

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ВЕСТНИК
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

**Выпуск
42(61)**

Серия: Строительство и архитектура
Научно-теоретический и производственно-практический
журнал

2015

Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta
Seriya: Stroitel'stvo 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. ОСНОВАНИЯ, ФУНДАМЕНТЫ,
ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ. МЕХАНИКА ГРУНТОВ

- Богомолов А. Н., Галай Б. Ф., Олянский Ю. И., Сербин В. В., Плхтюкова В. С.** Уплотнение
просадочных грунтов глубинными взрывами на юге России 4
- Сабитова Т. А., Анопин В. Н.** Особенности планирования и выполнения геодезических работ по
выявлению деформаций сооружений ТЭЦ в Нижнем Поволжье 15
- Тельминов И. В., Невзоров А. Л.** Прогноз продолжительности выноса загрязняющих веществ
с заболоченной территории 25
- Ушаков А. Н.** О распределении напряжений в упругой полуплоскости и по ее контакту с цен-
трально нагруженным абсолютно жестким штампом параболического очертания при конечном
значении коэффициента трения по контакту «штамп — грунт» 39
- Чусов В. В.** Перспективы применения эмпирических условий пластичности грунтов и определе-
ние их параметров при трехосных испытаниях грунтов 49

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

- Ерохина Л. А., Майорова Н. С.** Исследование структуры тяжелого бетона с целью повышения его
морозостойкости 58
- Майорова Н. С., Ерохина Л. А.** О формировании структурной плотности цементного камня с
добавкой недефицитных отсеков кварцевого песка 69
- Тухарели А. В., Акчури Т. К.** Оценка возможности использования органической добавки водной
дисперсии акрилового мономера в составах мелкозернистых бетонов 80
- Тухарели А. В., Акчури Т. К.** Исследования процессов структурообразования мелкодисперсной
бетонной композиции, модифицированной водной дисперсией акрилового мономера 89

ТЕПЛОСНАБЖЕНИЕ, ВЕНТИЛЯЦИЯ, КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ВОЗДУХА,
ГАЗОСНАБЖЕНИЕ И ОСВЕЩЕНИЕ

Корепанов Е. В., Булдакова И. Н. Методика определения теплового потенциала вертикального U-образного грунтового коллектора теплонасосной установки	98
Сергина Н. М., Мохаммед Саиф Али Абдулджалил. Об оценке эффективности систем пылеочистки в производстве строительных материалов	108
Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В. Экспериментальное определение теплофизических свойств энергоэффективных и экологически безопасных стеклопакетов	119
Чурикова В. И., Голованчиков А. Б., Чичерина Г. В. Исследование процесса массовыделения серы при электрохимическом окислении сероводорода	134

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА

Ишмаметов Р. Х., Сидоренко В. Ф. Совершенствование методов оценки экологической безопасности при строительстве малых населенных пунктов на трассах нефтегазопроводов	140
---	-----

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

Алексиков С. В., Симончук Д. Н. Повышение качества строительства дорожного полотна в засушливых районах юга РФ	154
Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В., Алексиков С. В. Разгрузочный клапан системы защиты гидропривода машин	163
Чан Ван Зы. Основные причины деформаций земляного полотна и выбор конструктивных мероприятий по инженерной защите пойменных участков автодорог Вьетнама	174

ТЕОРИЯ И ИСТОРИЯ АРХИТЕКТУРЫ, РЕСТАВРАЦИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЯ
ИСТОРИКО-АРХИТЕКТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Пастух О. А. Проектные концепции развития исторической территории города Орла	184
Фадеев А. В. Научные основы определения границ исторического ядра города Самары	194

ТЕХНОЛОГИЯ И ОРГАНИЗАЦИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА

Абрамян С. Г., Оганесян О. В. Устойчивое развитие и экологическая безопасность строительства зданий и сооружений: техногенные факторы, воздействующие на атмосферу. Часть I	202
--	-----

Content

BUILDING STRUCTURES, BUILDINGS AND CONSTRUCTIONS. BASEMENTS, FOUNDATIONS. UNDERGROUND STRUCTURES. SOIL ENGINEERING

Bogomolov A. N., Galai B. F., Olyanskii Yu. I., Serbin V. V., Plakhtyukova V. S. Compaction of sagged soils by depth explosions in the south of Russia	4
Sabitova T. A., Anopin V. N. Peculiarities of planning and performance of geodetic works on determination of deformations of buildings of CHPPs in the Lower Volga Region (Nizhnee Povolzh'e)	15
Tel'minov I. V., Nevzorov A. L. The forecast of duration of the contaminants removal from the wetlands	25
Ushakov A. N. About tension distribution in elastic half-plane and on its contact with centrally loaded absolutely rigid stamp of the parabolic outline at final value of friction coefficient on "stamp — soil" contact	39
Chusov V. V. Prospects of application of empirical conditions of soil plasticity and determination of their parameters by triaxial tests	49

BUILDING MATERIALS AND ARTICLES

Erokhina L. A., Maierova N. S. Research of the structure of heavy concrete in order to increase its frost resistance	58
Maierova N. S., Erokhina L. A. About formation of structural density of cement stone with additive of abundant glass sand sifting	69
Tukhareli A. V., Akchurin T. K. Assessment of the possibility of using organic additive of aqueous dispersion of acrylic monomer in the structure of fine grained concrete	80
Tukhareli A. V., Akchurin T. K. Research of the processes of structure formation of fine grained concrete composition modified by aqueous dispersion of acrylic monomer	89

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

Korepanov E. V., Buldakova I. N. Technique of determination of thermal potential of vertical U-shaped soil collector of heatpump installation	98
Sergina N. M., Mokhammed Saif Ali Abduldzhali. On the evaluation of the efficiency of dust cleaning systems in the manufacture of building materials	108
Fokin V. M., Kovylina A. V., Popova A. V. Experimental determination of thermophysical properties of power effective and ecologically safe double-glazed windows	119
Churikova V. I., Golovanchikov A. B., Chicherina G. V. Research of the process of sulfur mass emission at electrochemical oxidation of hydrogen sulfur	134

ENVIRONMENTAL ISSUES IN URBAN PLANNING

Ishmametov R. Kh., Sidorenko V. F. Improvement of methods of assessment of environmental safety at construction of small settlements on routes of oil and gas pipelines	140
--	-----

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

Aleksikov S. V., Simonchuk D. N. Increase of quality of construction of a roadway in arid regions in the south of the Russian Federation	154
Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. Relief valve of protection system of hydraulic drive of a machine	163
Chan Van Zy. Main causes of strain of roadbed and choice of design engineer protection measures on floodplain highways in Vietnam	174

THEORY AND HISTORY OF ARCHITECTURE, RESTORATION AND RECONSTRUCTION OF HISTORICAL AND ARCHITECTURAL HERITAGE

Pastukh O. A. Conceptual design of the development of historical territories of Orel town	184
Fadeev A. V. Scientific approach to determination of the boundaries of the historical core of Samara city	194

TECHNOLOGY AND CONTROL IN CONSTRUCTION

Abramyan S. G., Oganessian O. V. Sustainable development and ecological safety of construction of buildings and facilities: the technogenic factors influencing the atmosphere. Part I	202
---	-----

УДК 138.29(470.6)

А. Н. Богомолов^{а, в}, Б. Ф. Галай^б, Ю. И. Олянский^а, В. В. Сербин^б, В. С. Плахтюкова^б

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Северо-Кавказский федеральный университет*

^в *Пермский национальный исследовательский политехнический университет*

УПЛОТНЕНИЕ ПРОСАДОЧНЫХ ГРУНТОВ ГЛУБИННЫМИ ВЗРЫВАМИ НА ЮГЕ РОССИИ

На примере лессовых пород юга России проанализированы различные методы подготовки оснований II типа грунтовых условий по просадочности: предварительным замачиванием, грунтонабивными сваями, уплотнением взрывами. На конкретных строительных площадках проанализированы преимущества и недостатки каждого метода. В результате сделан вывод о целесообразности использования в грунтовых условиях юга России метода уплотнения энергией взрыва. Приводятся практические рекомендации к использованию метода.

К л ю ч е в ы е с л о в а: лессовые породы, просадочность, грунтовые сваи, замачивание котлованов, уплотнение грунтов взрывами, просадка толщи.

На юге России основным типом покровных отложений являются просадочные лессовые грунты. На этих грунтах ведется массовое строительство зданий и сооружений в городах, построены высокоответственные объекты завода «Атоммаш» и Ростовской АЭС в г. Волгодонске, Прикумского завода пластмасс в г. Буденновске (ныне ООО «Ставролен» ЛУКОЙЛа), сооружены крупнейшие в стране гидромелиоративные системы и водохранилища, железнодорожные и автомобильные магистрали.

Несмотря на высокий уровень механизации современного строительства и жесткие требования строительных норм, многие здания и сооружения, построенные на просадочных грунтах, испытали аварийные деформации, на исправление которых потребовались значительные бюджетные средства. Среди них следует отметить аварийные деформации промышленных зданий завода «Атоммаш», жилых домов и объектов соцкультбыта в г. Волгодонске [1] и крупного военного городка в г. Буденновске [2], деформации которых произошли в процессе строительства.

Особые трудности возникают при строительстве ответственных объектов на просадочных грунтах большой мощности. После аварийных деформаций Атоммаша по инициативе академика Е. М. Сергеева было выполнено тотальное изучение лессовых разрезов СССР, из которого следует, что наиболее просадочными грунтами страны и, возможно, мира являются лессовые толщи восточных районов Ставрополя (Буденновск и др.). Здесь мощность типичных лессов превышает 100 м, зона аэрации («мертвый горизонт») достигает 92 м, просадочная толща может составить 50...55 м, а просадка от собственного веса — 2,0...2,5 м [3, 4]. Такая просадка подтверждается практикой строительства и аварийными деформациями силосных корпусов Буденновского элеватора (2,0...2,5 м) и завода ЖБИ в г. Буденновске (1,8 м).

Строительные нормы¹ рекомендуют устранять просадочные свойства грунтов «...в пределах всей просадочной толщи — глубинным уплотнением грунто-

¹ СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. М.: ГУП ЦПП, 1996. п. 3.13.

выми сваями, предварительным замачиванием грунтов основания, в том числе с глубинными взрывами, химическим или термическим закреплением».

Химическое (силикатизация) и термическое (обжиг) закрепление были опробованы в 1970-е гг. при строительстве Прикумского завода пластмасс с участием ростовского Промстройниипроекта и московского Фундаментпроекта и не были приняты строителями даже в качестве противоаварийных мероприятий.

Грунтовые сваи, поставленные в нормах на первое место среди глубинных способов устранения просадочности, также ограничены: глубиной уплотнения (порядка 20 м), дороговизной буровых станков типа БС-1М с ударным молотом 3,2 т, опасностью ударного применения вблизи существующих зданий, необходимостью доувлажнения до оптимальной влажности мало-влажных лессов и сезонностью работ. В Ставропольском крае ударная технология набивки грунтовых свай трамбовками 3...5 т ни разу не применялась не только при массовом строительстве, но и на крупных стройках.

Предстроительное замачивание котлованов было популярным в 1970—1980-е гг. на крупных стройках, но затем сошло на нет из-за дефицита воды, длительности процесса, недостаточного уплотнения и опасности замачивания оснований соседних зданий на застроенной территории. Замачивание грунтов в котлованах с дренажными и без дренажных скважин вскрыло существенный недостаток Инструкции (1965), который сохранился в действующих рекомендациях². Полное промачивание просадочной толщи не приводит к полной ликвидации просадочности. Для достижения условной стабилизации просадки (1 см в неделю за последние две недели) в котлованы необходимо подать в 2...3 раза больше воды, чем для полного промачивания просадочной толщи. Это обусловлено отставанием и задержкой процесса просадки при быстром промачивании просадочной толщи. Лесс быстро сбрасывает вниз избыточную гравитационную влагу, и процесс просадки оказывается незавершенным. Распространенный взгляд на просадку как на быстрый и провальный процесс доуплотнения лессовых грунтов за счет разрушения неводостойких структурных связей представляется упрощенным и требует переоценки.

Ученые [5] обратили внимание на замедленно-просадочные средние и тяжелые лессовидные суглинки, глинистая фракция которых обогащена монтмориллонитом. Но замедленное проявление просадочности при определенных условиях характерно и для типичных лессов. Такое явление надо учитывать при прогнозе просадочных процессов, выборе противопросадочных мероприятий и разработке строительных норм. Следует согласиться с авторами этой статьи, что оценка просадочности в компрессионных приборах «не полностью соответствует реальным условиям работы оснований и фундаментов, особенно при подтоплении территорий». Для объяснения замедленно-

Пособие по проектированию зданий и сооружений (к СНиП 2.02.01-83). М.: Стройиздат, 1986. 415 с. п. 13.76

СП 22.13330.2011. Свод правил. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*. п. 6.1.22.

² СП 13330.2012. Свод правил. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87. п. 17.1.8.

просадочных процессов в лессовых грунтах потребуется более углубленное изучение структурных связей этих структурно-неустойчивых образований, которое в послевоенные годы успешно проводили Н. Я. Денисов, А. К. Ларионов, В. П. Ананьев, Е. М. Сергеев и другие исследователи.

Технико-экономическое сравнение нормативных способов показывает, что полное устранение просадочных свойств в мощных просадочных толщах ($H_{sl} > 20...25$ м) практически невозможно без применения глубинных взрывов. Глубинные взрывы в безводных районах Предкавказья с мощным лессовым покровом, где просадочные толщи имеют $H_{sl} = 25...50$ м, являются практически единственным средством быстрого и полного устранения их просадочности.

Из двух известных и эффективных методов уплотнения просадочных грунтов **глубинными взрывами** (Ю. М. Абелева и И. М. Литвинова) в условиях Северного Кавказа пока получил распространение гидровзрывной метод сосредоточенных зарядов И. М. Литвинова в различных вариантах. Наши попытки опробовать и внедрить метод рассредоточенных по скважине зарядов Ю. М. Абелева пока не получили поддержки со стороны строителей. Метод Ю. М. Абелева, с образованием цилиндрических камуфлетных полостей, может быть очень эффективным для устройства грунтовых свай, если полости заполнить грунтом и уплотнить его шнековым способом [6].

Первый опыт крупномасштабного применения глубинных взрывов для уплотнения просадочных грунтов на юге России состоялся при строительстве газоперерабатывающего завода (ГПЗ) в районе г. Грозного в 1973 г. Применить обычное предстроительное замачивание отказались, так как «проектируемые сооружения требовали высокой степени уплотнения и не допускали почти никаких неравномерных осадок». По мнению И. М. Литвинова [5, с. 208], *«запроектированное свайное основание было бы надежным для основного оборудования и зданий завода (при этом необходимо было забить около 9 тыс. железобетонных свай длиной 12...17 м), но это не обеспечило бы надежную защиту от просадок остального оборудования и коммуникаций на грунтовых подушках, находящихся под охраной водозащитных мероприятий. Свайный вариант значительно удлинил бы сроки строительства»*.

Площадка строительства занимала площадь свыше 100 тыс. м², т. е. при средней мощности просадочной толщи 10 м общий объем уплотнения составил около 1 млн м³ грунта. Опытное уплотнение взрывами привело к просадке грунта до 120...180 см при расчетной просадке от собственного веса 25...40 см, т. е. взрывная просадка превысила расчетную в 3...5 раз. При производстве работ возникла проблема: «Избыток воды после взрывных работ отжимался уплотняемым грунтом на поверхность, покрывая ее в отдельных местах на глубину до 10...15 см и обводняя при этом поверхностный (буферный) слой». Трамбование буферного слоя пришлось заменить гравийной подушкой толщиной до 3 метров. Гидровзрывное уплотнение провели за 253 суток вместо 885 суток, требовавшихся при ранее утвержденных свайных фундаментах, сэкономив 1 млн рублей. На уплотненных основаниях были построены здания и сооружения высотой до 76 м, испытывающие большие ветровые нагрузки и возможные сейсмические воздействия.

Внедрению гидровзрывного метода на стройках Ставропольского края способствовали три обстоятельства: ознакомление с взрывами на площадке

Грозненского газоперерабатывающего завода в 1973 г., выступление на VIII Всесоюзном совещании по закреплению и уплотнению грунтов [1, 7] и, главное, начало строительства крупнейшего в мире Прикумского завода пластмасс на самых просадочных грунтах страны [8].

Первое опробование гидровзрывного уплотнения просадочных лессов мощностью 28 м состоялось в декабре 1976 г. на стройбазе завода пластмасс в г. Буденновске. Просадка после взрывов составила 2,75 м, что в три раза превысило просадку от собственного веса грунта (рис. 1). Тогда же генеральный проектировщик — Ставропольский Промстройпроект — определил, что экономический эффект от применения глубинных взрывов на стройбазе составляет 1,5 млн руб. в ценах 1976 г. (по сравнению с грунтовыми сваями).

Опытные работы вскрыли несколько существенных недостатков киевского метода, которые остались неустраненными в действующих нормативах: полное промачивание всей просадочной толщи приводит к образованию в котлованах слоя воды (около 0,5 м) и длительной задержке строительства, связанной с осушением верхнего слоя; в мощной лессовой толще не удалось выдернуть остатки взрывных труб (рис. 1), потеря которых составила 3000 пог. м; разрушение труб произошло не только в нижней части, где был заряд ВВ, но и над поверхностью земли.

Высокая стоимость и дефицит (в то время) стальных труб заставили искать другие варианты эффективного гидровзрывного метода.



Рис. 1. Просадка грунта после гидровзрывного уплотнения лесса мощностью 28 м в г. Буденновске (декабрь 1976 г.) и неудачная попытка выдернуть обсадные трубы, разорванные после взрывов

Сначала была разработана технология цементации стенок взрывных скважин специальными устройствами [9], в 1980 г. была составлена «для служебного пользования» «Временная инструкция», разрешающая укладку зарядов в сухие дренажно-взрывные скважины до начала замачивания котлованов, которая затем была оформлена в виде Пособия [10], согласованного с Госгортехнадзором и Кавказвзрывпромом. Укладка зарядов в сухие скважины до начала замачивания котлованов в 3...5 раз удешевила и ускорила работы:

- вместо бурения дренажно-взрывных скважин диаметром 400...500 мм дефицитным буровым станком СО-2 стали использовать шнековые установки типа УГБ и др.;

- вместо расположения зарядов на большой глубине (0,75 просадочной толщи) подняли заряды на минимальную глубину камуфлетного действия, чтобы лучше уплотнить верхнюю, наиболее просадочную часть разреза;

- вместо одноярусного расположения зарядов было опробовано двухъярусное взрывание зарядов сначала нижнего яруса, а затем — верхних зарядов для уплотнения возможных камуфлетных полостей в нижнем ярусе;

- вместо полного промачивания просадочной толщи, которое приводило к образованию в котлованах «лягушатников», стали применять ограниченное замачивание на глубину $0,70...0,75H_{sl}$ с условием, что нижняя незамоченная часть толщи будет уплотнена большим природным давлением при сбросе избыточной сверху воды после взрывов;
- для осушения верхнего «буферного» слоя, после поглощения проектной нормы воды, делали перерыв на 2...4 суток, что позволило сразу после взрывов продолжить работы по уплотнению верхнего слоя;
- первые взрывы зарядов производили по периметру котлована, чтобы «оторвать» замоченную часть массива от окружающего естественного грунта;
- в связи с тем, что после взрывов верхняя часть лессовой толщи (буферный слой) сохраняет достаточно высокую влажность, часто превышающую оптимальную влажность (границу раскатывания) грунта, для уплотнения верхнего слоя с 1993 г. стали применять грунтовые сваи, изготовленные шнековым способом.

Гидровзрывным способом с 1977 г. были подготовлены надежные основания для многих зданий и сооружений в Ставропольском крае (города Буденновск, Георгиевск, Ипатово, Благодарный и др.), а также в Чечено-Ингушетии, Кабардино-Балкарии и Волгоградской области [8].

В Волгоградской области в 1980 г. глубинными взрывами уплотнили просадочные суглинки мощностью до 11 м при строительстве комбикормового завода производительностью 630 т/сут на станции Качалино и в основании 18 силосных корпусов и рабочего здания элеватора в г. Ленинске.

Согласно справке Министерства сельского строительства РСФСР «на Качалинском комбикормовом заводе применение гидровзрывов позволило исключить устройство свайного поля из 1354 ж/б свай типа С-14-35, что дало экономию 204,0 тыс. рублей. При строительстве элеватора в г. Ленинске трест «Приволжскэлеваторстрой» исключил 2558 свай С-11-30, что позволило сэкономить 185,0 тыс. рублей. В обоих случаях произошло сокращение сроков строительства нулевого цикла этих важных объектов Продовольственной программы» [8].

Согласие на выполнение взрывных работ на площадке Качалинского комбикормового завода производительностью 630 т/сут и элеватора емкостью 50 тыс. т в г. Ленинске дал Куйбышевский Промзернопроект по просьбе треста Приволжскэлеваторстрой (управляющий Г. И. Файвинов) и Волгоградского стройпоезда СПЭ-30 (начальник Л. С. Гриценко). Учитывая первый опыт таких работ в Поволжье, гидровзрывное уплотнение просадочных грунтов было подробно описано в журнале «Сельское строительство», 1984 г., № 8.

В районе г. Грозного (с. Алхан-Кала) на уплотненных взрывами суглинках был построен Ермоловский элеватор. Выполнение взрывных работ состоялось в 1982 г. в сложных условиях — на расстоянии 14 м от железнодорожной дороги Ростов — Баку и в 25 м от здания действующего элеватора. По данным Совета министров ЧИАССР «применение гидровзрывов позволило исключить устройство свайного фундамента из 343 шт. свай С-10-35 и 343 сваи С-12-35 и сэкономить, таким образом, 953,5 м³ бетона и 106,7 тонн арматурной стали. Общая экономия за счет отказа от ранее запроектированного свайного фундамента составила не менее 150 тыс. рублей» [8].

Кабардино-Балкария. Свиноводческий комплекс на 24 тыс. голов в колхозе «Ленинский путь» в станице Кременчуг-Константиновской (17 км к северу от г. Баксан). Уплотнение взрывами выполнили по просьбе Совета министров КБ АССР (06.06.1978 г.). Здесь типичный лесс мощностью 15 м был перекрыт сверху мощным (3,5 м) культурным слоем древней археологической стоянки [8]. Взрывы 641 заряда массой по 6,5 кг выполнили в скважинах глубиной 9 м с шагом 5×5 м при помощи 6040 пог. м детонирующего шнура. Объем уплотнения составил $182\,000\text{ м}^3$. Расход воды приняли $3\text{ м}^3/\text{м}^2$ площади котлована.

Завод «Атоммаш» в г. Волгодонске. История внедрения гидровзрывного метода на стройке крупнейшего в СССР завода «Атоммаш» прошла с осложнениями и в целом завершилась неудачно. В 1979 г. Ростовский инженерно-строительный институт (ныне РГСУ) по договору с п/о «Атоммаш» запроектировал уплотнение оснований двух опытных девятиэтажных домов — № 174 серии 94 и № 172 серии 87 в микрорайоне В-5. Внедрение подержала «Волгодонская правда» (12.09.1980 г.). Взрывы не состоялись.

СевКавПНИИИС Госстроя СССР в 1982 г. предложил уплотнить просадочные суглинки мощностью 27 м на площадке завода «Энергомаш». От этого предложения также отказались. Опытное опробование провели специалисты киевского НИИСКА на площадке с просадочной толщей 14,5 м и просадкой 10,8 см [2]. После этого взрывы не проводили.

Ставропольский край

Город Ипатово. Характеристику работ на Ипатовском комбикормовом заводе (ККЗ) дает Справка Ставропольского крайисполкома директору ПНИИИС Госстроя СССР (22.11.1979 г.):

«В соответствии с Постановлением ЦК КПСС и Совета министров СССР от 24 сентября 1974 года № 761 в с. Ипатово Ставропольского края осуществляется строительство крупного комбикормового завода производительностью 630 тонн в сутки. Площадка строительства расположена в районе сильнопросадочных грунтов II типа, рядом с хлебоприемным пунктом, существующие элеваторы которого в свое время испытывали просадочные деформации. Для их исправления потребовались сложные мероприятия.

Поэтому под основные объекты завода Ростовский Промзернопроект запроектировал буронабивные сваи, прорезающие просадочную толщу. Однако сваи в данных условиях оказались сложными в изготовлении и могли задерживать строительство.

Старший научный сотрудник Северо-Кавказского отделения ПНИИИС к.т.н. тов. Галай Б.Ф. предложил уплотнить просадочные грунты на этой площадке новым гидровзрывным методом. Разработанный по его авторскому свидетельству проект гидровзрывного уплотнения грунтов был одобрен Главпромзернопроектом и Министерством заготовок СССР. На площадке завода с 25 июня по 23 июля взрывами уплотнили 186 тыс. м^3 грунта.

Применение гидровзрывов позволило сэкономить 8129 м^3 сульфатостойкого бетона и 44,44 тонн арматурной стали, а также значительно сократило сроки строительства.

Общая экономия по объекту составила 310 тысяч рублей.

Учитывая высокую эффективность метода, трест «СевКавэлеваторстрой» с участием Северо-Кавказского отделения ПНИИИС представил данную работу на Выставку достижений народного хозяйства СССР» [8].

Осадка загруженных силкорпусов ККЗ составила всего 10...11 см, что в 3 раза меньше допустимой осадки, а разность осадок составила 1 см, что в 17 раз меньше допустимого значения по СНиП.

Город Благодарный. В 2009 г. началось строительство крупнейшего на юге России птицеперерабатывающего комбината, где просадочная толща составляла 25 м. На территории действующего предприятия было взорвано более 2000 глубинных зарядов массой до 10 кг и уплотнено более 600 тыс. м³ просадочных грунтов. Просадка после взрывов составила в среднем 1,4 м, превысив просадку от собственного веса в два раза. Взрывные работы выполнили без осложнений, в 20 м от производственных корпусов и резервуаров для воды, с устройством отсечных траншей. Это позволило сократить сроки и стоимость строительства в два раза, сэкономив около 15 миллионов рублей в текущих ценах [8].

Город Буденновск. Среди крупных объектов этого города, где применили гидровзрывное уплотнение, следует выделить очистные сооружения, военный городок для контрактников и газоперерабатывающий завод «Ставролен».

Очистные сооружения г. Буденновска и Прикумского завода пластмасс строились по межправительственному соглашению с ФРГ (фирмой «Линда»), в 1988 г. они стали предметом обсуждения из-за просадочности грунтов в ЦК КПСС. Исследованиями было установлено, что на площадке очистных сооружений просадочная толща имеет мощность до 45...50 м. Задержка строительства очистных сооружений ставила под угрозу сроки сдачи в эксплуатацию химического гиганта страны. Спасти ситуацию могло только гидровзрывное уплотнение просадочной толщи, сокращающее сроки замачивания с 4...6 месяцев до 1 месяца. Применение глубинных взрывов осложнялось близостью действующих очистных сооружений и наличием под очистными сооружениями единственного в районе артезианского бассейна подземных вод, используемого для водоснабжения города.

Площадка очистных сооружений была разбита на 26 карт-котлованов общей площадью 120 000 м². Заряды массой по 10 кг в количестве 4804 шт. разместили в скважины диаметром 200 мм и глубиной 6 м, с шагом 5 × 5 м. На карты было подано 1 192 000 м³ воды из расчета 10 м³/м² площади котлована. Для выполнения работ потребовалось 48,04 т водостойкого аммонита БЖВ, 71 460 пог. м водостойкого детонирующего шнура ДШЭ-12. Объем уплотненного грунта составил 4 804 000 м³.

После взрывов просадка дна котлованов в течение двух недель в среднем составила 1,70 м, в отдельных случаях достигая 2,25 м, превысив расчетную просадку (44...84 см) в 3 раза. К сожалению, полную послеаварийную просадку установить не удалось, т. к., не дожидаясь стабилизации просадки, строители приступили к доуплотнению верхнего «буферного» слоя тяжелыми трамбовками.

Военный городок для 1000 семей военнослужащих начали строить в 1992 г. по межправительственному соглашению России с Германией для Западной группы войск. Просадочные грунты не уплотнили, аварии произошли в процессе строительства [1].

При строительстве следующего городка для 1000 контрактников просадочные грунты мощностью до 22,5 м уплотнили глубинными взрывами. Для замачивания потребовалось 4 сут. Взрывы произвели через 3 сут после впи-

тывания воды и подсыхания котлованов. Просадка после взрывов в среднем составила 140 см и в 2 раза превысила просадку от собственного веса грунта (в среднем 70 см).

По справке генерального проектировщика ОАО «711 ВОЕНПРОЕКТ» и заказчика Северо-Кавказского строительного управления МО РФ гидро-взрывное уплотнение сократило сроки подготовки оснований в два раза и дало экономию 25 млн руб. [8].

Газоперерабатывающий завод ООО «Ставролен» ЛУКОЙЛа запланирован в рамках правительственного инвестиционного проекта «Реконструкция с целью переработки газового сырья месторождений Северного Каспия», которые ЛУКОЙЛ разрабатывает в российском секторе Каспийского моря. На первом этапе планируется ввести в эксплуатацию ГПЗ мощностью 2 млрд м³ в год, а затем — 4 млрд м³ в год. Это позволит заводу перерабатывать не 40 % газового сырья и 60 % бензина, а 75 % газа и 25 % бензина.

Значительный объем в этой стройке занимает Товарно-сырьевой склад СУГ с I уровнем ответственности всех сооружений. На площадке строительства просадочные лессы имели мощность 28,0 м и просадку от собственного веса 43...78 см. Грунтовые воды находились на глубине 25...29 м. Расчетную сейсмичность приняли равной 8 баллам.

Проект гидро-взрывного уплотнения просадочных грунтов поддержали самые авторитетные специалисты в области буровзрывных работ — доктора технических наук В. Л. Барон и М. И. Ганопольский (ООО «ЦПЭССЛ БВР», Москва), а также ОАО «Кавказвзрывпром» и Экспертно-консультативный центр «Ставпромбезопасность».

На уплотняемой площади по сетке 4,0 × 3,5 м были пробурены дренажно-взрывные скважины глубиной 6 м и диаметром 200 мм. В сухие скважины опустили гидроизолированные заряды водостойкого аммонита массой до 10 кг. Скважины заполнили гравием. Замачивание грунтов произвели из расчета промачивания $0,75H_{sl}$ мощности просадочной толщи, по 4,0 м³ на 1 м² площади котлованов, на что потребовалось 4...5 сут. После поглощения проектной нормы воды дали трехдневный перерыв для подсыхания верхнего слоя, а затем произвели глубинные взрывы сначала контурных зарядов, чтобы оторвать замоченную часть от незамоченного массива, а затем внутри котлованов с интервалом 3...5 с (рис. 2).

Качество уплотнения оценила изыскательская организация ЛУКОЙЛа, а Главгосэкспертиза России дала положительное заключение по результатам выполненных работ.

По данным заказчика, экономический эффект за счет применения глубинных взрывов составил 887,372 млн руб., не считая сокращения сроков строительства.

Несмотря на длительную историю применения глубинных взрывов для уплотнения просадочных грунтов, они не получили широкого распространения. Это объясняется слабой нормативно-теоретической базой рекомендуемых методов, отсутствием обобщающих аналитических исследований и рисками при проведении взрывов на застроенных территориях.

При строительстве на мощных лессовых толщах глубинные взрывы следует применять в комплексе с поверхностными методами уплотнения (трамбование и грунтовые подушки), шнековыми грунтовыми сваями, а для тяжелых сооружений — совместно с буронабивными и забивными ж/б сваями.



Рис. 2. Гидровзрывное уплотнение просадочных лессов на площадке строительства Газоперерабатывающего завода в г. Буденновске Ставропольского края

Для дальнейшего успешного применения глубинных взрывов — быстро, недорого и эффективного способа уплотнения лессовых оснований — следует объединить усилия изыскателей-геологов, геотехников-строителей, взрывников и ученых. При этом потребуются пересмотр и улучшение строительных норм, имеющих принципиальные ошибки и связывающих руки проектировщикам и строителям обязательными требованиями их выполнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Галай Б. Ф. Проблемы строительства и восстановления аварийных зданий военного городка в г. Буденновске. Ставрополь: СевКавГТУ, 2006. 51 с.
2. Проектирование и строительство зданий и сооружений на просадочных грунтах // Тезисы докладов и сообщений Всесоюзной конференции (Волгодонск, 20—21 ноября 1984 г.). М.: НИИОПС, 1984. С. 62—63.
3. Галай Б. Ф. Лесс. Взрывы. Шнековые сваи // Градостроительство и ЖКХ: научные статьи. Ставрополь: Сервисшкола; Северо-Кавказский федеральный университет, 2014. 462 с.
4. Опорные инженерно-геологические разрезы лессовых пород Северной Евразии / В. Т. Трофимов, С. Д. Балыкова, Т. В. Андреева, А. В. Ершова, Я. Е. Шаевич. М.: КДУ, 2008. 608 с.
5. Литвинов И. М. Укрепление и уплотнение просадочных грунтов в жилищном и промышленном строительстве. Киев: Будивельник, 1977. 288 с.
6. Галай Б. Ф. Рекомендации по проектированию и устройству буронабивных грунтовых свай, изготовленных шнековым способом в просадочных и слабых грунтах. Ставрополь: Сервисшкола; Северо-Кавказский государственный технический университет, 2012. 76 с.
7. Галай Б. Ф. Результаты применения противопросадочных мероприятий в Ставропольском крае // Закрепление и уплотнение грунтов в строительстве : Материалы VIII Всесоюзного совещания. Киев : Будивельник, 1974. С. 84—88.
8. Галай Б. Ф. Уплотнение просадочных грунтов глубинными взрывами. Ставрополь: Сервисшкола, СКФУ, 2015. 240 с.
9. Методические рекомендации по уплотнению просадочных грунтов гидровзрывным способом. Киев: НИИСК Госстроя СССР, 1980. 77 с.

10. Галай Б. Ф. Пособие по уплотнению просадочных лессовых грунтов глубинными взрывами в условиях Северного Кавказа (изыскания, проектирование, производство работ). Ставрополь: Сервисшкола; Северо-Кавказский государственный технический университет, 2012. 130 с.

© Богомолов А. Н., Галай Б. Ф., Олянский Ю. И., Сербин В. В., Плахтюкова В. С., 2015

Поступила в редакцию
в ноябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Уплотнение просадочных грунтов глубинными взрывами на юге России / А. Н. Богомолов, Б. Ф. Галай, Ю. И. Олянский, В. В. Сербин, В. С. Плахтюкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 4—14.

Об авторах:

Богомолов Александр Николаевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой гидротехнических и земляных сооружений, проректор по научной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; проф. кафедры строительного производства и геотехники, Пермский национальный исследовательский политехнический университет. Российская Федерация, 614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, banzaritcyn@mail.ru

Галай Борис Федорович — д-р геол.-минерал. наук, проф., проф. кафедры строительства, Северо-Кавказский федеральный университет. Российская Федерация, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, galaybf@mail.ru

Олянский Юрий Иванович — д-р геол.-минерал. наук, доц., проф. кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, olyansk@list.ru

Сербин Виталий Викторович — аспирант кафедры строительства, Северо-Кавказский федеральный университет. Российская Федерация, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, serbin_vitaliy@mail.ru

Плахтюкова Виктория Сергеевна — аспирант кафедры строительства, Северо-Кавказский федеральный университет. Российская Федерация, 355009, г. Ставрополь, ул. Пушкина, 1, pl_victoriya@mail.ru

A. N. Bogomolov, B. F. Galai, Yu. I. Olyanskii, V. V. Serbin, V. S. Plakhtyukova

COMPACTION OF SAGGED SOILS BY DEPTH EXPLOSIONS IN THE SOUTH OF RUSSIA

By the example of loess rocks in the south of Russia various methods to prepare bases of II type soil subsidence conditions such as presoaking, soil filling piles, compaction by explosions. The advantages and disadvantages of each method were analyzed on certain construction sites. As the result the conclusion about the feasibility of using the method of compaction by the energy of explosion in ground conditions in the south of Russia was made. Practical recommendations for the use of the method are given.

Key words: loess rocks, subsidence, soil piles, soaking of pits, soil compaction by explosions, depth subsidence.

REFERENCES

1. Galai B. F. *Problemy stroitel'stva i vosstanovleniya avariinykh zdanii voennogo gorodka v g. Budennovske* [Problems of construction and reconstruction of dangerous buildings in a military town in Budennovsk]. Stavropol, SevKavGTU Publ., 2006. 51 p.
2. *Proektirovanie i stroitel'stvo zdanii i sooruzhenii na prosadochnykh gruntakh. Tezisy dokladov i soobshchenii Vsesoyuznoi konferentsii (Volgodonsk, 20—21 noyabrya 1984 g.)* [Design and construction of buildings and structures on collapsing soil. Theses of reports and statements of All-Union Conference (Volgodonsk, November, 20—21, 1984)]. Moscow, NIIOPS Publ., 1984. Pp. 62—63.

3. Galai B. F. [Loess. Explosions. Auger piles]. *Gradostroitel'stvo i ZhKKh: nauchnye stat'i* [Town planning and housing and utility services. Scientific articles]. Stavropol, Servisshkola Publ.; North Caucasian Federal University Publ., 2014. 462 p.
4. Trofimov V. T., Balykova S. D., Andreeva T. V., Ershova A. V., Shaevich Ya. E. *Opornye inzhenerno-geologicheskie razrezy lessovykh porod Severnoi Evrazii* [Engineering and geological reference sections of loess in Northern Eurasia]. Moscow, KDU Publ., 2008. 608 p.
5. Litvinov I. M. *Ukreplenie i uplotnenie prosadochnykh gruntov v zhilishchnom i promyshlennom stroitel'stve* [Strengthening and compaction of collapsing soil in residential and industrial construction]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1977. 288 p.
6. Galai B. F. *Rekomendatsii po proektirovaniyu i ustroystvu buronabivnykh gruntovykh svai, izgotovlennykh shnekovym sposobom v prosadochnykh i slabyykh gruntakh* [Recommendations on design and installation of auger soil piles produced by auger-type method in collapsing and weak soil]. Stavropol, Servisshkola Publ.; North Caucasian State Technical University Publ., 2012. 76 p.
7. Galai B. F. [Results of application of anti-collapsing measures in Stavropol Kray]. *Zakreplenie i uplotnenie gruntov v stroitel'stve : Materialy VIII Vsesoyuznogo soveshchaniy* [Soil stabilization and consolidation in construction. Proc. of VIII All-Union Conference]. Kiev, Budivel'nik Publ., 1974. Pp. 84 — 88.
8. Galai B. F. *Uplotnenie prosadochnykh gruntov glubinnymi vzryvami* [Consolidation of collapsing soil by deep explosions]. Stavropol, Servisshkola Publ., NCFU Publ., 2015. 240 p.
9. *Metodicheskie rekomendatsii po uplotneniyu prosadochnykh gruntov gidrovzryvnym sposobom* [Methodical recommendations on consolidation of collapsing soil by hydroexplosive methods]. Kiev, NIISK of the State Committee for Construction of the USSR, 1980. 77 p.
10. Galai B. F. *Posobie po uplotneniyu prosadochnykh lessovykh gruntov glubinnymi vzryvami v usloviyakh Severnogo Kavkaza (izyskaniya, proektirovanie, proizvodstvo rabot)* [Manual on consolidation of collapsing loess soil by deep explosions under the conditions of North Caucasus (researches, design, works)]. Stavropol, Servisshkola Publ.; North Caucasian State Technical University Publ., 2012. 130 p.

For citation:

Bogomolov A. N., Galai B. F., Olyanskii Yu. I., Serbin V. V., Plakhtyukova V. S. [Compaction of sagged soils by depth explosions in the south of Russia]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 4—14.

About authors:

Bogomolov Aleksandr Nikolaevich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Vice-Rector for Scientific Research, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation; Professor of Construction Operations and Geotechnics Department, Perm National Research Polytechnic University. 29, Komsomolskii Prospekt, Perm', 614990, Russian Federation, banzaritcyn@mail.ru

Galai Boris Fedorovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Professor of Construction Department, North Caucasian Federal University. 1, Pushkin St., Stavropol', 355009, Russian Federation, galaybf@mail.ru

Olyanskii Yurii Ivanovich — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Docent, Professor of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, olyansk@list.ru

Serbin Vitalii Viktorovich — Postgraduate Student of Construction Department, North Caucasian Federal University. 1, Pushkin St., Stavropol', 355009, Russian Federation, serbin_vitaliy@mail.ru

Plakhtyukova Viktoriya Sergeevna — Postgraduate Student of Construction Department, North Caucasian Federal University. 1, Pushkin St., Stavropol', 355009, Russian Federation, pl_victoriya@mail.ru

УДК 528.482(470.4)

Т. А. Сабитова, В. Н. Анопин

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ОСОБЕННОСТИ ПЛАНИРОВАНИЯ И ВЫПОЛНЕНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ РАБОТ ПО ВЫЯВЛЕНИЮ ДЕФОРМАЦИЙ СООРУЖЕНИЙ ТЭЦ В НИЖНЕМ ПОВОЛЖЬЕ

Приведены материалы анализа деформации зданий и сооружений Волгоградской ТЭЦ-2 за 26-летний период. Предложен дифференцированный подход в определении периодичности выполнения геодезических работ на зданиях и сооружениях крупных объектов теплоэнергетики Нижнего Поволжья, имеющих различную интенсивность хода деформационных процессов.

Ключевые слова: геодезические наблюдения, репер, деформационная марка, здания и сооружения.

Одним из крупнейших теплоэнергетических предприятий г. Волгограда и всего Нижнего Поволжья является ТЭЦ-2, чей первый агрегат мощностью 25 МВт был введен в эксплуатацию в 1956 г. В настоящее время станция имеет 7 турбогенераторов и 10 паровых котлов. Установленная электрическая мощность составляет 300 МВт, тепловая мощность — 1112 Гкал/ч. ТЭЦ поставляет электроэнергию в единую электросистему России и осуществляет теплоснабжение многоэтажной жилой застройки и промышленных предприятий Красноармейского района г. Волгограда.

Учитывая исключительную значимость ТЭЦ, в целях предупреждения возможности возникновения на предприятии аварийных ситуаций запланированы и выполняются наблюдения за состоянием его зданий и сооружений. Главным показателем оценки их текущего состояния является степень безопасности. На разных этапах эксплуатации объектов она различна. Текущий уровень безопасности определяется значительным количеством внутренних факторов и внешних воздействий, которые можно сгруппировать в критерии стабильности. Обеспечить безопасность состояния здания или сооружения можно только при систематическом проведении мероприятий, обуславливающих увеличение стабильности всех критериев, находящихся ниже минимального технического уровня безопасности [1].

В процессе эксплуатации объекта разные критерии стабильности его состояния характеризуются различным уровнем безопасности. При проектировании исходят из заданного уровня. В приложении проекта Федерального закона «О техническом регламенте «О безопасности зданий и сооружений»¹ предлагается составлять технический паспорт объекта капитального строительства. Однако в сам закон² это приложение не вошло.

Паспорт объекта — это систематизированный свод документированных сведений о развитии технического состояния эксплуатируемого объекта, экс-

¹ Проект Федерального закона «О техническом регламенте «О безопасной эксплуатации зданий и сооружений» // Промышленное и гражданское строительство. 2008. № 6. С. 24—41.

² Федеральный закон от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений.

плутационная документация объекта (архивация, планирование, оценка соответствия), в которой отражаются результаты всех плановых и внеплановых проверок соответствия технического состояния объекта требованиям, установленным действующим федеральным законодательством³. В проекте закона приведен перечень документов, входящих в состав паспорта и приложений к нему, оговорен порядок эксплуатации объекта, описаны требования, предъявляемые к процедурам эксплуатации, технического обслуживания и текущих ремонтов.

Разработчиками Волгодонского инженерно-технического института предложено дополнительно вводить электронную версию паспорта объекта для того чтобы:

- эффективно контролировать текущее состояние объекта;
- планировать на объекте в заранее запрограммированном режиме все необходимые мероприятия;
- изменять уровень безопасности объекта по конкретным критериям, приблизившимся или перешедшим в зону предельного состояния (при необходимости);
- сбирать и систематизировать всю информацию об объекте от этапа изысканий до этапа его ликвидации;
- формировать электронный банк данных текущего состояния объектов на муниципальном уровне, уровне субъектов Российской Федерации и федеральном [1].

Безопасность здания или сооружения, оцениваемая на этапах инженерных изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации зависит от достаточно большого количества внешних и внутренних факторов, которые условно можно разделить на предусматриваемые (расчетные) и вследствие неполной имеющейся информации изначально непредусматриваемые (вне-расчетные). Обе группы оказывают непосредственное влияние на комплексную безопасность объекта, состоящую из предусматриваемой строительно-технической, технологической, пожарной безопасности, степени надежности инженерных коммуникаций, а также безопасности воздействия изначально непредусмотренных факторов.

К изначально непредусмотренным факторам в первую очередь следует отнести различного рода деформации сооружений, происходящие из-за изменения инженерно-геологических, гидрогеологических и других условий.

С течением времени во всех крупных инженерных сооружениях происходят определенные изменения. Под постоянным сильным давлением веса сооружения грунты в основании фундамента сжимаются и происходит осадка строения. Если в результате воздействия изменившихся в процессе эксплуатации факторов сжимаемость грунтов под фундаментом оказывается неодинаковой или нагрузка на разные части фундамента становится различной, осадка происходит с разной скоростью. Это приводит к деформациям сооружений, особенно значительным при воздействии на грунты техногенных факторов, сильном их увлажнении или пересыхании, выщелачивании из них кар-

³ Проект Федерального закона «Об общем техническом регламенте “О безопасной эксплуатации зданий, строений, сооружений и безопасном использовании прилегающих к ним территорий”». URL: amrfor.ru/gen_dir/bezop_teh.reg1.htm

бонатов и т. д. При значительных величинах деформаций в фундаменте и стенах зданий образуются трещины и разломы.

Значительная осадка сооружения также может быть следствием сильных динамических воздействий, передаваемых на основания от вибрации агрегатов, движения в непосредственной близости тяжелого транспорта, работы молотов и т. д.

С течением времени интенсивные осадки от собственного веса сооружения по мере уплотнения грунтов в основании обычно снижаются. При этом, как правило, на песчаных грунтах осадки характеризуются большими скоростями в начальный период с последующим быстрым затуханием, на глинистых затухание происходит медленнее, но в течение значительно более продолжительного времени.

При неблагоприятных геологических условиях (карстовые или оползневые районы) осадки и деформации в определенный период времени могут резко возрастать и, если вовремя не будут приняты необходимые профилактические меры, достигать катастрофических для сооружений размеров [2, 3].

Осадки в результате длительных динамических воздействий происходят «мгновенно». В течение ряда лет грунт под фундаментом от вибраций разжижается, образуя пустоты, особенно увеличивающиеся под влиянием размыва грунтовых вод, после чего в определенный момент происходит достаточно резкая осадка фундамента [2].

Целью наблюдений за состоянием сооружений является определение величин деформации для оценки устойчивости объекта и принятия своевременных профилактических мер, обеспечивающих возможность его нормальной эксплуатации. Кроме того, по результатам наблюдений оценивается правильность проектных расчетов и выявляются закономерности, позволяющие при данных условиях эксплуатации исключить или свести к минимуму интенсивность деформации сооружений.

Наблюдения за ее ходом представляют собой комплекс измерений величин изменения положения деталей зданий и сооружений и выявление причин их возникновения.

На крупных ответственных сооружениях наблюдения начинают с момента их возведения и продолжают в течение всего периода строительства и эксплуатации.

Для выявления причин деформации желательно выполнение наблюдений за изменением состояния и температуры грунтов и грунтовых вод, температурой тела сооружения, изменением метеоусловий. Целесообразно ведение измерений строительной нагрузки и нагрузки от установленного оборудования.

Наблюдения выполняют в соответствии со специальным проектом, который в общем случае включает: техническое задание на производство работ, общие сведения о сооружении, природных условиях и режиме его эксплуатации, схему размещения глубинных реперов и осадочных марок, принципиальную схему выполнения наблюдений, расчет необходимой точности измерений.

Средняя квадратическая ошибка измерений осадок сооружений обычно допускается около ± 1 мм. Но при наблюдениях за осадками фундаментов агрегатов, устанавливаемых с высокой точностью, а также сооружений, осадка которых после затухания возобновилась, точность измерений повышают до десятых долей миллиметра.

Рекомендуемым СНиП⁴ способом наблюдений за осадками является периодическое высокоточное нивелирование знаков, установленных на фундаменте исследуемого сооружения. Эти знаки, называемые осадочными марками, перемещаются вместе с сооружением. По наблюдениям за ними судят о величине осадки отдельных частей строительного объекта. Закладываемые в фундаменты марки имеют форму полусферической головки из нержавеющей стали с хвостовой частью, заделываемой в бетон.

Высотной опорой, которую используют для оценки величины осадки отдельных марок, является сеть фундаментальных реперов, устанавливаемых на значительном расстоянии от сооружения вне пределов осадочной воронки в местах, где сохранность и незыблемость высотного положения знака может быть гарантирована в течение всего времени наблюдений. Для достижения необходимой точности результатов наблюдений за осадками применяют глубинные знаки особой конструкции (глубинные репера), закладываемые до глубины скальных пород.

Места осадочных марок на сооружениях определяют с учетом конструкции фундамента, нагрузки на отдельные части основания (в том числе и динамической), инженерно-геологических и гидрогеологических условий. В общем случае необходима закладка марок вдоль осей фундамента, а чтобы выявить прогибы и перекосы в продольном и поперечном направлениях — в местах, где наиболее вероятно возникновение осадок по сторонам осадочных и температурных швов вокруг зон с наибольшей динамической нагрузкой и участков с меняющимися геологическими условиями [4].

Измерение осадок бетонных сооружений производят с использованием высокоточных и точных нивелиров типа Н05 с оптическими микрометрами и инварных штриховых реек, или электронных цифровых нивелиров типа Ni002 и т. д.

Первый цикл наблюдений обычно начинают после возведения основания сооружения. По его результатам вычисляют начальные отметки всех осадочных марок. Последующие циклы повторяют по мере возрастания нагрузки на основание. В период эксплуатации сооружения необходимая частота измерений зависит от скорости осадок: один цикл в квартал, полгода, год и т. д. Для уменьшения влияния на результаты измерений систематических ошибок нивелирование производят каждый раз по одной и той же схеме. Нивелирные ходы опирают на фундаментные глубинные реперы. При этом глубинные реперы должны находиться в тех же термических условиях, что и наблюдаемые объекты.

Расстояние от инструмента до марок допускаются до 25 м.

