich
канд. техн. наук, доц. кафедры городского строительства и автомобильных дорог, Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ), A.G.Voronkov@yandex.r
Candidate of Engineering Science, Docent of Town Planning and Roads Department, Tambov State Technical University

Гагарин Владимир Геннадьевич
Gagarin Vladimir Gennadevich
д-р техн. наук, проф., зав. лабораторией строительной теплофизики, Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ) РААСН, gagarinvg@yandex.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of the Laboratory for Structural Thermophysics, Institute for Scientific Research of Structural Physics (NIISPh) of RAACS

Гагарина Елена Владимировна
Gagarina Elena Vladimirovna
научный сотрудник лаборатории естественного освещения и инсоляции, Научно-исследовательский институт строительной физики (of) РААСН, gagarinaev@yandex.ru
the Researcher of the Laboratory of Day Lighting and Insolation, Institute for Scientific Research of Structural Physics (NIISPh) RAACS

Гайфуллин Альберт Ринатович
Gayfullin Albert Rinatovich
ассистент кафедры строительных материалов, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, gaifi@list.ru
Assistant of Construction Materials Department, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering

Галустов Константин Захарович
Galustov Konstantin Zakharovich
д-р техн. наук, советник РААСН, galust_K @ mail.ru
Doctor of Engineering Science, Counselor of RAACS

Гимранов Ильдар Рашадович
Gimranov Ildar Rashadovich
начальник производственного отдела, ООО «Газпром трансгаз Казань», info@tattg.gazprom.ru
the Head of Production Department, "Gazprom transgaz Kazan", Ltd.

Гладков Евгений Владимирович
Gladkov Evgeniy Vladimirovich
аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, ВолгГАСУ
Postgraduate student of Life Safety in Technosphere Department, VSUACE

Головнев Станислав Георгиевич
Golovnev Stanislav Georgievich
д-р техн. наук, проф., член-кор. РААСН, заслуженный работник высшей школы РФ, почетный строитель России, заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой технологии строительного производства, Южно-Уральский государственный университет, 2679183@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Corresponding member of RAACS, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Honored Builder of Russia, Honored Worker of Science of the Russian Federation, the Head of Technology of Construction Department, South-Ural State University

Гордон Владимир Александрович
Gordon Vladimir Alexandrovich
д-р тех. наук, проф., зав. кафедрой высшей математики, УНПК г. Орел, gordon@ostu.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Higher Mathematics Department, Educational Scientific Production Complex, Orel

Готлиб Елена Михайловна
Gotlib Elena Mikhailovna
д-р техн. наук, проф., Казанский государственный технологический университет, egotlib@yandex.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Kazan State Technological University

Граминовский Николай Александрович
Graminovskiy Nikolay Alexandrovich
аспирант, Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС), Nick-Gram@yandex.ru
Postgraduate student, Moscow State University of Railroads

Губанов Леонид Никандрович
Gubanov Leonid Nikandrovich
д-р техн. наук, проф., заведующий кафедрой экологии и природопользования, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет, eco-nngasu@yandex.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Ecology and Nature Management Department, Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering

Гумеров Азат Флорович
Gumerov Azat Florovich
канд. техн. наук, доц., проф. кафедры композитных материалов и технологий, филиал Казанского (Приволжского) федерального университета в г. Набережные Челны, azatcz@gmail.com
Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Composite Materials and Technologies Department, the branch of Kazan (Volga) Federal University in the city of Naberezhnye Chelny

Гусев Б. В.
Gusev B.V.
член-кор. РАН, почетный член РААСН, Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС)
Corresponding member of RAACS, Honored member of RAACS, Moscow State University of Railroads

Данилов Александр Максимович
Danilov Alexandr Maximovich
д-р техн. наук, проф., советник РААСН, зав. кафедрой математики и математического моделирования, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, fmatem@pguas.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Counselor of RAACS, the Head of Mathematics and Mathematical Modeling Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering

Делягин Михаил Юрьевич
Delyagin Mikhail Yurevich
аспирант, Тульский государственный университет, m.delyagin@yandex.ru
Postgraduate student, Tula State University

Дмитриева Татьяна Владимировна
Dmitrieva Tatyana Vladimirovna
канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, tdmitrieva-bel@yandex.ru
Candidate of Engineering Science, senior lecturer of Construction Material Science, Products and Structures Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Доценко Анатолий Иванович
Dotsenko Anatoliy Ivanovich
д-р техн. наук, проф., декан факультета механизации и автоматизации, зав. кафедрой строительных машин, эксплуатации и ремонта оборудования, Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС), DOTSENKO_ANT@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Dean of Mechanization and Automatization Faculty, Head of Construction Machinery, Equipment Operation and Repair Department, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Езерский Валерий Александрович
Ezerskiy Valeriy Alexandrovich
д-р техн. наук, проф. кафедры архитектуры и строительства зданий, Тамбовский государственный технический университет, wiz75micz@rambler.ru
Doctor of Engineering Science, Professor of Architecture and Building Construction Department, Tambov State Technical University

Емельянов Алексей Иванович
Emelyanov Alexey Ivanovich
канд. техн. наук, доц., доц. кафедры прикладной механики, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, emeljanovai@list.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Applied Mechanics Departmen, Mordovian State University named after N. P. Ogarev

Емельянов Сергей Геннадьевич
Emelyanov Sergey Gennadevich
советник РААСН, д-р техн. наук, проф., ректор, Юго-Западный государственный университет, rector@swsu.ru
Counselor of RAACS, Doctor of Engineering Science, Professor, Rector, South-West State University

Енджиевский Лев Васильевич
Endzhievskiy Lev Vasilevich
д-р техн. наук, проф., член-кор. РААСН, Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета, Красноярск, 8(391)2435961
Doctor of Engineering Science, Professor, Corresponding member of RAACS, Construction-Engineering Institute of Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Еремкин Александр Иванович
Eremkin Alexandr Ivanovich
д-р техн. наук, проф., советник РААСН, зав. кафедрой теплогазоснабжения и вентиляции, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, eremkin@pguas.r
Doctor of Engineering Science, Professor, Counselor of RAASN, the Head of Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering

Ермаков Олег Васильевич
Ermakov Oleg Vasilevich
канд. техн. наук, докторант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, ВолгГАСУ
Candidate of Engineering Science, Doctoral student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, VSUACE

Ерышев В.А.
Eryshev V.A.
советник РААСН, Тольяттинский государственный университет
Counselor of RAASN, Tolyatti State University

Ефименко Юрий Васильевич
Efimenko Yuriy Vasilevich
канд. техн. наук, зам. руководителя Центра «Строительные материалы и технологии», Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству РААСН, Владивосток, dalniis@mail.primorye.ru
Candidate of Engineering Science, Deputy Head of the «Construction Materials and Technologies» Center, Far Eastern R&D, Design and Technological Institute for the construction of the RAACS, Vladivostok