При камеральной обработке полевых материалов, после уравнивания нивелирных ходов, вычисляют отметки осадочных марок и составляют ведомости, в которых для каждой марки указывают:

- а) величину осадки между двумя последними циклами
- б) суммарную осадку с начала наблюдений.

Территория расположения зданий и сооружений ТЭЦ-2 г. Волгограда находится на широкой террасе плоской морской низменной равнины, сложенной мощным слоем отложений хвалыньских шоколадных глин [5]. Харак-

⁴ СНиП 3.01.03—84. Геодезические работы в строительстве. М. : Госстрой СССР, 1984. 28 с.

терной особенностью шоколадных глин является набухание при увлажнении, вспучивание при промерзании влажного грунта, а также уплотнение при его высыхании и под воздействием нагрузки. Следствие этих процессов может проявляться в деформации сооружений. На территории теплоэнергетического предприятия установлено 4 глубинных репера, а на фундаментах строений закреплены осадочные марки. В начальный период эксплуатации зданий и сооружений ТЭЦ геодезические наблюдения и оценку интенсивности процессов осадки проводили ежегодно. Затем в связи с постепенным уменьшением численных значений осадки большей части зданий и сооружений постепенно был осуществлен переход к периодическим наблюдениям, продолжающимся до настоящего времени. В соответствии с требованиями нормативной документации⁵ и [6, 7] определение вертикальных перемещений выполнялось геометрическим нивелированием II класса в два этапа. В первом этапе производилось нивелирование между глубинными реперами, по результатам которого оценивалась стабильность их состояния. Во втором этапе определялись величины вертикальных перемещений деформационных марок. Нивелирные ходы прокладывались по деформационным маркам между глубинными или рабочими реперами.

По результатам геодезических наблюдений определялись величины вертикальных перемещений фундаментов зданий: административного и лечебного корпусов, столовой, служебных корпусов 1 и 2, зданий химводоочистки и компрессорной, главного корпуса КТЦ, мазутонасосной и насосной станций, Спецэнергоремонта, градирен 1—3, дымовых труб 1 и 2, аккумуляторных баков 1 и 2, фундаментов турбогенераторов 2—10, котлов 1—9 и некоторых других сооружений.

В 2012 г. были выполнены геодезические работы и проведен анализ изменения отметок деформационных марок за период 1986—2012 гг. В результате было установлено, что в течение 1986—1999 гг. величины деформаций абсолютного большинства зданий и сооружений ТЭЦ были незначительны (за 13-летний период в основном в пределах 5...6 мм). При этом вертикальные перемещения имели значения как со знаком «+», так и «-». И лишь высота отдельных марок изменилась на более значительную величину. Так, марка 75, установленная на здании химводоочистки, поднялась на 52 мм, а марка 92 на противоположной стене опустилась на 22 мм, марки 216 и 219 на здании насосной опустились на 63 и 67 мм соответственно, при снижении уровня других марок всего на 20...30 мм.

На основании полученных результатов можно сделать вывод о целесообразности ежегодной оценки величины перемещения марок только на этих зданиях, установив периодичность нивелирования марок остальных объектов примерно раз в 3—4 года. Однако в целях экономии средств следующее нивелирование всех деформационных марок на объектах ТЭЦ, в том числе и на этих зданиях, было проведено лишь через шесть лет в 2005 г., затем в 2009,

⁵ СНиП 3.01.03—84. Геодезические работы в строительстве. М. : Госстрой СССР, 1984. 28 с.

ГОСТ 24846-81. Грунты, методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. М. 26 с.

2011 и 2012 гг. При этом марки 216 и 219 вследствие их повреждения не nivelировались.

Анализ данных этих лет свидетельствует о том, что в течение периода 2000—2012 гг. интенсивность вертикальных перемещений ряда зданий и сооружений резко возросла. При этом имели место значительные различия в разных их частях.

В итоге за 26-летний период изменения отметок марок административного корпуса варьировали в пределах $-53...-18$ мм, служебного корпуса 1 $-74...+1$ мм, здания электролизной $-135...-60$ мм, лечебного корпуса $-91...-14$ мм, химводоочистки $-25...+62$ мм, столовой $-100...-5$ мм (табл. 1).

Эта интенсификация и разнонаправленность процессов вертикальных перемещений явилась следствием значительного изменения условий эксплуатации, вызвавшим увеличение отрицательного техногенного воздействия на грунты оснований (их переувлажнение в результате техногенных протечек, изменение гидрогеологических условий, обуславливающих подъем уровня грунтовых вод, и т. д.). Так, в 2012 г. при определении превышений между глубинными реперами было установлено, что даже глубинный репер 3 в результате подтопления (в колодце стояла вода) изменил высотное положение в сторону понижения.

Администрации предприятия следует принять срочные меры по ремонту водоподводящих и водоотводящих систем, предотвращению переувлажнения грунтов, а в наиболее аварийно опасных местах — укреплению фундаментов оснований зданий и сооружений.

В то же время осадочные марки ряда других зданий и сооружений характеризовались относительно небольшими перемещениями в вертикальном направлении или равномерной осадкой, не способной вызывать разрушительных деформаций строительных объектов. Так, изменение вертикального положения марок на здании компрессорной составило $0...-5$ мм, градирнях 1 — $-3...+5$ мм, 3 — $0...3$ мм, газоходов — $-1...+4$ мм, дымовой трубы 1 — $4...-6$ мм, 2 — $0...20$ мм, фундаментов под турбогенераторами — $-6...+6$ мм, под котлами (с 1999 по 2012 гг.) — $-5...+8$ мм и т. д. (табл. 2).

Приведенные в таблицах факты свидетельствуют о целесообразности ежегодного выполнения геодезических наблюдений за ходом вертикальных перемещений деформационных марок на зданиях административного, лечебного и служебного корпусов, электролизной, химводоочистки, насосной и столовой. На остальных зданиях и сооружениях может быть установлена периодичность наблюдения раз в три — пять лет.

Для обеспечения качественного мониторинга наблюдений обработка и анализ их результатов должны выполняться в течение длительного периода, по возможности, постоянной группой независимых высококвалифицированных специалистов [8]. Обязательным условием является своевременное восстановление осадочных марок, поврежденных, уничтоженных и закрытых в процессе ремонта и эксплуатации зданий и сооружений (на лечебном корпусе невозможно было использовать 30 % марок, зданиях ГЩУ и ГРУ — 34 %, градирни 2 — 100 %, здании насосной ППВ — 40 %, аккумуляторном блоке 2 — 75 %, здании мазутного хозяйства — 100 %, фундаментах под турбогенераторами — 42 %, фундаментах под котлами — 12 % марок).

Т а б л и ц а 1

Значения вертикальных перемещений деформационных марок на фундаментах зданий и сооружений после 1986 г. на участках интенсивного техногенного воздействия

№ марок	Вертикальные перемещения, мм, за период времени						
	3 года (1989 г.)	5 лет (1991 г.)	13 лет (1999 г.)	19 лет (2005 г.)	22 года (2008 г.)	25 лет (2011 г.)	26 лет (2012 г.)
1	2	3	4	5	6	7	8
Здание химводоочистки							
74	0	+3	+4	+7	—	+11	+9
75	+17	+26	+52	+61	—	+74	+62
76	+1	+4	+6	+9	—	+12	+9
89	-3	+3	-1	+2	—	-3	-3
90	+17	+23	+19	+22	—	+19	+20
91	-3	+3	0	+3	—	+1	-3
92	-4	+2	-22	-19	—	-20	-18
Административное здание							
4	+2	+3	-52	-59	—	-28	-50
4	+9	+10	-50	-13	—	-37	-62
7	+4	+5	-54	-55	—	-34	-18
8	-12	-22	-77	-77	—	-53	-36
Здание столярной мастерской							
35	-4	-21	-32	-58	—	-56	-57
36	-8	0	-31	-66	—	-20	-48
39	+6	+20	-26	-53	—	+5	-53
42	-4	0	—	—	—	-47	-29
Здание электролизерной							
43	+3	+2	-123	-135	—	-187	-136
45	-4	-5	-100	-118	—	-22	-112
46	-5	-10	-58	-69	—	-73	-61
49	-7	-7	-103	-118	—	-89	-118
50	-3	-3	-145	-148	—	-156	-148
Лечебно-профилактический корпус							
63	-10	-8	-49	-69	-90	-88	-91
64	-5	-2	-15	-31	-74	-78	-80
66	-6	-2	-10	-9	-8	-7	-14
67	-7	-4	-12	-14	-7	-8	-16
Здание насосной							
216	—	+6	-63	-45	—	—	—
219	—	+5	-67	-53	—	—	—
220	—	+15	-21	-56	—	-50	-54
223	—	+14	-31	-68	—	-58	-67
Здание столовой							
122	+2	-2	-43	-48	—	-65	-100
123	+3	+2	-8	-6	—	-9	-19
124	+1	+1	-7	-5	—	-7	-5
129	0	-2	-19	-19	—	-24	-38
Здание служебного корпуса 1							
55	0	+1	-48	-64	-16	-71	-47
56	-2	-1	+4	-5	-8	+5	+1
58	-3	-3	-3	-18	-37	-24	-27
59	-2	-1	52	-61	-100	-90	-74

Таблица 2

Значение вертикальных перемещений деформационных марок на фундаментах зданий и сооружений после 1986 г. на участках слабого техногенного воздействия

№ марок	Вертикальные перемещения, мм, за период времени						
	3 года (1989 г.)	5 лет (1991 г.)	13 лет (1999 г.)	19 лет (2005 г.)	22 года (2008 г.)	25 лет (2011 г.)	26 лет (2012 г.)
1	2	3	4	5	6	7	8
Здание компрессорной							
114	+1	+4	-3	+1	—	-1	-3
115	-1	0	-6	-2	—	-5	-5
116	0	+2	-5	-1	—	-7	-5
117	+12	+5	-2	+2	—	-2	-3
Градирия 1							
200	—	+1	+2	—	—	+2	-1
201	—	-3	-5	—	—	-5	-3
202	—	-1	-5	—	—	-8	-3
203	—	0	0	—	—	-3	+1
Градирия 3							
211	—	+3	+2	—	—	+1	-1
212	—	+2	-2	—	—	0	0
213	—	+4	+3	—	—	+4	+4
214	—	+4	+4	—	—	+3	-1
Газоходы							
231	—	+3	-1	-1	—	+5	-3
233	—	+4	+3	+5	—	+6	+3
238	—	+3	-2	-2	—	-1	-2
246	—	0	-2	-1	—	-2	-1
Дымовая труба 1							
99	-4	-1	-4	-5	—	+5	—
1	2	3	4	5	6	7	8
100	-4	-1	-5	-5	—	-3	-4
101	-4	0	-4	-5	—	-7	-5
102	-4	0	-5	-6	—	-2	-6
Фундаменты под трубопроводами							
4	-3	-1	+1	-3	0	-3	-4
9	-4	-3	-1	-6	-2	-9	-11
11	-1	+1	+3	-1	-3	-2	-5
18	+2	+2	+3	+3	+2	+3	+5
28	+2	+3	+5	+6	+3	+2	+4
33	-4	-3	-4	-5	-3	-10	-6
Фундаменты под котлами							
1	—	—	—	-1	+1	-1	+1
10	—	—	—	+1	-2	+4	+3
20	—	—	—	+3	-2	+2	+3
30	—	—	—	+4	0	+5	+4
39	—	—	—	0	+1	0	+4

Только последовательный анализ результатов ежегодных наблюдений на объектах с интенсивным перемещением осадочных марок и периодический на остальных зданиях и сооружениях обеспечит возможность выявления и исключения систематических ошибок геодезических наблюдений, вызванных воздействием внешних условий (изменения температуры и влажности воздуха, вибрации и т. д.), поможет установить причины получения противоречи-

вых данных, определит необходимость введения корректив, т. е. позволит получить соответствующие действительности достаточно точные данные и обеспечит максимально обоснованные выводы и предложения по проведению мероприятий по ликвидации условий, вызывающих деформации зданий и сооружений теплоэнергетических предприятий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Заяров Ю. В. Разработка системы управления безопасностью эксплуатации зданий и сооружений // Бюллетень союза геодезистов. 2010. № 4. С. 25—28.
2. Инженерная геодезия / под ред. Д. Ш. Михелева. М. : Академия, 2008. 478 с.
3. Федотов Г. А. Инженерная геодезия. М.: Высш. шк., 2009. 462 с.
4. Справочник геодезиста. Кн. 2. 2-е изд., перераб. и доп. / под ред. В. Д. Большакова и Г. П. Левчука. М. : Недра, 1985. 440 с.
5. Анопин В. Н. Эколого-градостроительная характеристика геоморфологии окрестностей г. Волгограда // Вестник ВолгГАСА. Сер.: Строительство и архитектура. Юбилейный выпуск, 2002. С. 100—105.
6. Инструкция по нивелированию I—IV классов / Гл. упр. Геодезии и картографии при Сов. Министров СССР М. : Недра, 1990. 166 с.
7. Руководство по наблюдению за деформациями оснований и фундаментов зданий и сооружений / НИИОСП им. Герсевича. М. : Стройиздат, 1975. 160 с.
8. Анопин В. Н. Организация производства геодезических работ для определения осадки сооружений Волжской ГЭС // Бюллетень союза геодезистов. 2010. № 4. С. 9—10.

© Сабитова Т. А., Анопин В. Н., 2015

Поступила в редакцию
в августе 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Сабитова Т. А., Анопин В. Н. Особенности планирования и выполнения геодезических работ по выявлению деформаций сооружений ТЭЦ в Нижнем Поволжье // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 15—24.

Об авторах:

Сабитова Татьяна Анатольевна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры геодезии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, ta.sabitova@gmail.com

Анопин Владимир Николаевич — д-р географ. наук, проф., зав. кафедрой геодезии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, AnopinVi.Nik.48@yandex.ru

T. A. Sabitova, V. N. Anopin

PECULIARITIES OF PLANNING AND PERFORMANCE OF GEODETIC WORKS ON DETERMINATION OF DEFORMATIONS OF BUILDINGS OF CHPPs IN THE LOWER VOLGA REGION (NIZHNEE POVOLZH'E)

The materials of the analysis of deformations of buildings and constructions of Volgograd CHPP-2 over a 26-year period are presented in the article. The authors propose a differentiated approach in the definition of the frequency of performance of geodetic works on buildings and structures of large objects of heat power industry in the Lower Volga region with different intensity course of deformation processes.

Key words: geodesic observations, frame, deformation stamp, buildings and constructions.

REFERENCES

1. Zayarov Yu. V. [Development of the system of management of operating safety of buildings and constructions]. *Byulleten' soyuza geodezistov* [Bulletin of the union of geodesists], 2010, no. 4, pp. 25—28.
2. Mikhelev D. Sh., ed. *Inzhenernaya geodeziya* [Engineering geodesy]. Moscow, Akademiya Publ., 2008. 478 p.
3. Fedotov G. A. *Inzhenernaya geodeziya* [Engineering geodesy]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2009. 462 p.
4. Bol'shakov V. D. and Levchuk G. P., ed. *Spravochnik geodezista. Kn. 2.* [Geodesist's reference book. Book 2]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 440 p.
5. Anopin V. N. [Ecological town planning characteristic of geomorphology of the suburbs of Volgograd]. *Vestnik Volgogradskoi gosudarstvennoi arhitekturno-stroitel'noi akademii. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura. Yubileinyi vypusk* [Bulletin of Volgograd State Academy of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture. Anniversary issue], 2002, pp. 100—105.
6. *Instruktsiya po nivelirovaniyu I—IV klassov* [Instruction on levelling of I—IV forms]. Moscow, Nedra Publ., 1990. 166 p.
7. *Rukovodstvo po nablyudeniyu za deformatsiyami osnovanii i fundamentov zdaniy i sooruzheniy* [Guidance on supervision over deformations of bases and foundations of buildings and constructions]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1975. 160 p.
8. Anopin V. N. [Organization of the production of geodetic works for determination of setting of constructions of the Volga hydroelectric power station]. *Byulleten' soyuza geodezistov* [Bulletin of the union of geodesists], 2010, no. 4, pp. 9—10.

For citation:

Sabitova T. A., Anopin V. N. [Peculiarities of planning and performance of geodetic works on determination of deformations of buildings of CHPPs in the Lower Volga Region (Nizhnee Povolzh'e)]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 15—24.

About authors:

Sabitova Tat'yana Anatol'evna — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Geodesy Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, ta.sabitova@gmail.com

Anopin Vladimir Nikolaevich — Doctor of Geographic Science, Professor, the Head of Geodesy Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, AnopinVI.Nik.48@yandex.ru

УДК 504.064.2

И. В. Тельминов, А. Л. Невзоров

Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова

ПРОГНОЗ ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ВЫНОСА ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ С ЗАБОЛОЧЕННОЙ ТЕРРИТОРИИ

Предложен способ прогноза продолжительности выноса загрязняющих веществ из болота, служившего в качестве места складирования промышленных отходов и выпуска сточных вод. Прогноз выполняется по данным лабораторных исследований, мониторинга и численного моделирования. Приведены конструкции установок для определения фильтрационных характеристик торфа и параметров выноса из него загрязняющих веществ.

Ключевые слова: торф, коэффициент фильтрации, вынос поллютантов, самоочищение болота

Заболоченные территории, считающиеся землями, непригодными для сельскохозяйственного использования и строительства, нередко служили местом размещения свалок промышленных и бытовых отходов и даже сброса сточных вод [1—11]. Поэтому проблемы, связанные с изучением загрязнения болот и продолжительности их восстановления, являются весьма актуальными.

Целью данного исследования являлось прогнозирование продолжительности выноса поллютантов с загрязненного болотного массива. Для ее достижения решались следующие задачи: определение фильтрационных характеристик торфа и параметров интенсивности выноса из него поллютантов, создание численной модели болота для определения направления и скорости движения грунтовых вод.

Объектом изучения послужило болото Конинник, расположенное в 2 км от г. Онеги Архангельской области (рис. 1). Общая площадь болота составляет около 4,5 км², оно имеет ровный рельеф и относится к верховому типу. Согласно данным изысканий глубина торфяной залежи в среднем составляет 6...8 м, уклоны минерального дна не превышают 6 % (рис. 2).

Верхний слой болота сложен преимущественно из слаборазложившегося топяного торфа (степень разложения $D_{pd} < 10\%$), содержащего неразложившиеся остатки осоки, пушицы и сфагновых мхов. Мощность слоя составляет 1...2 м. Под верхним слоем залегает лесотопяной или топяной торф средней степени разложения ($D_{pd} = 22...26\%$), мощность слоя 5...6 м. Под торфом залегает слой ила мощностью 0,3...4,7 м, который подстилается мягко- и тугопластичными суглинками ледникового происхождения. Уровень грунтовых вод находится на глубине 5...10 см от поверхности.

Растительность представлена лесными (сосново-сфагновый, сосново-кустарничковый) и безлесными фитоценозами.

Начиная с 50-х годов прошлого века на болоте Конинник началось размещение свалок твердых отходов предприятий лесопиления и деревообработки, золошлакового материала, сточных вод гидролизного завода и очистных сооружений города (см. рис. 1). Древесные отходы размещены на восточной сто-

роне болота. Площадь свалки составляет 4,2 га. Отходы лесопиления, представленные щепой и опилками, занимают около 9 га. Золошлаковые материалы в первые десятилетия работы гидролизного завода сбрасывались в виде пульпы на поверхность в юго-западной части торфяного массива, а начиная с 90-х годов складировались в организованный золоотвал. Площадь золоотвала составляет 4,8 га. Площадь отвала гидролизного лигнина, складированного в отвале, расположенном на восточной окраине болота, составляет 24,4 га. В 2002 г. размещение твердых отходов и сброс сточных вод гидролизного завода были остановлены, однако сброс городских стоков продолжается.



Рис. 1. Болото Конинник (топографическая основа Google Maps): I—I — линия разреза; а — расположение болота; б — карта размещения свалок: 1 — границы болота; 2 — свалка древесных отходов; 3 — выпуск очистных сооружений; 4 — очистные сооружения; 5 — свалка гидролизного лигнина; 6 — организованный золоотвал; 7 — зола, размещенная на торфе; 8 — свалка отходов лесопиления

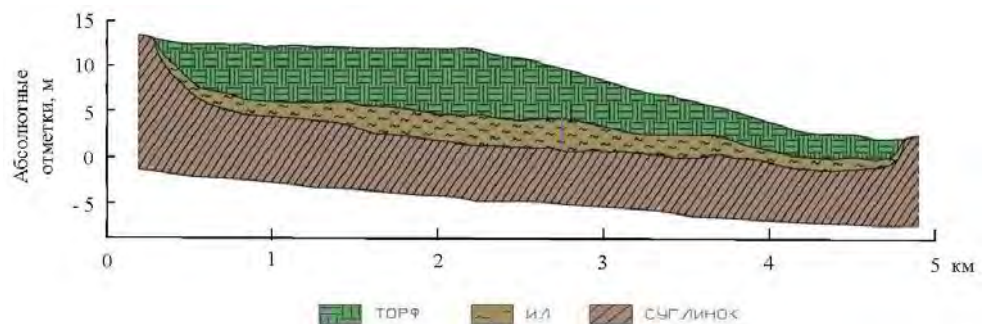


Рис. 2. Разрез I—I

Для выявления степени влияния размещенных отходов на окружающую среду в 2004 г. был начат мониторинг поверхностных и грунтовых вод. Для этого на территории болота была организована сеть наблюдательных постов

(рис. 3). На постах выполнялся систематический отбор проб воды для наблюдения за химическим составом. Первые пять лет отбор проб производился с периодичностью один раз в год, а затем один раз в два-три года. Отбор осуществлялся в середине октября, когда наблюдается минимальная за теплый период времени активность болотных микроорганизмов и бактерий.

Посты были заложены таким образом, чтобы учитывать направление движения грунтовых и сброса сточных вод.

Направление движения воды установлено на основании данных топографической съемки, а также анализа изменения состояния растительности и ее состава на территории болота, в том числе по космическим снимкам. Общий сток воды на болоте имеет северное направление (рис. 3). Сток с южной, незагрязненной части болота проходит между отвалами золошлаков и гидролизного лигнина, соединяется с водами, стекающими с западной части болота, меняет направление на северо-северо-восток и впадает в Лов-ручей. Общий сброс воды с болота происходит через Лов-ручей в Белое море.



Рис. 3. Схема размещения постов

Наблюдения за химическим составом грунтовых вод велось на двух постах: № 2 и № 4. Пост № 2 расположен в средней части болота западнее свалки древесных отходов на пути движения грунтовых вод от свалок к Лов-ручью. Пост № 4 был организован в нижней, южной части болота, не занятой свалками отходов и не подверженной влиянию загрязненных грунтовых вод из средней части болота.

Отбор грунтовых вод осуществлялся на каждом посту из трех пьезометров с глубины 1, 2 и 3 м. Отбор, доставка и хранение отобранных проб производились согласно ИСО 5667/3—85 и ПНД Ф 12.15.1—08. Химический анализ проб производился в аккредитованных лабораториях Северного (Арктического) федерального университета им. Ломоносова и Института экологических проблем Севера Уральского отделения РАН.

Проведенный в начале наблюдений расширенный анализ химического состава поверхностных и грунтовых вод показал, что болотные воды характеризуются повышенным содержанием аммония солевого, фосфатов, фенолов, нефтепродуктов, лигнинных веществ и химического потребления кислорода (ХПК), концентрация которых значительно превышает предельно допустимую (ПДК). Так как стоки с болота через Лов-ручей попадают в Белое море, ПДК принимались как для водных объектов, имеющих рыбохозяйственное значение. Концентрации остальных загрязняющих веществ, в частности метанола, формальдегида, нитритов, находились в интервале 0,2...1,2 ПДК. Исходя из этого, для проведения дальнейших наблюдений были приняты следующие пять приоритетных показателей: ионы аммония, фосфаты-ионы, летучие фенолы, нефтепродукты, лигнинные вещества. ХПК не включено в перечень контролируемых параметров, так как его высокие показатели связаны с наличием большого количества взвешенных веществ в воде торфяного массива.

Мониторинг грунтовых вод 2004—2014 гг. показал, что концентрация контролируемых веществ в южной, незагрязненной части болота (пост № 4) за период наблюдений изменяются в диапазоне значений, характерных для олиготрофных болот, не испытывающих негативного антропогенного воздействия [12, 13] (рис. 4).

На посту № 2 с 2004 г. отмечается постепенное снижение концентрации большинства поллютантов, что связано с окончанием складирования отходов и сброса сточных вод гидролизного завода. К 2012 г. концентрация поллютантов, кроме фосфатов и нефтепродуктов, снизилась до фоновых значений и в 2014 г. осталась на том же уровне. Изменение концентрации фосфатов за период наблюдений происходило в широком диапазоне. Причины таких колебаний и какую-либо закономерность изменения этого показателя выявить не удалось.

Для лабораторных испытаний образцы торфа с болота Конинник отбирались из шурфов с глубины 0,3...0,8 м и скважин с глубины 1...3 м. Для снижения скорости разложения торфа емкости с образцами до начала испытаний хранились при температуре 4...5 °С [14, 15].

Физические свойства торфа, определение которых велось по методикам ГОСТ 5180—84 и ГОСТ 11306—83, представлены в табл. 1.

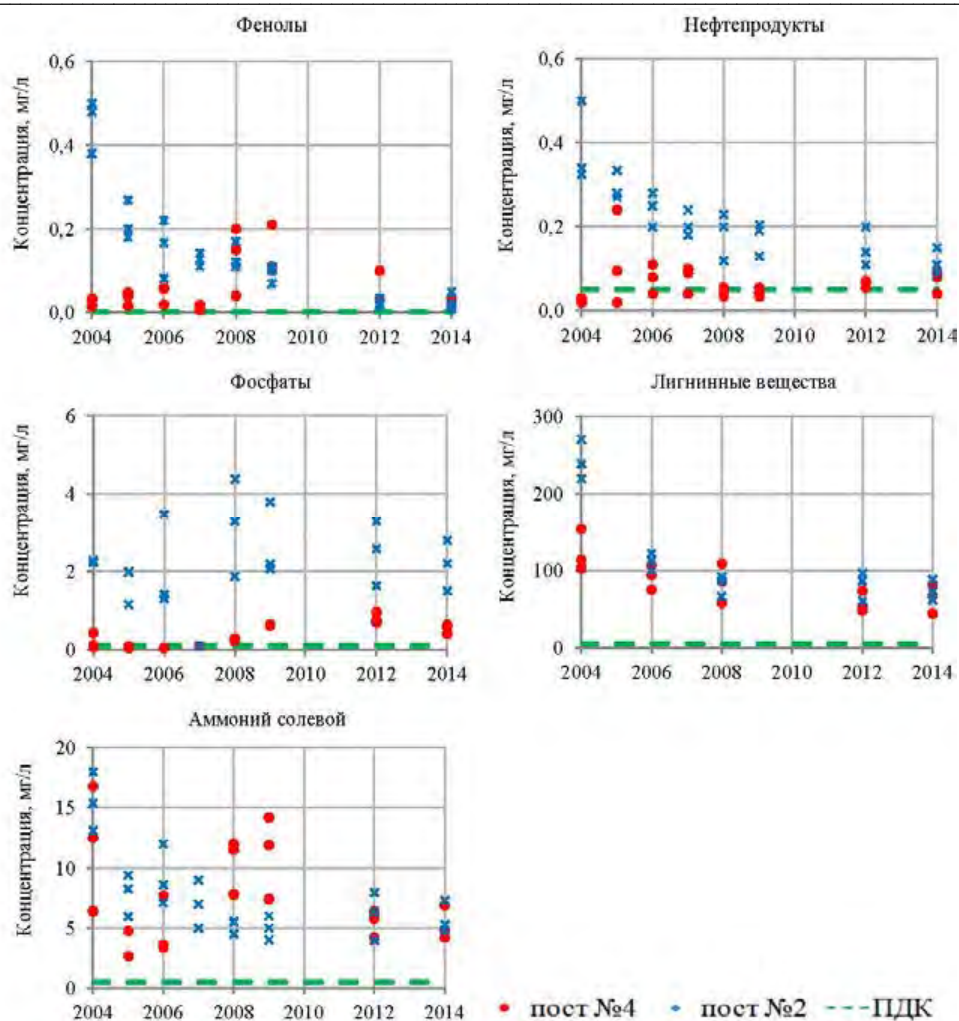


Рис. 4. Изменение концентраций загрязнителей на глубине 1...3 м на постах № 2 и № 4

Т а б л и ц а 1

Физические свойства торфа

Показатель	Интервал значений	Среднее значение
Плотность ρ , г/см ³	0,83...1,03	0,96
Абсолютная влажность W , %	888...1236	962
Плотность частиц ρ_s , г/см ³	1,46...1,52	1,50
Зольность A , %	1,4...3,0	2,1
Степень разложения D_{pd} , %	5...15	8
Плотность скелета ρ_{ds} , г/см ³	0,07...0,11	0,09
Коэффициент пористости e , доли ед.	14,4...19,4	15,7

Так как торф, сложенный из растительных остатков и волокон, определенным образом ориентированных в пространстве, является анизотропным грунтом [16, 17], исследование его водопроницаемости проводилось на специально сконструированной установке, позволяющей определять фильтрационную анизотропию образца [18]. Установка состоит из фильтрационного прибора, стенда управления, устройства для подачи воды и загрузочного приспособления (рис. 5).

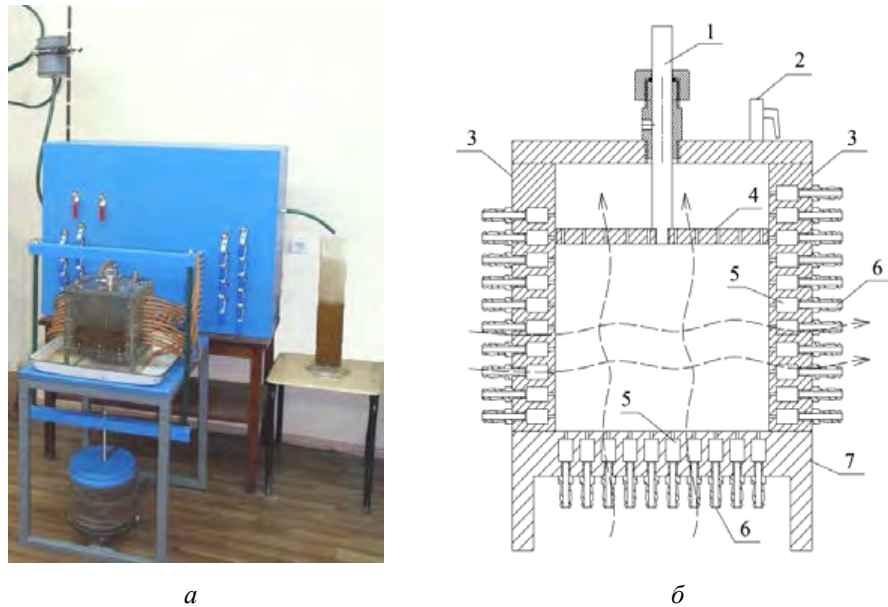


Рис. 5. Фильтрационно-компрессионная установка: а — общий вид установки; б — фильтрационный прибор: 1 — шток; 2 — кран для выпуска воздуха; 3 — перфорированная стенка; 4 — перфорированный поршень; 5 — канал для воды; 6 — штуцер; 7 — перфорированное днище

Образец размером $15 \times 15 \times 15$ см помещался в рабочую камеру прибора и уплотнялся заданным давлением. После достижения условной стабилизации производили последовательное определение коэффициента фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях, подводя и отводя воду от соответствующих каналов в днище и в стенки корпуса. Испытания проводили при постоянном градиенте напора.

Коэффициент фильтрации неуплотненного торфа в вертикальном направлении составил $K_B = 1,3 \dots 6,5$ м/сут (при среднем значении 4,6 м/сут), в горизонтальном направлении — $K_T = 12,5 \dots 27,6$ м/сут (при среднем значении 21,6 м/сут). Зависимости коэффициента фильтрации торфа в вертикальном и горизонтальном направлениях от давления описываются общим уравнением [19]:

$$K = k_0 e^{-0,07 p}, \quad (1)$$

где k_0 — коэффициент фильтрации неуплотненного торфа; e — основание натурального логарифма; p — давление под поршнем, кПа.

Степень фильтрационной анизотропии торфа в среднем составляет $\alpha = 4,7$. При уплотнении нагрузкой от 0 до 30 кПа α уменьшается от 4,7 до 4,1.

Анализ литературных данных позволил заключить, что снижение концентрации загрязняющих веществ в толще болота за исключением 50 см деятельного слоя, насыщенного корнями растений, происходит за счет разбавления и выноса грунтовыми водами [20, 21]. Влияние деструкции поллютантов бактериями и грибами также очень мало в связи с тем, что численность жизнеспособных микробных сообществ уменьшается с глубиной [22, 23] и скорость биоразложения значительно замедляется из-за низкой среднегодовой температуры основной толщи болота (порядка 2...5 °С) [24, 25].

Процесс снижения концентраций поллютантов во времени в болотном массиве за счет разбавления грунтовых вод был смоделирован авторами на специальной установке [26]. В рабочую камеру установки закладывался образец торфа длиной 50 см и диаметром 5 см, отобранный на болоте Конинник. Через образец фильтровалась дистиллированная вода, расход воды поддерживался в пределах 1...1,5 л/ч. В ходе опыта с интервалом 2...4 ч отбирали пробы фильтрата, прошедшего через образец, и проводили химический анализ на содержание тех же загрязнителей, которые определялись в пробах, отобранных из болотного массива. Общая продолжительность опыта составляла 20...28 ч.

По результатам опытов получили зависимости снижения удельной концентрации ($\Delta C/C_0$) от расхода фильтрата ω (рис. 6).

$$\Delta C/C_0 = a\omega^b, \quad (2)$$

где ΔC — снижение концентрации поллютанта в фильтрате, мг/л; C_0 — начальная концентрация поллютанта в фильтрате, мг/л; ω — расход фильтрата, л/г; a , b — параметры, зависящие от вида поллютанта (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Параметры уравнения (2)

Поллютант	Параметр уравнения	
	a	b
Лигнинные вещества	0,94	0,09
Фосфаты	0,97	0,14
Фенолы	0,67	0,30
Нефтепродукты	0,55	0,25
Аммоний	0,97	0,10

Анализ результатов промывки торфа показал, что для существенного снижения концентрации большинства загрязняющих веществ через него необходимо профильтровать объем воды не менее 1 л на 1 г сухого торфа.

Для определения скорости движения грунтовых вод нами была создана модель болота в программном комплексе «Plaxis 3D» (рис. 7). Исходные параметры модели — коэффициенты фильтрации в горизонтальном и вертикальном направлениях, коэффициент пористости, модуль деформации принимались по результатам лабораторных испытаний. Рельеф поверхности болота и

глубина торфа задавались по результатам геодезической съемки и инженерно-геологических изысканий. Приток атмосферных осадков устанавливался с помощью инфильтрационных колодцев (Infiltration well), равномерно распределенных по территории болота. Общий приток воды от колодцев задавался по среднегодовому объему атмосферных осадков с учетом испаряемости. По результатам моделирования были определены направление и скорость движения грунтовых вод в различных точках болотного массива (рис. 8).

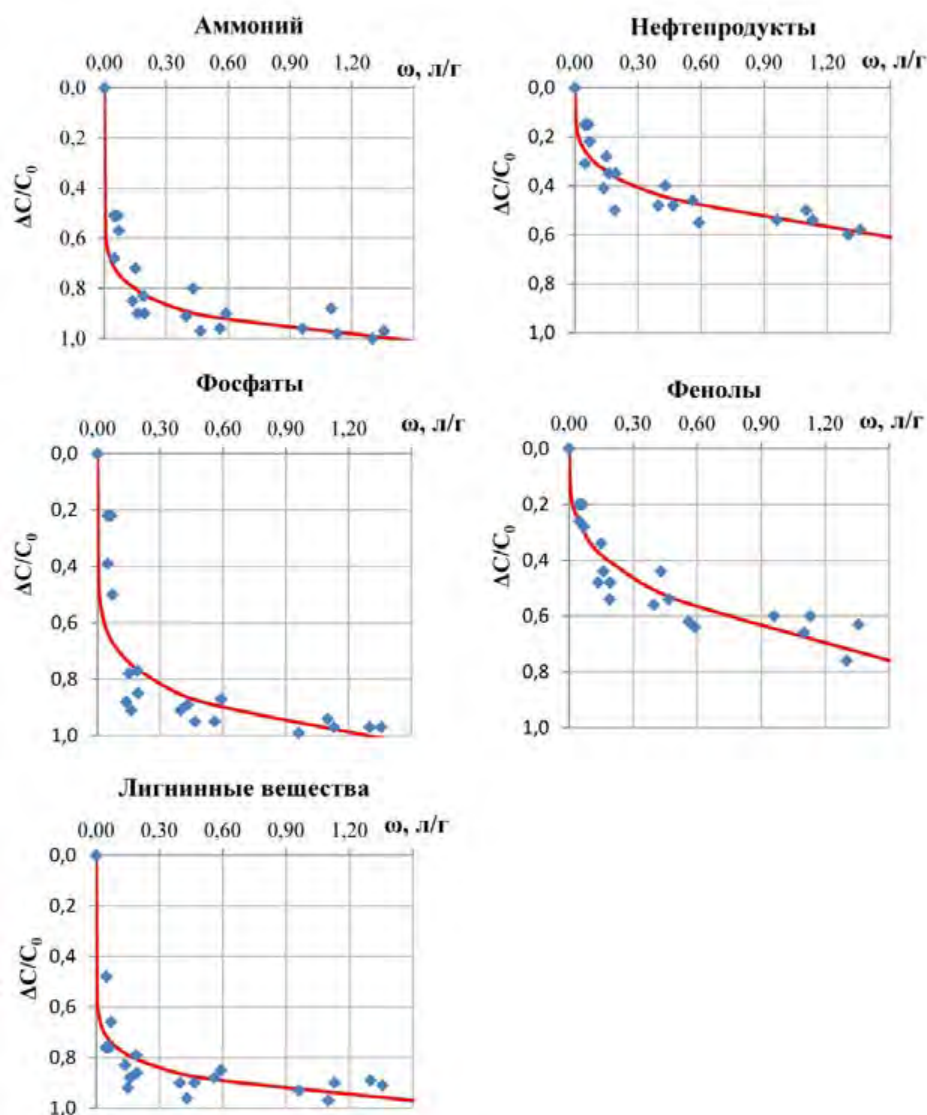


Рис. 6. Удельное снижение концентрации загрязняющих веществ в процессе промывки

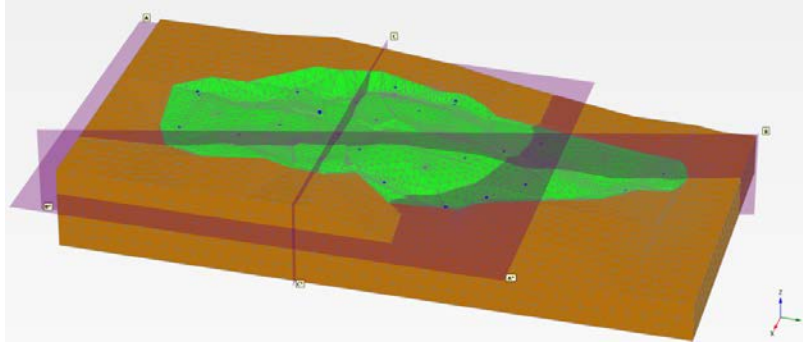


Рис. 7. Конечно-элементная модель болота в Plaxis 3D

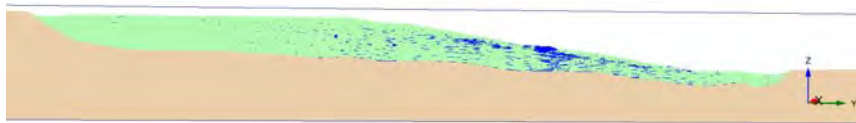


Рис. 8. Расчетный фильтрационный поток (стрелками показаны векторы скоростей)

Используя полученное уравнение (2), начальные концентрации загрязнителей в первый год наблюдения и скорость движения грунтовых вод, авторами были построены расчетные кривые снижения концентрации этих загрязнителей в торфяной залежи за период с 2004 по 2014 гг. Результаты представлены на рис. 9, где пунктиром даны расчетные зависимости, а точки, представляющие данные мониторинга, взяты из рис. 4.

Как видно из рис. 9, расчетные кривые, исключая данные по фосфатам, достаточно хорошо коррелируют с данными, полученными во время мониторинга. Хорошая сходимость лабораторных исследований и полевых наблюдений подтверждает предположение о преобладающем влиянии разбавления грунтовыми водами на снижение концентрации загрязнителей и позволяет использовать расчетные кривые для прогнозирования продолжительности выноса загрязнителей из болота.

Для этого экстраполируем расчетную кривую и определяем время, необходимое для снижения концентрации до заданной величины. На рис. 10 приведен прогноз снижения концентрации нефтепродуктов на посту № 2. Экстраполяция расчетной зависимости показала, что для достижения фоновых значений, характерных для южной части болота Конинник и соседнего болота Рейзен-мох, потребуется еще порядка 15 лет.

Выводы. 1. Лабораторные опыты и многолетний мониторинг показали, что снижение концентрации загрязнителей происходит, в основном, за счет разбавления и выноса грунтовыми водами и может быть выражено степенной зависимостью от расхода профильтровавшейся воды.

2. Прогноз продолжительности выноса загрязняющих веществ с болота может быть выполнен экстраполяцией расчетных кривых, построенных по результатам лабораторных испытаний и численного моделирования скорости движения грунтовых вод.

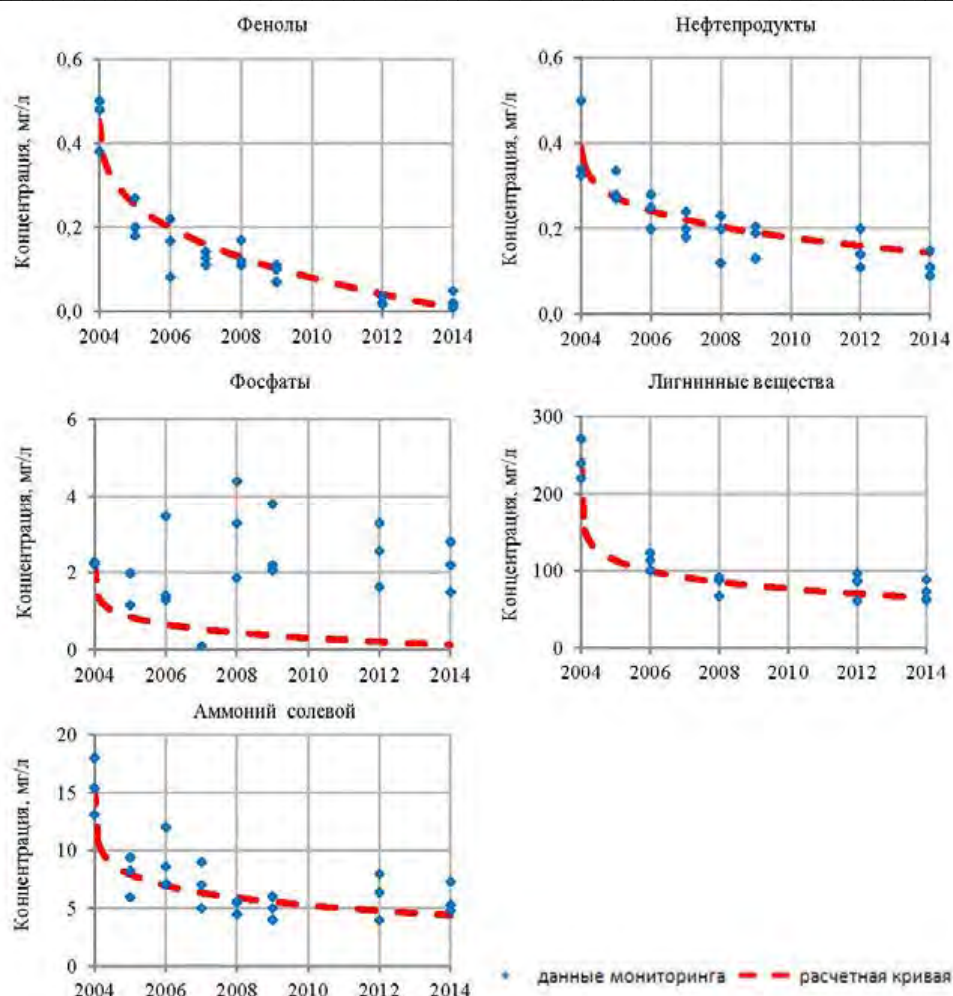


Рис. 9. Изменение концентраций загрязнителей на глубине 1...3 м на poste № 2



Рис. 10. Прогноз снижения концентрации нефтепродуктов (poste № 2)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахметьева Н. П., Лапина Е. Е. Использование торфяных болот в качестве приемников животноводческих стоков // Болота и биосфера: Мат. VI Всерос. науч. школы. Томск: ТГПУ, 2010. С. 129—133.
2. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С. М. Новикова. СПб.: ВВМ, 2009. 535 с.
3. Быкова Н. К., Кухарчик Т. И., Ермоленкова Т. В. Особенности функционирования и использования болот, сохранившихся в городах (на примере г. Минска) // Растительность болот: современные проблемы классификации, картографирования, использования и охраны: Материалы межд. научн.-практ. семинара. Минск: Право и экономика, 2009. С. 96—98.
4. Конечная Г. Ю., Мусатов В. Ю., Фетисов С. А. Обзор современного состояния водно-болотных угодий Псковской области на границе Российской Федерации с Беларусью. Псков.: Изд-во ПГПУ, 2009. 187 с.
5. Ларионов Н. С., Боголицын К. Г., Кузнецова И. А. Комплексная оценка влияния свалки твердых бытовых отходов г. Архангельска на компоненты природной среды // Российский химический журнал. 2011. Т. 55. № 1. С. 93—100.
6. Химический состав вод Обского болота (Западная Сибирь) и его пространственные изменения под влиянием сбросов загрязняющих веществ / О. Г. Савичев, Н. В. Гусева, Е. А. Куприянов, А. А. Скороходова, К. В. Ахмед-Оглы // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 323. № 1. С. 168—172.
7. Волкова И. И., Байков К. С., Сысо А. И. Болота Кузнецкого Алатау как естественные фильтры природных вод // Сибирский экологический журнал. 2010. № 3. С. 379—388.
8. Bavor J., Waters M. Pollutant transformation performance and model development in African wetland systems : large catchment extrapolation // Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands. 2008. Pp. 319—327.
9. Bruland G. L., Richardson C. J. An assessment of the phosphorus retention capacity of wetlands in the painter creek watershed, Minnesota, USA // Water, Air and Soil Pollution. 2006. Vol. 171. Pp. 169—184.
10. Leachate treatment in newly built peat Filters: A Pilot-Scale Study / P. Kangsepp, M. Koiv, M. Kriipsalu, U. Mander // Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands. 2008. Pp. 89—98.
11. Winde F., Erasmus E. Peatlands as Filters for Polluted Mine Water? — A Case Study from an Uranium-Contaminated Karst System in South Africa. Part I: Hydrogeological Setting and U Fluxes // Water. 2011. Vol. 3. № 1. Pp. 291—322.
12. Геоэкологическая оценка белых озер на территории Васюганского ландшафтного заказника (Тюменская область) / Н. М. Семенова, С. Н. Воробьев, Л. Г. Колесниченко, А. И. Рузакова // Вестник Тюменского государственного университета. 2012. № 365. С. 194—200.
13. Воистинова Е. С., Харанжевская Е. А. Региональная характеристика химического состава болотных вод в Томской области // Известия Самарского научного центра РАН, 2014. Т. 16. № 1(4). С. 942—946.
14. Крамаренко В. В., Емельянова Т. Я. Характеристика физических свойств верховых торфов Томской области // Вестник Томского государственного университета. 2009. № 322. С. 265—269.
15. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback / T. Ise, A. L. Dunn, S. C. Wofsy and P. R. Moorcroft // Nature Geoscience. 2008. Pp. 763—766.
16. Маслов Б. С. Гидрология торфяных болот. Томск: Изд-во ТГПУ, 2008. 424 с.
17. Ronkanen A.-K., Kløve B. Hydraulic soil properties of peatlands treating municipal wastewater and peat harvesting runoff // SUO (Mires and peat). 2005. 56(2). Pp. 43—56.
18. Прибор для определения коэффициента фильтрации: пат. 97532. Рос. Федерация. № 2010117094/28; заявл. 29.04.2010; опубл. 10.09.2010. Бюл. № 25.
19. Невзоров А. Л., Тельминов И. В. Фильтрационная анизотропия верхового торфа // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология. 2012. № 3. С. 276—281.
20. Денисенков В. П. Основы болотоведения: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во С- Петерб. ун-та, 2000. 224 с.
21. Cohen J. G., Kost M. A. Natural community abstract for bog. Michigan Natural Features Inventory, Lansing, MI, 2008. 21 p.
22. Функционирование микробных комплексов верховых торфяников — анализ причин медленной деструкции торфа. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 128 с.

23. Грум-Гржимайло О., Биланенко Е. Микроскопические грибы как компонент экосистемы верховых болот // Микология и фитопатология. 2010. Т. 44. № 6. С. 485—496.

24. Дюкарев Е. А., Головацкая Е. А. Особенности температурного режима торфяной залежи олиготрофного болота в южной тайге Западной Сибири // География и природные ресурсы. 2013. № 1. С. 65—71.

25. The limnological character of bog pools in relation to meteorological and hydrological features / G. González Garraza, G. Mataloni, R. Iturraspe, R. Lombardo, S. Camargo and M. V. Quiroga // Mires and Peat. 2012. 10. Art. 7. <http://www.mires-and-peat.net/pages/volumes/map10/map1007.php>

26. Фильтрационно-адсорбционный прибор: пат. 106748 Рос. Федерация. № 2011111845/28; заявл. 29.03.2011; опубл. 20.07.2011. Бюл. № 20. 113 с.

© Тельминов И. В., Невзоров А. Л., 2015

Поступила в редакцию
в мае 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Тельминов И. В., Невзоров А. Л. Прогноз продолжительности выноса загрязняющих веществ с заболоченной территории // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 25—38.

Об авторах:

Тельминов Илья Валентинович — ассистент кафедры инженерной геологии, оснований и фундаментов, Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова. Российская Федерация, 163002, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, 22, ilya.telm@gmail.com

Невзоров Александр Леонидович — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой инженерной геологии, оснований и фундаментов, Северный (Арктический) федеральный университет им. М. В. Ломоносова. Российская Федерация, 163002, г. Архангельск, Набережная Северной Двины, 22, a.l.nevzorov@yandex.ru

I. V. Tel'minov, A. L. Nevzorov

THE FORECAST OF DURATION OF THE CONTAMINANTS REMOVAL FROM THE WETLANDS

The way of the forecast of the contaminants removal from the bog used as the place of industrial wastes and sewage storage is suggested. The forecast is based on the results of the laboratory investigation, insitu monitoring and numerical simulation. The devices to determine the peat permeability and parameters of the contaminants removal from the peat are described.