Жаворонков Михаил Ильич
Zhavoronkov Mikhail Ilich
аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), sith07@list.ru
Postgraduate student, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Жарин Денис Евгеньевич
Zharin Denis Evgenevich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой композитных материалов и технологий, филиал Казанского (Приволжского) федерального университета в г. Набережные Челны, Denzharin@me.com
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Composite Materials and Technologies Department, the branch of Kazan (Volga) Federal University in the city of Naberezhnye Chelny

Железнова Татьяна Викторовна
Zheleznova Tatyana Viktorovna
студентка, Поволжский государственный технологический университет, ZheleznovaTV@volgatech.net
student, Volga State Technological University

Жерновский Игорь Владимирович
Zhernovskiy Igor Vladimirovich
канд. геол.-минерал. наук, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; ведущий научный сотрудник, НИИ «Наносистемы в строительном материаловедении», s-nsm@mail.ru
Candidate of Geological and Mineralogical Science, Belgorod State Technological Universitynamed after V.G. Shukhov; Leading Researcher, Research Institute «Nanosystems in construction material science»

Журавский Максим Анатольевич
Zhuravskiy Maxim Anatolevich
ведущий специалист Отдела развития систем энергоснабжения в г. Санкт-Петербурге, ОАО «Газпромпромгаз», Zhuravskiy@spb.promgaz.ru
Senior Specialist, the Department on Energy Supply Systems Development in St. Petersburg, JSC “Gazprom promgaz”

Журавский Сергей Вячеславович
Zhuravskiy Sergey Vyacheslavovich
директор, ООО «Белкальматрон», Минск
director, “Belkalmatron”, ltd., Minsk

Захаров Александр Викторович
Zakharov Alexandr Viktorovich
доц. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), miks@pstu.ru
Docent of Construction Production and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnical University

Зверяев Евгений Михайлович
Zveryaev Evgeniy Mikhailovich
советник РААСН, Институт прикладной математики (ИПМ) им. М.В. Келдыша, zveriaev@mail.ru
Counselor of RAACS, Institute for Applied Mathematics named after M.V. Keldysh

Земцов Виктор Андреевич
Zemtsov Viktor Andreevich
канд. техн. наук, зав. лабораторией естественного освещения и инсоляции, Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ) РААСН
Candidate of Engineering Science, the Head of the Laboratory for Day Lighting and Insolation, Institute for Scientific Research of Structural Physics (NIISPh) of RAACS

Зиганшин Малик Гарифович
Ziganshin Malik Garifovich
канд. техн. наук, доц., проф. кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, mjihan@mail.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Heat and Gas Supply and Ventilation Department, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering

Зылев Владимир Борисович
Zylev Vladimir Borisovich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительной механики, Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС), ZylevVB@yandex.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head Structural Mechanics Department, Moscow State University of Railroads

Исакулов Б.Р.
Isakulov B.R.
Ивановский государственный архитектурно-строительный университет
Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering

Иванов Александр Сергеевич
Ivanov Alexandr Sergeyevich
аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, ВолгГАСУ
Postgraduate student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, VSUACE

Игнатьев Александр Владимирович
Ignatev Alexandr Vladimirovich
канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой прикладной математики и вычислительной техники, ВолгГАСУ
Candidate of Engineering Science, Docent, the Head of Applied Mathematics and Computer Engineering Department, VSUACE

Игнатьев Владимир Александрович
Ignatev Vladimir Alexandrovich
д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки и техники РФ, советник РААСН, зав. кафедрой строительной механики, ВолгГАСУ
Doctor of Engineering Science, Professor, Honoured Worker of Science and Technology of the RF, Counselor of RAACS, the Head of Structural Mechanics Department, VSUACE

Кадушкин Владимир Александрович
Kadushkin Vladimir Alexandrovich
аспирант, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (СПбГАУ), v.a.kadushkin@gmail.com
Postgraduate student, Saint Petersburg State Agricultural University

Калиновский Сергей Андреевич
Kalinovskiy Sergey Andreyevich
аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, ВолгГАСУ
Postgraduate student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, VSUACE

Карапузова Наталья Юрьевна
Karapuzova Natalya Yurevna
канд. техн. наук, доц., ВолгГАСУ
Candidate of Engineering Science, Docent, VSUACE

Карпенко Н.И.
Karpenko N.I.
академик РААСН, Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ) РААСН
RAACS academician, Institute for Scientific Research of Structural Physics (NIISPh) of RAACS

Карпенко Сергей Николаевич
Karpenko Sergey Nikolaevich
д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем прочности и качества в строительстве, Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ) РААСН, niisf_lab9@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Leading Researcher of the Laboratory for Problems of Strength and Quality in Construction, Institute for Scientific Research of Structural Physics (NIISPh) of RAACS

Кашеварова Галина Геннадьевна
Kashevarova Galina Gennadevna
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительной механики и вычислительных технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), ggkas@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Structural Mechanics and Computer Technology, Perm National Research Polytechnical University

Кириченко Виктор Алексеевич
Kirichenko Viktor Alexeevich
канд. техн. наук, доц., Краснодарский строительный университет
Candidate of Engineering Science, Docent, Krasnodar University of Civil Engineering

Киселёв Игорь Яковлевич
Kiselyov Igor Yakovlevich
д-р техн. наук, старший научный сотрудник, ученый секретарь, Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ) РААСН, ikiselyov@bk.ru
Doctor of Engineering Science, Senior Researcher, Scientific Secretary, Institute for Scientific Research of Structural Physics (NIISPh) of RAACS

Клованич Сергей Федорович
Klovanich Sergey Fedorovich
д-р техн. наук, проф., Варминско-Мазурский университет в г. Ольштын (Польша), scotch@te.net.ua
Doctor of Engineering Science, Professor, Varminsko-Mazurskiy University in Olshtyn (Poland)

Клычников Роман Юрьевич
Klychnikov Roman Yurevich
канд. техн. наук, ассистент, Тамбовский государственный технический университет, kirza_soft@mail.ru
Candidate of Engineering Science, Assistant, Tambov State Technical University

Клюева Наталия Витальевна
Klyueva Nataliya Vitalevna
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой проектирования, строительства зданий и линейных сооружений, Юго-Западный государственный университет, klynavit@yandex.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Design, Construction of Buildings and Linear Structures Department, South-West State University

Кобзев Евгений Владимирович
Kobzev Evgeniy Vladimirovich
аспирант, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Postgraduate student, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Козлов Владимир Владимирович
Kozlov Vladimir Vladimirovich
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории строительной теплофизики, Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ) РААСН, gagarinvg@yandex.ru
Candidate of Engineering Science, the Leading Researcher of Laboratory for Structural Thermophysics, Institute for Scientific Research of Structural Physics (NIISPh) of RAACS

Колчунов Владимир Иванович
Kolchunov Vladimir Ivanovich
д-р техн. наук, проф. кафедры компьютерных технологий в строительстве, Национальный авиационный университет, Киев, i2103@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Professor of Computer Technology in Construction Department, National Aviation University, Kiev

Комов Василий Макарович
Komov Vasiliy Makarovich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительного производства, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет (СПбГАУ), komov-v-m@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Industry Department, Saint Petersburg State Agricultural University

Коротких Дмитрий Николаевич
Korotkikh Dmitriy Nikolaevich
канд. техн. наук, доц. кафедры технологии строительных материалов, изделий и конструкций, докторант, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет, korotkih.dmitry@gmail.com
Candidate of Engineering Science, Docent of Technology of Construction Materials, Products and Structures Department, Doctoral candidate, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering

Корпач Александр Иванович
Korpach Alexandr Ivanovich
аспирант кафедры строительных конструкций, оснований и фундаментов, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет; инженер, ООО «ГеоТехПроектСтрой», Липецк, korpach.vsi@mail.ru
Postgraduate student of Building Constructions and Foundations Department, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering; Engineer, «GeoTechProjectStroy», Ltd, Lipetsk

Котлов Виталий Геннадьевич
Kotlov Vitaliy Gennadevich
канд. техн. наук, доц., декан строительного факультета, Поволжский государственный технологический университет, KotlovG@volgatech.net
Candidate of Engineering Science, Docent, the Dean of Civil Engineering Faculty, Volga State Technological University

Кофф Григорий Львович
Koff Grigoriy Lvovich
д-р геол.-минерал. наук, проф., руководитель научной группы по исследованию природного и антропогенного риска в береговых зонах, Институт водных проблем РАН, koffgl@mail.ru
Doctor of Geology and Mineral Science, Professor, the Head of Scientific Group for Research of Natural and Anthropogenous Risk in Coastal Zones, Water Problems Institute of the Russian Academy of Sciences

Кравцова Эльвира Александровна
Kravtsova Elvira Alexandrovna
старший преподаватель кафедры информационных системы, УНПК г. Орел, gordon@ostu.ru
Senior Lecturer of Information Systems Department, Educational Scientific Production Complex, Orel

Красновских Марина Павловна
Krasnovskikh Marina Pavlovna
аспирант, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), krasnovskih@yandex.ru
Postgraduate student, Perm National Research Polytechnical University

Кривошеин Игорь Васильевич
Krivoshein Igor Vasilevich
канд. техн. наук, доц. кафедры теории сооружений и строительных конструкций, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
Candidate of Technical Science, Docent of Theory of Constructions and Construction Structures Department, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin

Круглова Альбина Николаевна
Kruglova Albina Nikolaevna
канд. техн. наук, доц. кафедры математики и математического моделирования, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, albinakruglova@yandex.ru
Candidate of Engineering Science, Docent of Mathematics and Mathematical Modeling Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering

Крупский Алексей Сергеевич
Krupskiy Alexey Sergeevich
аспирант кафедры коммунального и промышленного водопользования, Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС), i-pavlinova@mail.ru
Postgraduate student of Public and Industrial Water Consumption Department, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Крыгина А.М.
Krygina A.M.
советник РААСН, Юго-Западный государственный университет, Курск
Counselor of RAACS, South-West State University, Kursk

Крылов Борис Александрович
Krylov Boris Alexandrovich
академик РААСН, д-р техн. наук, проф., руководитель отдела, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева
RAASN academician, Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of the Department at CRCRI named after A.A. Gvozdev

Латышева Е.В.
Latysheva E.V.
Тольяттинский государственный университет
Tolyatti State University

Лебедев М.С.
Lebedev M.S.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Лебзак Владислав Николаевич
Lebzak Vladislav Nikolaevich
ОАО «ГИПРОДОРНИИ», stf-ofigig@mail.ru
“GIPRODORNII”, JSC

Леонович Сергей Николаевич
Leonovich Sergey Nikolaevich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой технологии строительного производства, Белорусский национальный технический университет (БНТУ), Минск
Doctor of Engineering Science, the Head of Technology of Construction Production Department, Belorussian National Technical University (BNTU), Minsk

Лизунова Наталья Сергеевна
Lizunova Natalya Sergeevna
аспирант, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, Lis258.86@mail.ru.
Postgraduate student, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering

Лютенко А.О.
Lyutenko A.O.
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Магдеев Усман Хасанович
Magdeev Usman Khasanovich
академик РААСН, д-р техн. наук, проф., Московский государственный строительный университет (МГСУ)
RAACS academician, Doctor of Engineering Science, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)

Макаров Геннадий Иванович
Makarov Gennadiy Ivanovich
Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.С. Герсеванова, gim2007@bk.ru
R&D, Planning and Surveying and Design-Engineering Institute of Foundations and Underground Structures named after N.M. Gersevanov

Маковецкий Олег Александрович
Makovetskiy Oleg Alexandrovich
канд. техн. наук, доц. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ), oleg-mak@inbox.ru
Candidate of Engineering Science, Docent of Building Production and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University

Макридин Николай Иванович
Makridin Nikolay Ivanovich
д-р техн. наук, проф., проф. кафедры технологий строительных материалов и деревообработки, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, techbeton@pguas.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Professor of Technology of Construction Materials and Wood Processing Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering

Максимова Ирина Николаевна
Maksimova Irina Nikolaevna
канд. техн. наук, доц., проф. кафедры стандартизации, сертификации и аудита качества, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, maksimovain@mail.ru; maksimova@pguas.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Standardization, Certification Audit Quality Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering

Мангушев Рашид Александрович
Mangushev Rashid Alexandrovich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой геотехники, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), 190005, Санкт-Петербург, ул. 2-я Красноармейская, 5, npk-cgt@yandex.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Geotechnics Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Матвеева Алена Владимировна
Matveeva Alena Vladimirovna
аспирантка кафедры сопротивления материалов, Московский государственный строительный университет (МГСУ), malina89.89@mail.r
Postgraduate student of Material Strength Department, Moscow State University of Civil Engineering (MSUCE)

Маций Сергей Иосифович
Matsiy Sergey Iosifovich
д-р техн. наук, проф. кафедры строительных материалов и конструкций, Кубанский государственный аграрный университет, matsiy@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Professor of Construction Materials and Structures Department, Kuban State Agricultural University