Key words: peat, filtration coefficient, removal of pollutants, self-cleaning of the bog.

REFERENCES

1. Akhmet'ieva N. P., Lapina E. E. [The using of peat-bogs as catchers for manuren]. *Bolota i biosfera: Materialy VI Vserossiiskoi nauchnoi shkoly* [Bogs and biosphere. Materials of VI All-Russian Scientific School]. Tomsk, TSPU Publ., 2010. Pp. 129—133.

2. Novikov S. M., ed. *Gidrologiya zabolochennykh territorii zony mnogoletnei merzloty Zapadnoi Sibiri* [Hydrology of wetlands in the zone of eternal frost in Western Siberia]. Saint-Petersburg, VVM Publ., 2009. 535 p.

3. Bykova N. K., Kukharchik T. I., Ermolenkova T. V. [Features of functioning and use of bogs which remained in cities (by the example of Minsk)]. *Rastitel'nost' bolot: sovremennye problemy klassifikatsii, kartografirovaniya, ispol'zovaniya i okhrany: Materialy mezhdunarodnogo nauchno-prakticheskogo seminar* [Flora of bogs: modern problems of classification, mapping, use and protection. Materials of Int. scientific-practical seminar]. Minsk, Law and Economy Publ., 2009. Pp. 96—98.

4. Konechnaya G. Yu., Musatov V. Yu., Fetisov S. A. *Obzor sovremennogo sostoyaniya vodno-bolotnykh ugodii Pskovskoi oblasti na granitse Rossiiskoi Federatsii s Belarus'yu* [The review of the current state of wetlands in Pskov Oblast on the border of the Russian Federation and Belarus]. Pskov, PGPU Publishing house, 2009. 187 p.

5. Larionov N. S., Bogolitsyn K. G., Kuznetsova I. A. [Complex assessment of influence of the landfill of solid household wastes in Arkhangelsk on the components of the environment]. *Rossiiskii khimicheskii zhurnal* [Russian Chemical Journal], 2011, 55(1), pp. 93—100.
6. Savichev O. G., Guseva N. V., Kupriyanov E. A., Skorokhodova A. A., Akhmed Ogly K. V. [Chemical composition of waters of the Ob bog (Western Siberia) and its spatial changes under the influence of pollutants discharge]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University], 2013, 323(1), pp. 168—172.
7. Volkova I. I., Baikov K. S., Syso A. I. [Mires of the Kuznetsk Alatau as Natural Filters of Natural Water]. *Sibirskii ekologicheskii zhurnal* [Contemporary Problems of Ecology], 2010, no. 3, pp. 379—388.
8. Bavor J., Waters M. Pollutant transformation performance and model development in African wetland systems : large catchment extrapolation. *Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands*, 2008, pp. 319—327.
9. Bruland G. L., Richardson C. J. An assessment of the phosphorus retention capacity of wetlands in the painter creek watershed, Minnesota, USA. *Water, Air and Soil Pollution*, 2006, vol. 171, pp. 169—184.
10. Kangsepp P., Koiv M., Kriipsalu M., Mander U. Leachate treatment in newiy built peat Filters: A Pilot-Scale Study. *Wastewater Treatment, Plant Dynamics and Management in Constructed and Natural Wetlands*, 2008. Pp. 89—98.
11. Winde F., Erasmus E. Peatlands as Filters for Polluted Mine Water? — A Case Study from an Uranium-Contaminated Karst System in South Africa. Part I: Hydrogeological Setting and U Fluxes. *Water*, 2011, 3(1), pp. 291—322.
12. Semenova N. M., Vorob'ev S. N., Kolesnichenko L. G., Ruzakova A. I. [Geoecological assessment of white lakes on the territory of Vasyugansky landscape reserve (Tyumen Oblast)]. *Vestnik Tyumenskogo gosudarstvennogo universiteta* [Vestnik of Tyumen State University], 2012, no. 365, pp. 194—200.
13. Voistinova E. S., Kharanzhevskaya E. A. [Regional characteristic of the chemical composition of bog waters in Tomsk oblast] *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], Vol. 16, no. 1(4), pp. 942—946.
14. Kramarenko V. V., Emel'yanova T. Ya. [Characteristic of physical properties of upper peat in Tomsk Oblast]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta* [Bulletin of Tomsk State University], 2009, no. 322, pp. 265—269.
15. Ise T., Dunn A. L., Wofsy S. C. and Moorcroft P. R. High sensitivity of peat decomposition to climate change through water-table feedback. *Nature Geoscience*, 2008, pp. 763—766.
16. Maslov B. S. *Gidrologiya torfyanykh bolot* [Hydrology of peat bogs]. Tomsk, TGPU Publishing house, 2008. 424 p.
17. Ronkanen A.-K., Kløve B. Hydraulic soil properties of peatlands treating municipal wastewater and peat harvesting runoff. *SUO (Mires and peat)*, 2005, 56(2), pp. 43—56.
18. *Pribor dlya opredeleniya koefitsienta fil'tratsii* [Device for the determination of filtration coefficient]. Patent RF, no. 2010117094/28, 2010.
19. Nevzorov A. L., Tel'minov I. V. [Filtration anisotropy of high-moor peat]. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya* [Geoecology. Engineering geology. Hydrogeology. Geocryology], 2012, no. 3, pp. 276—281.
20. Denisenkov V. P. *Osnovy bolotovedeniya: Uchebnoe posobie* [Principals of bog science: Manual]. Saint Petersburg, Publishing House of Saint Petersburg University, 2000. 224 p.
21. Cohen J. G., Kost M. A. *Natural community abstract for bog*. Michigan Natural Features Inventory, Lansing, MI, 2008. 21 p.
22. *Funktsionirovanie mikrobykh kompleksov verkhovykh torfyanikov — analiz prichin medlennoi destruktzii torfa* [Functioning of microbial complexes of upper peat bogs — the analysis of the reasons of slow peat destruction]. Moscow, Publishing House of the Association of KMK Scientific publications, 2013. 128 p.
23. Grum-Grzhymailo O. A., Bilanenko E. N. [Microfungi as a component of bogs ecosystems]. *Mikologiya i fitopatologiya* [Mycology and Phytopathology], 2010, 44(6), pp. 485—496.
24. Dyukarev E. A. and Golovatskaya E. A. [Temperature regime characteristics of the peat accumulation of the oligotrophic bog in the southern taiga of Western Siberia]. *Geografiya i prirodnye resursy* [Geography and natural resources], 2013, no. 1, pp. 65—71.

25. González Garraza G., Mataloni G., Iturraspe R., Lombardo R., Camargo S. and Quiroga M. V. The limnological character of bog pools in relation to meteorological and hydrological features. *Mires and Peat*, 2012, 10, art. 7. <http://www.mires-and-peat.net/pages/volumes/map10/map1007.php>

26. *Fil'tratsionno-adsorbtsionnyi pribor* [Filtration and adsorption device]. Patent RF, no. 2011111845/28, 2011.

For citation:

Tel'minov I. V., Nevzorov A. L. [The forecast of duration of the contaminants removal from the wetlands]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 25—38.

About authors:

Tel'minov Il'ya Valentinovich — Assistant of Engineering Geology, Bases and Foundations Department, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov. 22, Naberezhnaya Severnoi Dviny, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation. ilya_telm@gmail.com

Nevzorov Aleksandr Leonidovich — Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Engineering Geology, Bases and Foundations Department, Northern (Arctic) Federal University named after M. V. Lomonosov. 22, Naberezhnaya Severnoi Dviny, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation. a.l.nevzorov@yandex.ru

УДК 539.31:539.62

А. Н. Ушаков

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

**О РАСПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ В УПРУГОЙ ПОЛУПЛОСКОСТИ
И ПО ЕЕ КОНТАКТУ С ЦЕНТРАЛЬНО НАГРУЖЕННЫМ АБСОЛЮТНО ЖЕСТКИМ
ШТАМПОМ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО ОЧЕРТАНИЯ ПРИ КОНЕЧНОМ ЗНАЧЕНИИ
КОЭФФИЦИЕНТА ТРЕНИЯ ПО КОНТАКТУ «ШТАМП — ГРУНТ»**

Приведено решение задачи о распределении напряжений в упругом основании абсолютно жесткого штампа параболического очертания, находящегося под действием нормальной нагрузки заданной интенсивности при наличии конечного трения по его подошве. Представлены в замкнутой форме формулы для вычисления напряжений в точках полуплоскости. Для точек, лежащих на границе полуплоскости, эти формулы преобразуются в классические формулы Н. И. Мусхелишвили, дающие решение задачи о штампе с параболическим основанием. Показано, что распределение напряжений в основании штампа зависит от величины коэффициента бокового давления и коэффициента трения.

Ключевые слова: смешанная задача теории упругости, коэффициент трения, изолинии напряжений.

Рассмотрим штамп параболического очертания, симметрично расположенный относительно начала координат, т. е.

$$g(t) = ht^2, \quad (1)$$

где $-a \leq t \leq a$; h — заданное положительное действительное число (рис. 1). Предположим, что внешние силы, действующие на штамп, имеют равнодействующую, направленную вертикально вниз, т. е.

$$X = 0, Y = -P, \quad (2)$$

где P — заданная положительная постоянная величина.

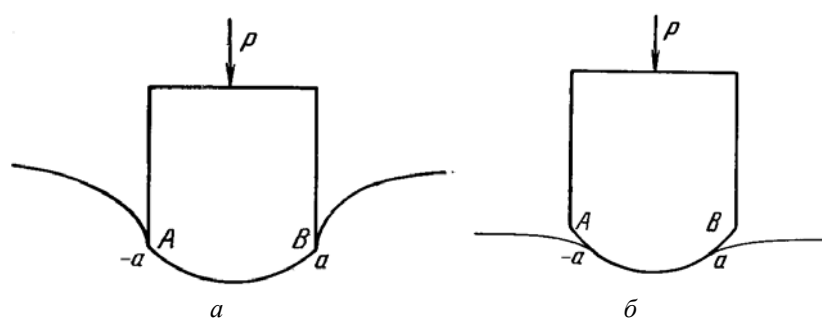


Рис. 1. Расчетная схема задачи

Определим напряженное состояние в нижней полуплоскости.

Для решения поставленной задачи воспользуемся методом сопряжения, предложенным Н. И. Мусхелишвили [1].

Рассмотрим решение задачи при различных значениях коэффициента трения k .

Функция напряжения $\Phi(z)$ для рассматриваемой задачи на основании формулы (12) §117 [1] с учетом (1) имеет вид

$$\Phi(z) = \frac{4\mu h(1+ik)e^{\pi i\alpha} \cos \pi\alpha}{\pi(\aleph+1)(a-z)^{\frac{1}{2}+\alpha}(a+z)^{\frac{1}{2}-\alpha}} \int_{-a}^a \frac{t(a+t)^{\frac{1}{2}+\alpha}(a-t)^{\frac{1}{2}-\alpha}}{t-z} dt + \frac{P(1+ik)e^{\pi i\alpha}}{2\pi(a+z)^{\frac{1}{2}+\alpha}(a-z)^{\frac{1}{2}-\alpha}}, \quad (3)$$

где μ — постоянная Ламе; $\aleph$ — упругая постоянная, связанная соотношением $\aleph = 3 - 4\nu$ с коэффициентом Пуассона ν , определяющим величину бокового давления грунта $\xi_0 = \frac{\nu}{1-\nu}$; k — коэффициент трения; α — некоторая постоянная, связанная с k условием

$$\operatorname{tg} \pi\alpha = k \frac{\aleph-1}{\aleph+1}, \quad 0 \leq \alpha \leq \frac{1}{2}. \quad (4)$$

Значения $\alpha = 0$ и $\alpha = 1/2$ соответствуют случаю отсутствия трения и бесконечно большого его значения.

Вычислим интеграл в правой части (3). Замечая, что при больших $|z|$

$$z(a+z)^{\frac{1}{2}+\alpha}(a-z)^{\frac{1}{2}-\alpha} = -ie^{\pi i\alpha} \left(z^2 + 2a\alpha z + \left(\frac{1}{2}z + 2\alpha^2 \right) a^2 \right) + O\left(\frac{1}{z} \right),$$

и, используя формулу (40) §110 [1], получаем

$$\int_{-a}^a \frac{t(a+t)^{\frac{1}{2}+\alpha}(a-t)^{\frac{1}{2}-\alpha}}{t-z} dt = \frac{\pi i}{e^{\pi i\alpha} \cos \pi\alpha} \left(z(a+z)^{\frac{1}{2}+\alpha}(a-z)^{\frac{1}{2}-\alpha} + ie^{\pi i\alpha} \times \right. \\ \left. \times \left(z^2 + 2a\alpha z + \left(\frac{1}{2} - 2\alpha^2 \right) a^2 \right) \right).$$

Подставляя полученное значение интеграла в правую часть формулы (3), имеем

$$\Phi(z) = \frac{4\mu h(1+ik)}{(\aleph+1)} \left(iz - \frac{e^{\pi i\alpha} (z^2 + 2a\alpha z + (-1/2 + 2\alpha^2) a^2)}{(a+z)^{\frac{1}{2}+\alpha}(a-z)^{\frac{1}{2}-\alpha}} \right) + \\ + \frac{P(1+ik)e^{\pi i\alpha}}{2\pi(a+z)^{\frac{1}{2}+\alpha}(a-z)^{\frac{1}{2}-\alpha}}.$$

Для вычисления компонент напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ воспользуемся соотношениями [1, с. 406]

$$\sigma_x + \sigma_y = 2 \left\{ \Phi(z) + \overline{\Phi(z)} \right\} = 4 \operatorname{Re} \Phi(z); \quad (5)$$

$$\sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} = 2\{(\bar{z} - z)\Phi'(z) - \Phi(z) - \overline{\Phi(z)}\}. \quad (6)$$

Представим функцию напряжения в виде суммы

$$\Phi(z) = \Phi_1(z) + \Phi_2(z),$$

где

$$\Phi_1(z) = \frac{4\mu h(1+ik)}{(1+\aleph)} \left(iz - \frac{e^{\pi i \alpha} (z^2 + 2a\alpha z + (-1/2 + 2\alpha^2)a^2)}{(a+z)^{\frac{1}{2}+\alpha} (a-z)^{\frac{1}{2}-\alpha}} \right), \quad (7)$$

$$\Phi_2(z) = \frac{P(1+ik)e^{\pi i \alpha}}{2\pi(a+z)^{\frac{1}{2}+\alpha} (a-z)^{\frac{1}{2}-\alpha}}, \quad (8)$$

а знаменатель дроби (7) в виде

$$(a+z)^{-\frac{1}{2}-\alpha} (a-z)^{-\frac{1}{2}+\alpha} = e^{-\left(\frac{1}{2}+\alpha\right)\ln(a+z)} e^{\left(-\frac{1}{2}+\alpha\right)\ln(a-z)}.$$

Поскольку логарифм является многозначной функцией, то для его определения, следуя [1, с. 352], положим $z - t = \rho e^{-i\theta}$, где $\rho = |z - t|$, а θ — угол между вектором, имеющим начало в t , а конец — в z , с осью абсцисс, причем полагаем этот угол заключенным между 0 и π и отсчитываем его от положительного направления Ox по часовой стрелке.

Прямые вычисления для функции напряжения (7) дают

$$\Phi_1(z) = -\frac{4\mu h}{1+\aleph} \left((kx + y) + i(ky - x) - \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (f_1 + if_2) \right);$$

$$\overline{\Phi_1}(z) = -\frac{4\mu h}{1+\aleph} \left((kx - y) + i(ky + x) - \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (f_3 + if_4) \right);$$

$$\Phi_1'(z) = -\frac{4\mu h}{1+\aleph} \left(-k + i - \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (f_5 + if_6) \right),$$

где

$$f_1 = m_1 + km_2; \quad f_2 = -m_2 + km_1; \quad f_3 = -m_1 + km_2; \quad f_4 = m_2 + km_1;$$

$$f_5 = l_1 m_1 - l_2 m_2 - k(l_1 m_2 + l_2 m_1) - \frac{2}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \times \\ \times [y \cos r + (x + a\alpha) \sin r + k((x + a\alpha) \cos r - y \sin r)];$$

$$f_6 = l_1 m_2 + l_2 m_1 + k(l_1 m_1 - l_2 m_2) + \frac{2}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} [(x + a\alpha) \cos r - y \sin r - \\ - k(y \cos r + (x + a\alpha) \sin r)];$$

$$m_1 = (x^2 - y^2 + 2\alpha x + (-1/2 + 2\alpha^2)a^2) \sin r + 2y(x + \alpha a) \cos r; \quad (9)$$

$$m_2 = (x^2 - y^2 + 2\alpha x + (-1/2 + 2\alpha^2)a^2) \cos r - 2y(x + \alpha a) \sin r;$$

$$l_1 = -(h_1 \sin s + h_2 \sin t); \quad l_2 = h_1 \cos s + h_2 \cos t;$$

$$h_1 = -\left(\frac{1}{2} + \alpha\right) \frac{1}{\rho_2 \sqrt{\rho_1 \rho_2}}; \quad h_2 = \left(-\frac{1}{2} + \alpha\right) \frac{1}{\rho_1 \sqrt{\rho_1 \rho_2}};$$

$$r = \frac{\theta_1 + \theta_2}{2} + \alpha(\theta_2 - \theta_1); \quad s = \frac{\theta_1 + 3\theta_2}{2} + \alpha(\theta_2 - \theta_1);$$

$$t = \frac{3\theta_1 + \theta_2}{2} + \alpha(\theta_2 - \theta_1);$$

$$\rho_1 = \sqrt{(a-x)^2 + y^2}; \quad \rho_2 = \sqrt{(a+x)^2 + y^2};$$

$$\theta_1 = \pi - \arctg \frac{|y|}{a-x}; \quad \theta_2 = \arctg \frac{|y|}{a+x}. \quad (10)$$

Тогда соотношения (5) и (6) примут вид

$$\sigma_x + \sigma_y = -\frac{16\mu h}{\aleph + 1} \left(y + kx - \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha f_1 \right);$$

$$\sigma_y - \sigma_x + 2i\tau_{xy} = \frac{16\mu h}{\aleph + 1} \left(y \left[1 + 2ki - \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (f_6 - if_5) \right] + kx - \frac{k}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (m_2 + im_1) \right),$$

откуда

$$\sigma_x = -\frac{16\mu h}{\aleph + 1} (kx + y) + \frac{8\mu h}{\aleph + 1} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left(\frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} (m_1 + 2km_2) + yf_6 \right); \quad (11)$$

$$\sigma_y = \frac{8\mu h}{\aleph + 1} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left(\frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} m_1 - yf_6 \right); \quad (12)$$

$$\tau_{xy} = \frac{16\mu hky}{\aleph + 1} + \frac{8\mu h}{\aleph + 1} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \left(yf_5 - \frac{km_1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \right). \quad (13)$$

Перейдем к рассмотрению функции напряжения (8). Решение задачи для этого случая приведено в [2] и имеет вид

$$\sigma_x = -\frac{Py}{\pi} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (l_2 + kl_1) - \frac{P}{\pi} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} (\sin r + 2k \cos r); \quad (14)$$

$$\sigma_y = \frac{Py}{\pi} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (l_2 + kl_1) - \frac{P}{\pi} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \sin r; \quad (15)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{Py}{\pi} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha (l_1 - kl_2) + \frac{P}{\pi} \left(\frac{\rho_1}{\rho_2} \right)^\alpha \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} k \sin r. \quad (16)$$

Заметим, что формулы (11)—(13) описывают напряженное состояние упругой полуплоскости, связанное лишь с формой штампа, а компоненты напряжения (14)—(16) дают решение задачи для прямолинейного горизонтального штампа, подверженного вертикальной силе, имеющей равнодействующую вида (2).

Решение поставленной задачи получаем сложением соответствующих выражений для компонент напряжения.

Известно [3], что при вертикальной нагрузке на штамп с прямолинейным горизонтальным основанием выделяют три фазы напряженного состояния грунтов под штампом, последней из которых является фаза выпирания, либо сопровождающаяся разрушением сооружения, либо делающая невозможной его дальнейшую эксплуатацию.

При определении несущей способности оснований фундаментов, нагруженных центрально приложенной вертикальной нагрузкой, в качестве классических рассматриваются решения и расчетные схемы, предложенные Л. Прандтлем [4] и Р. Хиллом [5].

Обе расчетные схемы, ввиду симметричности нагрузки и невесомости, однородности и изотропности основания, обеспечивают симметрию напряженного состояния относительно вертикальной оси и, как следствие, возникновение двустороннего симметричного выпора грунта.

Ниже приведены изолинии безразмерных напряжений σ_x/μ , σ_y/μ и τ_{xy}/μ , построенные на основании формул (11)—(16) при $a=3$, $\alpha=0,011$ (глинистый грунт) (рис. 2), $\alpha=0,023$ (песчаный грунт) (рис. 3) и конкретном значении величины прогиба h в случае «приведенной» вертикальной нагрузки $P/\mu = P^* = 1$. Коэффициент k трения бетона по грунту, согласно [6], принят равным 0,25.

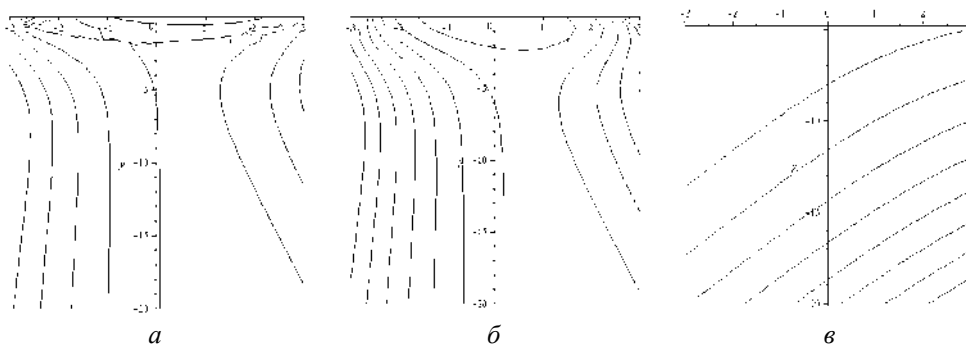


Рис. 2. Изолинии напряжения при $h = 0,5$, $P^* = 1$, $\alpha = 0,011$: а — горизонтального; б — вертикального; в — касательного

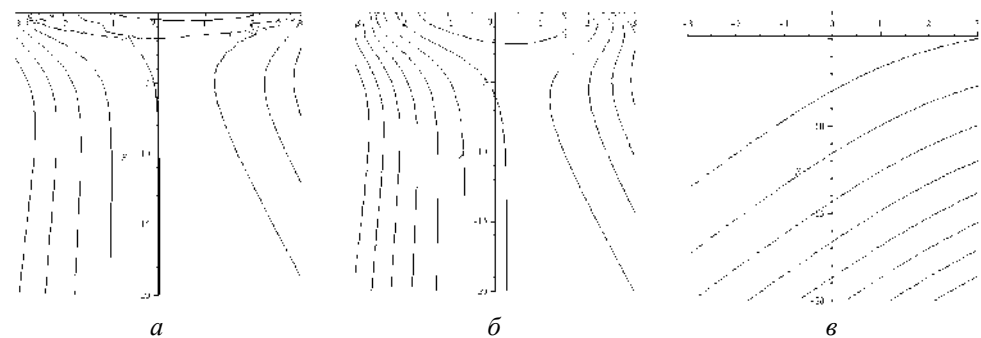


Рис. 3. Изолинии напряжения при $h = 0,5$, $P^* = 1$, $\alpha = 0,023$: a — горизонтального; b — вертикального; v — касательного

Как видно из рис. 2 и 3, картины изолиний всех трех компонент напряжения не являются симметричными относительно вертикальной оси. На основании этого можно сделать вывод о возможности одностороннего выпора грунта из-под штампа, находящегося под действием вертикальной нагрузки заданной постоянной интенсивности. Однако в работе [7] было показано, что в случае штампа с прямолинейным горизонтальным основанием при конечном коэффициенте трения изолинии всех трех компонент напряжения симметричны относительно вертикальной оси, поскольку компоненты напряжения (14)—(16) являются симметричными относительно α и x , т. е.

$$\begin{aligned}\sigma_x(-\alpha, -x, y) &= \sigma_x(\alpha, x, y); \\ \sigma_y(-\alpha, -x, y) &= \sigma_y(\alpha, x, y); \\ \tau_{xy}(-\alpha, -x, y) &= -\tau_{xy}(\alpha, x, y).\end{aligned}\tag{17}$$

Заметим, что компоненты напряжения (11)—(13) обладают такой же симметрией.

Пусть $f(-\alpha, -x, y) = \bar{f}$. Рассмотрим соотношения (9). Нетрудно видеть, что

$$\bar{\rho} = \left(\frac{\rho_1(-x, y)}{\rho_2(-x, y)} \right)^{-\alpha} = \left(\frac{\rho_1(x, y)}{\rho_2(x, y)} \right)^{\alpha} = \rho;$$

$$\rho_1(-x, y)\rho_2(-x, y) = \rho_1(x, y)\rho_2(x, y);$$

$$\begin{aligned}\sin \bar{r} &= \sin r; & \cos \bar{r} &= -\cos r; & \sin \bar{s} &= -\sin t; & \sin \bar{t} &= -\sin s; & \cos \bar{s} &= \cos t; \\ \cos \bar{t} &= \cos s.\end{aligned}$$

Тогда

$$\bar{l}_1 = -l_1; \quad \bar{l}_2 = l_2; \quad \bar{m}_1 = m_1; \quad \bar{m}_2 = -m_2,$$

откуда

$$\bar{f}_5 = -f_5; \quad \bar{f}_6 = f_6.$$

Применяя полученные соотношения для компоненты вертикального напряжения (12), имеем

$$\begin{aligned}\overline{\sigma_y} = \sigma_y(-\alpha, -x, y) &= \frac{8\mu h}{N+1} \left(\frac{\rho_1(-x, y)}{\rho_2(-x, y)} \right)^{-\alpha} \left(\frac{1}{\sqrt{\rho_1(-x, y)\rho_2(-x, y)}} \overline{m_1} - y \overline{f_6} \right) = \\ &= \frac{8\mu h}{N+1} \left(\frac{\rho_1(x, y)}{\rho_2(x, y)} \right)^{\alpha} \left(\frac{1}{\sqrt{\rho_1(x, y)\rho_2(x, y)}} m_1 - y f_6 \right) = \sigma_y(\alpha, x, y) = \sigma_y.\end{aligned}$$

Аналогично проверяются компоненты напряжения (11) и (13).

Таким образом, компоненты напряжения (11)–(16) удовлетворяют соотношениям (17) при любом конечном значении коэффициента трения, и значит, картины изолиний всех трех компонент напряжения будут симметричными относительно вертикальной оси. Следовательно, решение задачи о штампе с параболическим очертанием, как и решение задачи о штампе с прямолинейным горизонтальным основанием, согласуется с расчетными схемами Л. Прандтля и Р. Хилла, что предопределяет двусторонний выпор грунта из-под центрально нагруженного основания.

С учетом рассмотренного замечания на рис. 4 и 5 приведены картины изолиний горизонтального, вертикального и касательного напряжения для двух типов грунтов при тех же значениях параметров.

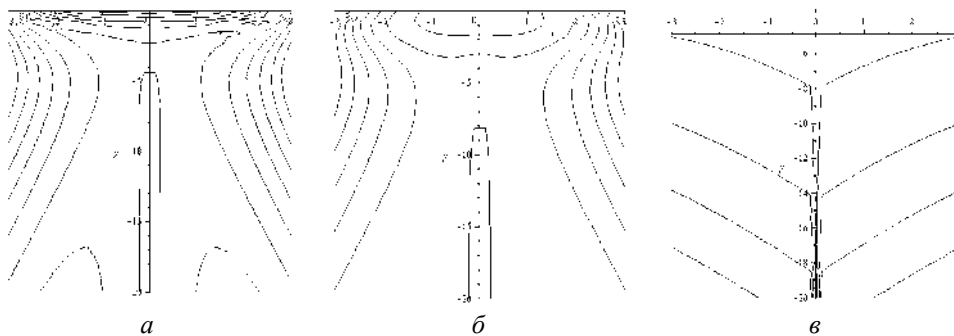


Рис. 4. Изолинии напряжения при $h = 0,5$, $P^* = 1$, $\alpha = 0,011$: a — горизонтального; b — вертикального; v — касательного

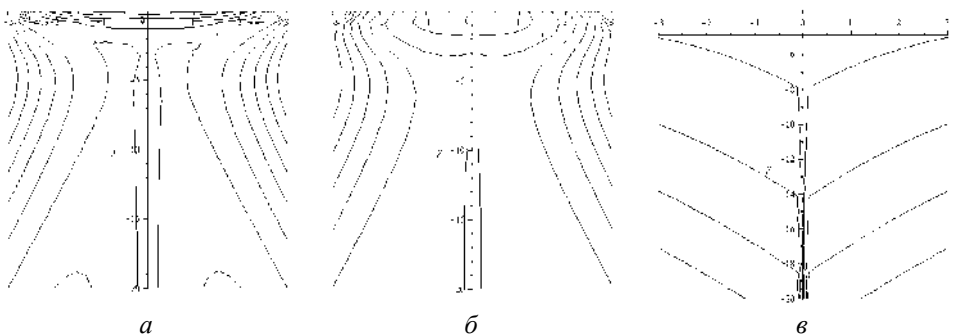


Рис. 5. Изолинии напряжения при $h = 0,5$, $P^* = 1$, $\alpha = 0,023$: a — горизонтального; b — вертикального; v — касательного

При отсутствии трения решение рассматриваемой задачи принимает вид

$$\sigma_x = \frac{8\mu h}{\aleph + 1} \left(\frac{m_1^*}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} - y f_6^* \right) + \frac{P}{\pi} \left(y l_2^* - \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right); \quad (18)$$

$$\sigma_y = -\frac{16\mu h y}{\aleph + 1} + \frac{8\mu h}{\aleph + 1} \left(\frac{m_1^*}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} + y f_6^* \right) - \frac{P}{\pi} \left(y l_2^* + \frac{1}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right); \quad (19)$$

$$\tau_{xy} = \frac{8\mu h y}{\aleph + 1} f_5^* - \frac{P y}{\pi} l_1^*, \quad (20)$$

где

$$f_5^* = l_1^* m_1^* - l_2^* m_2^* - \frac{2}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(y \cos \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) + x \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right);$$

$$f_6^* = l_1^* m_2^* + l_2^* m_1^* + \frac{2}{\sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(x \cos \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) - y \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right);$$

$$m_1^* = (x^2 - y^2 - 1/2 a^2) \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) + 2xy \cos \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right);$$

$$m_2^* = (x^2 - y^2 - 1/2 a^2) \cos \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) - 2xy \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right);$$

$$l_1^* = \frac{1}{2\rho_1 \rho_2 \sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(\rho_1 \sin \left(\frac{\theta_1 + 3\theta_2}{2} \right) + \rho_2 \sin \left(\frac{3\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right);$$

$$l_2^* = -\frac{1}{2\rho_1 \rho_2 \sqrt{\rho_1 \rho_2}} \left(\rho_1 \cos \left(\frac{\theta_1 + 3\theta_2}{2} \right) + \rho_2 \cos \left(\frac{3\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \right).$$

На рис. 6 приведены изолинии безразмерных горизонтальных, вертикальных и касательных напряжений, построенные на основании формул (17)—(19) при $a = 3$ для глинистого грунта при конкретных значениях прогиба h и «приведенной» вертикальной нагрузке P^* .

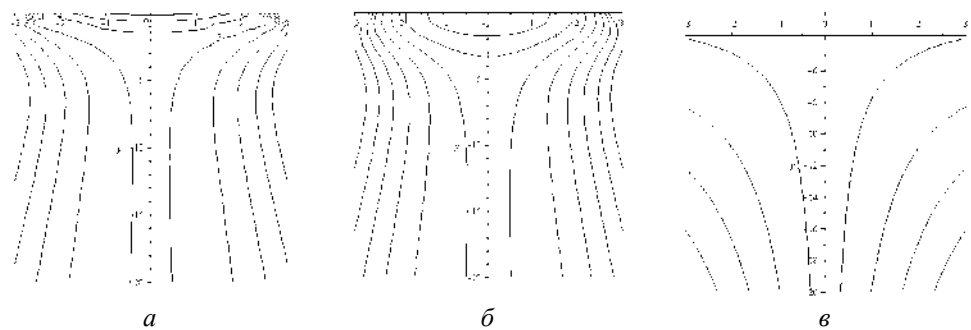


Рис. 6. Изолинии напряжения при $h = 0,5$, $P^* = 1$: а — горизонтального; б — вертикального; в — касательного

Анализ картин изолиний компонент напряжений, приведенных на рис. 4 и 5, убедительно показывает, что численные значения напряжений в упругом основании абсолютно жесткого штампа с параболическим очертанием, находящегося под действием вертикальной равномерно распределенной нагрузки, зависит не только от величины коэффициента Пуассона, но и от величины сил трения, возникающих на контакте «штамп — грунт».

Полагая в (12) и (15)

$$y = 0; \quad x = t; \quad \theta_1 = \pi; \quad \theta_2 = 0; \quad \rho_1 = |a - t|; \quad \rho_2 = |a + t| \quad (21)$$

и суммируя полученные выражения, получим формулу давления, действующего на границу полуплоскости, при заданной величине прогиба h и вертикальной нагрузке интенсивности P , приложенной к штампу. Имеем

$$P(t) = \frac{4\mu h}{\kappa + 1} \frac{(1 - 4\alpha^2)a^2 - 2t^2 - 4aat}{(a - t)^{\frac{1}{2} - \alpha} (a + t)^{\frac{1}{2} + \alpha}} + \frac{P \cos \pi \alpha}{\pi (a - t)^{\frac{1}{2} - \alpha} (a + t)^{\frac{1}{2} + \alpha}}. \quad (22)$$

Решение задачи физически возможно, если $P(t) \geq 0$ при $-a \leq t \leq a$, т. е. если

$$P \geq \frac{4\pi\mu h}{\kappa + 1} ((1 + 2\alpha)a)^2. \quad (23)$$

В этом случае сила P , прижимающая штамп, достаточно велика для того, чтобы углы A и B штампа вступили в контакт с упругим телом (рис. 1, a). Если P не удовлетворяет условию (23), то значит, что сила интенсивности P не достаточна для того, чтобы вдавить штамп до полного соприкосновения дуги AB с упругим телом (рис. 1, b).

Заметим, что при отсутствии трения формулы (22) и (23) принимают вид

$$P(t) = \frac{4\mu h}{\kappa + 1} \frac{a^2 - 2t^2}{\sqrt{a^2 - t^2}} + \frac{P}{\pi \sqrt{a^2 - t^2}}; \quad (21')$$

$$P \geq \frac{4\pi\mu h}{\kappa + 1} a^2 \quad (22')$$

и совпадают с формулами (8) и (9) §116а [1] с учетом значения для $h = 1/2R$, принятого в [1], где R — радиус окружности, частью которой является дуга AB .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мусхелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 707 с.
2. Богомолов А. Н., Ушаков А. Н. Методы теории функций комплексного переменного в задачах геомеханики. Волгоград: ВолгГАСУ; Перемена, 2014. 227 с.
3. Герсеванов Н. М. Опыт применения теории упругости к определению допускаемых нагрузок на грунт на основе экспериментальных работ // Труды МИИТ. Вып. XV. 1930.
4. Prandtl L. Über die Harte plastischer Körper // Gottinger Nachr. Math. phys. 1920. К. 1.
5. Hill R. The plastic yielding of notched bars under tension // Q. J. Mech. Appl. Math. 1949. № 2.
6. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения / под ред. Е. А. Сорочана и Ю. Г. Трофименкова. М.: Стройиздат, 1985. 480 с.
7. Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А. О симметрии компонент напряжения в однородном и изотропном основании абсолютно жесткого штампа при конечном значении коэффициента трения по контакту «штамп — грунт» // Изв. ТулГУ. Сер. Естеств. науки. 2013. Вып. 3. С. 317—322.

© Ушаков А. Н., 2015

Поступила в редакцию
в июне 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Ушаков А. Н. О распределении напряжений в упругой полуплоскости и по ее контакту с центрально нагруженным абсолютно жестким штампом параболического очертания при конечном значении коэффициента трения по контакту «штамп — грунт» // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 39—48.

Об авторе:

Ушаков Андрей Николаевич — докторант кафедры гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

A. N. Ushakov

**ABOUT TENSION DISTRIBUTION IN ELASTIC HALF-PLANE
AND ON ITS CONTACT WITH CENTRALLY LOADED ABSOLUTELY RIGID STAMP
OF THE PARABOLIC OUTLINE AT FINAL VALUE OF FRICTION COEFFICIENT
ON "STAMP — SOIL" CONTACT**

The solution of the task on tension distribution in the elastic basis of absolutely rigid stamp of the parabolic outline which is under the influence of normal loading of the set intensity in the presence of final friction on its sole is provided in the work. Forms for calculation of tension in half-plane points are presented in the closed formula. For the points lying on the limit of half-plane these formulas will be transformed into the classical formulas of N. I. Muskhelishvili giving the solution of the task on a stamp with the parabolic basis. It is shown that tension distribution in the basis of a stamp depends on the size of side pressure coefficient and friction coefficient.

Key words: mixed task of the theory of elasticity, friction coefficient, stress isoline.

REFERENCES

1. Muskhelishvili N. I. *Nekotorye osnovnye zadachi matematicheskoi teorii uprugosti* [Some main tasks of the mathematical theory of elasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 707 p.
2. Bogomolov A. N., Ushakov A. N. *Metody teorii funktsii kompleksnogo peremennogo v zadachakh geomekhaniki* [Methods of the theory of functions of complex variable in the tasks of geomechanics]. Volgograd, VSUACE Publ., Peremena Publ., 2014. 227 p.
3. Gersevanov N. M. [Experience of use of the theory of elasticity for the definition of accepted soil loading on the basis of experimental works]. *Trudy MIIT* [Works of MSURE], iss. XV, 1930.
4. Prandtl L. *Über die Härte plastischer Körper*. *Göttinger Nachr. Math. phys.*, 1920. K. 1.
5. Hill R. The plastic yielding of notched bars under tension. *Q. J. Mech. Appl. Math.*, 1949, no. 2.
6. Sorooshan E. A. and Trofimenkova Yu. G., ed. *Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya* [Bases, foundations and underground constructions]. Moscow, Stroizdat Publ., 1985. 480 p.
7. Bogomolov A. N., Ushakov A. N., Bogomolova O. A. [About symmetry tension component in homogeneous and isotropic foundation of absolutely rigid stamp at finite value of friction coefficient on "stamp — soil" contact]. *Izvestiya TulGU. Ser. Estestvennye nauki* [Bulletin of TSU. Series Natural sciences], 2013, iss. 3, pp. 317—322.

For citation:

Ushakov A. N. [About tension distribution in elastic half-plane and on its contact with centrally loaded absolutely rigid stamp of the parabolic outline at final value of friction coefficient on "stamp — soil" contact]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 39—48.

About author:

Ushakov Andrei Nikolaevich — Postdoctoral student of Hydraulic and Earthwork Structures Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation.

УДК 625.7

В. В. Чусов

Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ)

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭМПИРИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ ГРУНТОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИХ ПАРАМЕТРОВ ПРИ ТРЕХОСНЫХ ИСПЫТАНИЯХ ГРУНТОВ

Выполнен обзор и анализ аналитических и эмпирических условий пластичности, применяемых в задачах оценки сопротивления грунтов сдвигу. Аналитические условия Ладе — Дункана, Матсуока — Накаи и Друкера — Прагера включают в себя параметры материала, зависящие от сцепления и угла внутреннего трения. В настоящей публикации определены параметры материала этих условий при различных влажностях связных грунтов и разном числе приложенных нагрузок. Даны формулы для определения касательных напряжений по различным критериям.

Ключевые слова: сдвигоустойчивость, условия пластичности, трехосное сжатие, угол внутреннего трения, сцепление.

Введение. Обеспечение сдвигоустойчивости грунтов земляного полотна и материалов конструктивных слоев дорожных одежд позволяет обеспечить работу дорожной конструкции в стадии уплотнения, в ходе которой накопление остаточных деформаций носит затухающий характер, а материалы и грунты приспособляются к напряженному состоянию [1—4]. Решение задачи сопротивления грунтов сдвигу связано с выбором условия пластичности (критерия прочности), описывающего комбинации главных напряжений, при возникновении которых грунт переходит в пластическое состояние. Разработке критериев прочности и условий пластичности материалов, являющихся сплошными и дискретными средами, посвящены работы Г. Галилея, Э. Мариотта, А. Сен-Венана, М. Леви, Ш. Кулона, А. Треска, Р. Мизеса, Губера, Генки, О. Мора, А. Надаи, М. М. Филоненко-Бородича, П. Ладе, Дж. Дункана, Д. Друкера, В. Прагера, Х. Матсуока, Т. Накаи и др.

Состояние вопроса. Расчеты по сдвигоустойчивости базируются на условиях пластичности, из которых наиболее часто применяют критерии Кулона — Мора [5], Ладе — Дункана [6], Матсуока — Накаи [7], Друкера — Прагера [8], оригинальной и модифицированной моделей Cam Clay (Росcoe — Шофилда и др.) [9, 10], а также различные эмпирические условия [4, 11—13].

В табл. 1 приведены некоторые условия пластичности, применяемые для оценки сопротивления грунтов сдвигу.

Т а б л и ц а 1

Условия пластичности

Наименование условия	Формула предельного равновесия
1	2
Кулона — Мора [14]	$\frac{1}{\operatorname{tg} \varphi} \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} - \operatorname{tg} \varphi \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = c,$

где σ_1 и σ_3 — максимальное и минимальное главные напряжения, Па; c — сцепление, Па; φ — угол внутреннего трения материала, град.

О к о н ч а н и е т а б л. 1

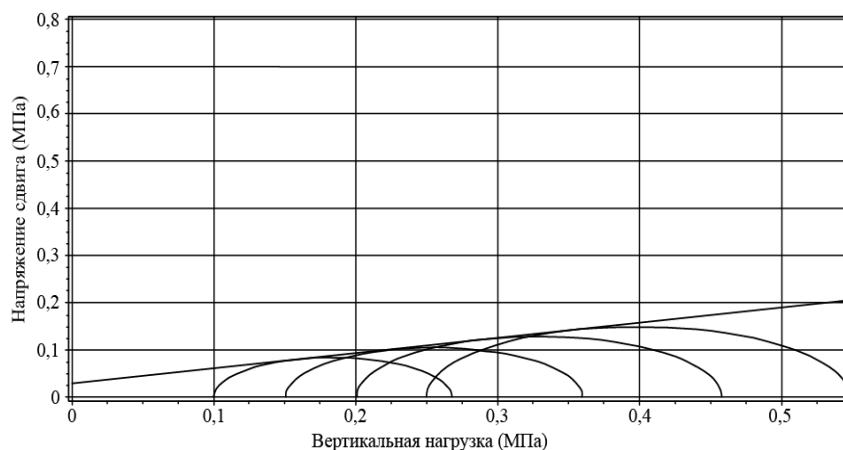
Наименование условия	Формула предельного равновесия
1	2
Ладе — Дункана [6]	$I_1^3 - k_{L-D} I_3 = 0;$ $k_{L-D} = \frac{(3 - \sin \varphi)^3}{(1 - \sin \varphi) \cos^2 \varphi},$
где I_1 и I_3 — первый и третий инварианты тензора напряжений, k_{L-D} — безразмерный параметр прочности грунта, связанный с углом внутреннего трения.	
Матсуока — Накаи [7]	$I_1 I_2 - k_{M-N} I_3 = 0;$ $k_{M-N} = \frac{9 - \sin^2 \varphi}{1 - \sin^2 \varphi},$
где I_1 , I_2 и I_3 — первый, второй и третий инварианты тензора напряжений (I_2 принимается положительным), k_{M-N} — безразмерный параметр прочности грунта, связанный с углом внутреннего трения.	
Друкера — Прагера [7]	$\sqrt{J_2} = k + a \cdot I_1;$ $a = \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)}; \quad k = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 \pm \sin \varphi)},$ знак «−» принимается при испытаниях на сжатие, а знак «+» на расширение [4],
где J_2 — второй инвариант девиатора тензора напряжений, a и k — параметры прочности, связанные с параметрами условия Кулона — Мора	
Оригинальная модель Cam Clay [10, 15]	$q + Mp \ln \left[\frac{p}{p_c} \right] = 0,$
где q — девиатор эффективных напряжений, p — давление, p_c — давление предельной консолидации, M — наклон линии критического состояния в p — q -пространство [8, 9, 11]	
Модифицированная модель Cam Clay [10, 15]	$p + \frac{q^2}{M^2 p} - p_c = 0$
Эмпирические модификации критерия Кулона — Мора [4, 11—13]:	
Арнольда — Долгих	$\frac{1}{2} \left(\sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \right) = c;$
А. Л. Калинина	$\frac{1}{2} \left(\sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \right) \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} = c;$
Александрова — Калинина	$\frac{1}{2} \left(\sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \right) \left(\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \right)^D = c,$
где c и D — параметры материала, позволяющие варьировать предельную поверхность	

Из анализа условий пластичности, представленных в табл. 1, следует их классификация, выполняемая по количеству инвариантов и параметров материала. Например, условия Ладе — Дункана и Матсуока — Накаи называют однопараметрическими, двух- и трехинвариантными соответственно [11, 12]. Однопараметрические условия целесообразно применять при решении задач для несвязных материалов. Для связных грунтов эти условия неприменимы, но могут быть модифицированы. Двухпараметрические условия применяют для оценки сдвигоустойчивости как связных, так и несвязных материалов. Для случая напряженного состояния $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ достаточно воспользоваться условием Кулона — Мора в его общепринятой форме [5], а при $-\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ предпочтительнее использовать условие Друкера — Прагера. Это связано с тем, что параметры условия Друкера — Прагера определяются таким образом, что его поверхность проходит либо через углы сжатия, либо по углам расширения шестигранника Мора. Поэтому при трехосном сжатии или трехосном расширении критерии Друкера — Прагера и Кулона — Мора дают одинаковые результаты.

Определение параметров условий пластичности по данным трехосного сжатия. Из анализа данных табл. 1 следует, что параметры условий связаны со сцеплением и углом внутреннего трения грунта. В настоящее время для испытаний грунтов трехосным сжатием существует три основные методики:

- 1) неконсолидированно-недренированное испытание;
- 2) консолидированно-недренированное испытание;
- 3) консолидированно-дренированное испытание.

Для дорожной отрасли применимы консолидированно-недренированные испытания, т. к. их проведение для определения угла внутреннего трения и сцепления наиболее рационально¹. Круги предельных эффективных напряжений и аппроксимирующая их приближающая предельная прямая приведены на рис.



Круги Мора

¹ ГОСТ 12248—2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.

Нами проведена серия испытаний суглинка легкого при относительных влажностях 0,52...0,68 и установлено, что в условиях однократно прикладываемой нагрузки данные проведенных испытаний согласуются со значениями угла внутреннего трения и сцепления, регламентируемыми ОДН 218.046-01. Поэтому значения параметров материалов в других условиях можно получить, используя для расчета данные ОДН 218.046-01. Выполнив расчеты параметров материала в различных условиях пластичности (см. табл. 1), автор дополнил данные нормативного документа ОДН 218.046-01 о параметрах материала, которые приведены в табл. 2—5.

Таблица 2

Значение параметров в зависимости от расчетного числа приложения нагрузки при расчетной относительной влажности 0,6

Параметр критерия	ΣN				
	1	10^3	10^4	10^5	10^6
C	0,03	0,03	0,016	0,014	0,012
φ	24	20	14,5	11	9
M	0,47	0,39	0,27	0,20	0,16
k_{L-D}	35,21	32,31	29,58	28,43	27,94
k_{M-N}	10,58	10,06	9,53	9,30	9,20
a	0,18	0,15	0,11	0,08	0,06
k	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01

Таблица 3

Значение параметров в зависимости от расчетного числа приложения нагрузки при расчетной относительной влажности 0,7

Параметр критерия	ΣN				
	1	10^3	10^4	10^5	10^6
C	0,019	0,013	0,009	0,007	0,006
φ	18	11,5	8,5	6,5	5,5
M	0,34	0,21	0,16	0,12	0,10
k_{L-D}	31,17	28,57	27,83	27,48	27,34
k_{M-N}	9,84	9,33	9,18	9,10	9,07
a	0,13	0,08	0,06	0,05	0,04
k	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01

Таблица 4

Значение параметров в зависимости от расчетного числа приложения нагрузки при расчетной относительной влажности 0,8

Параметр критерия	ΣN				
	1	10^3	10^4	10^5	10^6
C	0,011	0,007	0,005	0,003	0,002
φ	13	8	5	3	2,5
M	0,24	0,15	0,09	0,05	0,04
k_{L-D}	29,04	27,74	27,28	27,10	27,07
k_{M-N}	9,43	9,16	9,06	9,02	9,02
a	0,09	0,06	0,03	0,02	0,02
k	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00

Т а б л и ц а 5

Значение параметров в зависимости от расчетного числа приложения нагрузки при расчетной относительной влажности 0,9

Параметр критерия	ΣN				
	1	10^3	10^4	10^5	10^6
C	0,008	0,004	0,004	0,002	0,001
φ	11,5	6,5	3,5	2,2	2
M	0,21	0,12	0,06	0,04	0,04
k_{L-D}	28,57	27,48	27,14	27,05	27,04
k_{M-N}	9,33	9,10	9,03	9,01	9,01
a	0,08	0,05	0,02	0,01	0,01
k	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00

Из анализа данных табл. 2—5 следует, что параметры условий пластичности уменьшаются при увеличении относительной влажности и суммарного числа приложенных расчетных нагрузок.

Рассматривая возможность применения условий пластичности табл. 1 к расчету грунтов земляного полотна, отметим, что для напряженного состояния $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$ инварианты тензора и девiatora напряжений определяются по формулам:

$$I_1 = \sigma_1 + 2\sigma_3. \quad (1)$$

$$I_2 = 2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2. \quad (2)$$

$$I_3 = \sigma_1\sigma_3^2. \quad (3)$$

$$J_2 = \frac{1}{6}((\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2) = \frac{1}{3}(\sigma_1 - \sigma_3)^2. \quad (4)$$

С учетом (1) и (3) поверхность критерия Ладе — Дункана в развернутом виде описывается уравнением

$$(\sigma_1 + 2\sigma_3)^3 - k_{L-D}\sigma_1\sigma_3^2 = 0. \quad (5)$$

Учитывая (1)—(3), поверхность критерия Матцуока — Накаи опишем уравнением

$$(\sigma_1 + 2\sigma_3)(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2) - k_{M-N}\sigma_1\sigma_3^2 = 0. \quad (6)$$

Условия пластичности по (5) и (6) можно представить в виде критерия, предельное состояние по которому описывается уравнениями

$$\frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)^3}{\sigma_1\sigma_3^2} = \frac{(3 - \sin \varphi)^3}{(1 - \sin \varphi)\cos^2 \varphi}. \quad (7)$$

$$\frac{(\sigma_1 + 2\sigma_3)(2\sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2)}{\sigma_1\sigma_3^2} = \frac{9 - \sin^2 \varphi}{1 - \sin^2 \varphi}. \quad (8)$$

Из анализа (7) и (8) следует, что эти критерии не учитывают сцепление грунта, вследствие чего могут быть применены только к так называемой идеально сыпучей среде. Таким же недостатком обладают критерии оригинальной и модифицированной моделей Кэм — Клай. Отсюда следует, что для реальных грунтов целесообразно применять условия пластичности Кулона — Мора, Друкера — Прагера или эмпирические критерии.

Рассматривая напряженное состояние $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$, авторы работы [11] критерий Друкера — Прагера дают в виде:

при аппроксимации параметров материала критерия Друкера — Прагера, описывая конус этого условия вокруг пирамиды Кулона — Мора (трехосное сжатие),

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}} - \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}(\sigma_1 + 2\sigma_3) = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi)}; \quad (9)$$

при аппроксимации параметров материала критерия Друкера — Прагера, вписывая конус этого условия в пирамиду Кулона — Мора (трехосное растяжение),

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sqrt{3}} - \frac{2 \sin \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}(\sigma_1 + 2\sigma_3) = \frac{6c \cos \varphi}{\sqrt{3}(3 + \sin \varphi)}. \quad (10)$$

Уравнения (9) и (10) приводятся к виду [11]:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2c \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_1 + \sigma_3} = \sin \varphi. \quad (11)$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{6c \operatorname{ctg} \varphi + \sigma_1 + 5\sigma_3} = \frac{\sin \varphi}{3}. \quad (12)$$

Выполняя преобразования, (11) и (12) приводят к виду:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi} - \operatorname{tg} \varphi \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} = c. \quad (13)$$

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2 \cos \varphi} - \operatorname{tg} \varphi \frac{\sigma_1 + 5\sigma_3}{6} = c. \quad (14)$$

В формулах (13) и (14) левая часть представляет собой касательное напряжение, а правая часть (сцепление) является прочностной характеристикой грунта. Причем (13) является условием Кулона — Мора (см. табл. 1), а (14) — условием Друкера — Прагера, в котором параметры материала определены аппроксимацией, при которой конус Друкера — Прагера вписан в пирамиду Кулона — Мора. В уравнении (14) вычитаемое меньше чем в формуле (13), вследствие чего касательное напряжение, определяемое по (14), больше, чем по (13).

Другим альтернативным вариантом замены условия пластичности Кулона — Мора являются эмпирические критерии [4, 11—13]. При этом отметим, что критерий Кулона — Мора можно записать в виде

$$\left(\sigma_1 - \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_3 \right) \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}} = c. \quad (15)$$

Из анализа левой части условия Арнольда — Долгих следует, что касательные напряжения по этому критерию также выше, чем по (15). Критерии Калинина и Александрова — Калинина включают в себя третий параметр B или D соответственно. При $B = 2$ или $D = 0,5$ эмпирические критерии принимают вид критерия Кулона — Мора, а при $B = \infty$ или $D = 0$ эти условия становятся тождественными критерию Арнольда — Долгих. Кроме того, все эмпирические критерии, также как и условие пластичности Кулона — Мора, при $\varphi = 0$ вырождаются в третью теорию прочности, согласно которой предельное состояние грунта наступает тогда, когда девиатор напряжений становится равен удвоенной недренированной прочности c_u . То есть,

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2c_u. \quad (16)$$

Таким образом, при применении эмпирических критериев соблюдаются требования постулата Друкера.

Заключение. В заключении можно сделать выводы о перспективах применения расчетов касательных напряжений по условиям (14) и эмпирическим критериям Арнольда — Долгих, Калинина и Александрова — Калинина при проектировании дорожных конструкций и об их дальнейшем использовании в моделях пластического деформирования.

1. Переход на условия пластичности, в которых касательные напряжения, записанные в левой части уравнения предельного равновесия, выше, чем по критерию Кулона — Мора, приведет к проектированию дорожных одежд большей толщины. В результате появляется возможность устранения недостатка современных методов расчета, состоящего в том, что у эксплуатируемых дорожных одежд ровность покрытий выходит за рамки допустимых пределов раньше, чем наступает предельное состояние по критерию Кулона — Мора.

2. Предлагаемые модели расчета касательных напряжений по эмпирическим критериям позволяют модифицировать ряд моделей пластического деформирования, например такую известную модель, как формулу Ричарда Диллона Барксдейла. Поэтому предлагаемый расчет касательных напряжений по (14) или эмпирическим условиям может существенно расширить область математического моделирования пластического деформирования грунтов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Anochie-Boatehg J.* Advanced testing and characterization of transportation soils and bituminous sands. Ph. D. Thesis. Urbana, Illinois, USA, 2007.
2. *Barksdale R. D.* Laboratory Evaluation of Rutting in Base course Materials // Proceedings of the 3rd International Conference on Asphalt Pavements. London, 1972. Pp. 161—174.
3. *Werkmeister S.* Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions. Ph. D. Thesis. University of Technology, Dresden, 2003.
4. *Александров А. С., Долгих Г. В., Калинин А. Л.* О допускаемых давлениях на грунты земляного полотна и слою дорожной одежды // Наука и техника в дорожной отрасли. 2012. № 2. С. 10—13.
5. *Болдырев Г. Г.* Методы определения механических свойств грунтов. Состояние вопроса. Пенза: ПГУАС, 2008. 696 с.

6. Lade P. V., Duncan J. M. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil // Journal. Geotechnical Engineering Division, ASCE. 1975. Vol. 101. № 10. Pp. 1037—1053.
7. Matsuoka H., Nakai T. Stress-deformation and strength characteristics soil under three different principal stresses // Proceedings Japanese Society Civil Engineering. 1974. Vol. 232. Pp. 59—70.
8. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design // Quarterly of Applied Mathematics. 1952. Vol. 10. № 2. Pp. 157—165.
9. Schofield A. N., Wroth C. P. Critical State Soil Mechanics. McGraw-Hill, 1968. 310 p.
10. Roscoe K., Schofield A., Thurairajah A. Yielding of clays in state wetter than critical // Geotechnique. 1963. Vol. 13. № 3. Pp. 211—240.
11. Александров А. С., Долгих Г. В., Калинин А. Л. Применение критерия Друкера-Прагера для модификации условий пластичности // Наука и техника в дорожной отрасли. 2013. № 2. С. 26—29.
12. Калинин А. Л. Применение модифицированных условий пластичности для расчета безопасных давлений на грунты земляного полотна // Инженерно-строительный журнал. 2013. № 4(39). С. 35—45. doi: 10.5862/MCE.39.4.
13. Arnold G. K. Rutting of Granular Pavements. Dr. of Philosophy Thesis. 2004. 417 p.
14. Соколовский В.В. Статика сыпучей среды. М., 1960.
15. Schofield A. N. Disturbed soil properties and geotechnical design. Thomas Telford, 2006. 216 p.

© Чусов В. В., 2015

Поступила в редакцию
в июле 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Чусов В. В. Перспективы применения эмпирических условий пластичности грунтов и определение их параметров при трехосных испытаниях грунтов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 49—57.

Об авторе:

Чусов Василий Владимирович — учебный мастер кафедры строительства и эксплуатации дорог, Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия (СибАДИ). Российская Федерация, 644080, г. Омск, пр. Мира, 5, chysow@gmail.com

V. V. Chusov

PROSPECTS OF APPLICATION OF EMPIRICAL CONDITIONS OF SOIL PLASTICITY AND DETERMINATION OF THEIR PARAMETERS BY TRIAXIAL TESTS

The authors carry out the review and analysis of analytical and empirical conditions of plasticity used in the tasks of evaluation of soil shear strength. The Lade — Duncan, Matsuoka — Nakai and Drucker — Prager analytical conditions include material parameters that depend on the cohesion and angle of internal friction. In the present article material parameters of these conditions at various humidity of cohesive soils and different number of applied loads are determined. Formulas for the definition of shear stress at different criteria are provided.

К е y w o r d s: shear strength, plasticity condition, triaxial compression, angle of internal friction, cohesion.

REFERENCES

1. Anochie-Boatehg J. *Advanced testing and characterization of transportation soils and bituminous sands*. Ph. D. Thesis. Urbana, Illinois, USA, 2007.
2. Barksdale R. D. Laboratory Evaluation of Rutting in Base course Materials. *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Asphalt Pavements*. London, 1972. Pp. 161—174.
3. Werkmeister S. *Permanent deformation behaviour of unbound granular materials in pavement constructions*. Ph. D. Thesis. University of Technology, Dresden, 2003.

4. Aleksandrov A. S., Dolgikh G. V., Kalinin A. L. [Allowable pressure on soil road bed and layers of road pavements]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli* [Science & Engineering for Roads], 2012, no. 2, pp. 10—13.
5. Boldyrev G. G. *Metody opredeleniya mekhanicheskikh svoystv gruntov. Sostoyanie voprosa* [Methods of determination of mechanical properties of soil. State-of-the-art]. Penza, PSUACE Publ., 2008. 696 p.
6. Lade P. V., Duncan J. M. Elastoplastic stress-strain theory for cohesionless soil. *Journal. Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 1975, 101(10), pp. 1037—1053.
7. Matsuoka H., Nakai T. Stress-deformation and strength characteristics soil under three different principal stresses. *Proc. Japanese Society Civil Engineering*, 1974, vol. 232, pp. 59—70.
8. Drucker D. C., Prager W. Soil mechanics and plastic analysis for limit design. *Quarterly of Applied Mathematics*, 1952, 10(2), pp. 157—165.
9. Schofield A. N., Wroth C. P. *Critical State Soil Mechanics*. McGraw-Hill, 1968. 310 p.
10. Roscoe K., Schofield A., Thurairajah A. Yielding of clays in state wetter than critical. *Geotechnique*, 1963, 13(3), pp. 211—240.
11. Aleksandrov A. S., Dolgikh G. V., Kalinin A. L. [Application of Druker-Prager criterion for updating of plasticity conditions]. *Nauka i tekhnika v dorozhnoi otrasli* [Science & Engineering for Roads], 2013, no. 2, pp. 26—29.
12. Kalinin A.L. [Application of modified yield criteria for calculation of safe pressures on the subgrade soil]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2013, no. 4(39), pp. 35—45. doi: 10.5862/MCE.39.4.
13. Arnold G. K. *Rutting of Granular Pavements*. Dr. of Philosophy Thesis. 2004. 417 p.
14. Sokolovskii V. V. *Statika sypuchei sredy* [Statics of loose medium]. Moscow, 1960.
15. Schofield A. N. *Disturbed soil properties and geotechnical design*. Thomas Telford, 2006. 216 p.

For citation:

Chusov V. V. [Prospects of application of empirical conditions of soil plasticity and determination of their parameters by triaxial tests]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 49—57.

About author:

Chusov Vasilii Vladimirovich — Training Master of Construction and Road Operation Department, the Siberian Automobile and Highway Academy (SIBADI). 5, Prospekt Mira, Omsk, 644080, Russian Federation, chysow@gmail.com

УДК 666.972.53

Л. А. Ерохина, Н. С. Майорова

Ухтинский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ТЯЖЕЛОГО БЕТОНА С ЦЕЛЮ ПОВЫШЕНИЯ ЕГО МОРОЗОСТОЙКОСТИ

Морозостойкость бетона определяет его долговечность. От этого свойства зависит качество и надежность возводимых сооружений в условиях Севера. В статье приведены высказывания отечественных и зарубежных специалистов по исследованиям в этой области. Приведены сравнительные испытания образцов, твердевших в разных условиях, изменение свойств растворной смеси под влиянием разных по структуре кремнеземистых добавок, их влияние на темп роста прочности и изменение хрупкости образцов, а также опыт выявления оптимального количества тонкодисперсной добавки в составы с помощью замораживания.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бетон, морозостойкость, прочность, аморфная кристаллическая структура, тонкодисперсные компоненты.

Научные исследования по долговечности бетонов в северных зонах страны показывают, что морозная деструкция — это основная причина недолговечности тяжелого бетона, возникающая в результате фазовых превращений воды при колебаниях температуры от появляющихся напряжений при линейных и объемных деформациях материала с неоднородной структурой. Вода в капиллярах бетона разного сечения замерзает постепенно, так как содержит гидроксид кальция, химические добавки, в замкнутых порах может быть повышено давление, поэтому температура замерзания поровой жидкости снижается, и чем тоньше капилляр, тем снижается в большей степени. Морозное разрушение зависит от влажности или степени водонасыщения материала, температуры замерзания влаги в порах и характера пористости. С помощью современных комплексных модифицирующих добавок появляется возможность формировать более плотную, однородную структуру бетона, достигающую марочной прочности, твердеющую даже при отрицательной температуре.

Так, в нашем опыте забетонированные образцы-кубики с добавкой (ЦМИД-4ПМ) + СНВ оказались способными твердеть на морозе при температуре -20°C без предварительной выдержки и набрать марочную прочность в 28-дневный срок. Водоцементное отношение такого бетона составляло 0,36, отношение мелкого заполнителя к крупному — 0,47, количество тонких фракций вместе с вяжущим — $589,6 \text{ кг/м}^3$ бетона. В составе добавки есть реакционноспособный тонкодисперсный минеральный порошок, выполняющий роль не только уплотнителя. С такой добавкой вода в структуре при низком водоцементном отношении находится в пленочном состоянии, она не замерзает и медленно продолжает реагировать с клинкерной частью вяжущего. Комплексная добавка способствовала образованию в бетоне системы пор микрокапиллярного размера. Вода в микрокапиллярах не замерзала при отрицательной температуре, поэтому реакции гидратации очень медленно, но шли, дисперсность новообразований при их формировании на холоде возрастала, что и привело к росту прочности, хотя и с опозданием. У параллельных

образцов, твердевших в нормальных условиях, прочность в семидневном возрасте составляла 37 МПа, тогда как у твердевших на морозе — всего 10,3...10,8 МПа. К 28-суточному возрасту прочность стала почти одинаковой: у твердевших в нормальных условиях — 44,2 МПа, у твердевших на морозе — 43,2 МПа. Образцы, твердевшие в нормальных условиях, имели большую плотность — 2,48 г/см³, тогда как твердевшие на морозе — 2,35 г/см³. Водопоглощение образцов нормального твердения составило 2 %, твердевших на морозе — 2,5 %.

Если структура способна впитывать больше воды, она будет больше подвержена морозной деструкции, значит, структура более рыхлая, морозостойкость должна быть ниже. Испытания этих образцов на морозостойкость проводили ускоренным методом в 5%-м соленом растворе при температуре замораживания –50 °С. Образцы прошли 10 циклов замораживания и оттаивания, затем были испытаны на прочность. Потеря массы после испытания у образцов нормального твердения составила 0,4 %, образцы, твердевшие на морозе, потеряли 0,9 %. Прочность при сжатии после 10 циклов замораживания и оттаивания возросла у образцов нормального твердения на 4,5 % и стала 46,2 МПа, прочность твердевших на морозе образцов снизилась на 35,5 % и стала 28,3 МПа.

Несмотря на то, что образцы, твердевшие на морозе, набрали марочную прочность к 28-м суткам, структура свежесушеного бетона, формировавшаяся на морозе, имела больше капилляров, в которых вода замерзала и разрыхляла ее. Поэтому плотность этих образцов была ниже, чем у образцов, твердевших в нормальных условиях, водопоглощение выше. Большая потеря прочности после замораживания свидетельствует о недопустимости твердения свежесушеного бетона при отрицательной температуре. В начальный период происходит образование каркаса структуры, особенно плотного при нормальном твердении. Если свободная влага превращается в лед на морозе, межзерновое пространство расширяется и структура уже уложенного бетона разуплотняется, становится более высоким не только водопоглощение, но и деформативность матрицы. «В связи с этим перед исследователями ставится задача найти комбинацию ассоциирующих компонентов, существенно повышающих предельную деформативность при растяжении бетонов. Упругие и пластические свойства кристаллического каркаса новообразований в цементном камне все равно сохраняют свои физические свойства, характерные для бетона, поэтому проводят исследования по созданию гибридных композиций, деформации которых должны быть приближены при сжатии и растяжении» [1].

Активный поиск таких композиций предопределяет использование наноматериалов и нанотехнологий, в строительстве более 40 % всей нанотехнологической продукции. Установлено, что введение в бетонную смесь наноразмерных частиц оказывает существенное влияние на свойства бетона [2]. Получают наноструктурированное вяжущее постадийным помолом алюмосиликатного, кремнеземистого и гранитного сырья, используемого как основное вяжущее и как модификатор [3]. Авторы показали, что внутренняя энергия молекул оказывает влияние на поверхностную энергию материала, и в процессе измельчения происходит существенная механоактивация его. Нановяжущие обеспечивают увеличение прочности бетонов, изготовленных с ними, более чем на 60 %. Ползучесть бетона сегодня связывают с перегрупп-

пировкой наноразмерных гидросиликатов, с изменением их плотности. Добавление микрокремнезема снижает ползучесть бетона, что и открывает путь к получению высокоупакованных материалов с медленной ползучестью [4].

От свойств цементного камня проявлять усадочные деформации в значительной степени зависят такие характеристики бетона, как микропористость и стойкость в различных средах, прочность (особенно при растяжении и изгибе), сопротивляемость образованию трещин и др. [5]. И далее авторы делают вывод: оптимизация структуры мелкозернистого бетона путем создания высокоплотной упаковки заполнителя из отсева дробления кварцитопесчаника, обогащенного кварцевым песком, и синтеза высокодисперсных новообразований позволила почти в 2,5 раза уменьшить меру ползучести мелкозернистого бетона и существенно повысить предел прочности при сжатии. Добавление минерального порошка повышает стойкость бетона к деформациям, что очень важно в изменяющейся среде.

Бетон считается одним из самых неоднородных и сложных искусственных материалов, и выносливость бетона при отрицательных температурах имеет первостепенное значение в странах, имеющих минусовые температурные условия работы [6, 7]. После циклических испытаний на замораживание и оттаивание происходит потеря массы и динамического модуля упругости бетона, особенно у составов без воздухововлекающих добавок. Образцы, в составе которых были воздухововлекающие добавки, показали более высокую прочность при сжатии и морозостойкость. Наибольшей морозостойкостью характеризуются бетоны с модификаторами, в состав которых входят микропенообразующие компоненты [8], т. е. структуры, фактор расстояния между порами в которых находится в пределах 0,13...0,24 мм (по Пауэрсу — не более 0,25 мм). Миллиарды микроскопических воздушных ячеек снимают внутреннее давление на бетон, предоставляя их объем воде, расширяющейся при замерзании [6, 7]. Введение воздухововлекающих добавок значительно увеличивает морозостойкость бетонов. Но повреждения, связанные с фазовым переходом воды, тепло- и массоперенос в структуре сильно зависят от начального влагосодержания в смеси, и наиболее интенсивные фазовые переходы воды в структуре происходят при небольших отрицательных температурах до -6°C [9].

Морозостойкость бетона зависит от степени водонасыщения, но «устойчивость к замораживанию напрямую зависит от способности содержать замерзающую воду» [10]. Далее автор поясняет, что эта способность появляется, если бетон высокой производительности содержит небольшое количество вовлеченного воздуха, приблизительно от 3,5 до 4,5 %, защищающего бетон от повреждений при замораживании. Толщина цементного теста между воздушными пузырьками должна быть менее 0,25 мм, размер воздушных пузырьков должен быть как можно мельче и не должен превышать 0,05...1,25 мм. При перемешивании бетонной смеси происходит воздухововлечение, но этот процесс зависит от дисперсности вяжущего, содержания щелочи в цементе, пластичности смеси, времени перемешивания. Избыток мелких частиц песка снижает воздухововлечение, также как снижение водоцементного фактора. Воздухововлекающие добавки позволяют плотным бетонам повысить стойкость к морозному воздействию [10, 11].

Проницаемость бетона контролируется толщиной матрицы. Цементной пасты не должно быть очень много и очень мало (около 1 мм), так как она не становится препятствием для проникновения воды в структуру и насыщения ею крупного заполнителя. Цементное тесто должно полностью покрывать все частицы смеси, обеспечивая контакт между ними. Для этого должны быть введены дополнительно тонкодисперсные пески, цемент и воздух. Тонкодисперсные добавки позволяют увеличить объем цементного теста, вязкость и более толстый слой матрицы на зернах крупного заполнителя, препятствуя его наполнению водой. Чем больше площадь контакта, тем больше прочность и меньше пористость, а эти свойства могут быть обеспечены дополнительным количеством мелких компонентов. Всего 5...7 % тонкодисперсной добавки к крупному заполнителю обеспечивает наибольшую прочность и долговечность [12]. Этих качеств помогают достичь модификаторы, которые пока дороги и дефицитны, но обеспечивают быстрый набор прочности.

Наличие эффективных комплексных добавок привело к желанию при строительных работах упростить условия твердения бетонов. Дефицит электроэнергетических ресурсов, их высокая стоимость и возможность достижения марочной прочности на холоде побуждают формировать железобетонные конструкции без предварительной выдержки и термообработки. Достижение марочной прочности к месячному сроку считается конечной целью. Как показали эксперименты, для условий с холодным климатом марочной прочности недостаточно. Образовавшаяся на холоде капиллярная структура более проницаема для воды, обособленных пор мало, формирующаяся на морозе структура не компенсирует объемные изменения жидкой фазы и не обеспечивает высокую морозостойкость. В нормальных условиях или при тепловой обработке идет интенсивная гидратация в начальное время твердения, вода затворения участвует в химических процессах, капиллярное пространство сокращается за счет появляющихся новообразований, свободной воды при низком В/Ц не остается, с дефицитом влаги формируется плотная структура с малой проницаемостью для воды. Из учебной литературы [13] известно, что замораживаемый бетон должен достичь критической прочности прежде, чем его можно заморозить.

Айткин [10] считает замораживание и оттаивание стандартных образцов наиболее подходящим методом тестирования на долговечность. По его мнению, повысить стойкость к деформациям от фазовых изменений воды в плотных бетонах еще более эффективно помогут микросферы с меньшим диаметром, чем воздушные пузырьки от 10 до 60 мкм. Их вовлечение в объем смеси всего 2,8 % обеспечивает расстояние 0,07 мм, что значительно меньше 0,25 мм.

Наши исследования [12] морозного воздействия на бетон показали: если в структуре есть обособленные поры, прерывающие капилляры, по которым поступает вода внутрь, морозные деформации слабеют, структура выдерживает давление льда и много циклов замораживания и оттаивания. Ранее исследователи отмечали, что пористые добавки способны снимать давление от замерзающей воды, когда возникает демпфирующий эффект и даже останавливается трещинообразование [13]. Торможение роста микротрещин в работающем бетоне обеспечивают включенные в состав дополнительные границы раздела фаз, изменяющие траектории трещин или гасящие их. Развитие тре-

щин в структуре бетона зависит от его напряженно-деформированного состояния, так как микродефекты всегда есть даже на наноструктурном уровне [14]. Препятствовать распространению и слиянию микротрещин способны включенные в состав мелкие воздушные сферы или мягкие вещества, распределенные по объему. Эти микрообъемы снижают напряжения в структуре.

Опыт показывает [4], используя активные минеральные тонкодисперсные добавки с высокоалюминатными цементами при высокой подвижности смеси, получают бетоны, не отличающиеся долговечностью, тем более при циклическом воздействии низких температур. Тепловые изменения при переходе через нуль, а также смачивание и сушка приводят к появлению трещин на поверхности, особенно при содержании в смеси глинистых минералов [10]. И далее автор считает, что многие свойства зависят от свойств материнской породы наполнителя: химического и минерального составов, прочности, твердости, структуры пор, химической стабильности, размера частиц, их водопоглощения.

Снизить начальное водосодержание в строительных смесях возможно подбором минеральных компонентов с невысокой водоудерживающей способностью, уплотняющих структуру, а также используя эффективные ПАВ.

С имеющимися у нас твердыми кремнеземистыми тонкодисперсными добавками разной структуры мы провели эксперимент по уплотнению составов цементно-песчаного раствора: минеральной добавкой, содержащей кремнезем в аморфной, активной форме — микрокремнезем — и с инертной добавкой — отсевами кварцевого песка фракции $<0,16$ мм.

Большей водоудерживающей способностью обладает микрокремнезем, т. е. кремнеземистая добавка аморфной структуры. При одинаковом водоцементном отношении и одинаковой массе твердых частиц более низкая пластичность смеси отмечалась с добавкой микрокремнезема, имеющего более высокую удельную поверхность, чем отсева кварцевого песка, и более высокую водопотребность. Отсевы кварцевого песка в том же количестве удерживают влаги меньше, почти столько же, сколько рядовой песок, хотя имеют более высокую удельную поверхность, чем рядовой песок, что позволяет с меньшим количеством воды достичь большей пластичности. Мы вводили этой добавки до 50 % от массы цемента, и с водоцементным отношением 0,3 смесь все равно оставалась пластичной, при увеличении водоцементного отношения до 0,7 смесь становилась литой даже без пластификатора. Структуры, содержащие минимум влаги, будут и более морозостойкими, а от этого качества зависит долговечность бетона. Чем выше водоудерживающая способность, тем больше воды остается в структуре, тем больше капилляров будет сформировано, тем опаснее для структуры будет замораживание. Это предположение мы проверили следующим опытом.

По нашим предварительным опытам оптимальное количество отсевов для формирования наиболее плотной матрицы составляет от 20 до 50 % по массе цемента. Уплотнение цементного камня происходит за счет снижения водопотребности смеси с большим количеством твердых частиц в единице объема и увеличения координационного числа для всех и более крупных частиц песка. Для определения темпа роста прочности изготовили стандартные образцы-балочки из составов:

- 1 — цементно-песчаный раствор на рядовом песке с $M_k = 1,6$;
- 2 — с заменой части песка 20 % отсеков кварцевого песка;
- 3 — с заменой части песка 20 % микрокремнезема ($B/C = 0,5$).

Условия твердения — нормальные. При испытании образцы показывали посуточный рост прочности, представленный в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Наращение прочности при сжатии образцов с разными тонкодисперсными добавками (20 %) и содержанием цемента 20 и 30 %

Состав	Прочность образцов с 20 % цемента (изг/сж), МПа			Прочность образцов с 30 % цемента (изг/сж), кг/см ²		
	2 суток	7 суток	28 суток	2 суток	7 суток	28 суток
1	1,7/2,85	2,9/10,94	4,55/17,52	2,7/5,4	3,5/12,0	4,9/18,03
2	3,1/12,16	3,7,5/17,44	6,2/24,68	3,3/9,0	5,0/15,6	6,6/29,16
3	2,1/6,2	3,4/10,31	5,0/19,92	3,5/9,1	4,4/16,6	6,2/29,60

Из табл. 1 видно наращение прочности при более плотной упаковке частиц смеси с минеральными добавками, она значительно опережает темп роста прочности структуры, формирующейся без тонкозернистых добавок на рядовом песке, особенно с меньшим содержанием цемента, и в начальный период влияние отсеков кварцевого песка более заметно, чем влияние кремнезема аморфной структуры. С повышением количества цемента в смеси влияние добавок на прочность несколько снижено в начальные сроки твердения, но отношение прочности при изгибе к прочности при сжатии у образцов с тонкодисперсными добавками ниже и ровнее, чем без добавок на всем времени твердения, что показывает меньшую хрупкость у образцов с добавками, постепенно снижающуюся по мере твердения (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Изменение отношения показателей прочности при изгибе к прочности при сжатии тех же образцов таблицы 1

Состав	Прочность образцов с 20 % цемента (изг/сж), МПа			Прочность образцов с 30 % цемента (изг/сж), кг/см ²		
	2 суток	7 суток	28 суток	2 суток	7 суток	28 суток
1	0,59	0,29	0,27	0,53	0,44	0,21
2	0,25	0,21	0,25	0,36	0,32	0,22
3	0,33	0,33	0,25	0,40	0,26	0,20

Можно говорить об уплотнении структуры цементного камня тонкодисперсными добавками в большей степени более плотными добавками.

Изучая возможность использования уплотнителей структуры из различных материалов, специалисты [15] делают вывод: более высокую прочность в бетонах могут обеспечить добавки с более высоким модулем упругости, что может быть обеспечено торможением развития микротрещин или упрочнением структуры связующего вещества в большей степени с плотной кристаллической структурой, удерживающей минимум влаги. Введение таких примесей в растворную смесь способствует снижению усадки и увеличению сопротивления морозному воздействию [16, 17]. В то же время отмечается [18], что рас-

пространение трещин происходит, когда напряжение в вершине трещины достигает максимума. Гасят распространение трещин также воздушные поры (перфорация) или введенные в состав бетонной смеси мягкие пористые добавки, снижающие эти напряжения. Чем меньше размер гранул такой добавки, тем меньше ее влияние на снижение прочности бетона. Предлагаем использовать с этой целью микрогранулы вспученного пенополистирола диаметром < 1 мм. Но этот результат требует дальнейшей экспериментальной проверки [12].

Важной характеристикой структуры для бетонов являются показатели растяжимости, отношение прочности при изгибе к прочности при сжатии, характеризующие хрупкость материала. Потенциал сопротивления разрушению помимо условий трансформации внешней нагрузки во внутренние напряжения определяется количеством и качеством физических и физико-химических связей между омоноличивающим веществом и частицами наполнителя, а также внутренними связями структурных составляющих самого омоноличивающего вещества и наполняющих частиц [19].

Эксперименты показывают, что образцы без уплотнителя на рядовом песке с увеличением прочности по мере твердения до 28 сут значительно снижают это отношение — с $0,59...0,53$ до $0,27...0,21$, т. е. по мере твердения растет прочность и при изгибе, тогда как добавление в смесь тонкодисперсной добавки сглаживает эту разницу, и с ней даже в начальные сроки прочность при изгибе повышается.

На рис. 1 видно, как выравниваются линии с увеличением количества добавки (отсевы кварцевого песка) от 10 до 100 % и с увеличением количества цемента в каждом составе. С увеличением добавки до 100 % показатель хрупкости с ростом прочности к 28 сут не меняется, тогда как с 10 и 20 % добавки снижение отношения $R_{изг}/R_{сж}$ более значительно, особенно с увеличением количества цемента, что свидетельствует о повышении хрупкости по мере роста прочности. Чем ниже показатели усадки, ползучести, отношения $R_{изг}/R_{сж}$, тем выше сопротивляемость образованию трещин.

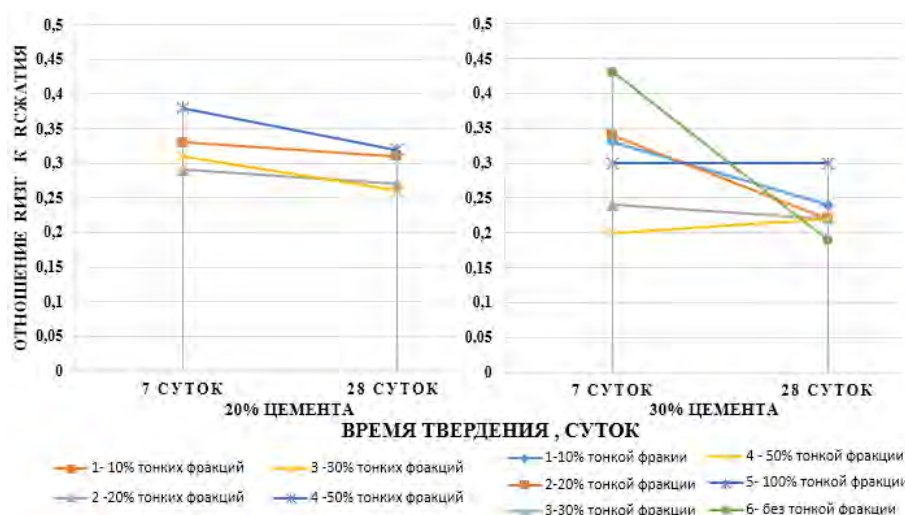


Рис. 1. Изменение отношения прочности при изгибе к прочности при сжатии у составов с 20 и 30 % цемента и разным количеством тонкодисперсной добавки

Произведено сравнение структурной прочности цементного камня при замораживании образцов-кубиков $10 \times 10 \times 10$ см с разным количеством тонкодисперсной добавки при разной отрицательной температуре. Образцы с одинаковым количеством вяжущего, но с разным количеством отсевов кварцевого песка — 10, 20 и 30 % от массы вяжущего — были насыщены водой в соответствии с ГОСТ 10060.0—95 и подвергнуты замораживанию: часть образцов при -20 °С, другая часть — при -50 °С. В замороженном состоянии образцы были испытаны на прочность при сжатии. Замороженные при -20 °С образцы с 10 % отсевов увеличили прочность при сжатии на 154 %, образцы с 20 % отсевов увеличили прочность на 91 %, образцы с 30 % отсевов показали рост прочности на 172 %. Прочность растет при замораживании водонасыщенных образцов за счет образования льда в капиллярах структуры и его взаимодействия с твердым каркасом цементного камня. Чем больше влаги в структуре, тем больше замерзшей фазы, тем выше прочность замороженных образцов. Контрольные образцы имели прочность после двух недель твердения 15,4 МПа при 10 % отсевов, 23,7 МПа — 20 % и 21,8 МПа — 30 % отсевов. Известно, что чем тоньше капилляры, тем при более низкой температуре замерзает в них влага. При -20 °С замерзает влага в крупных капиллярах с диаметром 15...40 мкм и выше, при более глубоком замораживании — до -50 °С — влага замерзает и в микрокапиллярном пространстве с диаметром 1...0,1 мкм, и прочность замороженных образцов должна еще возрасти. С понижением температуры ниже -35 °С замерзает вода с более низким химическим потенциалом, интенсивность фазовых переходов пренебрежимо мала [9]. Так, в нашем эксперименте замороженные при -50 °С образцы показали рост прочности к прочности замороженных образцов при -20 °С: образцы с 10 % отсевов — на 28,5 %, образцы с 20 % отсевов — всего на 10,8 %, образцы с 30 % отсевов — на 34 %. При замерзании микрокапиллярной влаги прочность образцов немного выросла, особенно у образцов с 30 % отсевов. Произошло разрыхление структуры в большей степени в составе, где тонкодисперсной добавки для этого количества цемента было больше, чем надо. Образовалась структура из твердых частиц с недостатком вяжущего. Тонкодисперсная добавка с недостатком цемента не формирует плотную структуру, так как много не связанных цементом частиц, хотя и уплотненных, но легко раздвигаемых увеличивающимся объемом льда. Если еще учесть, что в этой работе использовали шлакопортландцемент, то вместе с тонкодисперсными добавками в смеси были тонкодисперсные частицы молотого шлака в самом вяжущем, поэтому формировалась структура разной плотности с оптимальным соотношением у смеси с 20 % нашей добавки. Опыт показал, что прочность образцов в замороженном состоянии может подсказать оптимальное количество уплотнителя для взятого количества вяжущего.

Основными факторами, определяющими устойчивость бетона к замерзанию, являются пористая структура и насыщаемость бетона влагой [10], а это — плотность и способность пропускать внутрь воду. Авторы отмечают, что даже при оттаивании в воде продолжается процесс отвердевания и уплотнения (что наблюдалось при увеличении прочности после испытаний на морозостойкость), по этой причине авторы считают полезным после твердения во влажных условиях или после намокания бетона подсушивать его в естественных условиях, при повторном смачивании бетон уже не наберет столько влаги.

Кроме того, разработаны эффективные гидрофобизаторы, снижающие водопоглощение бетона в 5...10 раз и повышающие морозостойкость [20]. Для повышения трещиностойкости даже ячеистых структур легкого бетона разработаны способы дисперсного армирования полимерными и базальтовыми волокнами или углеродными нанотрубками [21], что пока еще, в отличие от недефицитных и повсеместно распространенных добавок, далеко от использования в повседневной практике.

Тот факт, что с добавкой тонкодисперсных компонентов, уплотнением структуры бетона и небольшого количества воздухововлечения большие морозы, преобладающие на севере, не могут превратить в твердую фазу всю воду в микрокапиллярной системе бетона, что быстро привело бы к разрушению структуры, дает надежду на долговременную эксплуатацию бетонных конструкций в условиях холодного климата.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рабинович Ф. Н. Какой бетон нужен строителям? (В порядке обсуждения) // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 2. С. 41—42.
2. Фаликман В. Р. Наноматериалы и нанотехнологии в современных бетонах // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 1. С. 31—34.
3. Оценка активности наноструктурированных вяжущих термодинамическим методом / В. В. Строкова, А. М. Айзенштадт, М. Н. Сивальнева, В. А. Кобзев, В. В. Нелюбова // Строительные материалы. 2015. № 2. С. 3—9.
4. Фаликман В. Р., Калашников О. О. Особо высокопрочные быстротвердеющие бетоны // Бетон и железобетон. 2015. № 1. С. 9—12.
5. Деформативные свойства мелкозернистого бетона / Е. С. Глаголев, Р. В. Лесовик, С. В. Ключев, В. А. Богусевич // Строительные материалы. 2014. № 1-2. С. 113—115.
6. Hong-qiang C., Lei-shun Z., and Ping-xian L. The influence of freeze thaw to concrete strength // Henan Science. 2003. Vol. 21. № 2. Pp. 214—216.
7. Li-kun Q. Study on the strength and deformation of concrete under multiaxial stress after high-temperature of freeze-thaw cycling. Ph. D. thesis. Dalian University of Technology, Liaoning, China, 2003.
8. Батраков В. Г. Модифицированные бетоны. М.: Техпроект, 1998. 786 с.
9. Экспериментальное исследование содержания незамерзшей воды в бетонах с противоморозными добавками / А. В. Малышев, Е. Г. Старостин, А. В. Степанов, А. М. Тимофеев // Бетон и железобетон. 2011. № 3. С. 2—4.
10. Aitcin P. C. High-Performance Concrete. E & FN Spon., 1998. 591 p.
11. Neville A. M. Concrete Technology. Longman Group UK Limited, 1987, Reprinted 2008 (twice). Second edition, 2010. Pp. 477—483.
12. Панталеенко В. Н., Ерохина Л. А. О повышении долговечности конструкций нефтегазопромысловых сооружений // Науч. труды III Всерос. (II Международной) конф. по бетону и железобетону. Т. 3. М., 2014. С. 348—355.
13. Микульский В. Г. Строительные материалы. Учебник. М.: АСВ, 1996.
14. Коротких Д. Н. Дисперсное армирование структуры бетона при многоуровневом трещинообразовании // Строительные материалы. 2011. № 3. С. 96—99.
15. Бердов Г. И., Зырянова В. Н. Пути совершенствования технологии и свойств строительных материалов // Известия вузов. Строительство. 2010. № 4. С. 51—61.
16. Freezing and thawing resistance of concretes with shrinkage reducing admixtures / J. Bae, N. S. Berke, R. J. Hoopes, J. Malone // International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete. 2002. Pp. 327—333.
17. Beddoe R. E. Low-temperature phase transitions of pore water in hardened cement paste // International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete. 2002. Pp. 161—168.
18. Torrenti J-M., Piyudier-Cabot G., Reynouard J-M. Mechanical Behavior of Concrete // ISTE Ltd. 2010. John Wiley & Sons Inc. P. 419.
19. Баженов Ю. М., Чернышов Е. М., Коротких Д. Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // Строительные материалы. 2014. № 3. С. 6—14.

20. Розенталь Н. К., Чехний Г. В. Гидрофобизация бетона как средство для повышения долговечности строительных конструкций // Бетон и железобетон. 2015. № 2. С. 24—27.

21. Перфилов В. А., Аткина А. В., Кусмарцева О. А. Применение модифицирующих микроармирующих компонентов для повышения прочности ячеистых материалов // Известия вузов. Строительство. 2010. № 9. С. 11—14.

© Ерохина Л. А., Майорова Н. С., 2015

Поступила в редакцию
в июне 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Ерохина Л. А., Майорова Н. С. Исследование структуры тяжелого бетона с целью повышения его морозостойкости // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 58—68.

Об авторах:

Ерохина Лариса Алексеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Ухтинский государственный технический университет. Российская Федерация, 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13, tosha_23@mail.ru

Майорова Наталья Сергеевна — старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Ухтинский государственный технический университет. Российская Федерация, 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13, tosha_23@mail.ru

L. A. Erokhina, N. S. Maiorova

RESEARCH OF THE STRUCTURE OF HEAVY CONCRETE IN ORDER TO INCREASE ITS FROST RESISTANCE

Frost resistance of concrete defines its durability. Quality and safety of constructions made of it under the conditions of the North depend on this characteristic. The article provides the statements by Russian and foreign specialists working in this sphere. Comparative tests of the samples that solidified under different conditions, change of properties of mortar mixes under the influence of silica additives with different structures, their influence on the growth rate of stability and change of fragility of the samples, as well as the experience of determination of optimum quantity of a finely dispersed additive to the mixtures with the help of freezing are given.

Key words: concrete, frost resistance, stability, amorphous crystal structure, finely dispersed components.

REFERENCES

1. Rabinovich F. N. [Which concrete is necessary for builders? (Pilot scheme)]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2015, no. 2, pp. 41—42.
2. Falikman V. R. [Nanomaterials and nanotechnologies in modern concrete]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2013, no. 1, pp. 31—34.
3. Stokova V. V., Aizenshtadt A. M., Sival'neva M. N., Kobzev V. A., Nelubova V. V. [Activity Evaluation of Nanostructured Binders with Using Thermodynamic Method]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2015, no. 2, pp. 3—9.
4. Falikman V. R., Kalashnikov O. O. [Ultra-high-early-strength concrete]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete], 2015, no. 1, pp. 9—12.
5. Glagolev E. S., Lesovik R. V., Klyuev S. V., Bogusevich V. A. [Deformation Properties of Fine-Grained Concrete]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2014, no. 1-2, pp. 113—115.
6. Hong-qiang C., Lei-shun Z., and Ping-xian L. The influence of freeze thaw to concrete strength. *Henan Science*, 2003, 21(2), pp. 214—216.
7. Li-kun Q. *Study on the strength and deformation of concrete under multiaxial stress after high-temperature of freeze-thaw cycling*. Ph. D. thesis. Dalian University of Technology, Liaoning, China, 2003.

8. Batrakov V. G. *Modifitsirovannye betony* [Modified concrete]. Moscow, Techproekt Publ., 1998. 786 p.
9. Malyshev A. V., Starostin E. G., Stepanov A. V., Timofeev A. M. [Pilot research of amount of unfrozen water in concrete with antifreezing agents]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete], 2011, no. 3, pp. 2—4.
10. Aïtcin P. C. *High-Performance Concrete*. E & FN Spon., 1998. 591 p.
11. Neville A. M. *Concrete Technology*. Longman Group UK Limited, 1987, Reprinted 2008 (twice). Second edition, 2010. Pp. 477—483.
12. Pantileenko V. N., Erokhina L. A. [About increase of lifetime of constructions of petroleum field buildings]. *Nauchnye trudy III Vserossiiskoi (II Mezhdunarodnoi) konferentsii po betonu i zhelezobetonu. T. 3* [Scientific works of III All-Russian (II International) conf. on concrete and reinforced concrete, vol. 3]. Moscow, 2014. Pp. 348—355.
13. Mikulskii V. G. *Stroitel'nye materialy. Uchebnik* [Construction materials. Manual]. Moscow, ASV Publ., 1996.
14. Korotkikh D. N. [Disperse Reinforcement of Concrete Structure at Multilevel Cracks Formation]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2011, no. 3, pp. 96—99.
15. Berdov G. I., Zyryanova V. N. [Way of perfection technology and property of building materials]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 2010, no. 4, pp. 51—61.
16. Bae J., Berke N. S., Hoopes R. J., Malone J. Freezing and thawing resistance of concretes with shrinkage reducing admixtures. *International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete*. 2002. Pp. 327—333.
17. Beddoe R. E. Low-temperature phase transitions of pore water in hardened cement paste. *Int. RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete*, 2002, pp. 161—168.
18. Torrenti J.-M., Piyudier-Cabot G., Reynouard J.-M. *Mechanical Behavior of Concrete*. ISTE Ltd. 2010. John Wiley & Sons Inc. P. 419.
19. Bazhenov Yu. M., Chernyshov E. M., Korotkikh D. N. [Designing of modern concrete structures: determining principles and technological platforms]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2014, no. 3, pp. 6—14.
20. Rozental' N. K., Chekhni G. V. [Hydrofobisation of concrete in order to increase lifetime of building constructions]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete], 2015, no. 2, pp. 24—27.
21. Perfilov V. A., Atkina A. V., Kusmartseva O. A. [The application of modifying microfitting components for strength increase of porous materials]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 2010, no. 9, pp. 11—14.

For citation:

Erokhina L. A., Maiorova N. S. [Research of the structure of heavy concrete in order to increase its frost resistance]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 58—68.

About authors:

Erokhina Larisa Alekseevna — Candidate of Engineering Science, Docent of Industrial and Civil Engineering Department, Ukhta State Technical University. 13, Pervomayskaya St., Ukhta, 169300, Russian Federation, tosha_23@mail.ru

Maiorova Natal'ya Sergeevna — Senior Lecturer Industrial and Civil Engineering Department, Ukhta State Technical University. 13, Pervomayskaya St., Ukhta, 169300, Russian Federation, tosha_23@mail.ru

УДК 666.972:531.754

Н. С. Майорова, Л. А. Ерохина

Ухтинский государственный технический университет

О ФОРМИРОВАНИИ СТРУКТУРНОЙ ПЛОТНОСТИ ЦЕМЕНТНОГО КАМНЯ С ДОБАВКОЙ НЕДЕФИЦИТНЫХ ОТСЕВОВ КВАРЦЕВОГО ПЕСКА

Приведены способы повышения качества бетонов, которые можно использовать без дополнительных затрат и привозных материалов, а также регулировки плотности и подвижности растворной смеси. Предлагается введение в бетонную смесь уплотнителя — недефицитной, имеющейся на месте тонкодисперсной фракции кварцевого песка $< 0,16$ мм. Описаны испытания, доказывающие ее благоприятное воздействие на плотность, прочность и морозостойкость тяжелых бетонов.

Ключевые слова: наполнитель, отсеvy кварцевого песка, водоредуцирование, водоудерживающая способность, микрокремнезем, реология, межзерновая пустотность, плотность.

В практике бетонирования рядовых составов тяжелого бетона обычно отсутствует чистота исполнения. Нередко расчетные составы, показывающие необходимый результат в лабораторных условиях, на стройках не достигают его. И тогда поступают предложения о введении в смесь эффективных добавок, которые смогут помочь достичь нужного качества бетона.

Изготовление качественных бетонов должно войти в повседневную практику строительства. Насколько велико влияние различных отклонений в составе на конечную прочность, видно из представленного графика на рис. 1.

Линия 1 отличается от других отсутствием как крупной фракции песка в составе, так и самой мелкой $< 0,16$ мм в начальной точке графика. Песок в этом случае был взят фракции 0,315 мм, наиболее многочисленной фракции мелких песков в Республике Коми. Затем в состав добавляли 50 до 100 % крупного песка. Прочность повышалась только в составе 1, где появлялась комбинация из двух фракций, при постепенном увеличении содержания крупной фракции. Увеличение крупной фракции в составах 2, 3, 4, 5, где присутствовала изначально фракция $< 0,16$ мм, не приводило к дальнейшему росту прочности с увеличивающимся количеством отсеvов с 5, 10, 20 и 50 % соответственно. В этих составах она повысилась только с ростом количества крупной фракции песка с 60 % и выше. Линия 2 отличается тем, что в этих составах везде присутствует 5 % добавки мелкой фракции песка $< 0,16$ мм (отсевов), которого недостаточно для уплотнения структуры. Прочностные показатели снижались вплоть до точки с 60 % крупного песка. Линия 3 показывает прочность составов с содержанием 10 % мелкой фракции, 10 % отсеvов улучшили показатели прочности по сравнению с 5 % добавки. Линии 4 и 5 отличаются введением в составы 20 и 50 % добавки мелкой фракции с постепенным увеличением крупных. Прочность падала вплоть до содержания 60 % крупной фракции песка. Все составы сблизили свои показатели прочности только с ростом крупной фракции песка, когда даже добавки 20 и 50 % мелких фракций песка не смогли разрыхлить структуру цементного камня.

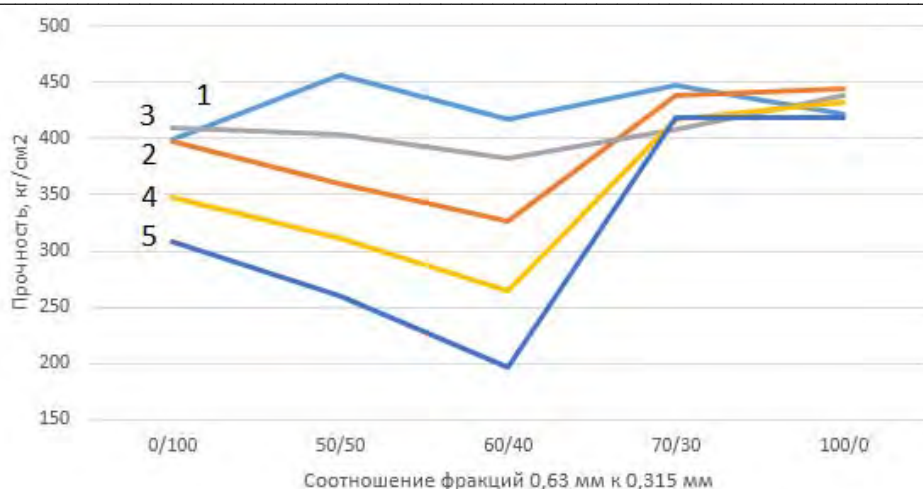


Рис. 1. Изменение прочности образцов при колебании фракций песка в составе

Плотность цементного камня зависит от плотности укладки твердых частиц в смеси, а с изменением содержания воды и гранулометрии заполнителя взаимная координация и плотность упаковки твердых частиц меняются. Максимально плотной упаковки частиц добиваются не в жестких смесях, а в смесях с достаточным количеством жидкости, где при формовании и уплотнении создаются условия к самоуплотнению частиц. Это может происходить, когда воды хватает для смачивания всех компонентов и частицы могут перемещаться в растворе под влиянием стяжения и контракции. С оптимальным количеством воды капилляры имеют минимальное сечение и стягивают подвижную массу, увеличивая число контактов между частицами. «Самоуплотнение дисперсной системы продолжается с повышением содержания воды вплоть до заполнения ею межчастичного пространства на 0,876 его объема. Процесс самоуплотнения продолжается еще за счет межчастичного взаимодействия при сближении дисперсных частиц до расстояния 100 нм и менее» [1].