Мележик Алексей Александрович
Melezhik Alexey Alexandrovich
ведущий инженер Отдела развития систем энергоснабжения в г. Санкт-Петербурге, ОАО «Газпром промгаз», AMelezhik@mail.ru
Senior Engineer, the Department on Energy Supply Systems Development in St. Petersburg, JSC “Gazprom promgaz”

Мелешкин Михаил Федорович
Meleshkin Mikhail Fedorovich
Объединенная дирекция единого заказчика Федеральной налоговой службы России
United Single Customer Direction of Federal Revenue Service in Russia

Мензелинцева Надежда Васильевна
Menzelintseva Nadezhda Vasilevna
д-р техн. наук, проф., декан факультета инженерных систем и техносферной безопасности, ВолгГАСУ
Doctor of Engineering Science, Professor, Dean of Engineering Systems and Technosphere Safety Department, VSUACE

Мигаль Р.Е.
Migal R.E.
Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС)
Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Миллер Юлия Владимировна
Miller Yuliya Vladimirovna
аспирант, Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ) РААСН; инженер, НП «АВОК», miller@abok.ru
Postgraduate student, Institute for Scientific Research of Structural Physics (NIISPh) of RAACS; Engineer, “AVOK” NPO

Михайлов Александр Георгиевич
Mikhaylov Alexandr Georgievich
д-р науки и техники, проф., ведущий специалист Отдела развития систем энергоснабжения в г. Санкт-Петербурге, ОАО «Газпром промгаз», Mikhailov@spb.promgaz.ru
Doctor of science and technology, Professor, Senior Specialist, the Department on Energy Supply Systems Development in St. Petersburg, JSC “Gazprom promgaz”

Монастырев Павел Владиславович
Monastyrev Pavel Vladislavovich
д-р техн. наук, декан архитектурно-строительного факультета, Тамбовский государственный технический университет, monastyrev68@rambler.ru
Doctor of Engineering Science, the Dean of Architecture and Civil Engineering Faculty, Tambov State Technical University

Моргунов Михаил Валерьевич
Morgunov Mikhail Valerevich
канд. техн. наук, доц. кафедры строительных конструкций, Брянская государственная инженерно-технологическая академия, 8-920-60-68-656
Candidate of Engineering Science, Docent of Construction Structures Department, Bryansk State Engineering Academy

Морозов Валерий Иванович
Morozov Valeriy Ivanovich
советник РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)
RAACS counselor, Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Reinforced Concrete and Masonry Constructions Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Морозов Валерий Иванович
Morozov Valeriy Ivanovich
советник РААСН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)
RAACS counselor, Doctor of Engineering Science, Professor, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Мурашкин Василий Геннадьевич
Murashkin Vasiliy Gennadevich
канд. техн. наук, доц., Самарский государственный архитектурно-строительный университет
Candidate of Engineering Science, Docent, Samara State University of Architecture and Civil Engineering

Мурашкин Геннадий Васильевич
Murashkin Gennadiy Vasilevich
д-р техн. наук, проф., член-кор. РААСН, Самарский государственный архитектурно-строительный университет
Doctor of Engineering Science, Professor, Corresponding member of RAACS, Samara State University of Architecture and Civil Engineering

Наназашвили И.Х.
Nanazashvili I.Kh.
д-р техн. наук, проф., Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС)
Doctor of Engineering Science, Professor, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Нелюбова Виктория Викторовна
Nelyubova Viktoriya Viktorovna
канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры строительного материаловедения, изделий и конструкций, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 3309991@mail.ru
Candidate of Engineering Science, Senior Lecturer of Construction Material Science, Products and Structures Department, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov

Низина Татьяна Анатольевна
Nizina Tatyana Anatolevna
советник РААСН, д-р техн. наук, проф. кафедры строительных конструкций, Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарева
Counselor of RAACS, Doctor of Engineering Science, Professor of Building Structures Department, Mordovian State University named after N.P. Ogarev

Образцов Илья Вячеславович
Obraztsov Ilya Vyacheslavovich
аспирант кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, sunspire@list.ru
Postgraduate student of Production of Construction Products and Structures Department, Tver State Technical University

Одесский Павел Дмитриевич
Odesskiy Pavel Dmitrievich
д-р техн. наук, профессор, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, odesskiy@tsniisk.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, CNIISK to V.A. Kucherenko

Павлинова Ирина Игоревна
Pavlinova Irina Igorevna
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой коммунального и промышленного водопользования, Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС), i-pavlinova@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Public and Industrial Water Consumption Department, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Пантелеев Дмитрий Андреевич
Panteleev Dmitriy Andreevich
аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), dm-pant@yandex.ru
Postgraduate student, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Панфилов Денис Александрович
Panfilov Denis Alexandrovich
канд. тех. наук, Самарский государственный архитектурно-строительный университет
Candidate of Engineering Science, Samara State University of Architecture and Civil Engineering

Парфенов Сергей Григорьевич
Parfenov Sergey Grigorevich
канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой строительных конструкций, Брянская государственная инженерно-технологическая академия, 8-910-337-62-60
Candidate of Engineering Science, Docent, the Head of Construction Structures Department, Bryansk State Engineering Academy

Петрашень Александр Сергеевич
Petrashen Alexandr Sergeevich
канд. техн. наук, доц., Дальневосточный федеральный университет, alserpet@yandex.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Far Eastern Federal University

Петров Алексей Николаевич
Petrov Alexey Nikolaevich
д-р тех. наук, доц., зав. кафедрой архитектуры, строительных конструкций и геотехники, Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ), petr@psu.karelia.ru
Doctor of Engineering Science, Docent, the Head of Architecture, Building Constructions and Geotechnics Department, Petrozavodsk State University

Петров Владилен Васильевич
Petrov Vladilen Vasilevich
д-р техн. наук, проф., академик РААСН, зав. кафедрой теории сооружений и строительных конструкций, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина, vvp@sstu.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, RAACS academician, the Head of Theory of Constructions and Construction Structures Department, Saratov State Technical University named after Yu.A. Gagarin

Петрович Михаил Любомирович
Petrovich Mikhail Lyubomirovich
зам. генерального директора, ЗАО «Петербургский НИПИГрад», petrovich.mikhail@gmail.com
Deputy General Director, “Peterburgskiy NIPIGrad”, Ltd

Петропавловская Виктория Борисовна
Petropavlovskaya Viktoriya Borisovna
канд. техн. наук, директор Центра менеджмента качества, доц. кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, victoriapetrop@gmail.com
Candidate of Engineering Science, the Director of Management Quality Center, Docent of Production of Construction Products and Structures Department, Tver State Technical University

Плешивцев А.А.
Pleshivtsev A.A.
аспирант, Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС)
Postgraduate student, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Поздеев Виктор Михайлович
Pozdeev Viktor Mikhailovich
канд. техн. наук, доц., зав. кафедрой строительных конструкций и оснований, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола, PozdeevVM@volgatech.net
Candidate of Engineering Science, Docent, the Head of Building Structures and Foundations Department, Volga State Technological University, Yoshkar Ola