Технологически решить задачу по уплотнению разных смесей непросто. Разные компоненты, разная гранулометрия сыпучих материалов, их водоудерживающая способность оказывают разное влияние на общее состояние смесей при разном количестве воды затворения. Использование пластификаторов и модифицирующих добавок привносит свои особенности при расчете и формовании составов. По словам [2], текучесть, уплотняемость, заполнение емкости, прокачиваемость используются в современной технологии бетонов как взаимозаменяемые понятия, а организация технологии бетонов с примесями мелких частиц все еще находится в стадии «младенчества».

Самая мелкая фракция песка может служить уплотнителем структуры, в чем авторы убедились на опытах. Определив минеральный состав фракций <0,16 мм, обнаружили, что кроме кремнезема в ней содержится более 30 % остатков плотных кристаллических пород гранатовой группы, амфиболы, магнетит, рутил, много ильменита, отсутствующих в более крупных фракциях кварцевого песка. Поэтому водоудерживающая способность отсевов кварцевого песка ниже, чем у рядового песка и еще ниже, чем у фракции 0,315 мм.

Когда только одна фракция заполнителя в составе, то межзерновая пустотность повышается, пористость повышается, прочность снижается. При соотношении двух фракций мелкая располагается между крупными зернами, сокращая межзерновую пустотность, и прочность возрастает, пока есть место для мелких частичек (см. рис. 1, линия 1). Как только количество мелких частиц не может разместиться в межзерновом пространстве крупных — опять начинается разуплотнение структуры, увеличение пористости, падение прочности (см. рис. 1, линии 4, 5).

Введение в составы третьей фракции еще больше усложняет систему. Фракция песка $< 0,16$ мм (отсевы) оказалась эффективной добавкой даже до 50 %, если крупные фракции мелкого заполнителя занимают также не менее 50 % объема. Получается выравнивание прочности при одинаковом количественном соотношении крупной фракции с более мелкими: и с фракцией 0,315, и с фракцией $< 0,16$ мм. Так как наши пески не являются крупными и самая многочисленная фракция в них 0,315 мм, приходится тщательно подбирать составы с максимальной плотностью без достаточного количества крупной фракции. А так как межзерновая пустотность растет с уменьшением размера частиц, то для ее заполнения потребуется больше отсевов или другого более эффективного уплотнителя. Иногда рядовой состав песков оказывается более эффективным, если в нем содержится оптимальное количество всех фракций.

В настоящее время добавкам-наполнителям уделяют особое внимание, так как с ними успешно решаются вопросы регулирования свойств, модифицирования бетонов и ресурсосбережения. Наполнителем называют инертную дисперсную минеральную добавку, занимающую 10...30 % и более от массы цемента. «За последнюю четверть века вспомогательная роль добавок переросла в определяющую на всех этапах получения и эксплуатации бетона за счет высокой эффективности и экологичности. Один из важнейших факторов, определяющих функциональность и эффективность добавок, — их совместимость с цементами» [3]. Различная природа и активность минеральных частиц не позволяют получить достаточной информации по количеству используемой добавки в конкретных бетонах, поэтому в каждом случае необходим экспериментальный подбор. Автор в работе [4] отмечает, что добавка микрокремнезема может существенно увеличить удобоформуемость смеси, несмотря на значительное увеличение площади поверхности цементирующих материалов.

Среди физических факторов, влияющих на реологию растворной и бетонной смеси, имеет значение не только гранулометрический состав, но и форма заполнителей и даже частиц вяжущего. Автором [5] отмечается недостаточное количество публикаций о использовании тонкодисперсных частиц в составе обычного бетона. Им выполнены фундаментальные исследования по изучению влияния микрокремнезема в составах растворной смеси, выявлена их роль как сферических частиц такого же или меньшего размера, чем цемент, способность захватывать молекулы воды и освобождать их для псевдооживления смеси при воздействии пластификатора. Гидратные фазы цемента с размером частиц 1...100 нм формируют с наполнителями связующие структуры, улучшающие прочностные свойства цементного камня и его долговечность. Введение в смесь микрокремнезема приводит к повышению плотности

C-S-H-геля, что в свою очередь препятствует их перемещению с течением времени и получению высокоупакованных составов с медленной ползучестью [6]. Повышение плотности формирующейся структуры без дополнительной изоляции с помощью тонкодисперсных компонентов смеси привело к технологии получения высокопрочных и долговечных бетонов [7]. Добавление микрокремнезема может существенно увеличить удобоукладываемость рабочей смеси даже с В/Ц ниже 0,28, но с пластификацией [4]. В работе [8] отмечается, что мелкий заполнитель имеет гораздо большее влияние на подвижность смеси, чем крупный. Некрупные частицы, прошедшие сквозь сита 0,63 до 0,315 мм, обеспечивают хорошую подвижность смеси, захватывая больше воздуха. Более мелкие частички вызывают уменьшение содержания воздуха и являются причиной слипаемости, сегрегации и снижения пластичности раствора. По мнению автора тонкие частички состоят из глины и обломков выветривания природного камня, большое количество таких включений в растворной смеси приводит к повышению водосодержания и понижению количества воздуха в смеси [9]. Автор считает, что воздух снижает потребность в воде при одинаковой пластичности смеси, а введение тонких фракций ведет к повышенной водопотребности.

По нашему мнению это утверждение относится к молотому песку, отличающемуся по минеральному составу от отсеков. В молотом песке может быть больше глинистых частиц, более мягких алюмосиликатов, лимонита, что мы обнаружили и в составе фракции 0,315 мм. Поэтому водоудерживающая способность этой фракции выше, чем у отсеков песка и даже выше, чем у рядового песка.

Но высокой реологии невозможно получить с недостатком тонкозернистых компонентов в смеси, удельная поверхность которых должна быть выше тонкозернистого песка. В свете новейших достижений в технологии изготовления высокопрочных бетонов оценивается роль тонких фракций в составе растворных смесей. Увеличить плотность раствора возможно при увеличении количества твердых частиц в единице объема смеси [10]. Кроме того, использование тонкодисперсных добавок в небольшом количестве в составах требует более интенсивного перемешивания для достижения высокой однородности смеси [4]. В работе [8] отмечается, что подбор составляющих должен соответствовать объему пустотности, содержанию грубых и тонких частиц, воды и воздуха. Низкий предел прочности в сочетании с низкой плотностью свидетельствуют о высоком содержании воды и воздуха в смеси.

Чтобы увеличить содержание тонких компонентов для высокопрочных бетонов, идут на повышение расхода цемента [9], вводят тонкомолотую каменную муку, которую можно сделать из тех же доломитов, гранитов или кварцитов, золы. По мнению [5], введение тонкодисперсного порошка, заменяющего вяжущее, может быть выгодно не столько с экономической точки зрения, сколько с реологической. Кроме этого, для повышения водостойкости бетонов вводят полимерные добавки, повышающие пластичность составов [11]. Передвижение воды в бетонной смеси в период, предшествующий схватыванию, вызывает неравномерное ее распределение и появление при отвердевании структурных дефектов. Поэтому расчет состава должен осуществляться по минимальной пустотности твердых компонентов, предусматривая введение в состав тонкомолотой каменной муки и микрокремнезема, которые

обеспечат уплотнение частиц [6]. Перемещение воды в затвердевшем бетоне должно быть сведено к минимуму, только в микрокапиллярном пространстве может быть диффузионное перемещение влаги и эти капилляры должны по мере гидратации зарости новообразованиями. «Мерой прочности становится высокая плотность цементной матрицы, а мерой повышения долговечности бетона является устранение или уменьшение проникновения воды в структуру бетона как в условиях ее напорного воздействия на сооружение, так и в условиях капиллярного всасывания» [12]. Концентрация твердых компонентов возрастает сильнее всего при увеличении удельной поверхности наполняющей добавки. Эффект упрочнения понижается со снижением дисперсности наполнителя и полностью исчезает с выходом на дисперсность обычного мелкого заполнителя [13]. Достичь требуемой удобоукладываемости и плотности следует путем тщательного подбора гранулометрического состава заполнителей при минимальном расходе цемента. По мнению [4] обязательны корректировки принятых составов после лабораторных испытаний опытных образцов. По мнению [5] свойства цементного камня зависят от вида пластификатора, его совместимости с вяжущим, их соотношения. Поэтому авторы исследовали реологические свойства составов без пластификации, а пластификатор вводили для сравнения.

Эксперименты были вызваны необходимостью улучшения свойств рядовых составов бетона для повышения их морозостойкости с помощью уплотнения структуры тонкодисперсными минеральными наполнителями. В качестве микронаполняющей добавки использовались тонкозернистые пески, но лучшие результаты показали отсеvy кварцевых песков фракции $< 0,16$ мм. В растворную смесь вводили от 20 до 50 % и даже 100 % отсеvов от массы цемента, и прочность не снижалась. Этот компонент отличается незначительной водоудерживающей способностью, что в смеси с более активными компонентами позволяет получить более подвижную смесь. Низкая водоудерживающая способность и высокая плотность тонких частиц отсеvов не способствуют коагуляции с более легкими частицами цементного клинкера, смесь становится более однородной и плотной. Влияние этой добавки на реологию в сравнении с активной добавкой микрокремнезема по результатам эксперимента по определению консистенции строительной смеси в соответствии с ГОСТ 310.4-81 «Цементы. Методы определения прочности при изгибе и сжатии» представлено в табл. 1.

Крупные песчинки рядового песка и смеси с добавкой тонкодисперсной фракции $< 0,16$ мм (I и II составы) удерживают воды меньше, чем микрокремнезем (III состав), что видно по расплыву конуса табл. 1. Состав III удерживает большее количество воды, чтобы достичь того же расплыва конуса, так как удельная поверхность сферических зерен микрокремнезема в 10 и более раз выше удельной поверхности цемента [4].

Но чем больше материал удерживает влаги, тем ниже его морозостойкость, что показано в следующем эксперименте.

Отформованные кубики из жесткой смеси (составов: 1 — Ц:П = 1:3, В/Ц = 0,4 с 0,5 % С-3; 2 — часть песка заменили на 20 % отсеvов; 3 — часть песка заменили на 20 % микрокремнезема) твердели в нормальных условиях 7 суток. После водонасыщения образцов перед замораживанием (по ГОСТ 10060.0—95) они прибавили менее 1,0 % массы, после 10 циклов

замораживания при -50°C их водонасыщение не превысило 1,9 %, все образцы прошли испытания без потери массы, но с потерей прочности у образцов с добавкой, удерживающей больше воды, — с микрокремнеземом (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

Изменение консистенции растворных смесей с разными минеральными добавками с изменением водоцементного отношения, распылв малого конуса, см

Составы смесей	В/Ц = 0,5	В/Ц = 0,6	В/Ц = 0,7	В/Ц = 0,8
I. Цемент — 200 г. Песок рядовой — 600 г. Вода — 100 мл (В/Ц = 0,5)	10	14	20	26
II. (I) + 40 г отсевов песка и 560 г рядового песка	10	13,5	19,5	25
III. (I) + 40 г микрокремнезема и 560 г рядового песка	10	11,4	16,5	22

Т а б л и ц а 2

Изменение прочности 7-суточных образцов-кубиков

Состав образцов	Прочность через 7 сут, МПа (контрольные)	Прочность через 10 циклов замораживания, МПа	Прочность после замораживания и твердения до 28 сут, МПа	Прочность через 3 месяца не мороженных образцов, МПа
1	11,14	12,96	13,05	20,1
2	13,87	25,77	25,98	26,94
3	14,53	13,22	22,26	26,97

После 10 циклов замораживания часть образцов (3 шт.) была испытана на прочность, другая часть возвращена во влажные опилки до 28-суточного срока для «залечивания» полученных при замораживании дефектов. За это время произошло зарастание микротрещин и прочность заметно выросла, особенно у образцов с тонкодисперсными добавками. Образцы с добавкой отсевов кварцевого песка имели самые высокие показатели прочности после испытаний на морозостойкость и, продолжая твердеть, добавили еще немного прочности к 28-суточному возрасту после замораживания. Значительно больше добавили прочности образцы 3 состава с микрокремнеземом, когда активный аморфный диоксид микрокремнезема продолжал реакции твердения с гидроксидом кальция, укрепляя структуру.

Микрокремнезем, имея высокую удельную поверхность, обладает большей водоудерживающей способностью. Удерживая на ранних стадиях свободную воду, способствует реакции гидратации вяжущего, образующиеся гидросиликаты кальция, укрепляя структуру, снижают водопроницаемость. Он выполняет роль и уплотнителя, и модификатора. Частицы отсевов кварцевого песка имеют меньшую удельную поверхность по сравнению с микрокремнеземом, более низкую пуццоланическую активность, но не содержат пор, воздуха, имеют более высокий модуль упругости, большую прочность,

однородно распределяются в объеме смеси и повышают водоредуцирующую активность пластификаторов, что способствует уплотнению смеси. Применяя эти добавки с суперпластификатором, получаем высокопластичную вязкую бетонную смесь с более высокой плотностью (рис. 2).

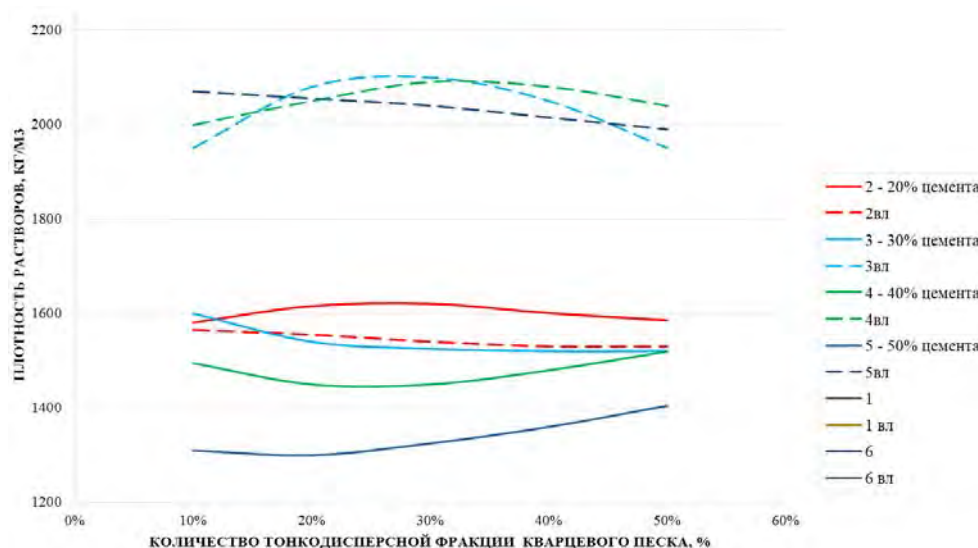


Рис. 2. Изменение насыпной плотности сухой и влажной смеси в зависимости от содержания цемента и тонкодисперсной фракции кварцевого песка: точки 1 и 1вл показывают плотность сухой и влажной смеси с 30 % цемента без добавок; точки 6 и 6вл показывают плотность сухой и влажной смеси с 100 % фракции < 0,16 мм

На рис. 2 видно, что плотность раствора увеличивается при небольшом расходе цемента (до 20 %) с количеством добавки-наполнителя не выше 20...30 % от массы цемента. С 30 и 40 % цемента в смеси 20...30 % добавки заметно увеличивают плотность влажной смеси. При дальнейшем увеличении содержания цемента в составе снижается плотность даже влажной смеси, но растет с увеличением содержания добавки уже с 30 до 40 %. С 50 % цемента по мере увеличения количества тонкодисперсной добавки плотность сухой смеси плавно растет вплоть до 50 % добавки, а плотность влажной смеси падает. Структура теряет плотность тем значительнее, чем больше введено добавки, превышающей пустотность смеси. Этот эксперимент проводился с добавкой отсевов кварцевого песка.

С увеличением величины отношения диаметров крупных и мелких частиц с 2 до 10 раз пористость сокращается с 39,2 до 26,5 %. Упаковка частиц становится более плотной [14]. В результате моделирования и расчета на ЭВМ с размерами частиц нашей гранулометрической кривой получилось среднее координационное число 6,1, пористость упаковки — 42,6 %, что очень близко согласуется с пустотностью смесей цемента с песком. С добавкой 50 % фракции 0,63 и 20 % отсевов пустотность сокращается до 32,5 %. Расчет пористости сыпучих смесей при разнице диаметров частиц от 2 до 10 раз по расчетам приведен в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Расчет пористости сыпучих смесей по математической модели

Пористость образцов, %	Отношение d_k/d_m						
	2	3	4	5	6	8	10
С крупной фракцией песка	39,2	35,8	34,1	30,8	37,2	32,1	26,5
С мелкой фракцией песка	41,4	38,7	37,1	32,2	37,4	32,7	28,9
Среднее координационное число крупных частиц	8,3	18	31,8	43,6	69,9	119,3	186,3
Среднее координационное число мелких частиц	4,1	4,8	5,2	5,2	5,4	5,6	5,4

Вводить уплотняющие добавки имеет смысл в составы с недостатком мелких частиц. Все линии на рис. 1 показывают рост прочности, если в составах есть от 60 % и выше крупных фракций, пустоты в них заполняют более мелкие фракции до 20 и 40 %, от массы цемента и координационное число контактов повышается. При отсутствии самой крупной фракции в мелком заполнителе ее роль выполняет следующая более крупная фракция песка и соотношение фракций меняется. С уменьшением размера крупной фракции долю тонкодисперсной добавки можно повысить без потери прочности, так как ее пустотность будет выше.

Актуальным направлением в бетоноведении всегда было использование отходов производства и некондиционного сырья в производстве строительных материалов, что дает экономический эффект или сохраняет природные ресурсы. Замена части вяжущего на тонкодисперсную минеральную добавку с низкой водоудерживающей способностью при постоянном В/Ц приводит к повышению подвижности, увеличению или снижению объема вовлеченного воздуха в зависимости от тонкости и природы добавки, а также к увеличению или снижению плотности в зависимости от содержания цемента. Максимальный прирост прочности имеет бетон при дозировке микрокремнезема 10...20 % от массы вяжущего, отсеков можно дать без потери прочности больше — 30...40 % в зависимости от количества цемента.

Исследователи утверждают [15], что дозировка модификатора несущественно влияет на степень гидратации, но оказывает значительное влияние на содержание гидратных фаз и дифференциальную пористость. Р. С. Aitkin [5] считает микрокремнезем с его высокой удельной поверхностью и реактивной способностью дополнительным цементирующим веществом. Количество одноосновных гидросиликатов в его присутствии увеличивается, изменяется баланс между порами геля и капиллярными в пользу пор геля [16]. Структура становится более дискретной с преобладанием мелкозернистых кристаллогидратов и геля. Более того, добавка микрокремнезема обеспечивает устойчивое упрочнение при твердении в воде в течение 4 лет [13].

Введение микрокремнезема в обычные составы тяжелого бетона могло бы дать лучшие результаты еще и потому, что эта добавка дает, кроме уплотняющего, пуццоланический эффект. Но вводить дорогостоящие и дефицитные добавки-уплотнители в любые некачественные составы не имеет смысла [9]. А вот зная гранулометрический состав используемых песков, при тща-

тельном подходе к подбору состава для изготовления более плотных тяжелых традиционных бетонов классов В30...В40, можно использовать в качестве уплотнителя недефицитные минеральные добавки — отсе́вы кварцевого песка, показавшие свою эффективность при определенном соотношении с цементом и крупными фракциями песка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бетонные и растворные смеси для восстановления мостовых конструкций / Е. И. Шмитко, В. Т. Перцев, А. В. Крылова, Н. А. Борисова, С. П. Смольянинова // Известия вузов. Строительство. 2005. № 1. С. 20—26.
2. Skarendahl A. The present — The future // 3rd International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete. 2003. Pp. 6—14.
3. Ушеров-Маршак А. В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 8—11.
4. Caldarone M. High-Strength Concrete: a practical guide. First published — Taylor & Francis. 2009 in the USA and Canada. 252 p.
5. Alcin P. C. High Performance Concrete. E & FN Spon, 2004. 140 p.
6. Новые представления о механизме действия суперпластификаторов, совместно размолотых с цементом или минеральными породами / В. И. Калашников, М. Н. Мороз, О. В. Тараканов, Д. В. Калашников, О. В. Суздальцев // Строительные материалы, 2014. № 9. С. 70—76.
7. Kardumyan G. Shrinkage compensated concretes. With low cement content for waterproof structures "Whitebath" // 18 International Baustofftagung. Weimar, 2012. Band 2. Pp. 763—770.
8. Karthikeyan H. Obla. Improving Concrete Quality. CRC Press 2015 by Taylor & Francis Group LLC. 192 p.
9. Neville A. M. Concrete Technology. Longman Group UK Limited. Second edition 2010. 460 p.
10. Калашников В. И. Через рациональную реологию в будущее бетонов. От высокопрочных и особовысокопрочных бетонов будущего к суперпластифицированным бетонам общего назначения настоящего // Технология бетонов. 2008. № 1. С. 22—26.
11. Falikman V. R., Petushkov A. V. Development of Russian Market of Nanotechnology Construction Products till 2020 // Nanotechnology in Construction: 4th International Symposium 2012.
12. Либланг Р., Рингвельски Д. Влияние интенсивного перемешивания на свойства сверхпрочных бетонов // СРІ. 2012. № 3. С. 32—35.
13. Структурообразование и разрушение цементных бетонов / В. В. Бабков, В. Н. Мохов, С. М. Капитонов, П. Г. Комохов. Уфа, 2002. 376 с.
14. Амосова О. Е. Координационное число и упаковка изометричных частиц гравитационного осадка // Геология и минеральные ресурсы Европейского северо-востока России. Т. IV. Сыктывкар, 1999. С. 135—140.
15. Каприелов С. С., Батраков В. Г., Шейнфельд А. В. Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспективы // Бетон и железобетон. 1999. № 6. С. 6—10.
16. Чистов Ю. Д., Хвастин М. А. Научно-технические основы производства и применения песчаных бетонов плотной и ячеистой структуры // Технология бетонов. 2005. № 1. С. 34—35.

© Майорова Н. С., Ерохина Л. А., 2015

Поступила в редакцию
в июне 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Майорова Н. С., Ерохина Л. А. О формировании структурной плотности цементного камня с добавкой недефицитных отсе́вов кварцевого песка // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 69—79.

Об авторах:

Майорова Наталья Сергеевна — старший преподаватель кафедры промышленного и гражданского строительства, Ухтинский государственный технический университет. Российская Федерация, 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13, tosha_23@mail.ru

Ерохина Лариса Алексеевна — канд. техн. наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства, Ухтинский государственный технический университет. Российская Федерация, 169300, г. Ухта, ул. Первомайская, 13, tosha_23@mail.ru

N. S. Maierova, L. A. Erokhina

ABOUT FORMATION OF STRUCTURAL DENSITY OF CEMENT STONE WITH ADDITIVE OF ABUNDANT GLASS SAND SIFTING

The article provides the ways of improvement of the quality of concrete that can be used without additional expenses and imported materials, or density adjustment and mobility of mortar mixes. The authors propose to add a sealant to a concrete mix — available abundant finely dispersed fraction of glass sand <0,16 mm. The tests proving its positive effect on density, stability and frost resistance of heavy concrete are described.

Key words: filler, glass sand sifting, water reduction, water retaining capacity, microsilica, rheology, intergranular porosity, density.

REFERENCES

1. Shmit'ko E. I., Pertsev V. T., Krylova A. V., Borisova N. A., Smol'yaninova S. P. [Concrete and Soluble Mixtures to Restore Bridge Structures]. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo* [News of higher educational institutions. Construction], 2005, no. 1, pp. 20—26.
2. Skarendahl A. The present — The future. *3rd Int. RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete*. 2003. Pp. 6—14.
3. Usharov-Marshak A. V. [Additives in concrete: progress and problems]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2006, no. 10, pp. 8—11.
4. Caldarone M. *High-Strength Concrete: a practical guide*. First public — Taylor & Francis. shed 2009 in the USA and Canada. 252 p.
5. Altcin P. C. *High Performance Concrete*. E & FN Spon, 2004. 140 p.
6. Kalashnikov V. I., Moroz M. N., Tarakanov O. V., Kalashnikov D. V., Suzdal'tsev O. V. [New Ideas about Action Mechanism of Superplasticizers Grinded Jointly with Cement or Mineral Rocks]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2014, no. 9, pp. 70—76.
7. Kardumyan G. Shrinkage compensated concretes. With low cement content for waterproof structures "Whitebath". *18 Int. Baustofftagung*. Weimar, 2012. Band 2. Pp. 763—770.
8. Karthikeyan H. Obala. *Improving Concrete Quality*. CRC Press 2015 by Taylor & Francis Group LLC. 192 p.
9. Neville A. M. *Concrete Technology*. Longman Group UK Limited. Second ed., 2010. 460 p.
10. Kalashnikov V. I. [Through rational rheology to the future of concrete. From high-strength and ultra-high-strength concrete of the future to superplasticized concrete of general purpose of the present]. *Tekhnologiya betonov* [Technology of concrete], 2008, no. 1, pp. 22—26.
11. Falikman V. R., Petushkov A. V. Development of Russian Market of Nanotechnology Construction Products till 2020. *Nanotechnology in Construction: 4th International Symposium 2012*.
12. Liblang R., Ringvel'ski D. [Influence of rapid mixing on properties of ultra-strength concrete]. *CPI*, 2012, no. 3, pp. 32—35.
13. Babkov V. V., Mokhov V. N., Kapitonov S. M., Komokhov P. G. *Strukturoobrazovanie i razrushenie tsementnykh betonov* [Structure formation and destruction of cement concrete]. Ufa, 2002. 376 p.
14. Amosova O. E. [Coordination number and packing of isometric particles of gravitation settling]. *Geologiya i mineral'nye resursy Evropeiskogo severo-vostoka Rossii. T. IV* [Geology and mineral resources of the European North-East of Russia. Vol. IV]. Syktyvkar, 1999. Pp. 135—140.
15. Kaprielov S. S., Batrakov V. G., Sheinfel'd A. V. [Modified concrete of new generation: reality and prospects]. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete], 1999, no. 6, pp. 6—10.
16. Chistov Yu. D., Khvastin M. A. [Scientific and technical principals of production and use of sandy concrete of compact and cellular structure]. *Tekhnologiya betonov* [Technology of concrete], 2005, no. 1, pp. 34—35.

For citation:

Maiorova N. S., Erokhina L. A. [About formation of structural density of cement stone with additive of abundant glass sand sifting]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 69—79.

About authors:

Maiorova Natal'ya Sergeevna — Senior Lecturer Industrial and Civil Engineering Department, Ukhta State Technical University. 13, Pervomayskaya St., Ukhta, 169300, Russian Federation, tosha_23@mail.ru

Erokhina Larisa Alekseevna — Candidate of Engineering Science, Docent of Industrial and Civil Engineering Department, Ukhta State Technical University. 13, Pervomayskaya St., Ukhta, 169300, Russian Federation, tosha_23@mail.ru

УДК 666.972.16:667.6

А. В. Тухарели, Т. К. Акчурин

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

**ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОРГАНИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ
ВОДНОЙ ДИСПЕРСИИ АКРИЛОВОГО МОНОМЕРА В СОСТАВАХ
МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ**

Рассмотрена возможность использования техногенных отходов органической природы в качестве химической добавки гидрофобизирующего действия, позволяющей увеличить прочность, плотность бетонной композиции, придать бетону специальные свойства, такие как водостойкость и стойкость в агрессивных средах. Это позволит использовать полученные модифицированные бетонные композиции при возведении строительных конструкций подземной части зданий, при строительстве гидротехнических объектов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: цементные бетоны, модифицирующие добавки, органическое техногенное сырье.

Повышение эффективности и качества бетонных композиций в полной мере не может быть достигнуто без использования химических добавок, что является весьма актуальной задачей технологии бетона, как и адаптация специфических, местных компонентов к новым технологическим возможностям создания бетонов нового поколения. Бетоны нового поколения можно классифицировать как высокотехнологичные бетонные смеси и композиции с добавками, приобретающие и сохраняющие требуемые свойства при твердении и службе в любых эксплуатационных условиях. Растущая многокомпонентность бетонов проявляется в сочетании минеральных и химических добавок, фракционного мелкого и крупного заполнителя, полимерной и стальной фибры. Адекватны и значительные системные эффекты в регулировании составов, структуры и свойств бетонной смеси и бетона [1—6].

Достаточно широкая номенклатура химических добавок отечественного и импортного производства для растворов и бетона усложняет их выбор за счет стремления производителей бетона улучшить его свойства путем модифицирования, снизить расход цемента, уменьшить энергетические затраты при производстве железобетона, а стоимость добавок должна быть минимальной при стабильных показателях их качества. Это весьма непростая задача, которую можно решить при использовании различных отходов и сопутствующих продуктов многих отраслей промышленности в качестве минеральных и химических модификаторов бетона. Следует учесть, что стоимость традиционных товарных химических добавок, как правило, выше тех, которые производятся на основе вторичного сырья [7—10].

Промышленные отходы предприятий Волгоградской области являются сложными по составу минеральными и органическими соединениями, обладающими различными химическими и физическими свойствами. Большая их часть экспериментально проверена на кафедре строительных материалов и специальных технологий ВолгГАСУ на возможность использования их для производства строительных композиционных материалов, а также в качестве добавок или составляющих, улучшающих основные свойства строительных композиций.

Среди добавок органической природы научный и практический интерес представляют отходы производства лакокрасочных материалов (ЛКМ), в частности водно-дисперсионных ЛКМ. Особенностью состава акриловой краски является то, что в качестве связующего вещества выступает акриловая полимерная эмульсия, самостоятельно применяющаяся при изготовлении полимерцементных растворов. Состав акриловой краски очень прост: пигмент, вода и акриловая смола, выступающая в качестве связующего компонента. Жидкие отходы в виде дисперсий, образующиеся при зачистке оборудования, содержат остатки пленкообразующего вещества и твердые частицы пигмента и, как правило, подлежат утилизации — вывозятся на мусоросжигательные заводы.

Отход лакокрасочного производства — органическая добавка водной дисперсии акрилового мономера (ВДАМ), по своим физическим свойствам находится на первой стадии пленкообразования, при которой частицы сближены до обратимого соприкосновения. Таким образом, данный факт дает авторам возможность исследовать водный раствор дисперсной фазы в качестве модифицирующей добавки бетонов [11, 12].

Целесообразность применения ВДАМ в бетонах определяли по достижению различных технологических и экономического эффектов при эксплуатации изделий из модифицированных составов. Эффективность ВДАМ оценивали сравнением показателей качества бетонных смесей и бетонов контрольного и модифицированного составов. В качестве контрольного образца выбран состав мелкозернистого бетона как наиболее распространенного строительного материала для ограждающих, несущих конструкций, в качестве защитного облицовочного слоя конструкций для защиты от воздействий агрессивных сред. Особенности мелкозернистого бетона обусловлены его структурой: высокой степенью однородности и мелкозернистости, большим процентом содержания цементного камня, отсутствие жесткого каменного скелета, повышенными значениями пористости и удельной поверхности твердой фазы.

Наряду с оценкой влияния добавки ВДАМ на изменения физико-механических характеристик бетона, изменение его водоотталкивающих свойств рассматривалось как один из основных положительных эффектов модификации. Эффективность ВДАМ как гидрофобизирующей добавки определяли по степени уменьшения водопоглощения бетона, использовали средства испытания и вспомогательные устройства по ГОСТ 10180, ГОСТ 10181.1 и ГОСТ 12730.3.

Показатель эффективности действия добавки оценивали согласно ГОСТ 24211—91. Были изготовлены 5 серий образцов, количество вводимой добавки: 0,3, 0,5, 1, 2, 3 от массы вяжущего, 0-я серия — контрольные образцы.

Рост плотности и прочности при сжатии образцов мелкозернистого бетона, модифицированных ВДАМ (рис. 1, а, б), составил около 10 и 30 % соответственно. Снижение пористости и показателя водопоглощения составил около 60 и 65 % соответственно (рис. 1, в, г) при варьировании количества вводимой добавки ВДАМ от 0,3 до 3 % (рис. 1, а—г). Причем при введении ВДАМ в количестве от 1 до 3 % наблюдается некая тенденция замедления изменения физико-механических показателей, что говорит о нецелесообразном использовании дозировки модификатора более 1 % (рис. 1, а—г).

Проведенные нами предварительные исследования показали возможность и целесообразность использования в технологии цементных бетонов модифицирующей органической добавки лакокрасочного производства на основе водной дисперсии акрилового мономера (ВДАМ).

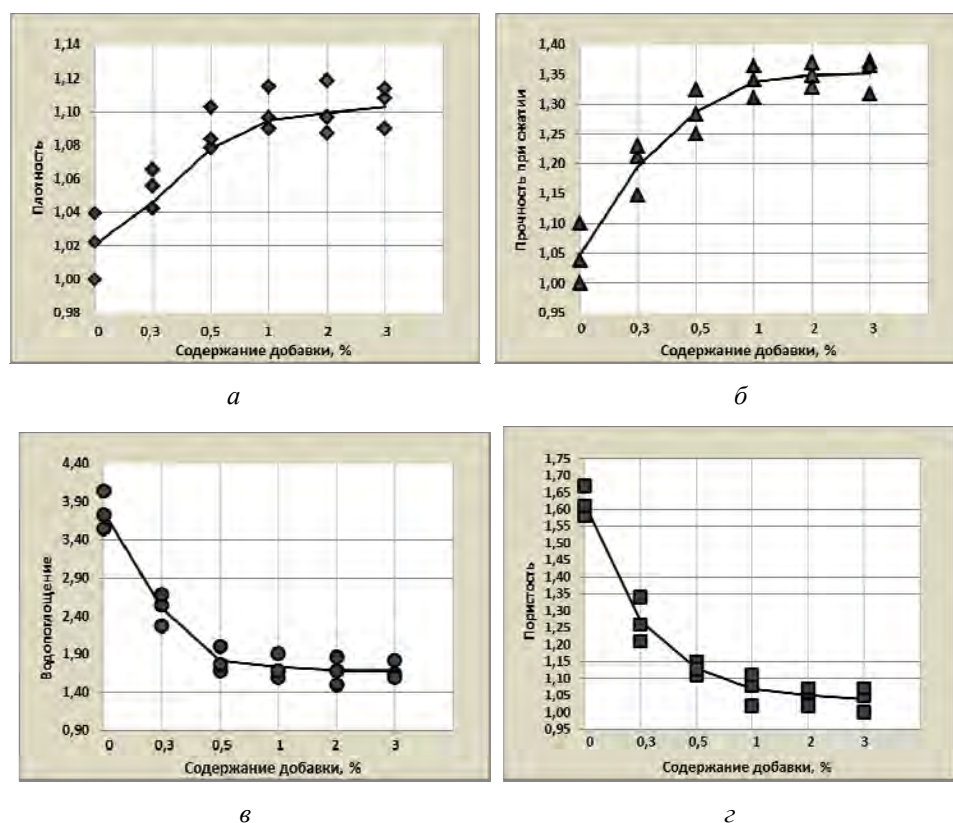


Рис. 1. Относительные физико-механические характеристики бетонных образцов в зависимости от % содержания полимерной добавки

Изменение и улучшение физико-механических свойств модифицированного мелкозернистого бетона объясняется процессом формирования твердого покрытия на частицах композиции, который начинается с усиления взаимодействия между частицами водной дисперсии. Вязкость дисперсии резко повышается, она становится гелеобразной. Затем происходит сжатие геля за счет дальнейшего удаления воды из пленки и разрушения имеющихся на поверхности глобул адсорбционно-гидратных оболочек. Коагуляционные контакты между частицами заменяются на конденсационные. Частицы теряют шарообразную форму и принимают вид плотно уложенных многогранников. Заключительный этап формирования твердого покрытия состоит в ликвидации межфазной границы — слиянии глобул. По мере испарения воды запускается механизм пленкообразования, покрытие приобретает водостойкость. Пленкообразование напоминает схватывание цементного раствора: в процессе гидратации он может разбавляться водой, а после схватывания — становится устойчивым к воде [7, 9].

Поровое пространство бетонной композиции при ее модификации изменяется, частично открытые поры становятся замкнутыми благодаря образованию полимерных мембран, поверхность же другой части открытых пор покрывается полимерной пленкой, при этом бетон приобретает гидрофобные свойства (водопоглощение значительно снижается). Немаловажным фактом является то, что ВДАМ отличается нейтральностью по отношению к другим материалам и способна сопротивляться проникновению воды, в том числе и под давлением.

Цемент в бетонной смеси, затворенный водной дисперсией мономера, на первой стадии твердения 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 [7]. Поэтому не менее важным фактором, чем влияние количества добавки на прочностные характеристики бетона, является величина водоцементного отношения. Для сопоставимости результатов испытаний цементных бетонов с различным содержанием модифицирующей добавки и различным водоцементным отношением в зависимости от возраста бетонных образцов результаты исследований представлены (рис. 2) в относительных единицах прочности.

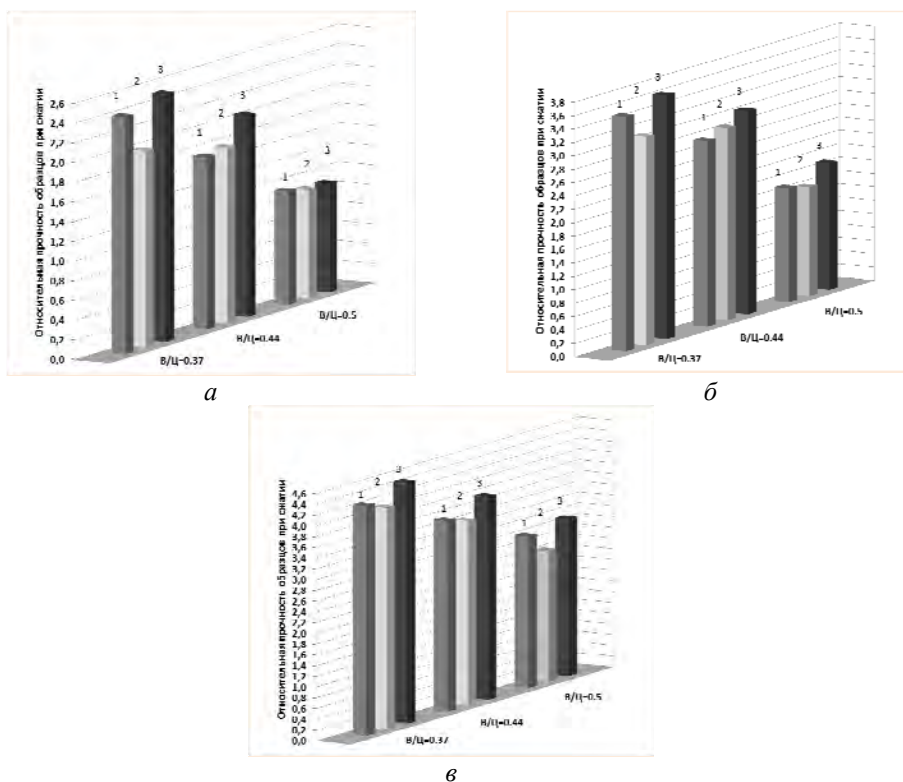


Рис. 2. Относительная прочность бетонных образцов при сжатии в зависимости от % содержания полимерной добавки и водоцементного отношения в возрасте: *a* — 7 сут, *b* — 14 сут, *v* — 30 сут; 1 — контрольные образцы, 2 — добавка 0,5 %, 3 — добавка 1,0 %

Модифицированный бетон как композиция приобретает свойства, заимствованные у каждого компонента. С одной стороны, полимерные добавки, увеличивая предельную сжимаемость бетона, способствуют увеличению его прочности. С другой стороны, большее содержание воды затворения в композиции препятствует цементирующим новообразованиям, возникающим при гидратации минерального вяжущего, и способствует образованию пространственной структурной матрицы. На этом основании можно сделать вывод, что адгезия полимерных связующих значительно выше, чем минеральных связующих, поэтому композит приобрел большие упруго-пластические свойства, что и послужило причиной значительного роста прочности материала.

Анализ полученных данных показал, что с увеличением водоцементного отношения с 0,37 до 0,5 прочность уменьшается в большей степени у образцов с меньшим количеством модифицирующей добавки в составе бетона.

Применение органической модифицирующей добавки ВДАМ уменьшает дефектность структуры цементного бетона, увеличивает адгезионные силы сцепления контактной зоны, что значительно улучшает его структурно-механические характеристики.

Полифункциональность действия химических добавок, т. е. способность одновременно вызывать несколько эффектов, является преимуществом добавок комплексного действия, наряду со способностью усилить какой-либо эффект по принципу аддитивности. Сочетая типы и количественные соотношения различных добавок, можно направленно регулировать структуру и, соответственно, физико-механические свойства цементного камня и бетона или заменить сочетание различных типов добавок одним модификатором комплексного действия, например таким как ВДАМ.

В соответствии с классификацией добавок по ГОСТ 24211—2003 суперпластификаторы (СП) занимают первое место среди добавок за счет способности регулировать свойства бетонных смесей, обусловленной чрезвычайно высоким эффектом разжижения бетонной смеси без снижения прочности бетона во все сроки испытания. Пластифицирующий эффект добавок СП обусловлен их принадлежностью к категории поверхностно-активных веществ, что приводит к образованию на поверхностях частиц цемента и тонкодисперсной фракции заполнителей мономолекулярных адсорбционных оболочек, снижающих внутреннее трение в бетонной смеси. При этом наблюдается пептизирующее действие добавки, противодействующее образованию флокулов из цементных частиц в процессе гидратации, что приводит, в свою очередь, к увеличению удельной поверхности частиц и оказывает положительное влияние на интенсивность процессов гидратации и структурообразования цементного камня.

Водная дисперсия ВДАМ — это система, состоящая из двух взаимно не смешиваемых жидких фаз, одна из которых диспергирована в другой в виде дисперсной фазы, вторая (вода) вмещает первую в качестве дисперсионной среды. Растворимость акрилового мономера в воде является мерой его полярности, она достаточно велика. Введенная в композицию добавка адсорбируется на границе раздела фаз, образуя мономолекулярный слой, ориентированный строго определенным образом. Эти адсорбированные слои изменяют соотношение сил в системе, что способствуют снижению вязкости добавки в

результате взаимодействия с отдельными цепями и звеньями макромолекул. Конформация цепей мономера способствуют разворачиванию макромолекул и образованию из них плотного ориентированного слоя на границе раздела фаз, проявляя тем самым пластифицирующий эффект. Такое действие ВДАМ позволяет увеличить число контактов макромолекул с поверхностью твердых частиц цементной композиции и усилить адсорбционное взаимодействие в межфазной зоне, что оказывает влияние практически на все важные строительно-технические свойства бетонов (рис. 3). К ним относятся значительное снижение водопоглощения и, как следствие, повышение морозостойкости модифицированного бетона, снижение пористости, рост плотности и прочности при сжатии. Все вышесказанное подтверждает возможность использования ВДАМ в качестве добавки с пластифицирующим и гидрофобным эффектом (комплексной) [13—15].

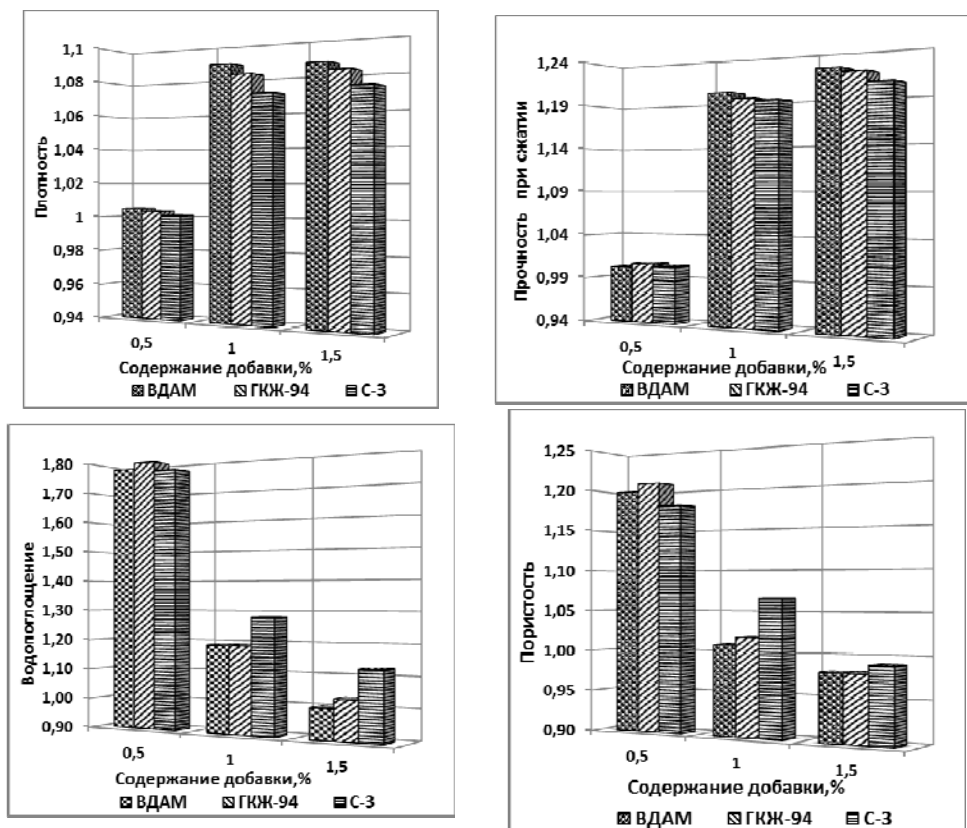


Рис. 3. Изменение плотности, прочности при сжатии, водопоглощения и пористости бетонных композиций (в относительных единицах), модифицированных гидрофобно-пластифицирующими добавками в зависимости от количества и вида добавок

Преимуществом ВДАМ в сравнении с пластифицирующими добавками (С-3, GKЖ-94) является также его достаточно низкая стоимость и доступность. Для общепринятых пластифицирующих добавок как отечественного, так и импортного производства характерна высокая стоимость, дефицитность и ограниченная сырьевая база.

Анализ полученных экспериментальных данных обозначил область использования модифицированного ВДАМ бетона в строительстве. Это бетон, предназначенный для конструкций подземных частей зданий и сооружений, который должен обладать свойствами, необходимыми для длительной нормальной службы этих конструкций в данных климатических и эксплуатационных условиях. Из-за агрессивного воздействия влаги возможно как отсыревание конструкций, так и их разрушение. Влага, накопившаяся в грунте из-за обильных дождей или таяния снега, приводит к отсыреванию подземных частей зданий или сооружений; неравномерный состав грунта и регулярная просадка почвы могут вызвать смещение конструктивных элементов. Кроме того, бетон, являющийся основной составляющей большинства подземных конструкций, характеризуется способностью легко впитывать влагу. При минусовых температурах жидкость, скопившаяся в порах бетонных конструкций, превращается в лед. При этом она расширяется, способствуя образованию микротрещин, которые впоследствии приводят к разрушению конструкции [16, 8, 11, 12].

Подземные части строений подвергаются воздействию двух типов влаги: напорной воды и капиллярной. В зависимости от того, какому типу воздействия должна препятствовать гидроизоляция, применяют противокapиллярную либо противонапорную изоляцию фундаментов и подвалов. Наружная обмазочная изоляция, которой в том числе выполняется герметизация швов, препятствует поступлению напорных почвенных вод. Обмазочная изоляция, нанесенная внутри конструкций, защищает их от капиллярной влаги. Недостатком подобной изоляции является то, что срок ее эксплуатации не превышает 5—6 лет. Поэтому для создания надежного барьера для капиллярной влаги водонепроницаемые бетоны высокой плотности являются незаменимым материалом, в том числе модифицированные гидрофобизирующими полимерными добавками, которые заполняют микротрещины и поры бетонных конструкций, препятствуя их разрушению, что способствует повышению прочности бетона, его морозостойкости и водонепроницаемости до W8—W12.

Предлагаемый авторами модификатор бетона на основе отходов лакокрасочного производства — органическая добавка водной дисперсии акрилового мономера (ВДАМ) — может составить конкуренцию импортным гидрофобизаторам подобного типа, придавая строительным изделиям улучшенные эксплуатационные характеристики. Проведенное 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Superplasticizers for concrete: fundamentals, technology and practice / N. Spiratos, N. Page, Mailvaganam, V. M. Malhotra, C. Jolicoeur. Quebec, 2006. 322 p.
2. Химические и минеральные добавки в бетон / под ред. А. В. Ушерова-Маршака. Харьков : Колорит, 2005. 280 с.
3. Neville A. M. Właściwości betony. Wyd. 4. Kraków, 2000. 874 s.
4. Collepardi M. The new concrete. Italy, 2006. 421 p.

5. Edward G., Nawy P. Fundamentals of High Performance Concrete. Sec. ed. Willy, 2001. 302 p.
6. Ma j. Experimental onvestigation for the product as ultra — high strength concrete // LACER. 2001. № 6. Pp. 215—226.
7. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.
8. Баженов Ю. М., Демьянова В. С., Калашиников В. И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 370 с.
9. Ушеров-Маршак А. В. Добавки в бетон: прогресс и проблемы // Строительные материалы. 2006. № 10. С. 8—12.
10. Вовк А. И. О некоторых особенностях применения гиперпластификаторов // Технологии бетона. 2008. № 6. С. 12—13.
11. Тухарели А. В., Акчури Т. К. Технология модифицированных эффективных цементных бетонов с использованием отходов лакокрасочного производства // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2014. № 2(8). С. 48—52
12. Тухарели А. В., Акчури Т. К. Перспективы и возможности использования отходов лакокрасочного производства для модификации цементных бетонов // Ресурсо- и энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона. Саратов : Сарат. гос. техн. ун-т, 2014. С. 92—97.
13. Пособие по применению химических добавок в производстве сборного железобетона. М. : НИИЖБ, 1991. 35 с.
14. Руководство по применению химических добавок в бетоне. М. : Стройиздат, 1985. 64 с.
15. Рекомендации по применению добавок суперпластификаторов в производстве сборного и монолитного железобетона. М. : НИИЖБ, 1987. 90 с.
16. Опыт возведения уникальных конструкций из модифицированных бетонов на строительстве комплекса «Федерация» / С. С. Каприелов, А. В. Шейнфельд, Ю. А. Киселева, О. В. Пригоженко, Г. С. Кардунян, В. И. Ургалов // Промышленное и гражданское строительство. 2006. № 8. С. 20—22.