Полейко Николай Леонидович
Poleyko Nikolay Leonidovich
канд. техн. наук, доц. кафедры технологии строительного производства, Белорусский национальный технический университет (БНТУ), Минск
Candidate of Engineering Science, Docent of Technology of Construction Production Department, Belorussian National Technical University (BNTU), Minsk

Полеонова Юлия Юрьевна
Poleonova Yuliya Yurevna
аспирантка кафедры производства строительных изделий и конструкций, Тверской государственный технический университет, yypoleonova@gmail.com
Postgraduate student of Production of Construction Products and Structures Department, Tver State Technical University

Пономарев Андрей Будимирович
Ponomarev Andrey Budimirovich
проф., зав. кафедрой строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, spstf@pstu.ru
Professor, the Head of Construction Production and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University

Попов Андрей Владимирович
Popov Andrey Vladimirovich
аспирант, Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, pav.com@icloud.com
Postgraduate student, Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering

Прокопенко Алексей Васильевич
Prokopenko Alexey Vasilevich
аспирант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, ВолгГАСУ
Postgraduate student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, VSUACE

Пухаренко Юрий Владимирович
Pukharenko Yuriy Vladimirovich
член-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных материалов и технологий, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), tsik@spbgasu.ru
Corresponding member of RAACS, Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Materials and Technology Department, St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering

Ракунов Юрий Павлович
Rakunov Yuriy Pavlovich
канд. техн. наук, доц., Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС), Rakunov1991@mai.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Рахимов Равиль Зуфарович
Rakhimov Ravil Zufarovich
д-р техн. наук, проф., член-кор. РААСН, зав. кафедрой строительных материалов, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, rahimov@kgasu.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Corresponding member of RAACS, the Head of Construction Materials Department, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering

Рябухин Александр Константинович
Ryabukhin Alexandr Konstantinovich
аспирант кафедры строительных материалов и конструкций, Кубанский государственный аграрный университет, ryabukhin@geoproekt.net
Postgraduate student of Construction Materials and Structures Department, Kuban State Agricultural University

Садовникова Наталья Петровна
Sadovnikova Natalya Petrovna
канд. техн. наук, доц., докторант, ВолгГАСУ, nps@volgodom.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Doctoral student, VSUACE

Салихов Мухаммет Габдулхаевич
Salikhov Mukhammet Gabdulkhaevich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой автомобильных дорог, Поволжский государственный технологический университет, SalihovMG@volgatech.net
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Road Department, Volga State Technological University

Санжапов Булат Хизбуллович
Sanzhapov Bulat Khizbullovich
д-р физ.-мат. наук, проф., проф. кафедры информационных систем и математического моделирования, ВолгГАСУ
Doctor of Physics and Mathematics Science, Professor, Professor of Data Systems and Mathematic Simulation Department, VSUACE

Сапрыкин Роман Юрьевич
Saprykin Roman Yurevich
Липецкий государственный технический университет, ic-cup@bk.ru
Lipetsk State Technical University

Саурин Анатолий Никифорович
Saurin Anatoliy Nikiforovich
канд. техн. наук, доц., генеральный директор, ООО «ГеоТехПроектСтрой», г. Липецк, Saurin_Anatoliy@rambler.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Director General, «GeoTechProjectStroy», Ltd, Lipetsk

Селяев Владимир Павлович
Selyaev Vladimir Pavlovich
академик РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных конструкций, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
Academician of the RAACS, Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Building Structures Department, Mordovian State University named after N.P. Ogarev

Слизнева Татьяна Евгеньевна
Slizneva Tatyana Evgenevna
канд. техн. наук, доц., доц. кафедры высшей и прикладной математики, Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, k_vm@igasu.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Higher and Applied Mathematics Department, Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering

Соколов Андрей Александрович
Sokolov Andrey Alexandrovich
зам. генерального директора, ГУП «Кольцевые магистрали», ugkh@ugkh.mos.ru
Deputy Director General, SUE "Ring main"

Соколов Борис Сергеевич
Sokolov Boris Sergeevich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, sokolov@ksaba.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Reinforced Concrete and Masonry Structures Department, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering

Соколова Алла Германовна
Sokolova Alla Germanovna
канд. техн. наук, доц., доц. кафедры управления проектами в стройиндустрии, Высшая школа экономики, ac.falconi@yahoo.com
Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Project Management in Construction Industry Department, Higher School of Economics

Соколова Юлия Андреевна
Sokolova Yuliya Andreevna
действительный член РААСН, проф., д-р техн. наук, зав. кафедрой управления проектами в стройиндустрии, Высшая школа экономики, inep_s@mail.ru
Full member of RAACS, Professor, Doctor of Engineering Science, the Head of Project Management in Construction Industry Department, Higher School of Economics

Стрельников Александр Иванович
Strelnikov Alexandr Ivanovich
канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, советник РААСН, ЦНИИП градостроительства РААСН, strelnikovai@gmail.com
Candidate of Engineering Science, Senior Researcher, Leading Researcher, Counselor of RAACS, CRDI of Urban Planning RAACS

Строкова Валерия Валерьевна
Strokova Valeriya Valerevna
д-р техн. наук, проф., Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова; директор, Инновационный научно-образовательный и опытно-промышленный центр наноструктурированных композиционных материалов, vvstrokova@gmail.com
Doctor of Engineering Science, Professor, Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov; Director, Innovative Scientific Study and Industrial Center of Nanostructured Composite Materials

Суров Иван Александрович
Surov Ivan Alexandrovich
аспирант кафедры технологий строительных материалов и деревообработки, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, techbeton@pguas.ru
Postgraduate student of Technologies of Construction Materials and Wood Processing Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering

Суэтина Т.А.
Suetina T.A.
член-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., Московская государственная академия коммунального хозяйства и строительства (МГАКХиС)
Corresponding member of RAACS, Doctor of Engineering Science, Professor, Moscow State Academy of Municipal Economy and Construction

Табунщиков Юрий Андреевич
Tabunshchikov Yuriy Andreevich
д-р техн. наук, проф., член-кор. РААСН, зав. кафедрой, Московский архитектурный институт (МАРХИ), tab@abok.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Corresponding member of RAACS, the Head of the Department, Moscow Architectural Institute

Тараканов Олег Вячеславович
Tarakanov Oleg Vyacheslavovich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой кадастра недвижимости и права, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, ziqk@pguas.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Cadastral Survey of Real Estate and Right Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering

Тарасов Алексей Владимирович
Tarasov Alexey Vladimirovich
аспирант, Инженерно-строительный институт Сибирского федерального университета, Красноярск, al.vl.tarasov@gmail.com
Postgraduate student, Construction-Engineering Institute of Siberian Federal University, Krasnoyarsk

Темников Юрий Николаевич
Temnikov Yuriy Nikolaevich
канд. техн. наук, директор, ООО «Кальматрон-СПБ», Санкт-Петербург
Candidate of Engineering Science, Director, “Calmatron-SPB”, St. Petersburg

Тер-Восканян Ольга Шабовна
Ter-Voskanyan Olga Shabovna
канд. архит., старший научный сотрудник, ЦНИИП градостроительства РААСН, 8(495)707667
Candidate of Architecture, Senior Researcher, CRDI of Urban Planning RAACS

Толмачев Владимир Николаевич
Tolmachev Vladimir Nikolaevich
д-р техн. наук, старший научный сотрудник, заместитель заведующего Отделом развития систем энергоснабжения в г. Санкт-Петербурге, ОАО «Газпром промгаз», V.Tolmachev@spb.promgaz.ru
Doctor of Engineering Science, Senior Researcher, Deputy Head of the Department of Energy Supply Systems Development in Saint Petersburg, JSC “Gazprom promgaz”

Тотурбиев Адильбий Батырбиевич
Toturbiev Adilbiy Batyrbievich
канд. техн. наук, ЗАО «Опытное научно-производственное предприятие», Республика Дагестан, totbat@mail.ru
Candidate of Engineering Science, CJSC «Experimental scientific-industrial enterprise», Dagestan Republic

Тотурбиев Батырбий Джакаевич
Toturbiev Batyrbiy Dzhakaevich
д-р техн. наук, проф., Институт геологии Дагестанского научного центра РАН, totbat@mail.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Institute of Geology of the Dagestan Scientific Center of the Russian Academy of Sciences

Трещев Александр Анатольевич
Treshchev Alexandr Anatolevich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет, taa58@yandex.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction, Construction Materials and Structures Department, Tula State University

Трошков Евгений Олегович
Troshkov Evgeniy Olegovich
аспирант, Поволжский государственный технический университет, Йошкар-Ола, troshkoveo@mail.ru.
Postgraduate student, Volga State Technical University, Yoshkar-Ola

Труфанова Е.В.
Trufanova E.V.
Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова
R&D, Planning and Surveying and Design-Engineering Institute of Foundations and Underground Structures named after N.M. Gersevanov

Тухарели Владислав Димитриевич
Tukhareli Vladislav Dimitrievich
аспирант кафедры строительных материалов и специальных технологий, ВолгГАСУ
Postgraduate student of Construction Materials and Special Technology Department, VSUACE

Тютюнников Анатолий Иванович
Tyutyunnikov Anatoliy Ivanovich
канд. техн. наук, доц., главный специалист Отдела развития систем энергоснабжения в г. Санкт-Петербурге, ОАО «Газпром промгаз», A.Tutunnikov@spb.promgaz.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Chief Specialist of the Department on Energy Supply Systems Development in St. Petersburg, JSC "Gazprom promgaz"

Ухатский М.Л.
Ukhatskiy M.L.
ООО «Инфорспроект», Москва
"Inforsproject", ltd., Moscow

Ушаков Андрей Николаевич
Ushakov Andrey Nikolaevich
канд. техн. наук, доц., докторант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, ВолгГАСУ, andrey.ushakov@vgi.volsu.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Doctoral student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, VSUACE

Файвусович А.С.
Fayvusovich A.S.
Луганский национальный аграрный университет
Lugansk National Agricultural University

Фатхулин Л.Р.
Fatkhulin L.R.
Казанский государственный архитектурно-строительный университет
Kazan State University of Architecture and Civil Engineering

Федоров Виктор Сергеевич
Fedorov Viktor Sergeevich
д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных конструкций, зданий и сооружений, Московский государственный университет путей сообщения (МГУПС)
Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Designs, Buildings and Constructions, Moscow State University of Railroads

Федосов Сергей Викторович
Fedosov Sergey Viktorovich
д-р техн. наук, проф., академик РААСН, зав. кафедрой строительного материаловедения и специальных технологий, президент, Ивановский государственный архитектурно-строительный университет, president@igasu.ru
Doctor of Engineering Science, Professor, Academician of RAACS, the Head of Construction Materials Science and Special Technology Department, the President, Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering

Фомина Екатерина Олеговна
Fomina Ekaterina Olegovna
аспирантка кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, ВолгГАСУ
Postgraduate student of Life Safety in Technosphere Department, VSUACE

Халиуллин Марат Ильсурович
Khaliullin Marat Ilsurovich
канд. техн. наук, доц., начальник управления научно-исследовательской деятельностью, Казанский государственный архитектурно-строительный университет, khaliullin@kgasu.ru.
Candidate of Engineering Science, Docent, the Head of the Department on Scientific-Research Activity, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering

Хусаинов Ильгиз Ильдусович
Khusainov Ilgiz Ildusovich
аспирант кафедры строительной механики и вычислительных технологий, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ihi888@pstu.ru
Postgraduate student of Structural Mechanics and Computer Technology Department, Perm National Research Polytechnic University

Чепизубов Игорь Геннадьевич
Chepizubov Igor Gennadevich
канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем прочности и качества в строительстве, Научно-исследовательский институт строительной физики (НИИСФ) РААСН, niisf_lab9@mail.ru
Candidate of Engineering Science, Leading Researcher, Institute for Scientific Research of Structural Physics (NIISPh) of RAACS

Черкасов Василий Дмитриевич
Cherkasov Vasiliy Dmitrievich
член-кор. РААСН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой прикладной механики, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, cherkasov-vd@yandex.ru
Corresponding member of RAACS, Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Applied Mechanics Department, Mordovian State University named after N.P. Ogarev

Черкасов Дмитрий Васильевич
Cherkasov Dmitriy Vasilevich
аспирант, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева. vd-cherkasov@mail.ru
Postgraduate student, Mordovian State University named after N.P. Ogarev

Черноусов Роман Николаевич
Chernousov Roman Nikolaevich
канд. техн. наук, доц., доц. кафедры сопротивления материалов, Липецкий государственный технический университет, ozzgood@inbox.ru
Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Material Strength Department, Lipetsk State Technical University

Чернышов Евгений Михайлович
Chernyshov Evgeniy Mikhailovich
академик РААСН, д-р техн. наук, проф., Воронежский государственный архитектурно-строительный университет
Academician of RAACS, Doctor of Engineering Science, Professor, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering

Швецов Геннадий Иванович
Shvetsov Gennadiy Ivanovich
д-р геол.-минерал. наук, проф., член-кор. РААСН
Doctor of Geology and Mineral Science, Professor, Corresponding member of RAACS

Шерешевский Михаил Борисович
Shereshevskiy Mikhail Borisovich
аспирант, Тульский государственный университет, m.shereshevskii@gmail.com
Postgraduate student, Tula State University

Юй Хуэй
Yuy Khuey
аспирант, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ), yjd1983@hotmail.com
Postgraduate student, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engeneering

Ярцев Виктор Петрович
Yartsev Viktor Petrovich
д-р техн. наук, проф., советник РААСН, зав. кафедрой конструкций зданий и сооружений, Тамбовский государственный технический университет (ТГТУ)
Doctor of Engineering Science, Professor, Counselor of RAACS, the Head of Structure of Buildings and Constructions Department, Tambov State Technical University

Примечание. С авторами статей — аспирантами, докторантами и сотрудниками ВолгГАСУ — можно связаться по e-mail: **info@vgasu.ru** (в теме письма указать наименование структурного подразделения, фамилию и инициалы адресата).

ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета» со второго полугодия 2007 г. временно выходит в одной серии «Строительство и архитектура», по 4 выпуска ежегодно.

Журнал включен в Перечень ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, утвержденный ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации.

Библиографические сведения о публикациях в журнале, пристатейные списки литературы и полные тексты статей представлены в **Российском индексе научного цитирования (РИНЦ)** на сайте Научной электронной библиотеки www.elibrary.ru.

«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство и архитектура» входит в базу данных **Ulrich's Periodicals Directory** американского издательства Bowker, являющуюся самой крупной базой, описывающей мировой поток сериальных (периодических и продолжающихся) изданий. Активно используется научными учреждениями для анализа мирового потока сериальных изданий.

Серия включена в базу данных **DOAJ — Directory of Open Access Journals** (Директория журналов открытого доступа) научной библиотеки университета г. Лунд (Швеция), www.doaj.org, обеспечивающую открытый доступ к полнотекстовым материалам научных и академических журналов на различных языках, поддерживающих систему контроля качества публикуемых статей.

Серия включена в американскую базу данных **ЭБСКО Publishing:** http://www.ebsco.com/

Требования к оформлению статей и сопроводительных материалов. Статью необходимо представить на электронном носителе и в распечатанном виде (2 экз.) в сопровождении заполненного автором *лицензионного договора* (2 экз.) (скачать бланк по адресу http://www.vgasu.ru/science/journals/herald-volggasu/preparation-requirements/), *анкеты* согласия автора на доступ к его персональным данным неограниченного круга лиц (скачать бланк по адресу http://www.vgasu.ru/science/journals/herald-volggasu/preparation-requirements/), *выписки из протокола* заседания кафедры и одной *рецензии*. К статьям прилагается экспертное заключение о возможности опубликования в открытой печати. Все сопроводительные документы представляются на бумажных носителях в оригинале.

В *отдельном файле помещаются сведения об авторах* на русском и английском языках, а также кириллицей и латиницей в полном соответствии с данными в заполненном бланке *анкеты* (см. выше): фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, звание, должность, место работы; наименование и код научной специальности (по Номенклатуре), по которой автор проводит диссертационное исследование; почтовый адрес, телефон и адрес электронной почты.

В статье приводятся: *индекс УДК;* на русском и английском языках: *фамилия и инициалы автора, заглавие, аннотация* (на русском языке до 500 знаков, на английском — от 500 знаков до целой страницы), *ключевые слова*. Текст статьи заверяется личной подписью автора (соавторов).

Объем статьи — от 7 с. установленного формата «Вестника» (см. ниже), включая название, аннотации, ключевые слова, текст, таблицы, рисунки, библиографический список. Последняя страница считается полной независимо от фактического заполнения.

Оригинал статьи должен быть набран с помощью пакета программ *Microsoft Office* (*Word 2003*); шрифт *основного текста* — Times New Roman (Cyr) № 11 (11 пунктов). Параметры страницы — поля, см: верхнее — 3,7; нижнее — 4,5; левое — 2,0; правое — 6,0; переплет — 0, поля зеркальные. Расстояние от края до верхнего колонтитула, см — 3,0, от края до нижнего колонтитула — 3,7. Абзацный отступ равен 0,75 см. Межстрочный интервал одинарный. Автоматически устанавливаются переносы (не более 4 подряд в одном абзаце). Автоматически устанавливается запрет висячих строк.

Для *набора формул* используется редактор формул *Microsoft MathType 5*; по умолчанию устанавливаются размеры шрифта для одно- и двухстрочных формул: обычного — 11 пт, крупного и мелкого индекса — соответственно 8 и 6 пунктов, крупного и мелкого символа — соответственно 16 и 11 пунктов. Греческие и русские буквы набираются прямым шрифтом, латинские — курсивом. Если написание в формулах отличается от традиционного, автор должен сделать соответствующие пометки на полях распечатанной статьи, при этом греческие буквы обводятся красным карандашом, готические — синим. Формулы выключаются в левый край с абзацным отступом. Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

Векторные рисунки, сохраненные в формате WMF, *растровые* — в TIF или BMP; *графики и диаграммы*, построенные в *Microsoft Excel*, а также *рисунки*, созданные в *Corel Draw 12* или *AutoCAD 2006* и сохраненные в оригинальном формате, дополнительно помещаются на электронный носитель отдельными файлами. Имя файла должно соответствовать наименованию или номеру рисунка в тексте статьи. Кроме того, *иллюстрации* обязательно присылаются распечатанными на отдельных листах формата А4 в масштабе 1:1, в пригодном для сканирования виде. Размер шрифта текста в рисунках — 9-10 пт. *Подписи к рисункам* выполняются непосредственно в тексте статьи шрифтом Times № 10 (10 пт), экспликация в подрисуночной подписи — Times № 9 (9 пт). Для сжатия больших файлов использовать архиваторы *Arj* и *WinZip*, *WinRAR*.

Цветные и черно-белые фотографии присылать в оригинальном виде с подписями на обороте. Цифровые фотографии выполнять с разрешением не менее 300…600 dpi, присылать в электронном виде в любом графическом формате, кроме .jpg.

Текст *таблиц* набирается шрифтом Times New Roman (Cyr) № 10 (10 пунктов).

Пристатейные *баблиографические списки* размещаются после основного текста статьи.

В библиографическом списке приводится только цитируемая в статье литература. Источники группируются в списке в порядке упоминания в тексте. Ссылки на источники приводятся в тексте в квадратных скобках (запрещается использовать ссылки-сноски для указания источников). В библиографическую запись включаются только основные элементы библиографического описания (ГОСТ 7.0.5–2008). Разделительные знаки «тире» между областями опускаются. Шрифт Times New Roman (Cyr) № 9 (9 пунктов). Язык библиографических записей соответствует языку описываемых источников.