© Тухарели А. В., Акчури Т. К., 2015

Поступила в редакцию
в ноябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Тухарели А. В., Акчури Т. К. Оценка возможности использования органической добавки водной дисперсии акрилового мономера в составах мелкозернистых бетонов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 80—88.

Об авторах:

Тухарели Анастасия Викторовна — аспирант кафедры строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, asyzv@yandex.ru

Акчури Талгат Кадимович — канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

A. V. Tukhareli, T. K. Akchurin

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING ORGANIC ADDITIVE OF AQUEOUS DISPERSION OF ACRYLIC MONOMER IN THE STRUCTURE OF FINE GRANED CONCRETE

The authors consider the possibility of using technogenic wastes of organic nature as a chemical additive of hydrophobic effect that allows to increase strength, density of concrete composition, give concrete special properties such as water resistance and rigidity in corrosion environment. It allows to use the received modified concrete compositions when constructing building structures of underground parts of buildings and hydropower facilities.

Key words: cement concretes, modifying additives, organic technogenic raw materials.

REFERENCES

1. Spiratos N., Page N., Mailvaganam, Malhotra V. M., Jolicoeur C. *Superplasticizers for concrete: fundamentals, technology and practice*. Quebec, 2006. 322 p.
2. Usharov-Marshak A. V., ed. *Khimicheskie i mineral'nye dobavki v beton* [Chemical and mineral additives in concrete]. Khar'kov, Color Publ., 2005. 280 p.
3. Neville A. M. *Właściwości betony*. Wyd. 4. Kraków, 2000. 874 s.
4. Collepardi M. *The new concrete*. Italy, 2006. 421 p.
5. Edward G., Naway P. *Fundaments of High Performance Concrete*. Sec. ed. Willy, 2001. 302 p.
6. Ma j. Experimental onvestigation for the product as ultra — high strength concrete. *LACER*, 2001, no. 6, pp. 215—226.
7. Ratinov V. B., Rosenberg T. I. *Dobavki v beton* [Additive in concrete]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1989. 188 p.
8. Bazhenov Yu. M., Dem'yanova V. S., Kalashnikov V. I. *Modifitsirovannye vysokokachestvennye betony* [Modified concrete of high quality]. Moscow, ASV Publ., 2006. 370 p.
9. Usharov-Marshak A. V. [Additives in concrete: progress and problems]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2006, no. 10, pp. 8—12.
10. Vovk A. I. [About some features of use of superplasticizers]. *Tekhnologii betona* [Technology of concrete], 2008, no. 6, pp. 12—13.
11. Tukhareli A. V., Akchurin T. K. [Technology of modified effective cement concrete with use of waste of paint and varnish production]. *Inzhenerno-stroitel'nyi vestnik Prikaspiya* [Engineering and construction bulletin of Prikaspii], 2014. no. 2(8) pp. 48—52.
12. Tukhareli A. V., Akchurin T. K. [Prospects and possibilities of use of waste of paint and varnish production for modification of cement concrete]. *Resurso- i energoeffektivnye tekhnologii v stroitel'nom komplekse regiona* [Resource-and power effective technologies in a construction complex of the region]. Saratov, Saratov State Technical University Publ., 2014. Pp. 92—97.
13. *Posobie po primeneniyu khimicheskikh dobavok v proizvodstve sbornogo zhelezobetona* [Manual on use of chemical additives in production of prefabricated concrete]. Moscow, NIIZHB Publ., 1991. 35 p.
14. *Rukovodstvo po primeneniyu khimicheskikh dobavok v betone* [Manual on use of chemical additives in concrete]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1985. 64 p.
15. *Rekomendatsii po primeneniyu dobavok superplastifikatorov v proizvodstve sbornogo i monolitnogo zhelezobetona* [Recommendations on use of additives of superplasticizer in production of prefabricated and cast reinforced concrete]. Moscow, NIIZHB Publ., 1987. 90 p.
16. Kaprielov S. S., Sheinfel'd A. V., Kiseleva Yu. A., Prigozhenko O. V., Kardumyan G. S., Urgapov V. I. [Erection of unique structures made of modified concrete and used for construction of the complex "Federation" MMDTs "Moscow—City"]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2006, no. 8, pp. 20—22.

For citation:

Tukhareli A. V., Akchurin T. K. [Assessment of the possibility of using organic additive of aqueous dispersion of acrylic monomer in the structure of fine grained concrete]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 80—88.

About authors:

Tukhareli Anastasiya Viktorovna — Postgraduate Student of Construction Materials and Special Technologies Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, asyzv@yandex.ru

Akchurin Talgat' Kadimovich — Candidate of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Materials and Special Technologies Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 666.972.16:667.6

А. В. Тухарели, Т. К. Акчурин

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

**ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ
МЕЛКОДИСПЕРСНОЙ БЕТОННОЙ КОМПОЗИЦИИ,
МОДИФИЦИРОВАННОЙ ВОДНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ АКРИЛОВОГО МОНОМЕРА**

Дан анализ процессов структурообразования мелкозернистой композиции, модифицированной водной дисперсией акрилового мономера (ВДАМ). Использован расширенный анализ в режимах EDS (энергодисперсионного анализа), WDS (волновой микроанализ) и EBSD (дифракции обратно отраженных электронов) двулучевой системы Versa 3D™ DualBeam™ с использованием источников электронной эмиссии. Посредством анализа карт рентгена и диаграмм дана оценка влияния ВДАМ на процессы структурообразования модифицированной композиции.

Ключевые слова: цементные бетоны, модифицирующие добавки, органическое техногенное сырье, структурообразование.

Появление в строительной практике и расширение области применения высокотехнологичных бетонов нового поколения, называемых эффективными, характеризуется использованием при их изготовлении различных компонентов. Это вяжущие низкой водопотребности, наполненные и тонкомолотые, быстротвердеющие и особобыстротвердеющие цементы, суперпластификаторы, воздухововлекающие и поризующие добавки, армирующие волокна, высокодисперсные порошки, получаемые с применением микро- и наноразмерных структурных составляющих. Переход таких бетонов на новый уровень строительно-технических свойств и возможностей является следствием модифицирования их структуры по сравнению с традиционными видами бетонов прежних поколений. Возрастающие на несколько порядков протяженность поверхности раздела фаз в структуре новых композиций, а также числа физических и физико-химических контактов в единице объема материала, изменение размерно-геометрических и энергетических характеристик пор — все это специфические признаки структуры высокотехнологичных бетонов. Модификация структуры, несомненно, является наиболее рациональным подходом в создании бетонов нового поколения. Особое место в технологии бетона занимают оптимизация гранулометрического состава; гидратация цемента; регулирование свойств жидкой фазы и гидратных новообразований путем изменения их минерального и гранулометрического состава; применение минеральных добавок, электролитов и пластификаторов; формирование рациональной поровой структуры цементной матрицы, так как основными компонентами бетонов, отвечающими за формирование структуры и свойств, были и остаются цемент и заполнители.

Свойства строительных композиционных материалов в значительной степени определяются их составом и поровой структурой. Поэтому для получения материалов с заданными свойствами важно иметь четкие представления о процессах формирования структуры и возникающих новообразований, что изучается на макро-, микро- и молекулярно-ионном уровне.

Наиболее распространенными физико-химическими методами анализа, изучающими процессы структурообразования, являются микроскопические, позволяющие определять характерные для каждого минерала оптические свойства, которые обусловлены его внутренним строением. К главным оптическим свойствам цементного клинкера, цементного камня, бетонов, стекла, огнеупоров, шлаков, керамики и т. д. относят показатели светопреломления, силу двойного преломления, осьность, оптический знак, цвет и др. Для проведения этих исследований применяют поляризационные микроскопы: микроскопию в проходящем свете — для изучения прозрачных шлифов материалов; микроскопию в отраженном свете — полированных шлифов; для образцов в виде порошков исследования проводят в специальных иммерсионных аппаратах (иммерсионные жидкости обладают определенными показателями светопреломления).

С помощью электронного микроскопа можно изучить: форму и размеры отдельных субмикроскопических кристаллов; процессы роста и разрушения кристаллов; процессы диффузии; фазовые превращения при термической обработке и охлаждении; механизм деформации и разрушения. Современные электронные микроскопы имеют полезное увеличение до 3 000 000 раз, что позволяет видеть частицы размером 0,3...0,5 нм за счет использования электронных лучей, волны которых во много раз короче видимого света, и поэтому становится возможным проникнуть в мир малых частиц.

Аналитическая сканирующая электронная микроскопия (АСЭМ) предоставляет возможность решать задачи изучения морфологии, фазового состава, контактных зон и взаимоотношения фаз, распределение элементов по площади. При падении электронного пучка на образец в нем возбуждается большая группа различных излучений. Помимо фотонов (катодолуминесценция) и рентгеновского излучения (микронзонд) возникают потоки вторичных и отраженных электронов. Регистрируя вторичные электроны, можно получать информацию о тонких особенностях рельефа образца. Отраженные электроны характеризуют изменения в среднем атомном номере образца и позволяют осуществлять фазовый анализ. На рис. 1 представлены новообразования цементного камня, полученные методом АСЭМ [1—3].

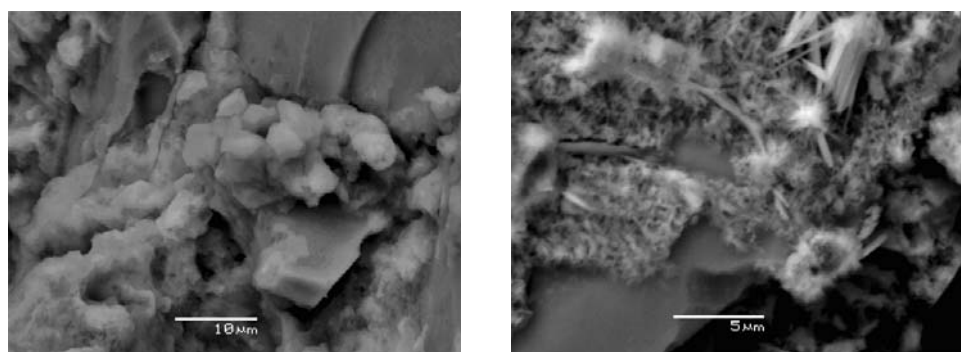


Рис. 1. Морфология новообразований цементного камня

Но метод АСЭМ обладает по сравнению с методом рентгеноспектрального микронзондового анализа (РСМА) более слабым термическим воздейст-

вием, имеет худший предел обнаружения и пригоден для анализа гидратированных фаз только при высокой локальности.

Для трехмерной визуализации образцов бетона, модифицированных водной дисперсией акрилового мономера (ВДАМ), их прототипирования и исследования в естественных условиях была использована универсальная двулучевая система Versa 3D™ DualBeam™, которая на сегодня является одной из самых прогрессивных в области применения источников электронной эмиссии, позволяющей получать четкие, контрастные электронные изображения образцов и более высокий ток электронного луча для расширенного анализа в режиме EDS (энергодисперсионного анализа), WDS (волновой микроанализ) и EBSD (дифракции обратно отраженных электронов).

Дифракция обратно-отраженных электронов (EDS) используется для анализа текстуры или преимущественных ориентаций моно- или поликристаллического материала, исследования морфологии, дефектов, микродеформаций, изучения зерен и межзеренных границ, распределения фаз и картирования кристаллических ориентаций.

Электронная дифракция обратного рассеяния (EBSD) является микроструктурно-кристаллографической техникой для исследования кристаллографической ориентации многих материалов, которые используются для объяснения структуры, или предпочтенной ориентации любого прозрачного или поликристаллического материала.

Одновременная коллекция EDS/EBSD увеличивает возможности обоих методов, когда типовая химия или фаза не могут быть дифференцированы через один только EDS из-за подобного состава или структура не может быть решена с одним только EBSD из-за неоднозначных решений для структуры. Положения фаз определяются в картах рентгена, а измеренная интенсивность EDS дается в диаграммах для каждого элемента. Для каждой фазы химические диапазоны интенсивности собираются выбрать зерно. Зарегистрированная химия определяет, какая фаза кристаллической структуры используется для индексации каждого пункта.

Использование EBSD с длиной волны дисперсионной спектроскопии рентгена (WDS) и/или энергией дисперсионной спектроскопии рентгена (EDS) обеспечивает более глубокое понимание свойств экземпляра [4—6].

При анализе трехмерного изображения контрольных образцов мелкозернистого бетона (рис. 2) отчетливо видны многочисленные поверхности раздела в структуре бетона (28 сут), влияющие на физико-механические характеристики исходной мелкозернистой композиции. Предпосылкой для улучшения структурообразования бетона явился фактор, связанный с границами раздела «цементная матрица — заполнитель», где отмечаются размерные дефекты структуры и их совпадение с характерными для различных физических явлений размерами в зоне межфазного контакта. Этот фактор является одним из основных показателей для существенного изменения свойств бетона путем его модификации ВДАМ [13—15].

Водорастворимая добавка ВДАМ, обладающая специфическим строением и рядом особых характеристик, осуществляет целенаправленное воздействие на процессы, протекающие в период формирования структуры цементной мелкозернистой композиции (рис. 3). Эффективность управления структурными изменениями в модифицированной цементной системе обусловлена

получением более плотной структуры композита, уменьшением порового пространства в просматриваемой области при повышении вяжущего потенциала цемента совместно с развитием пластифицирующего эффекта в модифицированной ВДАМ цементной матрице, что в свою очередь оказывает влияние на направленное изменение механизма гидратации клинкерных минералов. А это обеспечит более высокое использование заложенного потенциала прочности кристаллогидратов, повысит качество совместной работы всех компонентов бетонной композиции.

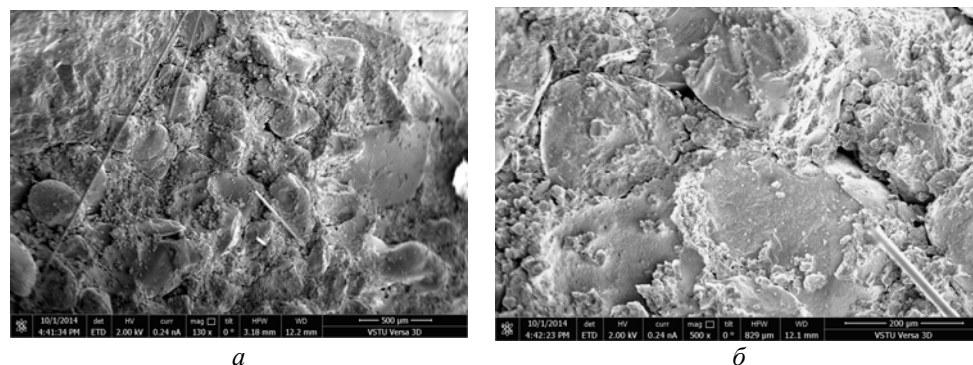


Рис. 2. Микроскопическое трехмерное изображение контрольных образцов мелкозернистого бетона при разной кратности увеличения: *а* — $\times 130$; *б* — $\times 500$

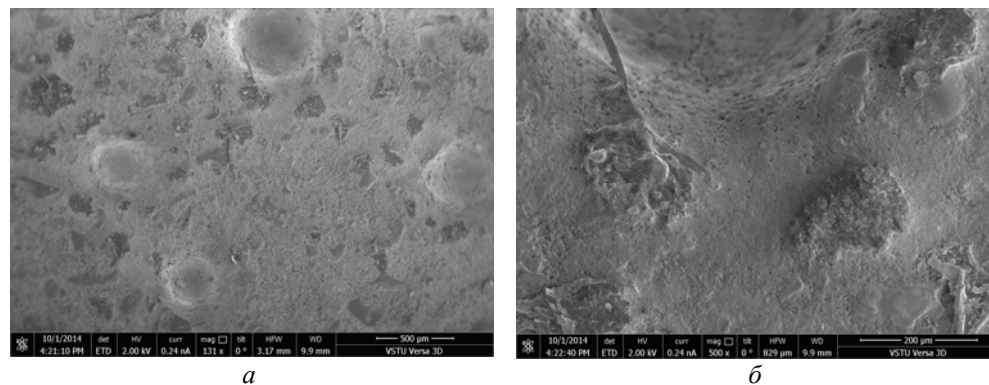


Рис. 3. Микроскопическое трехмерное изображение модифицированных ВДАМ образцов мелкозернистого бетона при разной кратности увеличения: *а* — $\times 131$; *б* — $\times 500$

Пластифицирующий эффект ВДАМ при ее введении в цементное вяжущее зависит от наличия в молекуле акрилового мономера углеводородного радикала и двойной связи (общая формула акрилатов $\text{CH}_2 = \text{CHC}(\text{O})\text{OR}$, где R — алкильный или арильный радикал), способных реагировать с минералами вяжущего или продуктами его гидратации, что улучшает технологические и эксплуатационные свойства. Модифицирующий эффект добавки ВДАМ проявляется как результат различных физических процессов, протекающих в твердеющей системе, а также за счет химических процессов на границе раздела фаз «цементный камень — зерно заполнителя», «цементный камень — поровая структура», что хорошо просматривается на микроскопическом трех-

мерном изображении модифицированных ВДАМ образцов мелкозернистого бетона (см. рис. 3) [7—10].

Гидрофобизирующие свойства добавки ВДАМ проявляются в формировании плотной и однородной структуры модифицированной композиции бетона. Уменьшается количество и размеры макропор (см. рис. 3). Макропоры имеют правильные окружные формы с ровными краями и размерами 0,5...0,05 мм с преобладанием пор размером 0,1 мм. Система равномерно распределенных пор с гидрофобизированной поверхностью в затвердевшем модифицированном бетоне снижает капиллярный подсос, уменьшает проницаемость бетона. Гидрофобизирующий эффект ВДАМ придает стенкам пор и капилляров в бетоне гидрофобные (водоотталкивающие) свойства. Механизм действия состоит в том, что при контакте с продуктами гидратации цемента ВДАМ осаждается в виде мельчайших капелек на стенках мелких пор и капилляров, образуя гидрофобные покрытия. В результате возникает контакт, имеющий обратный угол, при котором силы поверхностного натяжения выталкивают воду из пор. Многие органические вещества с резкой асимметрией в строении молекул вводятся в бетон с целью:

уменьшения смачивания стенок пор и капилляров, а также поверхности изделий;

воздухововлечения или газообразования, сопровождающегося гидрофобизацией поверхности образующихся газовых пор;

повышения связности и подвижности бетонной смеси, происходящих за счет равномерно распределенных в ней пузырьков воздуха или газа.

Эффективность гидрофобизирующих свойств ВДАМ оценивалась по степени уменьшения водопоглощения бетона (ГОСТ 30459—96).

Водоотталкивающие свойства бетона с применением гидрофобизирующей добавки ВДАМ наиболее эффективно могут быть использованы в строительстве гидротехнических сооружений.

Измеренная интенсивность EDS (рис. 4) дана в диаграммах для каждого элемента. Зарегистрированная химия определяет, какая фаза кристаллической структуры используется для индексации каждого пункта. Процесс интенсивного формирования гидратных составляющих и продуктов гидратации в контрольном бездобавочном образце обусловлен линиями кальция, кремния и кислорода.

Одновременно с гидросиликатами при гидратации СЗС происходит гидратация оксида кальция, являющегося одним из основных компонентов затвердевающего цементного камня и оказывающего значительное влияние на образование гидросиликатов, гидроферритов и, возможно, других гидратных составляющих [11—12]. Гидроалюминаты кальция определяет линия алюминия (рис. 4, а). Наличие линии углерода (рис. 4, б) служит индексацией модифицирующей добавки ВДАМ на фоне образования продуктов гидратации цемента.

Влияние модификатора ВДАМ на процессы гидратации цемента оценивали по росту интенсивности линий химических элементов на диаграмме EDS (рис. 4, в). Снижение интенсивности линии углерода (рис. 4, в) свидетельствует об участии добавки ВДАМ в процессах структурообразования модифицированного мелкозернистого бетона на фоне значительного роста интенсивности линии кальция.

При управлении процессами гидратации и структурообразования цементных систем при введении добавки ВДАМ важным остается вопрос уста-

новления закономерностей между свойствами твердеющей цементной системы и бетона, с одной стороны, и дозировкой вводимой добавки — с другой.

Показатель эффективности действия добавки оценивали согласно ГОСТ 24211—91. Были изготовлены пять серий образцов, количество вводимой добавки — 0,3, 0,5, 1, 2, 3 % от массы вяжущего в сравнении с контрольным бездобавочным образцом.

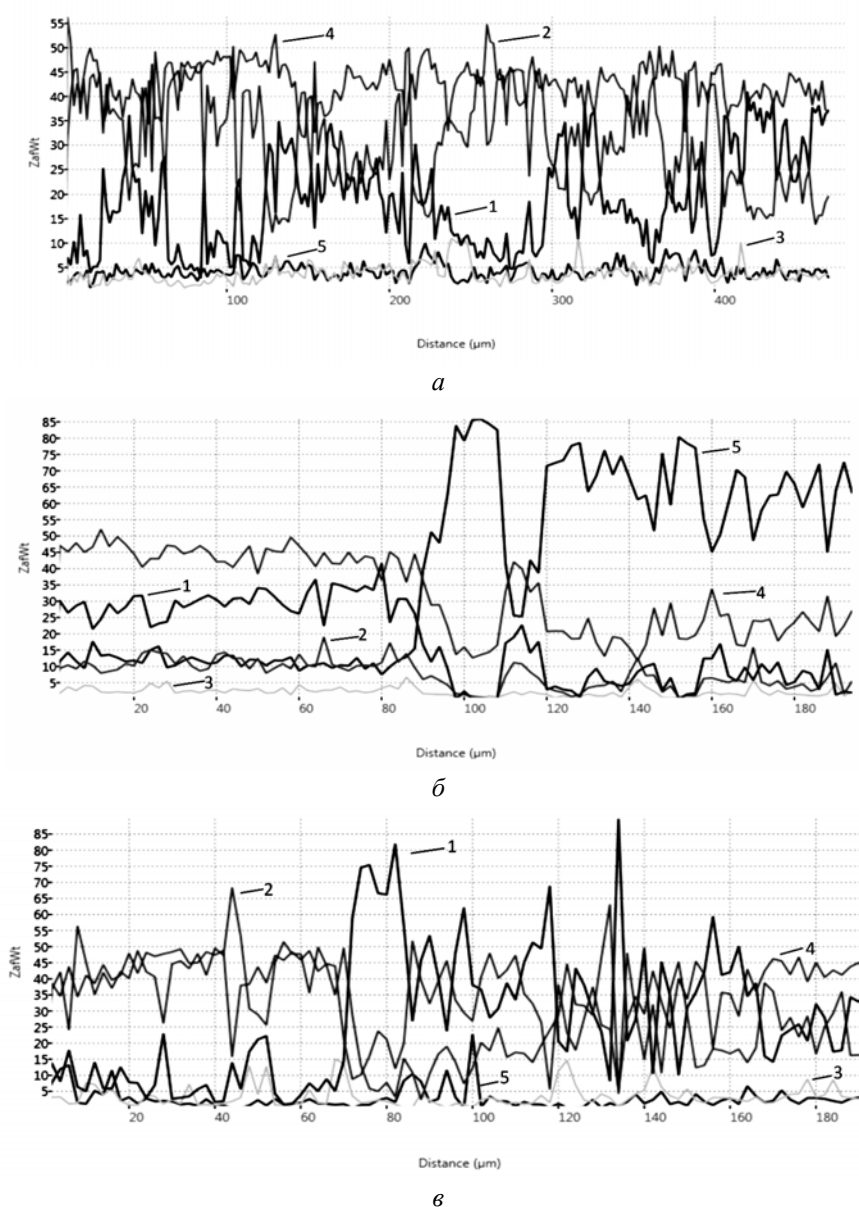


Рис. 4. Диаграммы измерения интенсивности химических элементов, характеризующих фазовый состав кристаллических структур бетона: *a* — контрольный бездобавочный образец в возрасте 14 сут; *б* — модифицированный ВДАМ образец бетона в возрасте 14 сут; *в* — модифицированный ВДАМ образец бетона в возрасте 28 сут: 1 — линия кальция (Ca); 2 — линия кремния (Si); 3 — линия алюминия (Al); 4 — линия кислорода (O); 5 — линия углерода (C)

Рост плотности и прочности при сжатии образцов мелкозернистого бетона, модифицированных ВДАМ, составил около 10 и 30 % соответственно. Снижение пористости и показателя водопоглощения составил около 60 и 65 % соответственно при варьировании количества вводимой добавки ВДАМ 0,3...3 %. При введении ВДАМ в количестве от 1 до 3% наблюдается тенденция замедления изменения физико-механических показателей, что говорит о нецелесообразном использовании дозировки модификатора более 1 %. Поэтому можно утверждать, что содержание ВДАМ должно быть минимальным, но достаточным для достижения необходимых физико-механических характеристик бетонной композиции.

Предварительные исследования показали возможность и целесообразность использования в технологии цементных бетонов модифицирующей органической добавки лакокрасочного производства на основе водной дисперсии акрилового мономера (ВДАМ).

Оптимизацию структуры, свойств и технологий производства бетона введением модификатора ВДАМ можно оценить как одно из прогрессивных направлений совершенствования процесса управления свойствами цементных композитов с высокоразвитой пространственной мелкозернистой и малопористой структурой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Adams B. L., Wright S. I., Kunze K. Orientation imaging: The emergence of a new microscopy // *Metallurgical and Materials Transactions A*. Vol. 24. № 4. 1993. Pp. 819—831.
2. Day A. *Developments in the EBSD technique and their application to grain imaging*. Ph. D. dissertation. University of Bristol, Bristol, England, 1993.
3. Deans S. R. *The Radon transform and some of its applications*. Wiley, New York, 1983.
4. Functional micro-concrete: The incorporation of zeolites and inorganic nano-particles into cement microstructures / S. L. Colston, D. O'Connor, P. Barnes, E. L. Mayes, S. Mann, H. Freimuth, W. Ehrfeld // *Journal of Materials Science Letters*. 2000. Vol. 19. № 12. Pp. 1085—1088.
5. Колохов П. Г., Харитонов А. М. Наноструктурная модель цементного камня для оценки свойств композиционного материала // *Популярное бетоноведение*. 2007. № 2(16). С. 125—127.
6. Hanahara S., Ichikawa M. Nanotechnology of cement and concrete // *Taiheiyo Cement Kenkyu Hokoku*. 2001. № 141. Pp. 47—58.
7. Баженов Ю. М. *Технология бетона : учебник*. М.: АСВ, 2003. 500 с.
8. *Технология бетона, строительных изделий и конструкций : учебник* / Ю. М. Баженов, Л. А. Алимов, В. В. Воронин, У. Х. Магдеев. М. : АСВ, 2004. 256 с.
9. Соломатов В. И., Тахиров М. К., Мд Тахер Шах. *Интенсивная технология бетонов*. М. : Стройиздат, 1989. 264 с.
10. Кузнецова Т. В., Сычев М. М., Осокин А. П. *Специальные цементы : учеб. пособие*. СПб. : Стройиздат, 1997. 314 с.
11. Горчаков Г. И. *Строительные материалы : учебник*. М. : Высш. шк., 1981. 160 с.
12. Физико-химические основы формирования структуры цементного камня / под ред. А. Г. Шпыновой. Львов : Изд-во Львовского гос. ун-та, 1981. 160 с.
13. Полак А. Ф. Теория гидратации вяжущих веществ // *Тр. НИИПромстроя*, 1976. С. 54—89.
14. Бутт Ю. М. *Технология вяжущих веществ*. М. : Высш. шк., 1965. 619 с.
15. Волженский А. В., Буров Ю. С., Колокольников В. С. *Минеральные вяжущие вещества*. М. : Стройиздат, 1979. 476 с.

© Тухарели А. В., Акчури Т. К., 2015

Поступила в редакцию
в ноябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Тухарели А. В., Акчурин Т. К. Исследования процессов структурообразования мелкодисперсной бетонной композиции, модифицированной водной дисперсией акрилового мономера // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 89—97.

Об авторах:

Тухарели Анастасия Викторовна — аспирант кафедры строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, asyzv@yandex.ru

Акчурин Талгат Кадимович — канд. техн. наук, проф., зав. кафедрой строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

A. V. Tukhareli, T. K. Akchurin

RESEARCH OF THE PROCESSES OF STRUCTURE FORMATION OF FINE GRANED CONCRETE COMPOSITION MODIFIED BY AQUEOUS DISPERSION OF ACRYLIC MONOMER

The analysis of processes of structure formation of fine grained compositions modified by aqueous dispersion of acrylic monomer is presented. The authors used advanced analysis in EDS mode (energy dispersive analysis), WDS (wave microanalysis) and EBSD (electron backscatter diffraction) of Versa 3D™ DualBeam™ dual-beam system using electron emission sources. Due to the analysis of X-ray maps and diagrams the impact assessment of VDM on the processes of structure formation of modified compositions is given.

Key words: cement concrete, modifying additives, organic technogenic raw materials, structure formation.

REFERENCES

1. Adams B. L., Wright S. I., Kunze K. Orientation imaging: The emergence of a new microscopy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1993, 24(4), pp. 819—831.
2. Day A. Developments in the EBSP technique and their application to grain imaging. Ph. D. dissertation. University of Bristol, Bristol, England, 1993.
3. Deans S. R. *The Radon transform and some of its applications*. Wiley, New York, 1983.
4. Colston S. L., O'Connor D., Barnes P., Mayes E. L., Mann S., Freimuth H., Ehrfeld W. Functional micro-concrete: The incorporation of zeolites and inorganic nano-particles into cement micro-structures. *Journal of Materials Science Letters*, 2000, 19(12), pp. 1085—1088.
5. Komokhov P. G., Kharitonov A. M. Nanostructured cement stone model to estimate the properties of the composite material. *Populyarnoe betonovedenie* [Popular concrete science], 2007, no. 2(16), pp. 125—127.
6. Hanehara S., Ichikawa M. Nanotechnology of cement and concrete. *Taiheiyo Cement Kenkyu Hokoku*, 2001, no. 141, pp. 47—58.
7. Bazhenov Yu. M. *Tekhnologiya betona : uchebnik* [Technology of concrete: textbook]. Moscow, ASV Publ., 2003. 500 p.
8. Bazhenov Yu. M., Alimov L. A., Voronin V. V., Magdeev U. Kh. *Tekhnologiya betona, stroitel'nykh izdelii i konstruktivnykh materialov : uchebnik* [Technology of concrete, construction products and structures: the textbook]. Moscow, ASV Publ. 256 p.
9. Solomatov V. I., Takhirov M. K., Md Takher Shakh. *Intensivnaya tekhnologiya betonov* [Intensive technology of concrete]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1989. 264 p.
10. Kuznetsova T. V., Sychev M. M., Osokin A. P. [Special cements: Proc. Benefit]. Saint-Petersburg, Stroiizdat Publ., 1997. 314 p.
11. Gorchakov G. I. *Stroitel'nye materialy : uchebnik* [Construction materials: the textbook]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1981. 160 p.
12. Shpynova A. G., ed. *Fiziko-khimicheskie osnovy formirovaniya struktury tsementnogo kamnya* [Physical and chemical bases of formation of structure of cement stone]. L'vov, Lviv State University Press, 1981. 160 p.

13. Polak A. F. [Theory of hydration binders]. *Trudy NIIPromstroya* [Proc. of NIIPromstroï], 1976. Pp. 54—89.
14. Butt Yu. M. *Tekhnologiya vyazhushchikh veshchestv* [Technology of binders]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 1965. 619 p.
15. Volzhenskii A. V., Burov Yu. S., Kolokol'nikov V. S. *Mineral'nye vyazhushchie veshchestva* [Mineral binders]. Moscow, Stroiizdat Publ., 1979. 476 p.

For citation:

Tukhareli A. V., Akchurin T. K. [Research of the processes of structure formation of fine grained concrete composition modified by aqueous dispersion of acrylic monomer]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 89—97.

About authors:

Tukhareli Anastasiya Viktorovna — Postgraduate Student of Construction Materials and Special Technologies Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, asyzv@yandex.ru

Akchurin Talgat' Kadimovich — Candidate of Engineering Science, Professor, the Head of Construction Materials and Special Technologies Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 621.577.2

Е. В. Корепанов, И. Н. Булдакова

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛООВОГО ПОТЕНЦИАЛА ВЕРТИКАЛЬНОГО U-ОБРАЗНОГО ГРУНТОВОГО КОЛЛЕКТОРА ТЕПЛОНАСОСНОЙ УСТАНОВКИ

Приводится методика и результаты математического моделирования процесса нагрева теплоносителя в вертикальном U-образном грунтовом коллекторе теплонасосной установки системы теплоснабжения. Аналитическое уравнение для расчета температуры теплоносителя в трубе коллектора получено в результате решения одномерного дифференциального уравнения энергии. Задача теплопроводности грунта решается методом конечных элементов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: тепловой насос, грунтовый теплообменник, тепловой потенциал грунта.

Тепловой потенциал вертикального грунтового коллектора (теплообменника) геотермальной теплонасосной установки характеризуется величиной теплового потока, получаемого с одного метра глубины скважины, и температурой теплоносителя на выходе из коллектора. Линейный тепловой поток необходим для проектирования системы теплоснабжения, а температура теплоносителя на выходе из коллектора — для построения термодинамического цикла при решении задачи управления системой теплоснабжения [1].

Отбор теплоты тепловым насосом из грунта осуществляется горизонтальными или вертикальными коллекторами [2—4].

Горизонтальный коллектор размещают на глубине 1...1,5 м, но для большинства регионов России это совпадает с глубиной промерзания грунта, и для обеспечения нормальной работы теплового насоса необходимо либо уменьшать температуру теплоносителя до отрицательных температур (что приводит к еще большему промерзанию грунта), либо закладывать трубы коллектора на большую глубину. В этих условиях обеспечить необходимый теплосъем можно регулированием температуры теплоносителя на входе в коллектор или уменьшением тепловой нагрузки на отопление и вентиляцию, применяя утилизаторы теплоты. Проведенные методом конечных элементов расчеты теплосъема горизонтальными коллекторами показали, что удовлетворительные результаты получаются при прокладке труб коллектора на глубине более 5 м. Так, для коллектора длиной 500 м на глубине 5 м при входной температуре $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ и наружной температуре $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ была получена тепловая мощность 4,75 кВт. Размещение горизонтальных труб на большой глубине возможно только методом горизонтального бурения, что делает такую систему экономически малоэффективной. Поэтому в условиях средней полосы России альтернативы вертикальным коллекторам нет.

Вертикальные коллекторы используются двух типов: U-образные и коаксиальные. U-образные коллекторы обладают тем преимуществом, что нагрев теплоносителя происходит как в опускном, так и в подъемном трубопроводе, а в коаксиальном только в опускном. Кроме того, верхние слои грунта промерзают, и в этой зоне происходит охлаждение нагретого в нижних слоях

земли теплоносителя, что в *U*-образном коллекторе можно исключить, заизолировав верхнюю часть подъемной трубы [5].

Исследования, проведенные в различных странах [6—8], показали, что на теплопроизводительность грунтового коллектора существенное влияние оказывают геотермические особенности региона, и единственным способом избежать ошибок проектирования является выполнение расчетных исследований.

Для расчета используются как аналитические [5, 9—11], так и численные методы [3, 6—8, 12, 13].

Аналитические методы, как правило, построены на одномерных моделях и применимы только в зоне нулевого геотермального градиента, в которой температуру грунта можно считать постоянной [14]. Эта глубина зависит от региона и составляет 50...80 м. На большей глубине температура грунта увеличивается, и применение аналитических методов может привести к большим ошибкам, поэтому для глубоких скважин необходимо использовать численные методы решения задачи теплопроводности.

Основные проблемы, возникающие при проектировании теплонасосных установок с грунтовыми коллекторами (теплообменниками), связаны с ошибками в определении теплового потенциала коллектора, который характеризуется удельной теплопроизводительностью грунта. Температура грунта изменяется в течение года: понижается в течение отопительного периода и повышается в течение летнего периода. Глубина проникновения суточных и сезонных колебаний температуры наружного воздуха и интенсивности падающей солнечной радиации зависят от конкретных почвенно-климатических условий. Величина потока радиогенной теплоты, поступающей из земных недр, также отличается для разных местностей.

По глубине скважины в установившемся режиме в зимний период можно выделить четыре характерные зоны:

зона резкого сезонного изменения температуры (до глубины промерзания грунта);

зона от глубины промерзания (от нулевой изотермы) до зоны постоянной температуры грунта;

зона постоянной температуры грунта (нулевого геотермального градиента);

зона повышения температуры грунта.

В результате экспериментальных исследований и по данным, приведенным в части II Справочника по климату СССР, получены зависимости для расчета температуры грунта по глубине скважины в Удмуртской Республике, имеющей характерные для средней полосы России климатические условия.

В первой зоне ($0 \leq h_x \leq h_0$) при допущении, что температура в системе координат «температура — термическое сопротивление» изменяется линейно, находим температуру грунта на расстоянии h_x от поверхности земли по формуле:

$$t_x = t_{\text{ext}} + (t_0 - t_{\text{ext}}) \left(\frac{1}{\alpha_e} + \frac{h_s}{\lambda_s} + \frac{h_x}{\lambda_x} \right) / \left(\frac{1}{\alpha_e} + \frac{h_s}{\lambda_s} + \frac{h_0}{\lambda_x} \right). \quad (1)$$

Во второй зоне ($h_0 < h_x \leq h_R = 18 \text{ м}$):

$$t_x = t_0 - (t_R - t_0)(h_x - h_0)/(h_R - h_0). \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) принято: t_x — температура грунта на глубине x от поверхности; t_{ext} — температура наружного воздуха; t_0 — температура на границе глубины промерзания (нулевая изотерма); t_R — температура в зоне нулевого градиента; h_s — высота снежного покрова в зимний период; h_x — расстояние от поверхности земли; h_R — глубина границы зоны нулевого градиента; h_0 — глубины промерзания; α_e — коэффициент теплоотдачи на поверхности земли; λ_s — теплопроводность снега; λ_x — теплопроводность грунта (определяется с учетом промерзания).

Температурный режим слоев грунта во второй и третьей зонах формируется под воздействием тепловой энергии, поступающей из недр земли, и практически не зависит от сезонных изменений параметров наружного климата.

В третьей зоне в каждом сечении ($18 \leq h_x \leq 75$) температура практически постоянна $t_x = t_R = 6,5^\circ\text{C}$ (для Удмуртской Республики).

В четвертой зоне ($h_x > 75$) с увеличением глубины температура грунта возрастает и может быть определена по регрессионному уравнению

$$t_x = 3,39 + 0,046h_x - 3,79 \cdot 10^{-5} h_x^2. \quad (3)$$

Температура поверхности трубы (грунта около трубы коллектора) определяется в результате решения краевой задачи теплопроводности. Расчетная схема и фрагмент сеточной области показаны на рис. 1.

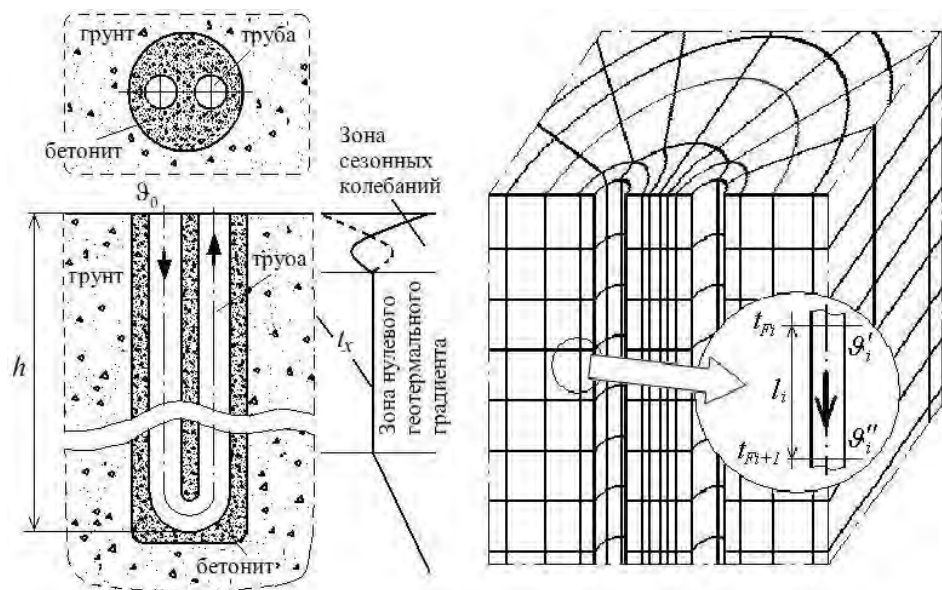


Рис. 1. Расчетная схема и сеточная область

Вертикальная скважина с полипропиленовой трубой диаметром 32 мм залита бетонитом (смесь цементно-песчаного раствора с глиной). Граница расчетной области принималась на расстоянии 6 м от оси скважины. Анализ

литературных источников, например [15, 16], показал, что температурные возмущения на расстоянии от оси 3,5 м составляют 1,7...2 %, а на расстоянии 6 м — менее 1 %.

Поскольку проектный расчет теплонасосной установки выполняется по предельным удельным потокам теплоты с учетом выхолаживания грунта в первые годы эксплуатации, то задача решается как стационарная. В стационарной постановке краевая задача теплопроводности грунта со скважиной и трубой с граничными условиями третьего рода на поверхности земли и на внутренней поверхности трубы коллектора и граничными условиями первого рода на бесконечном удалении от коллектора в массив грунта:

$$\operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} t) = 0, \quad (4)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial x} \right|_F = \alpha_F (t - \vartheta), \quad (5)$$

$$\lambda \left. \frac{\partial t}{\partial y} \right|_{y=0} = \alpha_e (t - t_{\text{ext}}), \quad (6)$$

$$t|_{x \rightarrow \pm \infty} = t_x. \quad (7)$$

На границах «труба коллектора — бетонит» и «бетонит — грунт» задавались условия идеального контакта. Плотность теплового потока на внешней поверхности F трубы грунтового коллектора определяется по градиенту температурного поля в грунте.

Задача решалась методом конечных элементов. Использовались квадратичные изопараметрические конечные элементы.

Изменение температуры по длине трубы коллектора описывается уравнением энергии потока жидкости, движущейся со скоростью u :

$$\frac{d\vartheta}{dz} = \frac{\alpha \chi}{c \rho u f} (t_F - \vartheta), \quad (8)$$

где t_F — температура поверхности трубы; $\chi = \pi d$ — смоченный периметр трубы; ρ — плотность теплоносителя; c — теплоемкость теплоносителя; f — площадь живого сечения потока.

Поскольку температура поверхности трубы t_F изменяется по длине, то в пределах участка длиной l принимается линейный закон изменения температуры поверхности трубы (рис. 1):

$$t_F = t'_F + \frac{t''_F - t'_F}{l}, \quad (9)$$

где t'_F и t''_F — температура поверхности трубы в начале и в конце участка.

При использовании численных методов для вычисления температуры грунта вся расчетная область разбивается на участки длиной l_i , равной шагу сетки по высоте скважины (см. рис. 1). В этом случае температура в конце каждого участка определяется по схеме бегущего счета.

Решение уравнения энергии для температуры ϑ'' в конце участка трубы коллектора длиной l_i при линейном изменении температуры поверхности и температуре теплоносителя в начальном сечении участка ϑ' имеет вид [17]

$$\vartheta'' = \vartheta' + (t_F'' - t_F') - \frac{\vartheta' - t_F' + (t_F'' - t_F')}{NTU} [1 - \exp(-NTU)], \quad (10)$$

где $NTU = \alpha \chi l_i / (c \rho u) = \alpha F_i / W$ — число переноса единиц теплоты грунтового теплообменника (коллектора); $F_i = \chi l_i$ — площадь боковой поверхности участка трубы длиной l_i ; $W = cG$ — условный (водяной) эквивалент грунтового теплообменника; $G = \rho u$ — массовый расход теплоносителя.

Для вычисления коэффициента теплоотдачи α от поверхности трубы коллектора к теплоносителю используется критериальное уравнение М. А. Михеева [18].

В качестве теплоносителя был выбран рассол с характеристиками: теплопроводность 0,565 Вт/(м·°C), плотность 1070 кг/м³, теплоемкость 3,71 кДж/(кг·°C). Общая длина U-образного коллектора, состоящего из опускной трубы и подъемной трубы, принималась равной двойной глубине скважины.

На рис. 2 приведены температурные поля в грунте по высоте скважины глубиной 80 м. Входная температура рассола принималась $\vartheta_0 = -5$ °C.

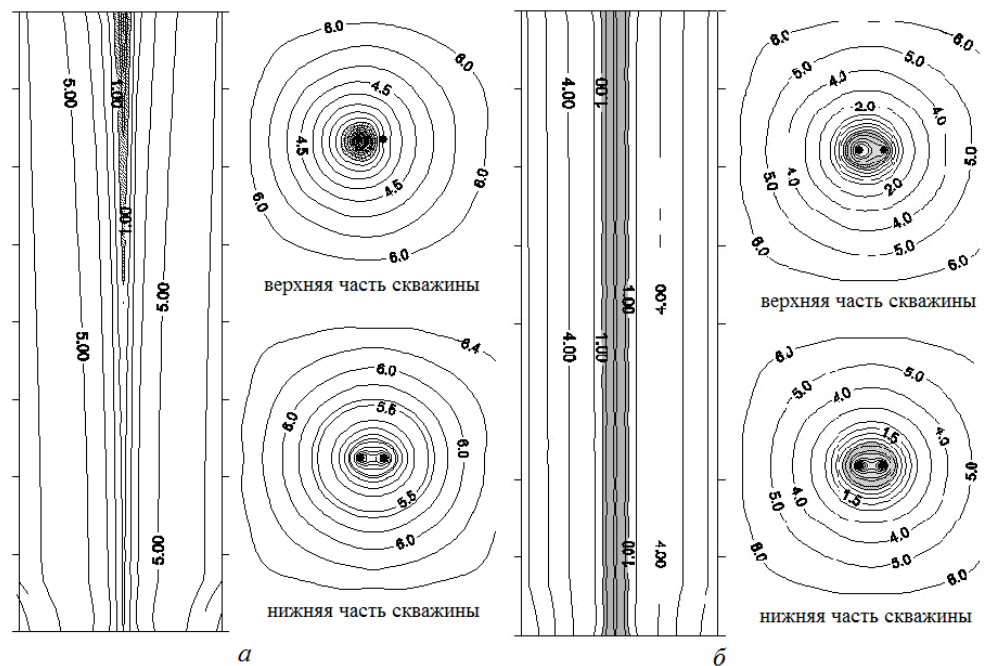


Рис. 2. Температурное поле скважины глубиной 80 м при $t_{ext} = 6,5$ °C: а — $G = 0,05$ кг/с; б — $G = 0,3$ кг/с

При малых расходах рассола ($G = 0,05$ кг/с) грунт замораживается только около опускной трубы коллектора (рис. 2, а), так как рассол в верхней части

подъемной трубы нагревается до температуры около 4°C . Замораживание грунта достигает глубины около 35 м. В нижней части скважины температура грунта остается положительной. При больших расходах ($G = 0,3 \text{ кг/с}$) рассол не успевает сильно прогреться, и его температура в подъемной трубе остается отрицательной, и замораживание грунта происходит по всей высоте скважины (рис. 2, б). С уменьшением расхода температура рассола на выходе из коллектора увеличивается, что приводит к увеличению запаса энтальпии, а следовательно, и к уменьшению количества скважин.

На рис. 3 и 4 приведено изменение температуры теплоносителя и изменение линейного теплового потока по длине трубы коллектора в скважине глубиной 80 и 200 м.

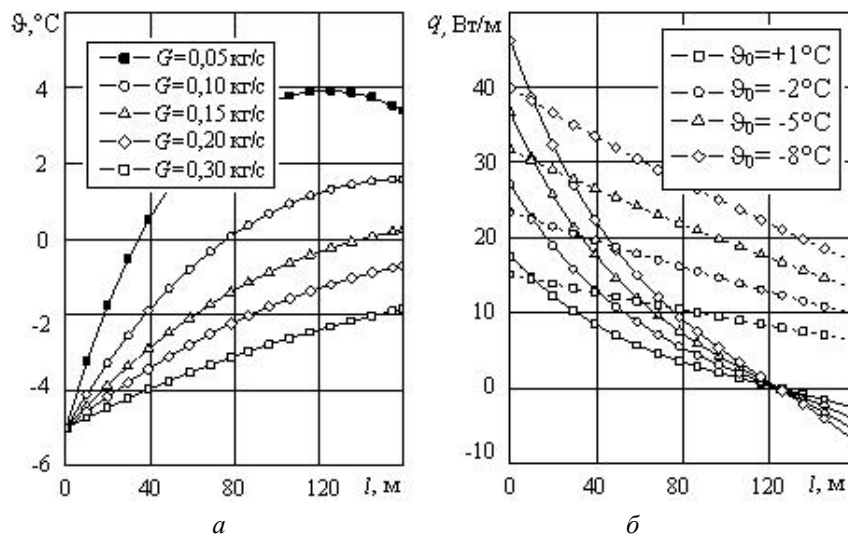


Рис. 3. Изменение температуры рассола (а) и линейного теплового потока на поверхности трубы коллектора (б) в скважине глубиной 80 м

Температура теплоносителя зависит от расхода, начальной температуры и глубины скважины. В скважине глубиной 80 м при расходе $G = 0,05 \text{ кг/с}$ температура теплоносителя увеличивается в опускной трубе коллектора и в нижней части подъемной трубы коллектора до глубины 40 м (до длины коллектора 120 м), а затем начинает уменьшаться из-за оттока теплоты обратно в грунт, так как температура грунта в этой области ниже температуры теплоносителя вследствие замораживания (рис. 2). С увеличением расхода из-за большой скорости теплоносителя его температура уменьшается, и оттока теплоты в грунт не происходит.

В скважине глубиной 200 м температура теплоносителя почти в два раза выше, чем в скважине глубиной 80 м, поэтому отток теплоты в подъемной трубе происходит во всем диапазоне исследованных величин расхода теплоносителя.

Линейный тепловой поток на поверхности трубы имеет максимальное значение в верхней части опускной трубы и монотонно уменьшается по длине коллектора.