Библиографический список приводится *дважды*. Во втором варианте все русскоязычные библиографические записи приводятся *на латинице*, записи на других языках просто повторяются.

Авторы статей несут всю полноту ответственности за содержание статей и за сам факт их публикации. Редакция журнала не несет никакой ответственности перед авторами и/или третьими лицами и организациями за возможный ущерб, нанесенный публикацией статьи. Редакция исходит из того, что, *в соответствии с законодательством в части авторского права, автор, направляя статью в редакцию, полностью соглашается с условиями редакции и, следовательно, только сам лично несет ответственность за использование в тексте статьи материалов третьих лиц и соблюдение их авторских прав.* Все права автора и вся полнота его ответственности сохраняются и после публикации статьи в журнале.

Порядок рецензирования. Статьи обсуждаются редколлегией, рецензии, поступившие в сопроводительных материалах, учитываются. Статьи могут быть направлены редакцией на дополнительную внутреннюю или внешнюю экспертизу (рецензирование) и опубликованы только при положительном заключении. Имена авторов и рецензентов друг другу не сообщаются. Копия заключения предоставляется автору.

Статьи, не отвечающие изложенным требованиям, редколлегией не принимаются. Материалы, не принятые к опубликованию, авторам не высылаются.

Редакция имеет право производить сокращения и редакционные изменения текста. Корректура статей авторам не предоставляется. Согласование редакционных и авторских изменений текста статьи (переписка, тел. переговоры) производится за счет автора.

Гонорар за опубликование статьи не выплачивается, плата за публикацию статей с аспирантов не взимается.

КОМПЛЕКТОВАНИЕ ОЧЕРЕДНОГО НОМЕРА ЗАВЕРШАЕТСЯ ЗА 3 МЕСЯЦА ДО ПЛАНИРУЕМОГО ВЫХОДА В СВЕТ.

Примерный график выпуска **серии «Строительство и архитектура» — март (прием статей до 1 декабря); июнь (прием статей до 1 марта); сентябрь (прием статей до 1 июня); декабрь (прием статей до 1 сентября).**

ISSN 1815-4360. Серия «Строительство и архитектура»

Тематические рубрики

Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания, фундаменты, подземные сооружения. Строительная механика. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов. Строительные материалы и изделия. Гидротехническое строительство. Гидравлика и инженерная гидрология. Технология и организация строительства. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда в строительстве. Инновации в строительном производстве, интенсификация, энергосбережение и энергоэффективность. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности. Градостроительство. Теория развития города. Управление инвестиционно-градостроительной деятельностью. Экологические проблемы градостроительства. Информационные технологии в строительстве и архитектуре. Научно-методический раздел. Организация высшего образования в области строительства и архитектуры. Методика преподавания дисциплин строительного и архитектурного направлений в вузе. Хроника.

Подробная информация о журнале представлена на сайте ВолгГАСУ **www.vgasu.ru**, в разделе ***Научная деятельность / Научные журналы / Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*** (сразу после подписания выпуска в печать на сайте публикуются титул и содержание; через месяц со дня выхода очередного номера из печати на сайте размещается его полнотекстовый файл).

Статьи направлять по адресу: **400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, ком. Б-314а. Редакция «Вестника ВолгГАСУ». Тел. (8442)-96-98-46. E-mail: info@vgasu.ru (для В.И. Воробьева).**

Уточнить ***условия публикации статей и приобретения*** очередного номера журнала можно по тел. **(8442)-96-98-46** у ответственного секретаря редсовета журнала **Владимира Ивановича Воробьева.**

За консультацией по вопросам подготовки авторского оригинала статьи к печати обращаться по адресу: 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, ком. В-210, редакционно-издательский отдел ВолгГАСУ. Тел. (8442)-96-98-28. E-mail: mariapes@mail.ru.

Вниманию читателей и авторов!
«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета»
временно выходит в одной серии
«СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА» (4 выпуска в год).
Подписной индекс по каталогу «Пресса России» 85343,
на Интернет-сайте агентства «Книга-Сервис» — Е85343
(по электронному каталогу можно подписаться и на текущие номера).
По вопросу приобретения ранее вышедших номеров журнала
обращаться по тел. 8-(844-2)-96-98-46 к отв. секретарю редсовета *В.И. Воробьеву*

Продолжается прием статей в очередные выпуски
серий «**Политематическая**» и «**Строительная информатика**»
электронного сетевого научно-технического журнала **«ИНТЕРНЕТ-ВЕСТНИК ВолгГАСУ»**.
*Журнал включен в **Перечень** ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, **утвержденный ВАК** Министерства образования и науки Российской Федерации.*
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство **Эл № ФС77-26286 от 17.11.06**, Международным центром ISSN, **ISSN 1994-0351**, включен в базу РИНЦ (www.elibrary.ru).
Подробная информация на сайте журнала **www.vestnik.vgasu.ru**

«Интернет-вестник ВолгГАСУ» не является электронной версией печатного журнала.
Оба журнала содержат оригинальные публикации.

По вопросам публикации статей в научно-теоретическом журнале
«СОЦИОЛОГИЯ ГОРОДА»
обращаться к гл. редактору Б.А. Навроцкому по тел. 8-8442-96-99-25.
Подписаться на журнал можно по каталогу «Пресса России», подписной индекс **29507**
и по Интернет-каталогу на сайте агентства «Книга-Сервис», подписной индекс **Е 29507**.
*Журнал включен в **Перечень** ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, **утвержденный ВАК** Министерства образования и науки Российской Федерации.*
Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства

в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия, свидетельство **Эл № ФС77-26286 от 17.11.06**, Международным центром ISSN, **ISSN 1994-0351**, включен в базу РИНЦ (www.elibrary.ru).
Подробная информация о журнале на сайте ВолгГАСУ по адресу: **www. vgasu.ru**
в разделе Научная деятельность / Научные журналы.

Научное издание

ВЕСТНИК
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

Серия: Строительство и архитектура
2013. Вып. 31 (50)
Часть 2. Строительные науки

Редакторы *М.Л. Песчаная, Р.В. Худадян*
Перевод на английский язык *О.Ю. Юшко*
Компьютерная правка и верстка *Н.А. Каширина, Н.Е. Никиташина*
Компьютерный дизайн обложки *О.Ю. Мелешин*
Информационно-библиографическое обслуживание выпуска *Е.В. Хромова*

Подписано в печать 08.04.2013. Формат 70×108/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Уч.-изд. л. 52,4. Усл. печ. л. 44,3. Тираж 300 экз. Заказ № 13

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»
Редакционно-издательский отдел
Отдел оперативной полиграфии
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1