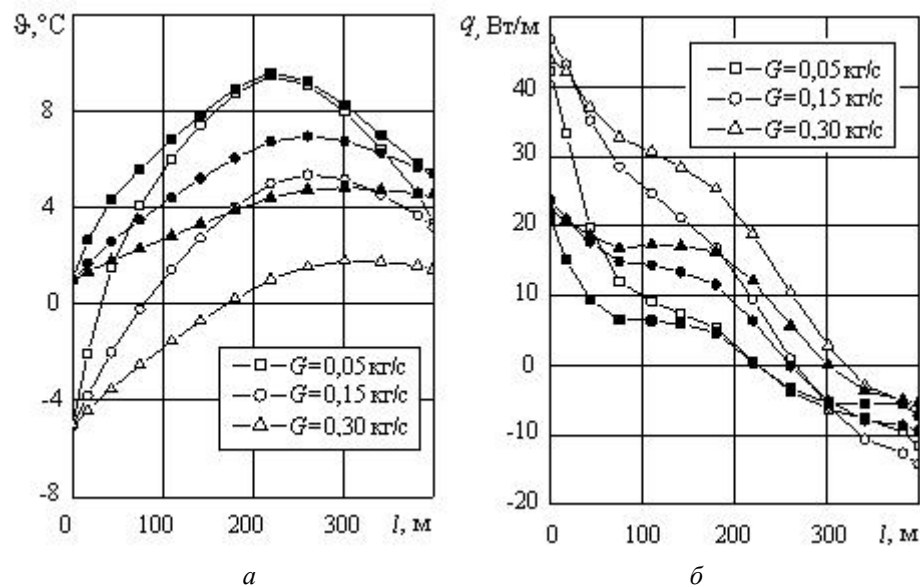


Рис. 4. Изменение температуры рассола (а) и линейного теплового потока (б) на поверхности трубы коллектора в скважине глубиной 200 м: залитые маркеры $\Theta_0 = -5^\circ\text{C}$, залитые маркеры $\Theta_0 = +1^\circ\text{C}$

В скважинах небольшой глубины (в зоне нулевого градиента) при расходах теплоносителя более $0,1 \text{ кг/с}$ линейный тепловой поток по всей длине положительный.

В скважинах глубиной ниже зоны нулевого градиента в верхней части линейный тепловой поток становится отрицательным, что сказывается на величине теплопроизводительности скважины. Длина участка подъемной трубы с теплоотводом теплоты в грунт зависит как от расхода, так и от начальной температуры теплоносителя.

Анализ расчетных данных показал, что теплопроизводительность вертикального грунтового коллектора даже в зоне нулевого геотермального градиента зависит как от характеристик грунта, режимных и температурных факторов, так и от региональных климатических и геотермальных особенностей. Поэтому применение для расчета количества скважин удельных тепловых потоков, рекомендованных в методиках различных фирм (например, Viessman), полученных, как правило, для европейских условий, может привести к серьезным проектным ошибкам.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агафонов С. А., Булдакова И. Н., Корепанов Е. В. Математическая модель управления тепловым режимом здания с теплонасосной установкой // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения / под общ. ред. Л. П. Мышляева. Новокузнецк, 2010. С. 206—210.
2. Васильев Г. П. Теплохладоснабжение зданий и сооружений с использованием низкопотенциальной тепловой энергии поверхностных слоев Земли: монография. М.: ИД «Граница», 2006. 176 с.
3. Yang H., Cui P., Fang Z. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems // Applied Energy. 2010. Vol. 87. Iss. 1. Pp. 16—27.

4. Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers / Y. Wu, G. Gan, A. Verhoef, R. G. Gonzalez, P. L. Vidale // *Applied Thermal Engineering*. 2010. Vol. 30. Iss. 16. Pp. 2574—2583.

5. Богуславский Э. И., Кудряшов Б. Б., Мовчан И. Б. Определение температуры нагрева теплоносителя в геотермальных скважинах приповерхностных систем теплоснабжения // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2003. № 5. С. 209—211.

6. Булдакова И. Н., Корепанов Е. В. Определение теплопроизводительности вертикального грунтового коллектора теплонасосной установки в климатических условиях Удмуртской Республики // Материалы 3-й Международной науч.-техн. конф. «Теоретические основы теплогазоснабжения и вентиляции», 21—23 ноября 2009 г., МГСУ. М.: МГСУ, 2009. С. 107—110.

7. Omer Ozyurt, Dundar Arif Ekinci. Experimental study of vertical ground-source heat pump performance evaluation for cold climate in Turkey // *Applied Energy*. 2011. Vol. 88. Iss. 4. Pp. 1257—1265.

8. Florides Georgios A., Christodoulides P., Pouloupatis P. Freezing of geothermal borehole surroundings: A numerical and experimental assessment with applications // *Applied Energy*. Vol. 92. April 2012. Pp. 333—345.

9. Min Li, Alvin C. K. Lai. Analytical model for short-time responses of ground heat exchangers with U-shaped tubes: Model development and validation // *Applied Energy*. 2013. Vol. 104. Pp. 510—516.

10. Филатов С. О., Володин В. И. Работа теплообменников утилизации теплоты грунта // Труды БГТУ. 2011. № 3. Химия и технология неорганических веществ. С. 179—184.

11. Трушевский С. Н. Аналитическое исследование влияния термоскважин для тепловых насосов на окружающую среду // Труды международной науч.-технич. конф. «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». 2012. Т. 4. С. 247—253.

12. Булдакова И. Н., Булдакова Е. Н., Корепанов Е. В. Математическое моделирование процесса нагрева теплоносителя в U-образном грунтовом коллекторе теплонасосной установки // Наука и молодежь: проблемы, поиски, решения / под общ. ред. Л. П. Мышляева. Новокузнецк, 2010. С. 210—215.

13. Палагин А. В., Корепанов Е. В. Моделирование нестационарного теплообмена грунта с U-образным коллектором теплонасосной установки // Вестник МГСУ. 2011. № 7. С. 456—462.

14. Богословский В. А., Жигалин А. Д., Хмелевской В. К. Экологическая геофизика : учебное пособие для геофизических, геологических и геоэкологических специальностей вузов. М. : МГУ, 2000. 256 с.

15. Zarrella A., Scarpa M., De Carli M. Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: The approach of CaRM // *Renewable Energy*. 2011. Vol. 36. Iss. 9. Pp. 2357—2367. doi:10.1016/j.renene.2011.01.032

16. Gultekin A., Aydin M., Sisman A. Determination of Optimal Distance Between Boreholes // Proc. Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University. Stanford, California, February 24—26, 2014. URL: [http://web.itu.edu.tr/murataydin/Determination OptDist BetwBHE.pdf](http://web.itu.edu.tr/murataydin/Determination%20OptDist%20BetwBHE.pdf)

17. Булдакова И. Н., Корепанов Е. В. Нагрев теплоносителя в трубе U-образного грунтового коллектора теплонасосной установки // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 2(24). С. 175—177.

18. Исаченко В. П., Осипова В. А., Сукомел А. С. Теплопередача. Изд. 4-е. М.: Энергия, 1981. 488 с.

© Корепанов Е. В., Булдакова И. Н., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Корепанов Е. В., Булдакова И. Н. Методика определения теплового потенциала вертикального U-образного грунтового коллектора теплонасосной установки // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 98—107.

Об авторах:

Корепанов Евгений Витальевич — канд. техн. наук, доцент, зав. кафедрой теплоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова. Российская Федерация, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7, evg-vit-korepanov@yandex.ru

Булдакова Ирина Николаевна — старший преподаватель кафедры теплоснабжения, отопления, вентиляции и кондиционирования, Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова. Российская Федерация, 426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7, buldakovaI@gmail.com

E. V. Korepanov, I. N. Buldakova

TECHNIQUE OF DETERMINATION OF THERMAL POTENTIAL OF VERTICAL U-SHAPED SOIL COLLECTOR OF HEATPUMP INSTALLATION

The technique and the results of mathematical modeling of process of heating of the heat carrier in a vertical U-shaped soil collector of heatpump installation of epy system of heat supply is given. The analytical equation for the calculation of temperature of the heat carrier in a pipe of a collector is received as a result of the solution of the one-dimensional differential equation of energy. The problem of soil heat conductivity is solved by the method of finite elements.

Key words: thermal pump, soil heat exchanger, thermal soil potential.

REFERENCES

1. Agafonov S. A., Buldakova I. N., Korepanov E. V. [Mathematical model of regulation of thermal condition in a building with heat pump plant]. *Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya* [Science and the youth: problems, searches, solutions]. Novokuznetsk, 2010. Pp. 206—210.
2. Vasil'ev G. P. *Teplokhodosnabzhenie zdaniy i sooruzheniy s ispol'zovaniem nizkopotentzial'noi teplovoi energii poverkhnostnykh sloev Zemli: monografiya* [Heat and cold supply to buildings and constructions with the help of low-potential thermal energy of Earth's surface soils: monograph]. Moscow, IDES «Border», 2006. 176 p.
3. Yang H., Cui P., Fang Z. Vertical-borehole ground-coupled heat pumps: A review of models and systems. *Applied Energy*, 2010, 87(1), pp. 16—27.
4. Wu Y., Gan G., Verhoef A., Gonzalez R. G., Vidale P. L. Experimental measurement and numerical simulation of horizontal-coupled slinky ground source heat exchangers. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(16), pp. 2574—2583.
5. Boguslavskii E. I., Kudryashov B. B., Movchan I. B. [Determination of temperature of heating of a heat carrier in geothermal wells of near-surface heat supply system]. *Gornyi informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskii zhurnal)* [Rock information and analytical bulletin (scientific and technical journal)], 2003, no. 5, pp. 209—211.
6. Buldakova I. N., Korepanov E. V. [Determination of heating capacity of vertical soil collector of heat pump plant under climate conditions of the Udmurt Republic]. *Materialy 3-i Mezhdunarodnoi nauch.-tekhn. konf. «Teoreticheskie osnovy teplogazosnabzheniya i ventilyatsii», 21—23 noyabrya 2009 g., MGSU* [Proc. of 3d Inter. scien.-techn. conf. "Theoretical principals of heat and gas supply and ventilation", November, 21—23, 2009, MGSU]. Moscow, MGSU, 2009. Pp. 107—110.
7. Omer Ozyurt, Dundar Arif Ekinci. Experimental study of vertical ground-source heat pump performance evaluation for cold climate in Turkey. *Applied Energy*, 2011, 88(4), pp. 1257—1265.
8. Florides Georgios A., Christodoulides P., Pouloupatis P. Freezing of geothermal borehole surroundings: A numerical and experimental assessment with applications. *Applied Energy*, vol. 92, April 2012, pp. 333—345.
9. Min Li, Alvin C. K. Lai. Analytical model for short-time responses of ground heat exchangers with U-shaped tubes: Model development and validation. *Applied Energy*, 2013, vol. 104, pp. 510—516.
10. Filatov S. O., Volodin V. I. [Performance of heat exchangers of soil heat recovery]. *Trudy BGTU* [Bulletin of Belarusian State Technological University], 2011, no. 3, pp. 179—184.
11. Trushevskii S. N. [Analytical research of the influence of thermo-wells for heat pumps on the environment]. *Trudy mezhdunarodnoi nauch.-tekhnich. konf. «Energoobespechenie i energo-*

sberezhenie v sel'skom khozyaistve» [Proc. of Intern. scien.-techn. conf. "Power supply and energy saving in agriculture"], 2012, vol. 4, pp. 247—253.

12. Buldakova I. N., Buldakova E. N., Korepanov E. V. [Mathematical modeling of the process of heating of a heat carrier in U-shaped soil collector of heat pump plant]. *Nauka i molodezh': problemy, poiski, resheniya* [Science and the youth: problems, searches, solutions]. Novokuznetsk, 2010. Pp. 210—215.

13. [The modeling a transient heat transfer between ground and a heat pump U-tube]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2011, no. 7, pp. 456—462.

14. Bogoslovskii V. A., Zhigalin A. D., Khmelevskoi V. K. *Ekologicheskaya geofizika : uchebnoe posobie dlya geofizicheskikh, geologicheskikh i geoekologicheskikh spetsial'nostei vuzov* [Environmental geophysics: Manual for geophysical, geological and geocological specialties in Institutions of Higher Education]. Moscow, MSU Publ., 2000. 256 p.

15. Zarrella A., Scarpa M., De Carli M. Short time step analysis of vertical ground-coupled heat exchangers: The approach of CaRM. *Renewable Energy*, 2011, 36(9), pp. 2357—2367. doi:10.1016/j.renene.2011.01.032

16. Gultekin A., Aydin M., Sisman A. Determination of Optimal Distance Between Boreholes. *Proc. Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University*. Stanford, California, February 24—26, 2014. URL: [http://web.itu.edu.tr/murataydin/Determination OptDist-BetwBHE.pdf](http://web.itu.edu.tr/murataydin/Determination%20OptDist-BetwBHE.pdf)

17. Buldakova I. N., Korepanov E. V. [Heating of a heat carrier in a pipe of U-shaped soil collector of heat pump plant]. *Intellectual'nye sistemy v proizvodstve* [Intellectual systems in production], 2014, no. 2(24), pp. 175—177.

18. Isachenko V. P., Osipova V. A., Sukomel A. S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow, Energiya Publ., 1981. 488 p.

For citation:

Korepanov E. V., Buldakova I. N. [Technique of determination of thermal potential of vertical U-shaped soil collector of heatpump installation]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 98—107.

About authors:

Korepanov Evgenii Vital'evich — Candidate of Engineering Science, Docent, Head of Heat Supply, Heating, Ventilation and Conditioning Department, Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov. 7, Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russian Federation. evg-vit-korepanov@yandex.ru

Buldakova Irina Nikolaevna — Senior Lecturer of Heat Supply, Heating, Ventilation and Conditioning Department, Izhevsk State Technical University named after M. T. Kalashnikov. 7, Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russian Federation. buldakovaIN@gmail.com

УДК 621.928.9:691

Н. М. Сергина, Мохаммед Саиф Али Абдулджалил

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ОБ ОЦЕНКЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СИСТЕМ ПЫЛЕОЧИСТКИ В ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматриваются вопросы оценки эффективности систем пылеочистки с вихревыми инерционными пылеуловителями со встречными закрученными потоками.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вихревой пылеуловитель со встречными закрученными потоками, отсос из бункерной зоны, эффективность, аэродинамическое сопротивление.

Известно, что организация отсоса из бункерной зоны обеспечивает повышение эффективности циклонных аппаратов и снижение энергозатрат на реализацию процесса очистки промышленных выбросов от пыли [1—6]. Результаты многочисленных теоретических и экспериментальных исследований показали [7—11], что эта особенность присуща и вихревым пылеуловителям со встречными закрученными потоками (ВЗП). Некоторые из этих результатов в качестве примера представлены на рис. 1—4 [7, 9].

Эффективность пылеуловителя ВЗП без отсоса из бункера описывается уравнением регрессии [9]

$$\eta = 0,9 + 9,028\bar{V}_y(1 - 0,1\bar{V}_y) + 0,1_n(1 - 2,16K_n). \quad (1)$$

Для аппарата ВЗП с отсосом из бункера аналогичная зависимость имеет вид [9]

$$\eta = 0,9 + 9,028\bar{V}_y(1 - 0,1\bar{V}_y) + 0,1_n(1 - 2,16K_n) + 0,148K_{отс}(0,5 - K_{отс}), \quad (2)$$

где $K_{отс}$ — доля отсасываемого из бункера расхода от общего подаваемого на очистку от пыли.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что эффективность пылеуловителя ВЗП с отсосом из бункера повышается на величину

$$\Delta\eta = \eta^* - \eta = 0,14K_{отс}(0,5 - K_{отс}). \quad (3)$$

Регрессионные зависимости, характеризующие коэффициент аэродинамического сопротивления, используемый для оценки энергозатрат на проведение процесса обеспыливания выбросов, имеют вид:

для пылеуловителя ВЗП без отсоса из бункера

$$\zeta = 417,4 - 9,67\bar{V}_y(11,1 - \bar{V}_r) - 647K_n(0,58 - K_n); \quad (4)$$

для пылеуловителя ВЗП с отсосом из бункера

$$\zeta^* = 244,8 - 9,01\bar{V}_y(8,41 - \bar{V}_r) - 388K_n(0,36 - K_n) - 113K_{отс}(0,71 - K_{отс}). \quad (5)$$

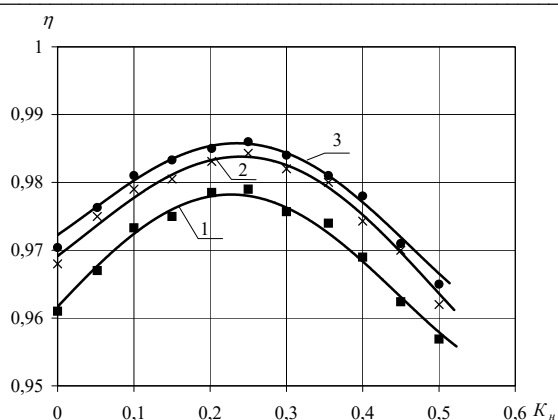


Рис. 1. Изменение эффективности пылеуловителя ВЗП без отсоса из бункера в зависимости от доли расхода, подаваемого на нижний ввод аппарата K_n : 1 — при $\bar{V}_y = 3,3$; 2 — при $\bar{V}_y = 4,3$; 3 — при $\bar{V}_y = 5,3$ ($\bar{V}_y$ — скорость в среднем сечении пылеуловителя, отнесенная к 1 м/с)

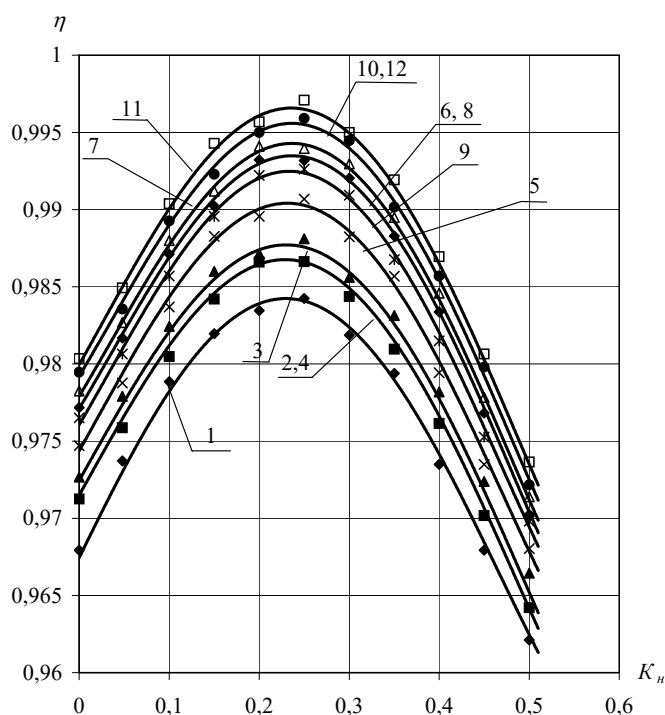


Рис. 2. Изменение эффективности пылеуловителя ВЗП с отсосом из бункера в зависимости от доли расхода, подаваемого на нижний ввод аппарата K_n : 1, 2, 3, 4 — при $\bar{V}_y = 3,3$ и доле отсасываемого расхода от общего 10, 20, 25, 30 % соответственно; 5, 6, 7, 8 — при $\bar{V}_y = 4,3$ и доле отсасываемого расхода от общего 10, 20, 25, 30 % соответственно; 9, 10, 11, 12 — при $\bar{V}_y = 5,3$ и доле отсасываемого расхода от общего 10, 20, 25, 30 % соответственно

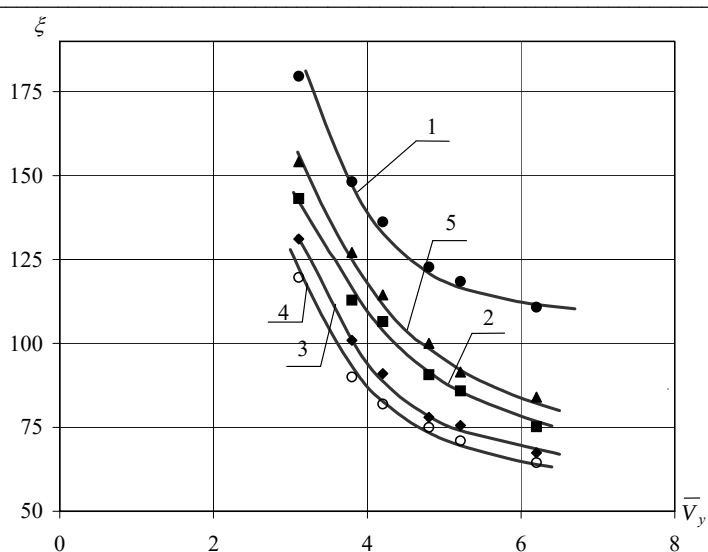


Рис. 3. Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления пылеуловителя ВЗП без отсоса из бункера в зависимости от скорости пылевоздушного потока в аппарате: 1 — при $K_n = 0$; 2 — при $K_n = 0,1$; 3 — при $K_n = 0,2$; 4 — при $K_n = 0,3$; 5 — при $K_n = 0,5$

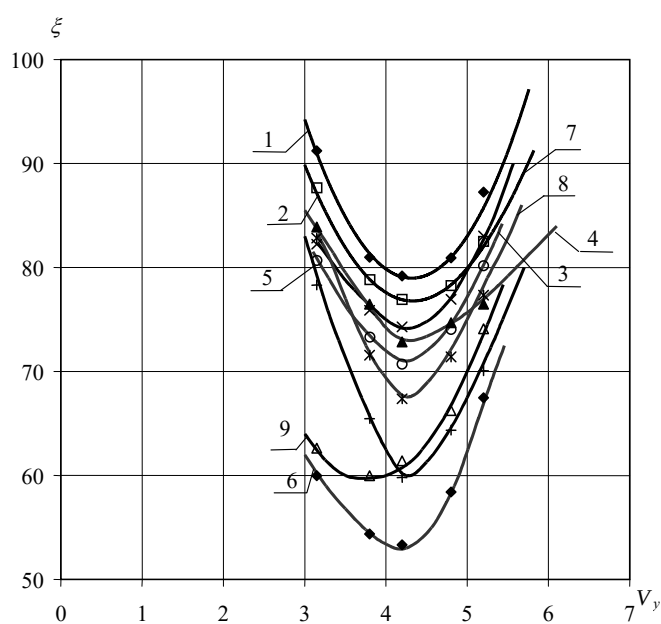


Рис. 4. Изменение коэффициента аэродинамического сопротивления пылеуловителя ВЗП с отсосом из бункера в зависимости от скорости пылевоздушного потока в аппарате: 1, 2, 3 — при $K_n = 0$ и доле отсасываемого расхода от общего 10, 20, 30 % соответственно; 4, 5, 6 — при $K_n = 0,2$ и доле отсасываемого расхода от общего 10, 20, 30 % соответственно; 7, 8, 9 — при $K_n = 0,3$ и доле отсасываемого расхода от общего 10, 20, 30 % соответственно

При компоновке систем для снижения пылепоступлений в атмосферу возможны несколько вариантов рециклинга пылевоздушной смеси, отсасываемой из бункерной зоны одного из аппаратов. Например, при компоновке двухступенчатой системы пылеочистки с пылеуловителями ВЗП может осуществляться подача пыли, уловленной в аппарате второй ступени, в воздушном потоке на нижний ввод аппарата первой ступени, как это показано на схеме, приведенной на рис. 5. Для обеспечения устойчивого перемещения пылевоздушной смеси по рециркуляционному воздуховоду установлен отвод-закручиватель [12, 13].

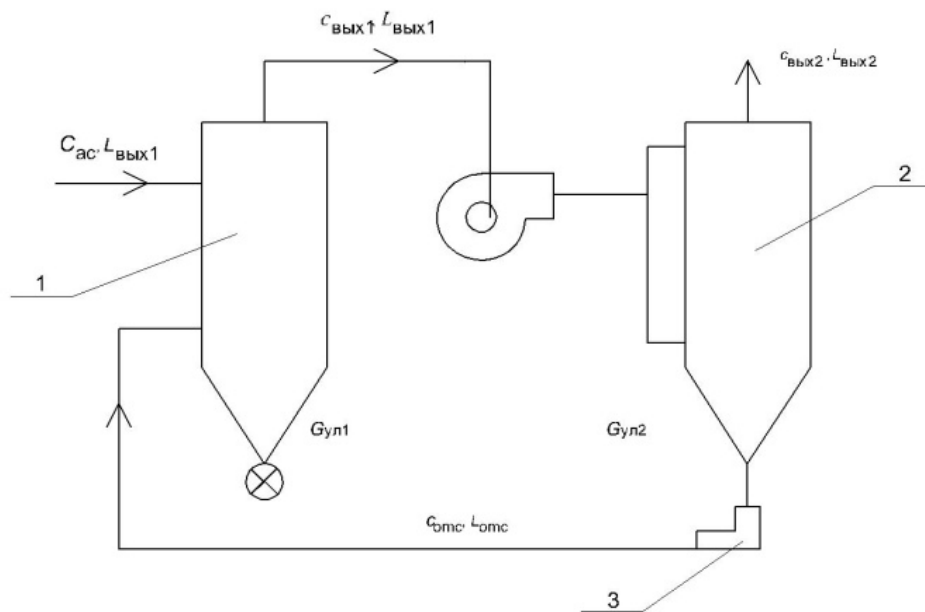


Рис. 5. Схема для расчета эффективности системы пылеочистки: 1 — аппарат ВЗП первой ступени; 2 — аппарата ВЗП второй ступени с отсосом из бункера; 3 — отвод-закручиватель

В этом случае расчет эффективности такой установки может быть проведен на основе решения системы балансовых уравнений массовых потоков пыли (6)

$$\begin{cases} G_{ул1} + c_{вых1} L_{сист} = c_{ас} L_{ас} + c_{отс} L_{отс}; \\ G_{ул1} = \eta_1^* (c_{ас} L_{ас} + c_{отс} L_{отс}); \\ G_{ул2} = \eta_2^* c_{вых1} L_{сист}; \\ G_{ул2} = c_{вых2} L_{вых2}; \\ c_{отс} L_{отс} = k G_{ул2}; \\ L_{сист} = L_{ас} + L_{отс} + L_{подс1}; \\ L_{вых2} = L_{сист} - L_{отс}. \end{cases} \quad (6)$$

В системе уравнений (6) приняты следующие обозначения: c_{ac} , $c_{отс}$ — содержание пыли в потоках, поступающих на верхний и нижний вводы пылеуловителя первой ступени из системы аспирации и из бункера пылеуловителя второй ступени соответственно; L_{ac} , $L_{отс}$ — расход пылевоздушной смеси на входе в верхний и нижний вводы первого пылеуловителя из системы аспирации и из бункера второго пылеуловителя соответственно, м³/ч; $L_{сист}$ — общий расход пылевоздушной смеси, прошедшей очистку в системе, м³/ч; $L_{подс1}$ — объем воздуха, подсасываемого через шлюзовой затвор пылеуловителя первой ступени, м³/ч; $c_{вых1}$, $c_{вых2}$ — содержание пыли в воздухе на выходе из аппарата первой ступени и из системы пылеочистки соответственно, мг/м³; $G_{ул1}$, $G_{ул2}$ — масса пыли, уловленной в пылеуловителях, кг/ч; η_1^* , η_2^* — эффективность каждого из аппаратов в системе пылеочистки; k — коэффициент, характеризующий долю пыли, возвращающейся в систему (изменяется от 0 при отсутствии отсоса воздуха из бункера аппарата до 1 при полном возврате пыли).

По определению эффективность очистки воздуха от пыли в системе составляет

$$\eta_{сист} = \frac{c_{ac}L_{ac} - c_{вых2}L_{вых2}}{c_{ac}L_{ac}} = 1 - \frac{c_{вых2}L_{вых2}}{c_{ac}L_{ac}}. \quad (7)$$

Если пренебречь величиной подсосов через шлюзовой затвор пылеуловителя первой ступени, систему (6) можно привести к виду

$$\begin{cases} G_{ул1} + c_{вых1}L_{ac} + c_{вых1}L_{отс} = c_{ac}L_{ac} + c_{отс}L_{отс}; \\ G_{ул1} = \eta_1^*(c_{ac}L_{ac} + c_{отс}L_{отс}); \\ G_{ул2} = \eta_2^*(c_{вых1}L_{ac} + c_{вых1}L_{отс}); \\ G_{ул1} + c_{вых2}L_{ac} = c_{вых1}L_{ac} + c_{вых1}L_{отс}; \\ G_{ул2} = c_{отс}L_{отс} / k. \end{cases} \quad (8)$$

Чтобы получить решение системы относительно $c_{вых2}L_{вых2} = c_{вых2}L_{ac}$, разделим обе части входящих в (8) уравнений на $c_{ac}L_{ac}$ и получим

$$\begin{cases} \bar{G}_{ул1} + \bar{c}_{вых1}\bar{L}_{ac} + \bar{c}_{вых1}\bar{L}_{отс} = 1 + \bar{c}_{отс}\bar{L}_{отс}; \\ \bar{G}_{ул1} = \eta_1^*(1 + \bar{c}_{отс}\bar{L}_{отс}); \\ \bar{G}_{ул2} = \eta_2^*(\bar{c}_{вых1}\bar{L}_{ac} + \bar{c}_{вых1}\bar{L}_{отс}); \\ \bar{G}_{ул1} + \bar{c}_{вых2}\bar{L}_{ac} = \bar{c}_{вых1}\bar{L}_{ac} + \bar{c}_{вых1}\bar{L}_{отс}; \\ \bar{G}_{ул2} = \bar{c}_{отс}\bar{L}_{отс} / k, \end{cases} \quad (9)$$

где $\bar{G}_{ул1} = G_{ул1} / c_{ac}L_{ac}$, $\bar{G}_{ул2} = G_{ул2} / c_{ac}L_{ac}$, $\bar{c}_{вых1}\bar{L}_{отс} = c_{вых1}L_{отс} / c_{ac}L_{ac}$,
 $\bar{c}_{отс}\bar{L}_{отс} = c_{отс}L_{отс} / c_{ac}L_{ac}$, $\bar{c}_{вых1}\bar{L}_{ac} = c_{вых1}L_{ac} / c_{ac}L_{ac}$, $\bar{c}_{отс}\bar{L}_{отс} = c_{отс}L_{отс} / c_{ac}L_{ac}$.

Сложим почленно первые два уравнения системы (6) и в результате получим

$$-c_{\text{вых1}}L_{\text{авх1}} + c_{\text{ac}}L_{\text{ac}} + c_{\text{отс}}L_{\text{отс}} = \eta_1^*(c_{\text{ac}}L_{\text{ac}} + c_{\text{отс}}L_{\text{отс}});$$

$$(1 - \eta_1^*)(c_{\text{ac}}L_{\text{ac}} + c_{\text{отс}}L_{\text{отс}}) = c_{\text{вых1}}(L_{\text{ac}} + L_{\text{отс}}).$$

Теперь разделим на $c_{\text{ac}}L_{\text{ac}}$. Тогда последнее выражение приобретает вид

$$(1 - \eta_1^*)(1 + \bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}}) = \bar{c}_{\text{вых1}}(1 + \bar{L}_{\text{отс}}).$$

Решаем систему (9) относительно $\bar{c}_{\text{вых2}}\bar{L}_{\text{ac}}$ методом исключения. Таким образом получаем

$$\eta_2^*\bar{c}_{\text{вых1}}(\bar{L}_{\text{ac}} + \bar{L}_{\text{отс}}) + \bar{c}_{\text{авх1}}(\bar{L}_{\text{ac}} + \bar{L}_{\text{отс}}) - \bar{c}_{\text{авх2}}\bar{L}_{\text{авх2}};$$

$$\bar{c}_{\text{вых1}}(1 - \eta_2^*)(\bar{L}_{\text{ac}} + \bar{L}_{\text{отс}}) = \bar{c}_{\text{вых2}}\bar{L}_{\text{вых2}}$$

или

$$\begin{cases} (1 - \eta_1^*)(1 + \bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}}) = \bar{c}_{\text{вых1}}(1 + \bar{L}_{\text{отс}}); \\ (1 - \eta_2^*)\bar{c}_{\text{вых1}}(\bar{L}_{\text{ac}} + \bar{L}_{\text{отс}}) = \bar{c}_{\text{вых2}}\bar{L}_{\text{вых2}}; \\ \bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}} = \eta_2^*\bar{c}_{\text{вых1}}(1 + \bar{L}_{\text{отс}}); \\ \eta_1^* = \eta_1(c_{\text{отс}}/c_{\text{ac}}, L_{\text{отс}}/L_{\text{ac}}); \\ \eta_2^* = \eta_2(\bar{c}_{\text{вых1}}). \end{cases} \quad (10)$$

Полученная система (10) представляет собой систему пяти нелинейных уравнений с пятью переменными. Если принять значения η_2^* постоянной величиной и решить систему относительно параметра $1/(1 - \eta_1^*)$, получим

$$\frac{1}{1 - \eta_1^*} = \eta_2^* \left(1 + \frac{1}{\bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}}} \right). \quad (11)$$

Известно, что эффективность вихревого аппарата существенно зависит от соотношения объемов и запыленности потоков, подаваемых через нижний и верхний вводы. Принимаем в качестве первого приближения, что $\eta_1^* = f(\bar{c}_{\text{отс}}, \bar{L}_{\text{отс}})$, и выразим эту функцию через ряд следующего вида:

$$\frac{1}{1 - \eta_1^*} = 1 - \frac{A_1}{\bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}}} + \frac{A_2}{(\bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}})^2} - \frac{A_3}{(\bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}})^3} + \frac{A_4}{(\bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}})^4} - \dots \quad (12)$$

Как второе приближение примем, что значимы только первые три члена ряда. Тогда

$$\eta_2^* \left(1 + \frac{1}{\bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}}} \right) = 1 - \frac{A_1}{\bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}}} + \frac{A_2}{(\bar{c}_{\text{отс}}\bar{L}_{\text{отс}})^2}.$$

Решение полученного квадратного уравнения

$$\bar{c}_{отс} = \frac{\frac{A_1 + \eta_2^*}{\bar{L}_{отс}} + \frac{1}{\bar{L}_{отс}} \sqrt{(A_1 + \eta_2^*)^2 - 4(1 - \eta_2^*)A_2^2}}{2(1 - \eta_2^*)} = 0$$

имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{c}_{отс} &= \frac{\frac{A_1 + \eta_2^*}{\bar{L}_{отс}} + \frac{1}{\bar{L}_{отс}} \sqrt{(A_1 + \eta_2^*)^2 - 4(1 - \eta_2^*)A_2^2}}{2(1 - \eta_2^*)} = \\ &= \frac{A_1 + \eta_2^* + \sqrt{2\eta_2^*(A_1 + 2A_2) + (A_1^2 - 4A_2) + \eta_2^{*2}}}{2(1 - \eta_2^*)\bar{L}_{отс}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Подставим выражение (13) в выражение (11). Тогда получаем

$$\frac{1}{1 - \eta_1^*} = \eta_2^* \left[1 + \frac{2(1 - \eta_2^*)}{A_1 + \sqrt{2\eta_2^*(A_1 + 2A_2) + (A_1^2 - 4A_2) + \eta_2^{*2}} + \eta_2^*} \right]. \quad (14)$$

Тогда суммарная эффективность пылеулавливания системы при возврате уловленного продукта на нижний ввод пылеуловителя первой ступени составит

$$\begin{aligned} \eta_{сист}^* &= 1 - \bar{c}_{вых2}\bar{L}_{ас} = 1 - \frac{(\eta_1^* - 1)(1 - \eta_2^*)}{\eta_2^*k_{ул}(1 - \eta_1^*) - 1} = 1 - \frac{(1 - \eta_2^*)}{\frac{1}{1 - \eta_1^*} - \eta_2^*k_{ул}} = \\ &= 1 - \frac{1 - \eta_2^*}{\eta_2^* \left[(1 - k_{ул}) + \frac{2(1 - \eta_2^*)}{A_1 + \sqrt{2\eta_2^*(A_1 + 2A_2) + (A_1^2 - 4A_2) + \eta_2^{*2}} + \eta_2^*} \right]}. \end{aligned} \quad (15)$$

При полном возврате пыли, уловленной в аппарате второй ступени, т. е. при $k_{ул}=1$, выражение (15) примет вид

$$\begin{aligned} \eta_{сист}^* &= 1 - \frac{1 - \eta_2^*}{\frac{2(1 - \eta_2^*)\eta_2^*}{A_1 + \sqrt{2\eta_2^*(A_1 + 2A_2) + (A_1^2 - 4A_2) + \eta_2^{*2}} + \eta_2^*}} = \\ &= 1 - \frac{\sqrt{2\eta_2^*(A_1 + 2A_2) + (A_1^2 - 4A_2) + \eta_2^{*2}} + \eta_2^* + A_1}{2\eta_2^*}. \end{aligned} \quad (16)$$

Вместе с тем следует отметить, что при таком подходе, во-первых, эффективность пылеулавливания каждого из аппаратов в системе считается постоянной величиной, а во-вторых, не учитывается дисперсный состав пыли, поступающей в пылеуловитель второй ступени и возвращаемой после него в

первый пылеуловитель. Кроме того, в результате каких-либо скачкообразных изменений в технологическом процессе, составе, влажности сырья и т. д. в систему пылеочистки поступает пыль с переменным фракционным составом, и поэтому эффективность пылеуловителя будет меняться случайным образом [14, 15].

Пылеуловители ВЗП, так же как любой пылеулавливающий аппарат, характеризуются определенной фракционной эффективностью η_{ϕ} . С учетом сказанного выше общую эффективность η_0 можно определить как [14]

$$\eta_0 = \int_0^{\infty} \eta_{\phi}(d_{\phi}) dD(d_{\phi}) = \int_{d_{\phi \min}}^{d_{\phi \max}} \eta_{\phi}(d_{\phi}) dD(d_{\phi}), \quad (17)$$

где d_{ϕ} — размер пылевых частиц, мкм; $D(d_{\phi})$ — интегральная функция прохода, характеризующая фракционный состав улавливаемой пыли.

Для примера на рис. 6 приведены зависимости, характеризующие экспериментальные значения математических ожиданий фракционной эффективности разных пылеулавливающих устройств: циклона, ВЗП, ВЗП с отсосом из бункера, рукавного фильтра [14].

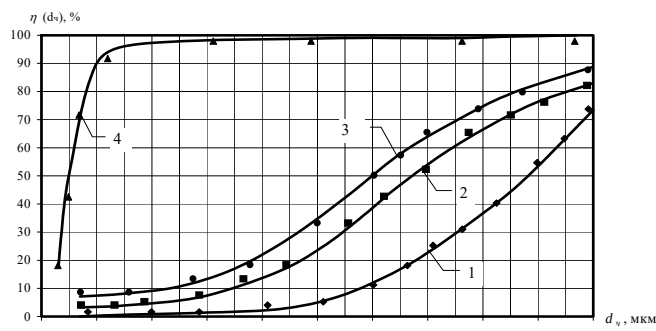


Рис. 6. Экспериментальные значения математических ожиданий фракционной эффективности улавливания для пылеочистных аппаратов: 1 — циклон СЦН-40; 2 — ВЗП; 3 — ВЗП с отсосом из бункерной зоны при $K_0 = 0,1$; 4 — рукавный фильтр

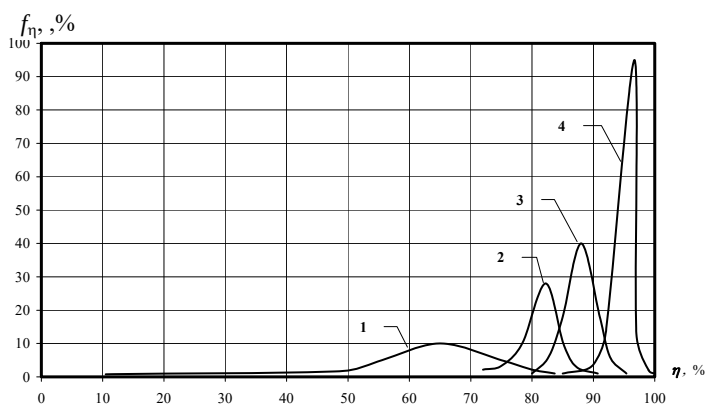


Рис. 7. Функции плотности распределения общей эффективности очистки: 1 — циклон СЦН-40; 2 — ВЗП; 3 — ВЗП с отсосом из бункерной зоны при $K_{отс} = 0,1$; 4 — рукавный фильтр

На основании случайной функции $D(d_q)$ и фракционной эффективности η_ϕ (рис. 6) по выражению (17) рассчитаны функции плотности распределения общей эффективности пылеочистки для этих же четырех аппаратов, показанные на рис. 8 [14]. Полученные данные свидетельствуют о том, что, например, с вероятностью 50 % эффективность пылеулавливания в аппарате ВЗП с отсосом из бункера будет иметь значения в интервале 86...90 %, с вероятностью 20 % — в интервале 83...93 %, с вероятностью 10 % — в интервале менее 83 % и более 93 %. Отсюда следует, что общая эффективность процесса пылеочистки зависит не только от конструктивных и режимных параметров пылеуловителя, но и от случайной функции прохода $D(d_q)$ для пыли, содержащейся в газовом потоке, подаваемом на очистку [14, 15].

Таким же образом можно получить функции плотности распределения концентрации пыли на выходе газового потока из перечисленных выше аппаратов (рис. 8) [14].

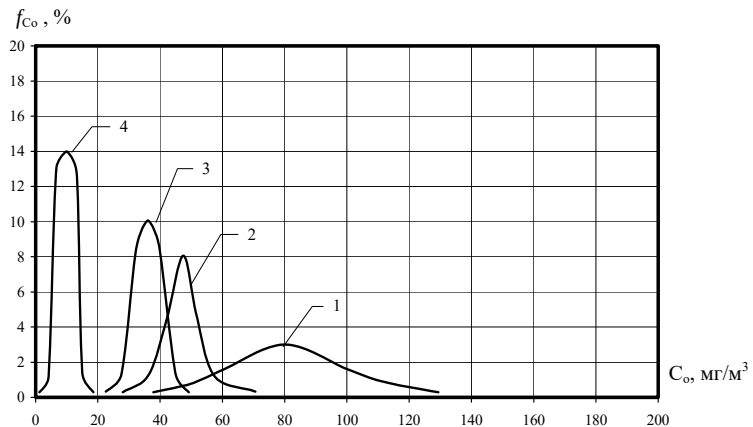


Рис. 8. Функции плотности распределения концентрации пыли на выходе из: 1 — циклона СЦН-40; 2 — ВЗП; 3 — ВЗП с отсосом из бункерной зоны при $K_{отс} = 0,1$; 4 — рукавного фильтра

Полученные результаты показали, что на выходе газового потока из рукавного фильтра содержание пыли в нем составит 2,6...18,2 мг/м³, на выходе из аппарата ВЗП с отсосом из бункера — от 20 до 45 мг/м³. Эти же значения для ВЗП без отсоса и циклона составляют 30...70 мг/м³ и 40...130 мг/м³ соответственно.

Таким образом, поскольку эффективность аппаратов, установленных во многоступенчатых установках пылеулавливания, является, как показано выше, случайной величиной, то для достоверной оценки следует рассматривать и эффективность системы как случайную величину, зависящую от случайных факторов (расхода воздуха, подаваемого на очистку, концентрации пыли на входе в систему, дисперсного состава материала и его изменения в системе и пр.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Cortelis C., Gil A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separation // Progress in energy and combustion Science. 2007. Vol. 33. № 5. Pp. 409—452.
2. Nabil Kharoua, Lyes Khezzar, Zoubir Nemouchi. Study of the pressure drop and flow field in standard gas cyclone models using the granular model // International Journal of Chemical Engineering. 2011. Vol. 2011. Pp. 111—123.

3. The effect of cyclone shape and dust collector on gas-solid flow and performance / Chol-Ho Hong, Ji-Won Han, Byeong-Sam Kim, Cha-Sik Park, Oh Kyung Kwon // *International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering*. 2012. № 6. Pp. 37—42.
4. Buick K. Charakterische Uterschide zwischen Drehstromungsentstauber un Zyklon // *Verfahrenstechnik*. 1970. Bd. 4. № 11. S. 511—513.
5. Ciliberti D. F., Lancaster B. W. Perfomance of rotary flow cyclones // *AIChE J.* 1976. Vol. 22. № 2. Pp. 394—398. DOI: 10.1002/aic.690220224.
6. Strauss W. *Industrial gas cleaning*. Pergamon Press, 2006. 472 p.
7. Азаров В. Н., Сергина Н. М. Системы пылеулавливания с инерционными аппаратами в производстве строительных материалов // *Строительные материалы*. 2003. № 8. С. 14—15.
8. Сергина Н. М., Азаров В. Теоретическая оценка эффективности вихревых пылеуловителей с отсосом из бункерной зоны // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 11. С. 47—51.
9. Сергина Н. М. Аппараты ВЗП с отсосом из бункерной зоны в производстве строительных материалов // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 11. С. 43—46.
10. Сергина Н. М., Семенова Е. А., Кондратенко Т. О. Пути снижения пыли извести в атмосферу при производстве строительных материалов // *Альтернативная энергетика и экология*. 2013. № 12. С. 48—50.
11. Сергина Н. М., Семенова Е. А., Кисленко Т. А. Система обеспыливания для производства керамзита // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 4. URL : ivdon.ru/
12. Azarov V. N., Borovkov D. P., Redhwan A. M. Application of Swirling Flows in Aspiration Systems // *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2014. Vol. 8. № 4. Pp. 750—753.
13. Experimental Study of Secondary Swirling Flow Influence on Flows Structure at Separation Chamber Inlet of Dust Collector with Countercurrent Swirling flows / V. N. Azarov, D. V. Lukanin, D. P. Borovkov, A. M Redhwan // *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*. 2014. Vol. 8. № 5. Pp. 851—856.
14. Азаров В. Н. Комплексная оценка пылевой обстановки и разработка мер по снижению запыленности воздушной среды промышленных предприятий : дис... д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 2004.
15. Сергина Н. М. О применении вероятностного подхода к оценке эффективности многоступенчатых систем пылеулавливания // *Инженерный вестник Дона*. 2013. № 4. URL: ivdon.ru

© Сергина Н. М., Мохаммед Саиф Али Абдулджалил, 2015

Поступила в редакцию
в августе 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Сергина Н. М., Мохаммед Саиф Али Абдулджалил Об оценке эффективности систем пылеочистки в производстве строительных материалов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета*. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 108—118.

Об авторах:

Сергина Наталия Михайловна — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, kaf-bgdvt@mail.ru

Мохаммед Саиф Али Абдулджалил — аспирант кафедры безопасности жизнедеятельности в техносфере, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, kaf-bgdvt@mail.ru

N. M. Sergina, Mokhammed Saif Ali Abduldzhali

ON THE EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF DUST CLEANING SYSTEMS IN THE MANUFACTURE OF BUILDING MATERIALS

The paper considers the issues of the evaluation of the efficiency of dust cleaning systems with vortex inertial dust collectors with countercurrent swirling flows.

Key words: dust collector with countercurrent swirling flows, suction from the bunker area, efficiency, aerodynamic resistance.

REFERENCES

1. Cortelis C., Gil A. Modeling the gas and particle flow inside cyclone separation. *Progress in energy and combustion Science*, 2007, 33(5), pp. 409—452.
2. Nabil Kharoua, Lyes Khezzar, Zoubir Nemouchi. Study of the pressure drop and flow field in standard gas cyclone models using the granular model. *International Journal of Chemical Engineering*, 2011, vol. 2011, pp. 111—123.
3. Chol-Ho Hong, Ji-Won Han, Byeong-Sam Kim, Cha-Sik Park, Oh Kyung Kwon. The effect of cyclone shape and dust collector on gas-solid flow and performance. *International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering*, 2012, no. 6, pp. 37—42.
4. Buick K. Charakteristische Unterschiede zwischen Drehstromungsentstauber und Zyklon. *Verfahrenstechnik*, 1970, Bd. 4, no. 11, s. 511—513.
5. Ciliberti D. F., Lancaster B. W. Performance of rotary flow cyclones. *AIChE J.*, 1976, 22(2), pp. 394—398. DOI: 10.1002/aic.690220224.
6. Strauss W. *Industrial gas cleaning*. Pergamon Press, 2006. 472 p.
7. Azarov V. N., Sergina N. M. [Dust collecting systems in an inertial apparatus in production of construction materials]. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2003, no. 8, pp. 14—15.
8. Sergina N. M., Azarov D. V. [Theoretical evaluation of vortex dust separators efficiency with evacuation from bunker area]. *ISJAE* [International Scientific Journal "Life and Ecology"], 2013, no. 11, pp. 47—51.
9. Sergina N. M. [Counter swirling flows devices with evacuation from bunker area in inertial dust separation systems]. *ISJAE* [International Scientific Journal "Life and Ecology"], 2013, no. 11, pp. 43—46.
10. Sergina N. M., Semenova E. A., Kondratenko T. O. [Ways of lime dust emission decrease into atmosphere at construction materials production]. *ISJAE* [International Scientific Journal "Life and Ecology"], 2013, no. 12, pp. 48—50.
11. Sergina N. M., Semenova E. A., Kislenko T. A. [A system of purifying from dust for keramzit production]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2013, no. 4. URL : ivdon.ru/
12. Azarov V. N., Borovkov D. P., Redhwan A. M. Application of Swirling Flows in Aspiration Systems. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 2014, 8(4), pp. 750—753.
13. Azarov V. N., Lukanin D. V., Borovkov D. P., Redhwan A. M. Experimental Study of Secondary Swirling Flow Influence on Flows Structure at Separation Chamber Inlet of Dust Collector with Countercurrent Swirling flows. *International Review of Mechanical Engineering (IREME)*, 2014, 8(5), pp. 851—856.
14. Azarov V. N. *Kompleksnaya otsenka pylevoi obstanovki i razrabotka mer po snizheniyu zaplylenosti vozduшной среды promyshlennykh predpriyatii* [Complex assessment of dust situation and development of measures to decrease dust content in the air environment of industrial enterprises. Dr. Eng. Sci. Diss.]. Rostov-on-Don, 2004.
15. Sergina N. M. [About the probabilistic approach application to estimate the multilevel dust-collecting systems efficiency]. *Inzhenernyi vestnik Dona* [Engineering Journal of Don], 2013. № 4. URL: ivdon.ru

For citation:

Sergina N. M., Mokhammed Saif Ali Abduldzhali. [On the evaluation of the efficiency of dust cleaning systems in the manufacture of building materials]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 108—118.

About authors:

Sergina Nataliya Mikhailovna — Candidate of Engineering Science, Docent, Docent of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, kaf-bgdvt@mail.ru

Mokhammed Saif Ali Abduldzhali — Postgraduate Student of Life Safety in Technosphere Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, kaf-bgdvt@mail.ru

УДК 536.24

В. М. Фокин, А. В. Ковылин, А. В. Попова

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИ БЕЗОПАСНЫХ СТЕКЛОПАКЕТОВ

Ранее авторами статьи были исследованы теплофизические свойства (ТФС) стеклопакетов, такие как: эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности. Зная эти свойства стеклопакетов, можно решить проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду от оконного блока — пластикового профиля и стеклопакета.

Авторами статьи были исследованы различные виды стеклопакетов — с теплоизоляционным покрытием и без и определен эквивалентный коэффициент температуропроводности.

К л ю ч е в ы е с л о в а: энергоэффективность, стеклопакет, эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, эквивалентный коэффициент температуропроводности, экологическая безопасность.

В последние годы российский рынок окон развивался довольно успешно, серьезные компании готовы производить светопрозрачные конструкции практически любой сложности. Основная функция окна — обеспечить естественное освещение помещений и способствовать обеспечению комфортных условий в помещениях. А так как наибольшие потери теплоты в ограждениях зданий проходят через стеклопакеты, то чтобы снизить потери теплоты и обеспечить комфортные условия, нужно знать теплофизические свойства: эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, эквивалентный коэффициент температуропроводности [1].

В процессе эксплуатации здания необходимо знание ТФС строительных, теплоизоляционных материалов и изделий. Информация о свойствах новых, разрабатываемых и используемых материалов позволяет корректно проводить тепловые расчеты систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, выбирать оптимальные варианты эксплуатации и контролировать энергосбережение в зданиях. Актуальной является и задача снижения уровня эксплуатационного энергопотребления при определении ТФС.

На сегодняшний день существуют различные виды стеклопакетов: однокамерные, двухкамерные. А так как теплофизические свойства оконного блока существенно влияют на тепловой и воздушный режим зданий различного назначения, а также на работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество тепловой энергии, то появилась необходимость определить его ТФС: эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, объемную теплоемкость и эквивалентный коэффициент температуропроводности.

ТФС стеклопакетов ограждений зданий определяли методом неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и установкой для его осуществления, патент на изобретение РФ № 2530441 и № 2421711 [2, 3].

Сущность метода заключается в следующем [4]. На середину грани исследуемого образца устанавливается дополнительная термопара со стороны нагревателя. Образец помещается в устройство для осуществления способа неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов между нагревателем и холодильником, торцы закрываются герметическими крышками. В электронном блоке управления с помощью пульта управления на кнопках устанавливается температура нагревателя ($^{\circ}\text{C}$), температура холодильника ($^{\circ}\text{C}$), толщина образца (мм), и включается устройство. Далее нагреватель начинает нагреваться до заданной температуры, холодильник охлаждаться до заданной температуры. Электронный блок управления контролирует заданные температуры нагревателя и холодильника и поддерживает их с точностью $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$ до тех пор, пока тепловой поток, проходящий через испытываемый образец, не стабилизируется.

В дальнейшем наблюдение за тепловым потоком осуществляется автоматически, таймер в электронном блоке управления отсчитывает время наблюдения, по истечении которого производится запись показаний в блок памяти и автоматическое вычисление определяемых значений коэффициента теплопроводности и коэффициента термического сопротивления.

Одновременно после включения устройства производится запись температуры на поверхности исследуемого образца со стороны нагревателя с интервалом 1...3 мин и заносится значения в ЭВМ. Запись показаний производится до наступления стационарного режима.

Значения коэффициента теплопроводности и коэффициента термического сопротивления рассчитываются вычислительным устройством [5]. Коэффициент теплопроводности определяется по формуле (1), Вт/(м·К):

$$\lambda = \frac{q \cdot \delta}{T_n - T_x}, \quad (1)$$

где q — плотность стационарного теплового потока, проходящего через испытываемый образец, Вт/м²; δ — толщина образца, мм; T_n — температура нагревателя, $^{\circ}\text{C}$; T_x — температура холодильника, $^{\circ}\text{C}$.

Коэффициент термического сопротивления определяется по формуле (2), (м²·К)/Вт:

$$R = \frac{T_n - T_x}{q}. \quad (2)$$

Для того чтобы определить объемную теплоемкость и температуропроводность исследуемого образца, выявили температурную волну на поверхности образца, которая образуется до наступления стационарного режима, когда температура поверхности перестает изменяться во времени и становится постоянной. До наступления стационарного режима температуры поверхности сопряжения образца и нагревателя будут разные [6]. Поэтому для нахождения температуры поверхности образца со стороны нагревателя на его поверхность установили дополнительную термопару для измерения температуры от начала нагрева до наступления стационарного режима.

Далее определяется объемная теплоемкость по формуле (3), кДж/(м³·К):

$$c\rho = \frac{B^2 \cdot z}{\lambda \cdot 2\pi}. \quad (3)$$

Тепловая активность плоского образца, Вт/(м²·К), определяется по формуле (4):

$$B = \frac{q}{\vartheta_{\Pi}}. \quad (4)$$

Амплитуда колебаний температурной полуволны определяется по формуле (5), °С,

$$\vartheta_{\Pi} = 0,5(T_{\max} - T_{\min}), \quad (5)$$

где z — время измерения температуры со стороны нагревателя до наступления стационарного режима, с; $T_{\max}$ — максимальная температура поверхности плоского образца со стороны нагревателя, °С; $T_{\min}$ — минимальная температура поверхности плоского образца со стороны нагревателя, °С [7].

Коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле (6), м²/с:

$$a = \frac{\lambda}{c\rho}. \quad (6)$$

Для исследования ТФС стеклопакетов ограждений зданий были изготовлены однокамерные и двухкамерные стеклопакеты с покрытием стекол пленкой и без покрытия. Размеры стеклопакетов:

- однокамерный стеклопакет без пленки 250×250×24 мм (4–16–4) мм;
- однокамерный стеклопакет 250×250×24 мм с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–16–4) мм;
- однокамерный стеклопакет 250×250×32 мм с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–24–4) мм;
- однокамерный стеклопакет 250×250×24 мм с пленкой (бронза) на одном стекле (4бронза–16–4) мм;
- двухкамерный стеклопакет без пленки 250×250×32 мм (4–10–4–10–4) мм;
- двухкамерный стеклопакет 250×250×32 мм с расположением пленок на двух крайних стеклах (4И–10–4–10–И4) мм;
- двухкамерный стеклопакет 250×250×32 мм с расположением пленок на среднем и крайнем стеклах (4–10–4И–10–И4) мм.

Определим ТФС (эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, объемную теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности) **однокамерного стеклопакета (4–16–4)** [8].

Используем приведенную выше методику определения ТФС стеклопакетов. Так, для однокамерного стеклопакета (4–16–4) ТФС имеют следующие значения. Эквивалентный коэффициент теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $\lambda_{\text{экв}} = 0,148$ Вт/(м·К).

Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $R_{\text{экв}} = 0,162$ (м²·К)/Вт.

Объемная теплоемкость рассчитывается по формуле (3):

$$c_p = \frac{17,7^2 \cdot 1260}{0,148 \cdot 2 \cdot 3,14} = 425, \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Тепловая активность рассчитывается по формуле (4):

$$B = \frac{98}{5,55} = 17,7, \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Амплитуда колебаний температурной полуволны рассчитывается по формуле (5):

$$\vartheta_{\Pi} = 0,5(37 - 25,9) = 5,55, \text{ }^{\circ}\text{C};$$

Эквивалентный коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле (6):

$$a_{\text{экв}} = \frac{0,148}{425000} = 0,348 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств однокамерного стеклопакета (4–16–4) при температуре нагревателя 37 °С и температуре холодильника 24 °С приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

ТФС однокамерного стеклопакета (4–16–4) при температуре нагревателя 37 °С и температуре холодильника 24 °С

Параметр	Значение
Время измерения τ , мин	21
Температура нагревателя $T_{\text{н}}$, °С	37
Температура холодильника $T_{\text{х}}$, °С	22
Разность температур ΔT , °С	15
Толщина δ , м	0,024
Тепловой поток q , Вт/м ²	98
Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, Вт/(м·К)	0,148
Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности $R_{\text{экв}}$ (м ² ·К)/Вт	0,162
Объемная теплоемкость c_p , кДж/(м ³ ·К)	425
Эквивалентный коэффициент температуропроводности $a_{\text{экв}}$, м ² /с	$0,348 \cdot 10^{-6}$

Определим ТФС (эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, объемную теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности) **однокамерного стеклопакета с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–16–4).**

Используем приведенную выше методику определения ТФС стеклопакетов. Так, для однокамерного стеклопакета с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–16–4) ТФС имеют следующие значения [9]. Эквивалентный коэффициент теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $\lambda_{\text{экв}} = 0,048 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $R_{\text{экв}} = 0,5 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$.

Объемная теплоемкость рассчитывается по формуле (3):

$$c_p = \frac{7,2^2 \cdot 1020}{0,048 \cdot 2 \cdot 3,14} = 176, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Тепловая активность рассчитывается по формуле (4):

$$B = \frac{30}{4,15} = 7,2, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Амплитуда колебаний температурной полуволны рассчитывается по формуле (5):

$$\vartheta_{\text{п}} = 0,5(30 - 21,7) = 4,15, \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Эквивалентный коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле (6):

$$a_{\text{экв}} = \frac{0,048}{176000} = 0,27 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств однокамерного стеклопакета с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–16–4) при температуре нагревателя $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре холодильника $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

ТФС однокамерного стеклопакета с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–16–4) при температуре нагревателя $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре холодильника $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Параметр	Значение
Время измерения τ , мин	17
Температура нагревателя $T_{\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$	30
Температура холодильника $T_{\text{х}}$, $^{\circ}\text{C}$	15
Разность температур ΔT , $^{\circ}\text{C}$	15
Толщина δ , м	0,024
Тепловой поток q , Вт/м ²	30
Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, Вт/(м·К)	0,048
Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности $R_{\text{экв}}$ (м ² ·К)/Вт	0,5
Объемная теплоемкость c_p , кДж/(м ³ ·К)	176
Эквивалентный коэффициент температуропроводности $a_{\text{экв}}$, м ² /с	$0,27 \cdot 10^{-6}$

Определим ТФС (эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, объемную теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности) **однокамерного стеклопакета с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–24–4).**

Используем приведенную выше методику определения ТФС стеклопакетов. Так, для однокамерного стеклопакета с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–24–4) ТФС имеют следующие значения. Эквивалентный коэффициент теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $\lambda_{\text{экв}} = 0,048 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $R_{\text{экв}} = 0,666 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$.

Объемная теплоемкость рассчитывается по формуле (3):

$$c_p = \frac{4,2^2 \cdot 1260}{0,048 \cdot 2 \cdot 3,14} = 74, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Тепловая активность рассчитывается по формуле (4):

$$B = \frac{22,5}{5,4} = 4,2, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Амплитуда колебаний температурной полуволны рассчитывается по формуле (5):

$$\vartheta_{\text{п}} = 0,5(30 - 19,2) = 5,4, \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Эквивалентный коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле (6):

$$a_{\text{экв}} = \frac{0,048}{74000} = 0,649 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств однокамерного стеклопакета с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–24–4) при температуре нагревателя $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и температуре холодильника $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$ приведены в табл. 3 [9].

Т а б л и ц а 3

*ТФС однокамерного стеклопакета с пленкой (напылением) на одном стекле
(4И–24–4) при температуре нагревателя $30 \text{ }^{\circ}\text{C}$ и
температуре холодильника $15 \text{ }^{\circ}\text{C}$*

Параметр	Значение
Время измерения τ , мин	21
Температура нагревателя $T_{\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$	30
Температура холодильника $T_{\text{х}}$, $^{\circ}\text{C}$	15
Разность температур ΔT , $^{\circ}\text{C}$	15
Толщина δ , м	0,032
Тепловой поток q , Вт/м^2	22,5
Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, $\text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	0,048
Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности $R_{\text{экв}}$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$	0,666
Объемная теплоемкость c_p , $\text{кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$	74
Эквивалентный коэффициент температуропроводности $a_{\text{экв}}$, $\text{м}^2/\text{с}$	$0,649 \cdot 10^{-6}$

Определим ТФС (эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, объемную теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности) **однокамерного стеклопакета с пленкой (бронза) на одном стекле (4бронза–16–4)**.

Используем приведенную выше методику определения ТФС стеклопакетов. Так, для однокамерного стеклопакета с пленкой (бронза) на одном стекле (4бронза–16–4) ТФС имеют следующие значения. Эквивалентный коэффициент теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $\lambda_{\text{экв}} = 0,136 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $R_{\text{экв}} = 0,176 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$.

Объемная теплоемкость рассчитывается по формуле (3):

$$c_p = \frac{19,98^2 \cdot 960}{0,136 \cdot 2 \cdot 3,14} = 449, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Тепловая активность рассчитывается по формуле (4):

$$B = \frac{84,9}{4,25} = 19,98, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Амплитуда колебаний температурной полуволны рассчитывается по формуле (5):

$$\vartheta_{\text{п}} = 0,5(30 - 21,5) = 4,25, \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Эквивалентный коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле (6):

$$a_{\text{экв}} = \frac{0,136}{449000} = 0,303 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств однокамерного стеклопакета с пленкой (бронза) на одном стекле (4бронза–16–4) при температуре нагревателя 30°C и температуре холодильника 15°C приведены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

ТФС однокамерного стеклопакета с пленкой (бронза) на одном стекле (4бронза–16–4) при температуре нагревателя 30°C и температуре холодильника 15°C

Параметр	Значение
Время измерения τ , мин	16
Температура нагревателя $T_{\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$	30
Температура холодильника $T_{\text{х}}$, $^{\circ}\text{C}$	15
Разность температур ΔT , $^{\circ}\text{C}$	15
Толщина δ , м	0,024
Тепловой поток q , Вт/м ²	84,9
Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, Вт/(м · К)	0,136
Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности $R_{\text{экв}}$ (м ² · К)/Вт	0,176
Объемная теплоемкость c_p , кДж/(м ³ · К)	449
Эквивалентный коэффициент температуропроводности $a_{\text{экв}}$, м ² /с	$0,303 \cdot 10^{-6}$

Определим ТФС (эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности [10], объемную теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности) **двухкамерного стеклопакета без пленки (4–10–4–10–4)**.

Используем приведенную выше методику определения ТФС стеклопакетов. Так, для двухкамерного стеклопакета без пленки (4–10–4–10–4) ТФС имеют следующие значения. Эквивалентный коэффициент теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $\lambda_{\text{экв}} = 0,120 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $R_{\text{экв}} = 0,266 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$.

Объемная теплоемкость рассчитывается по формуле (3):

$$c_p = \frac{13,1^2 \cdot 960}{0,12 \cdot 2 \cdot 3,14} = 219, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Тепловая активность рассчитывается по формуле (4):

$$B = \frac{56,3}{4,3} = 13,1, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Амплитуда колебаний температурной полутолщины рассчитывается по формуле (5):

$$\vartheta_{\text{п}} = 0,5(35 - 26,5) = 4,3, \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Эквивалентный коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле (6):

$$a_{\text{экв}} = \frac{0,12}{219000} = 0,55 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета без пленки (4–10–4–10–4) при температуре нагревателя 35 °С и температуре холодильника 20 °С приведены в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

ТФС двухкамерного стеклопакета без пленки (4–10–4–10–4) при температуре нагревателя 35 °С и температуре холодильника 20 °С

Параметр	Значение
Время измерения τ , мин	16
Температура нагревателя $T_{\text{н}}$, °С	35
Температура холодильника $T_{\text{х}}$, °С	20
Разность температур ΔT , °С	15
Толщина δ , м	0,032
Тепловой поток q , Вт/м ²	56,3
Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, Вт/(м·К)	0,120
Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности $R_{\text{экв}}$ (м ² ·К)/Вт	0,266
Объемная теплоемкость c_p , кДж/(м ³ ·К)	219
Эквивалентный коэффициент температуропроводности $a_{\text{экв}}$, м ² /с	$0,55 \cdot 10^{-6}$

Определим ТФС (эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, объемную теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности) **двухкамерного стеклопакета с расположением пленок на двух крайних стеклах (4И–10–4–10–И4).**

Используем приведенную выше методику определения ТФС стеклопакетов. Так, для двухкамерного стеклопакета с расположением пленок на двух крайних стеклах (4И–10–4–10–И4) ТФС имеют следующие значения. Эквивалентный коэффициент теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $\lambda_{\text{экв}} = 0,046 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ [11].

Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $R_{\text{экв}} = 0,695 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$.

Объемная теплоемкость рассчитывается по формуле (3):

$$c_p = \frac{4,32^2 \cdot 1080}{0,046 \cdot 2 \cdot 3,14} = 70, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Тепловая активность рассчитывается по формуле (4):

$$B = \frac{21,6}{5} = 4,32, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Амплитуда колебаний температурной полуволны рассчитывается по формуле (5):

$$\vartheta_{\text{п}} = 0,5(35 - 25) = 5, \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Эквивалентный коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле (6):

$$a_{\text{экв}} = \frac{0,046}{70000} = 0,657 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета с расположением пленок на двух крайних стеклах (4И–10–4–10–И4) при температуре нагревателя 35 °С и температуре холодильника 20 °С приведены в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

ТФС двухкамерного стеклопакета с расположением пленок на двух крайних стеклах (4И–10–4–10–И4) при температуре нагревателя 35 °С и температуре холодильника 20 °С

Параметр	Значение
Время измерения τ , мин	18
Температура нагревателя $T_{\text{н}}$, °С	35
Температура холодильника $T_{\text{х}}$, °С	20
Разность температур ΔT , °С	15
Толщина δ , м	0,032
Тепловой поток q , Вт/м ²	21,6
Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, Вт/(м · К)	0,046
Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности $R_{\text{экв}}$ (м ² · К)/Вт	0,695
Объемная теплоемкость c_p , кДж/(м ³ · К)	70
Эквивалентный коэффициент температуропроводности $a_{\text{экв}}$, м ² /с	$0,657 \cdot 10^{-6}$

Определим ТФС (эквивалентный коэффициент теплопроводности, эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности, объемную теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности) **двухкамерного стеклопакета с расположением пленок на среднем и крайнем стеклах (4–10–4И–10–И4).**

Используем приведенную выше методику определения ТФС стеклопакетов. Так, для двухкамерного стеклопакета с расположением пленок на среднем и крайнем стеклах (4–10–4И–10–И4) ТФС имеют следующие значения. Эквивалентный коэффициент теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $\lambda_{\text{экв}} = 0,069 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$.

Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности определяется на экспериментальной установке, $R_{\text{экв}} = 0,463 \text{ (м}^2 \cdot \text{К)/Вт}$.

Объемная теплоемкость рассчитывается по формуле (3):

$$c_p = \frac{6,7^2 \cdot 1080}{0,069 \cdot 2 \cdot 3,14} = 112, \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Тепловая активность рассчитывается по формуле (4):

$$B = \frac{32,4}{4,85} = 6,7, \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}.$$

Амплитуда колебаний температурной полуволны рассчитывается по формуле (5):

$$\vartheta_{\Pi} = 0,5(35 - 25,3) = 4,85, \text{ }^{\circ}\text{C}.$$

Эквивалентный коэффициент температуропроводности рассчитывается по формуле (6):

$$a_{\text{экв}} = \frac{0,069}{112000} = 0,62 \cdot 10^{-6}, \text{ м}^2/\text{с}.$$

Результаты экспериментального исследования теплофизических свойств двухкамерного стеклопакета с расположением пленок на среднем и крайнем стеклах (4–10–4И–10–И4) при температуре нагревателя 35°C и температуре холодильника 20°C приведены в табл. 7.

Т а б л и ц а 7

ТФС двухкамерного стеклопакета с расположением пленок на среднем и крайнем стеклах (4–10–4И–10–И4) при температуре нагревателя 35°C и температуре холодильника 20°C

Параметр	Значение
Время измерения τ , мин	18
Температура нагревателя $T_{\text{н}}$, $^{\circ}\text{C}$	35
Температура холодильника $T_{\text{х}}$, $^{\circ}\text{C}$	20
Разность температур ΔT , $^{\circ}\text{C}$	15
Толщина δ , м	0,032
Тепловой поток q , Вт/м ²	32,4
Эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, Вт/(м·К)	0,069
Эквивалентное термическое сопротивление теплопроводности $R_{\text{экв}}$ (м ² ·К)/Вт	0,463
Объемная теплоемкость c_p , кДж/(м ³ ·К)	112
Эквивалентный коэффициент температуропроводности $a_{\text{экв}}$, м ² /с	$0,62 \cdot 10^{-6}$

Результаты экспериментальных исследований однокамерного стеклопакета с теплозащитной пленкой (бронза) (4бронза-16-4), двухкамерного стеклопакета без пленки (4-10-4-10-4), двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками (напылением) на среднем и крайнем стеклах (4И-10-4И-10-4), однокамерного стеклопакета с теплозащитной пленкой (напылением) (4И-24-4), однокамерного стеклопакета с теплозащитной пленкой (напылением) (4И-16-4), двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками (напылением) на двух крайних стеклах (4И-10-4-10-И4) приведены в табл. 8.

Т а б л и ц а 8

Значения эквивалентного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, эквивалентного термического сопротивления теплопроводности $R_{\text{экв}}$, эквивалентного коэффициента температуропроводности $a_{\text{экв}}$ и плотности теплового потока q стеклопакетов

Свойства стеклопакета Вид стеклопакета	$\lambda_{\text{экв}}$, Вт/(м·°С)	$R_{\text{экв}}$, (м ² ·К)/Вт	$a_{\text{экв}}$, м ² /с	q , Вт/м ²
1	2	3		4
Однокамерный стеклопакет без пленки (4-16-4)	0,148	0,162	$0,348 \cdot 10^{-6}$	98
Однокамерный стеклопакет с пленкой (бронза) (4бронза-16-4)	0,136	0,176	$0,303 \cdot 10^{-6}$	84,9
Двухкамерный стеклопакет без пленки (4-10-4-10-4)	0,120	0,266	$0,55 \cdot 10^{-6}$	56,3
Двухкамерный стеклопакет с пленкой (напылением) на крайнем и среднем стеклах (4И-10-4И-10-4)	0,069	0,463	$0,62 \cdot 10^{-6}$	32,4
Однокамерный стеклопакет с пленкой (напыление) (4И-24-4)	0,048	0,666	$0,649 \cdot 10^{-6}$	22,5
Однокамерный стеклопакет с пленкой (напыление) (4И-16-4)	0,048	0,5	$0,27 \cdot 10^{-6}$	30
Двухкамерный стеклопакет с пленкой (напылением) на двух крайних стеклах (4И-10-4-10-И4)	0,046	0,695	$0,657 \cdot 10^{-6}$	21,6

По полученным экспериментальным данным ТФС стеклопакетов [12] можно сделать *выводы*:

1. При разности температуры между холодильником и нагревателем 15 °С наименьший эквивалентный коэффициент температуропроводности у однокамерного стеклопакета с пленкой (напыление) (4И-16-4).
2. При разности температуры между холодильником и нагревателем 15 °С наибольший эквивалентный коэффициент температуропроводности у двухкамерного стеклопакета с пленкой (напылением) на двух крайних стеклах (4И-10-4-10-И4).

Сравнивая полученные экспериментальные данные однокамерных стеклопакетов с теплозащитной пленкой (напыление), пленкой (бронза) и без пленки, можно сделать выводы [13, 14, 15]:

1. Наименьший коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ср}} = 0,05$ Вт/(м·°С) имеет однокамерный стеклопакет с пленкой (напыление) (4И-16-4), что в три

раза (в 3,3 раза) меньше коэффициента теплопроводности однокамерного стеклопакета без пленки (4–16–4).

2. Самое высокое значение термического сопротивления теплопроводности $R_{\text{ср}} = 0,597 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ имеет однокамерный стеклопакет с пленкой (напыление) (4И–24–4), что в 4,1 раза больше термического сопротивления теплопроводности однокамерного стеклопакета без пленки (4–16–4).

3. Плотность теплового потока наибольшая в однокамерном стеклопакете с пленкой (бронза) (4бронза–16–4), что в 3,8 раза больше, чем плотность теплового потока однокамерного стеклопакета с пленкой (напыление) (4И–24–4).

Сравнивая полученные экспериментальные данные двухкамерных стеклопакетов с теплозащитной пленкой и без, можно сделать выводы [16, 17]:

1. Наименьший коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ср}} = 0,049 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°С)}$ имеет двухкамерный стеклопакет с пленкой на двух крайних стеклах (4И–10–4–10–И4), что почти в три раза (в 2,5 раза) меньше коэффициента теплопроводности двухкамерного стеклопакета без пленки (4–10–4–10–4).

2. Самое высокое значение термического сопротивления теплопроводности $R_{\text{ср}} = 0,655 \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}$ имеет двухкамерный стеклопакет с пленкой на двух крайних стеклах (4И–10–4–10–И4), что в 2,5 раза больше термического сопротивления теплопроводности двухкамерного стеклопакета без пленки (4–10–4–10–4).

3. Плотность теплового потока наибольшая в двухкамерном стеклопакете без пленки (4–10–4–10–4), что в 2,4 раза больше, чем плотность теплового потока двухкамерного стеклопакета с пленкой на двух крайних стеклах (4И–10–4–10–И4).

Сравнивая полученные экспериментальные данные однокамерного и двухкамерного стеклопакетов с теплозащитной пленкой и без пленки, можно сделать выводы:

1. Более оптимальным вариантом «цена — качество теплофизических свойств» является однокамерный стеклопакет с теплозащитной пленкой (напылением) 4И–16–4.

2. Однако необходимо учитывать, что стоимость низкоэмиссионного стекла И (20...25 у.е./м²) в два раза превышает цену обычного стекла (8...12 у.е./м²).

3. Необходимо учитывать, что звукопоглощение выше в двухкамерном стеклопакете по сравнению с однокамерными (в плане дальнейших исследований).

4. В литературе нет данных по сроку службы, долговечности и времени эксплуатации теплозащитных пленок и напыления, что также входит в планы дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абдурафиков Р., Спиридонов А. В. Как оценивать энергоэффективные окна // Энергосбережение. 2013. № 8. С. 28—31.
2. Лепилов В. И. Исследование теплофизических свойств и характеристик систем массивных экранов : дис. канд. техн. наук. Астрахань, 2007.
3. Фокин В. М., Ковылин А. В. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов. Пат. № 2421711 Российская Федерация, МПК⁸ G01N25/00.

4. Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В. Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов и установка для его осуществления. Пат. № 2530441 Российская Федерация, МПК⁸ G01N25/18.
5. Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В. Экспериментальное исследование теплофизических свойств стеклопакета и пластикового профиля оконного блока // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 38 (57). С. 158—168.
6. Фокин В. М., Ковылин А. В., Чернышов В. Н. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов. М.: Спектр, 2011. 155 с.
7. Фокин В. М., Ковылин А. В. Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2009. Сер.: Строительство и архитектура. Вып. 14(33). С. 123—127.
8. Ковылин А. В., Фокин В. М. Определение теплотехнических свойств оконного стекла для ограждений зданий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. 2011. Сер.: Строительство и архитектура. Вып. 21(40). С. 124—127.
9. Фокин В. М., Ковылин А. В. Теплофизические исследования строительных материалов методом неразрушающего контроля с использованием тепломера // Теплофизические исследования и измерения в энергосбережении, при контроле, управлении и улучшении качества продукции и услуг: материалы Междунар. теплофиз. шк. Тамбов: ТГТУ, 2010. С. 23—26.
10. Фокин В. М., Ковылин А. В. Определение теплофизических свойств ограждающих конструкций зданий методом неразрушающего контроля с использованием электронного измерителя плотности тепловых потоков ИТП-МГ 4.03 «Поток» // Актуальные проблемы в строительстве и архитектуре. Образование. Наука. Практика : матер. 66-й Всерос. науч.-технич. конф. по итогам НИР университета за 2008 г. Самара : СГАСУ, 2009. С. 273—275.
11. Фокин В. М. Основы энергосбережения и энергоаудита. М.: Машиностроение-1, 2006.
12. Фокин В. М. Научно-методологические основы определения теплофизических свойств материалов методом неразрушающего контроля. М.: Машиностроение-1, 2003. 140 с.
13. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е. В. Аметистов, В. А. Григорьев, Б. Т. Емцев и др.; под общ. ред. В. А. Григорьева и В. М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с. (Теплоэнергетика и теплотехника).
14. Champoussin J.-C. Sur la pertinence des modeles thermocinetiques et l'estimation de leurs caracteristiques // Heat and Mass Trasfer. 1983. Vol. 26. Iss. 8. Pp. 1229—1239. doi:10.1016/S0017-9310(83)80178-1
15. Chohan R. K. Effects of manufacturing tolerance on the thermal response of industrial thermometers // Proc. Inst., Mech. Eng. 1986. Vol. 2000. № 4. Pp. 285—289.
16. Dantzig J. A. Improved transient response of thermocouple sensor // Rev. Sci. Instrum. 1985. 56 (5). <http://dx.doi.org/10.1063/1.1138214>.
17. Lanivik M. Thermometry by surface probes // High Temperatures-High Pressures. 1983. Vol. 15. № 2. Pp. 199—204.

© Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В., 2015

Поступила в редакцию
в июне 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Фокин В. М., Ковылин А. В., Попова А. В. Экспериментальное определение теплофизических свойств энергоэффективных и экологически безопасных стеклопакетов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 119—133.

Об авторах:

Фокин Владимир Михайлович — д-р техн. наук, проф., зав. каф. энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Ковылин Андрей Васильевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Попова Анна Владимировна — учебный мастер кафедры энергоснабжения и теплотехники, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

V. M. Fokin, A. V. Kovylin, A. V. Popova

EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THERMOPHYSICAL PROPERTIES OF POWER EFFECTIVE AND ECOLOGICALLY SAFE DOUBLE-GLAZED WINDOWS

Earlier, the authors of the article investigated thermophysical properties (ThPP) of double-glazed windows such as: equivalent coefficient of heat conductivity, equivalent thermal resistance of heat conductivity. Taking into account these properties of double-glazed windows it is possible to solve problems of energy saving and decrease losses of warmth into the environment from the window block — a plastic profile and a double-glazed window.

The authors of the present article investigated different types of double-glazed windows — with a heat-insulating covering and without it and the equivalent coefficient of heat diffusivity is defined.

Key words: energy efficiency, double-glazed window, equivalent coefficient of heat conductivity, equivalent thermal resistance of heat conductivity, equivalent coefficient of heat diffusivity, ecological safety.

REFERENCES

1. Abdurafikov R., Spiridonov A. V. [How to evaluate energy efficient windows]. *Energoberezhenie* [Energy efficiency], 2013, no. 8, pp. 28—31.
2. Lepilov V. I. *Issledovanie teplofizicheskikh svoystv i kharakteristik sistem massivnykh ekranov : dissertatsiya kandidata tekhnicheskikh nauk* [Research of thermal-physical properties and characteristics of bulk shields systems. Cand. Eng. Sci. Diss.]. Astrakhan', 2007.
3. Fokin V. M., Kovylin A. V. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya kompleksa teplofizicheskikh kharakteristik tverdykh stroitel'nykh materialov* [Method of nondestructive control over a complex of thermal-physical characteristics of solid construction materials. Pat. RF, no. 2421711].
4. Fokin V. M., Kovylin A. V., Popova A. V. *Sposob nerazrushayushchego kontrolya kompleksa teplofizicheskikh kharakteristik tverdykh stroitel'nykh materialov i ustanovka dlya ego osushchestvleniya* [Method of nondestructive control over a complex of thermal-physical characteristics of solid construction materials and installation for its implementation. Pat. RF, no. 2530441].
5. Fokin V. M., Kovylin A. V., Popova A. V. [Experimental study of thermal-physical properties of a double-glazed window and plastic profile of the window block]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 38(57), pp. 158—168.
6. Fokin V. M., Kovylin A. V., Chernyshov V. N. *Energoeffektivnye metody opredeleniya teplofizicheskikh svoystv stroitel'nykh materialov* [Energy efficient methods of determination of thermal-physical properties of construction materials]. Moscow, Spektr Publ., 2011. 155 p.
7. Fokin V. M., Kovylin A. V. [Theoretical fundamentals of the determination of thermal conductivity, volumetric heat capacity and thermal diffusivity of materials according to surface thermal measurements through the method of nondestructive test]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], iss. 14(33), pp. 123—127.
8. Kovylin A. V., Fokin V. M. [Definition thermal characteristics of the window glass for barriers buildings]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], iss. 21(40), pp. 124—127.
9. Fokin V. M., Kovylin A. V. Thermal-physical researches of construction materials by the method of nondestructive control with the help of the heat flow meter. *Teplofizicheskie issledovaniya i izmereniya v energoberezharii, pri kontrole, upravlenii i uluchshenii kachestva produktsii i uslug: materialy Mezhdunarodnoi teplofizicheskoi shkoly* [Thermal-physical researches and measurements in

energy efficiency at control, management and improvement of quality of products and services. Proc. of Inter. Thermal-Psyc. School]. Tambov, TGTU Publ., 2010. Pp. 23—26.

10. Fokin V. M., Kovylin A. V. [Determination of thermal-physical properties of enclosing structures of buildings by the method of nondestructive control with the help of electronic measurer of density of thermal streams of ITP-MG 4.03 "Potok"]. *Aktual'nye problemy v stroitel'stve i arkhitekture. Obrazovanie. Nauka. Praktika : materialy 66-i Vserossiiskoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii po itogam NIR universiteta za 2008 g.* [Current problems in construction and architecture. Education. Science. Practice. Proc. of 66th All-Russian Scien.-Tech. Conf. following the results of R&D university over 2008]. Samara, SGASU Publ., 2009. Pp. 273—275.

11. Fokin V. M. *Osnovy energosberezheniya i energoaudita* [Principals of energy efficiency and energy audit]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2006.

12. Fokin V. M. *Nauchno-metodologicheskie osnovy opredeleniya teplofizicheskikh svoystv materialov metodom nerazrushayushchego kontrolya* [Scientific and methodological principals of determination of thermal-physical properties of materials by the method of nondestructive control]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2003. 140 p.

13. Ametistov E. V., Grigor'ev V. A., Emtsev B. T. *Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskii eksperiment: Spravochnik* [Heat- and mass-transfer. Heat and technical experiment. Reference book]. Moscow, Energoizdat Publ., 1982. 512 p.

14. Champoussin J.-C. Sur la pertinence des modeles thermocinetiques et l'estimation de leurs caracteristiques. *Heat and Mass Trasfer*, 1983, 26(8), pp. 1229—1239. doi:10.1016/S0017-9310(83)80178-1

15. Chohan R. K. Effects of manufacturing tolerance on the thermal response of industrial thermometers. *Proc. Inst., Mech. Eng.*, 1986, 2000(4), pp. 285—289.

16. Dantzig J. A. Improved transient response of thermocouple sensor. *Rev. Sci. Instrum.*, 1985, 56(5). <http://dx.doi.org/10.1063/1.1138214>

17. Lanivik M. Thermometry by surface probes. *High Temperatures-High Pressures*, 1983, 15(2), pp. 199—204.

For citation:

Fokin V. M., Kovylin A. V., Popova A. V. [Experimental determination of thermophysical properties of power effective and ecologically safe double-glazed windows]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 119—133.

About authors:

Fokin Vladimir Mikhailovich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Power Supply and Heat Engineering Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Kovylin Andrei Vasil'evich — Candidate of Engineering Science, Senior Lecturer of Power Supply and Heat Engineering Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Popova Anna Vladimirovna — Training master of Power Supply and Heat Engineering Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 628.349.08

В. И. Чурикова^а, А. Б. Голованчиков^б, Г. В. Чичерина^а

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Волгоградский государственный технический университет*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА МАССОВЫДЕЛЕНИЯ СЕРЫ ПРИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОМ ОКИСЛЕНИИ СЕРОВОДОРОДА

Приведены результаты экспериментального исследования электрохимического процесса окисления сульфид-ионов в модельных растворах, содержащих их в диапазоне концентраций, соответствующих нахождению в ряде природных газов и водных растворах. На основе экспериментальных данных проведено математическое моделирование процесса, оценена адекватность полученной модели и проведен ее корреляционный анализ.

К л ю ч е в ы е с л о в а: электрохимическое окисление сероводорода, зависимость массы получаемой серы от времени электролиза, математическая модель процесса.

Проблема очистки природного, попутного газов, воды от присутствия сероводорода является актуальной. Наличие сероводорода приводит к интенсивной коррозии газовой и нефтяной аппаратуры, нарушению качественных характеристик природной воды, нарушению экологического состояния окружающей среды. Наличие сероводорода в воздухе выше концентрации 1 г/м^3 приводит к летальному исходу для людей и млекопитающих [1]. Известны технологии и устройства [2, 3], позволяющие связывать и выводить сульфид-ионы из «активного» состояния. Однако в этих технологиях [4] используются либо физические методы разрушения с помощью плазмотронов, либо химические с применением химических веществ, связывающих сульфид-ионы в «нерастворимые» соединения. Эти способы относительно дороги и сопровождаются образованием большого количества отходов, способствующих нарушению экологического равновесия. Достоинствами электрохимического метода является то, что он сопровождается выделением продукта — элементарной серы, являющейся экологически чистым продуктом, — и дает возможность управлять процессом окисления чисто электрическим способом [5].

Ранее [6] представлены результаты исследования кинетики процесса электрохимического окисления сульфид-ионов, находящихся в электропроводящей жидкой среде, содержащей хлорид-ионы. Определены оптимальные значения плотности тока и электрохимического потенциала, позволяющие получать максимальный выход массы элементарной серы.

Целью данной статьи является исследование влияния концентрации сульфид-иона на количественные характеристики массы серы, выделяющейся при электрохимическом окислении из водных растворов и растворов, содержащих, наряду с сульфид-ионами хлорид-ионы, и разработка на основе этих данных математической модели процесса выделения серы во времени.

В качестве модельного раствора использован раствор сульфида натрия в концентрациях $1 \dots 0,1$ моль/л. В качестве токопроводящей добавки применяли раствор хлорида натрия при соотношении концентраций сульфид-иона к хлорид-иону 1 к 0,1. В качестве источника тока использован выпрямитель ЛИПС-1. Оптимальная плотность тока выдерживалась равной $0,75 \text{ А/дм}^2$.

Масса выделившейся на платиновом электроде серы определялась весовым анализом с использованием электронных весов. Температура растворов поддерживалась равной (23...24) °С.

Из экспериментальных данных, представленных на рис. 1, следует, что максимальная масса серы выделяется при концентрации сульфид-ионов, равной 0,5 моль/л.

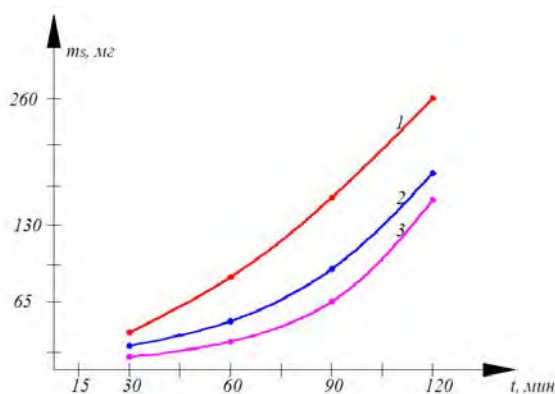


Рис. 1. Зависимость выделившейся массы серы от времени электролиза. Раствор $\text{Na}_2\text{S} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$, м: 1 — 0,5; 2 — 0,25; 3 — 1,0. Температура 23 °С. Плотность тока 0,75 А/дм²

Введение в модельный раствор хлорид-ионов, как показывают экспериментальные данные (рис. 2), интенсифицирует процесс увеличения массовыделения серы. За часовую экспозицию в растворе, содержащем хлорид-ионы, количество серы, выделившейся на аноде, увеличилось на 32 %. Это увеличение может быть объяснено участием в процессе химического окисления сульфид-ионов атомарного хлора, образующегося в одновременно протекающем процессе окисления хлорид-ионов.

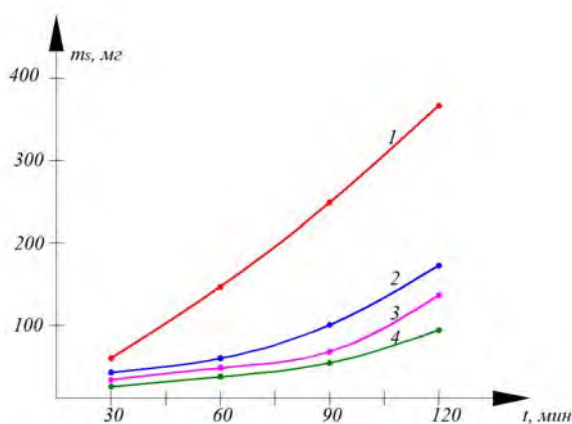


Рис. 2. Зависимость выделившейся массы серы от времени электролиза раствора сульфида натрия с хлоридом натрия при соотношении 1/0,1. Концентрация сульфида натрия, моль/л: 1 — 0,5; 2 — 0,25; 3 — 1,0; 4 — 0,1. Температура 23 °С. Плотность тока 0,75 А/дм²

Вышеприведенные данные явились материалом для расчета математической модели экспериментальной зависимости электрохимического процесса выделения серы от времени по методикам, изложенным в [7, 8].

В табл. 1 приведены результаты экспериментальных данных, полученных в трех параллельных опытах.

Т а б л и ц а 1

Зависимость массы серы, мг, от времени экспозиции

Наименование параметра	Обозначение	Величина				
Время, мин	τ	15	30	60	90	120
Количество серы в первом параллельном опыте	S_1	27,0	73,0	130,0	205,0	360,0
Количество серы во втором параллельном опыте	S_2	32,0	66,0	110,0	192,5	326,0
Количество серы в третьем параллельном опыте	S_3	35,2	58,8	118,0	184,0	316,8

Обработка экспериментальных данных проведена в виде степенного уравнения

$$S = K \tau^m, \quad (1)$$

которое в линеаризированной системе координат преобразуется к виду

$$Y = a + bx, \quad (2)$$

где $y = \ln S$; $a = \ln K$; $b = m$; $x = \ln \tau$.

В табл. 2 приведены линеаризированные значения времени τ и массы серы S в параллельных опытах.

Т а б л и ц а 2

*Зависимость массы серы от времени в трех опытах
в линеаризованных координатах*

Наименование параметра	Обозначение	15	30	60	90	120
Натуральный логарифм времени	X	2,71	3,40	4,09	4,50	5,79
Натуральный логарифм количества серы (среднее значение)	Y	3,44	4,15	4,78	5,27	5,81
То же в первом опыте	Y_1	3,29	4,29	4,87	5,32	5,88
То же во втором опыте	Y_2	3,46	4,19	4,70	5,26	5,78
То же в третьем опыте	Y_3	3,56	3,96	4,77	5,21	5,21

Проверка однородности дисперсий функций Y_i от среднего значения Y в параллельных опытах по критерию Кохрена приводит к его расчетному значению

$$G_P = 4,58 \cdot 10^{-1},$$

что меньше табличного значения $G_T = 0,684$ [4]. Из этого следует, что условие воспроизводимости выполняется.

Определение теоретических значений коэффициентов a и b в линеаризованном уравнении (2) проводится методом наименьших квадратов для функции

$$U = \sum_{i=1}^m (\alpha + bx_i - y_i)^2 \Big\} \min.$$

В результате получаем $a = 0,34$; $b = 1,091$. Из этого следует, что параметры уравнения (1) принимают численные значения $K = 1,54$ и $n = 1,091$.

Результаты расчетов теоретических и экспериментальных значений представлены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3

Сравнительные данные теоретических значений выхода серы в сравнении с экспериментальными значениями выхода серы для каждого момента времени

Номер опыта	1	2	3	4	5
Время, мин	15	30	60	90	120
Количество серы (средн.), мг. Эксперимент	31,4	63,9	119,3	193,8	334,3
Количество серы по формуле (1), мг	29,67	63,22	134,70	209,73	287,11
Относительное отклонение теоретического значения массы серы от экспериментального, %	-5,51	-1,1	12,9	8,20	-14,1

Из вышеприведенных результатов расчета следует, что максимальное отклонение теоретического значения массы серы от экспериментального не превышает 15,0 %, а среднее по абсолютной величине — 10 %.

Проверка адекватности линеаризованного уравнения (2) по критерию Фишера показывает, что расчетное значение критерия Фишера составляет $F_p = 3,91$, а табличное значение 4,1. Отсюда следует, что полученное уравнение (2) адекватно описывает экспериментальную табличную зависимость [8]. Оба коэффициента линеаризованного уравнения a и b значимы, так как их проверка по критерию Стьюдента показывает расчетное значение коэффициентов $t_a = 8,85$ и $t_b = 22,27$ больше табличного значения $t_{\text{таб}} = 2,23$. При этом коэффициент корреляции $r = 0,993$, то есть корреляционная связь времени и массы серы, выделяемой в электрохимическом процессе окисления сероводорода, высокая и прямая.

На основании полученных результатов корреляционного анализа экспериментальной зависимости выхода массы серы от времени в электрохимическом реакторе можно сделать вывод об однородности дисперсии в параллельных опытах, так как критерий Кохрена расчетный $F_p = 0,458$ меньше его табличного значения $F_T = 0,689$, а экспериментальную зависимость можно описать степенным уравнением (1) с коэффициентами

$$S = 0,451 t^{1,085}. \quad (3)$$

При этом адекватность этого уравнения доказывается тем, что расчетное значение критерия Фишера $F_p = 3,91$ меньше табличного $F_T = 4,1$ (при числе основных опытов $m = 5$, а параллельных $l = 3$) и оба коэффициента $k = 0,451$ и $n = 1,085$ значимы, т. к. расчетные значения их критерия Стьюдента $t_a = 8,85$ и $t_b = 22,27$ больше табличного значения $t_{\text{таб}} = 2,23$.

Учитывая, что коэффициент корреляции составляет $r = 0,991$, можно сделать вывод о том, что полученная зависимость выхода серы от времени является высокой и прямой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вредные химические вещества. Неорганические соединения V—VIII групп. Справочник / под ред. В. А. Филова. М.: Химия, 1983. 592 с.
2. Очистка газов от сернистых соединений при эксплуатации газовых месторождений / А. И. Гриценко, И. А. Галанин, Л. М. Зиновьева, В. И. Мурин. М.: Недра, 1985. 270 с.
3. Диденко В. Г. Основы оптимизации процессов мокрой очистки многокомпонентных выбросов // Вестник Волгоградской государственной архитектурно-строительной академии. Сер.: Строительство и архитектура. 1999. Вып. 1. С. 24—31.
4. Кемпбел Д. М. Очистка и переработка природных газов / под ред. С. Ф. Гудкова. М.: Недра, 1977. 229 с.
5. Применение электрохимических процессов и аппаратов для обеззараживания воды / под ред. Л. А. Кульчитского. Киев.: УкрНИИНТИ, 1985. 40 с.
6. Чурикова В. И., Москвичева Е. В., Фомичев В. Т. Исследование процесса электрохимической очистки природного газа // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 38(57). С. 189—195.
7. Бондарь А. Г., Статюха Г. А. Планирование эксперимента в химической технологии. Киев: Вища школа, 1976. 181 с.
8. Голованчиков А. Б., Симаков Б. В. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии: учеб. пособие. Ч. 1. Волгоград.: ВГТУ, 1994. 114 с.

© Чурикова В. И., Голованчиков А. Б., Чичерина Г. В., 2015

Поступила в редакцию
в марте 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Чурикова В. И., Голованчиков А. Б., Чичерина Г. В. Исследование процесса массовыделения серы при электрохимическом окислении сероводорода // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 134—139.

Об авторах:

Чурикова Валерия Игоревна — аспирант, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, yachurikova@yandex.ru

Голованчиков Александр Борисович — д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой процессов и аппаратов химических производств, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400005, г. Волгоград, пр. им. Ленина, 28

Чичерина Галина Владимировна — канд. хим. наук, доцент кафедры общей и прикладной химии, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, galinachicherina@rambler.ru

V. I. Churikova, A. B. Golovanchikov, G. V. Chicherina

RESEARCH OF THE PROCESS OF SULFUR MASS EMISSION AT ELECTROCHEMICAL OXIDATION OF HYDROGEN SULFUR

The article provides the results of an experimental study of the electrochemical oxidation process of sulfide ions in model solutions containing them in finding the appropriate concentration range in a number of natural gas and aqueous solutions. On the basis of the experimental data the mathematical modeling of the process, assessment of the adequacy of the resulting model is carried out, as well as its correlation analysis.

Key words: electrochemical oxidation of hydrogen sulfide, sulfur dependence of the mass obtained from the electrolysis time, mathematical model of the process.

REFERENCES

1. Filov V. A., ed. *Vrednye khimicheskie veshchestva. Neorganicheskie soedineniya V—VIII grupp. Spravochnik* [Harmful chemicals. Inorganic compounds of V—VIII groups. Reference book]. Moscow, Khimiya Publ., 1983. 592 p.
2. Gritsenko A. I., Galanin I. A., Zinov'eva L. M., Murin V. I. *Ochistka gazov ot sernistykh soedinenii pri ekspluatatsii gazovykh mestorozhdenii* [Purification of gases from sulphur compounds at gas field development]. Moscow, Nedra Publ., 1985. 270 p.
3. Didenko V. G. [Principals of optimization of processes of wet cleaning of multicomponent emissions]. *Vestnik Volgogradskoi gosudarstvennoi arhitekturno-stroitel'noi akademii. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State Academy of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 1999, iss. 1, pp. 24—31.
4. Kempbel D. M. *Ochistka i pererabotka prirodnikh gazov* [Natural gas cleaning and processing]. Moscow, Nedra Publ., 1977. 229 p.
5. Kul'chitskii L. A. *Primenenie elektrokhimicheskikh protsessov i apparatov dlya obezzarazhivaniya vody* [Use of electrochemical processes and devices for water disinfection]. Kiev, UkrNIINTI Publ., 1985. 40 p.
6. Churikova V. I., Moskvicheva E. V., Fomichev V. T. [Research of the process of electrochemical purification of natural gas]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 38(57). C. 189—195.
7. Bondar' A. G., Statyukha G. A. *Planirovanie eksperimenta v khimicheskoi tekhnologii* [Planning of the experiment in chemical technology]. Kiev, Vishcha shkola Publ., 1976. 181 p.
8. Golovanchikov A. B., Simakov B. V. *Primenenie EVM v khimicheskoi tekhnologii i ekologii: uchebnoe posobie. Ch. 1* [Use of computers in chemical technology and ecology. Manual. Pt. 1]. Volgograd, VGTU Publ., 1994. 114 p.

For citation:

Churikova V. I., Golovanchikov A. B., Chicherina G. V. [Research of the process of sulfur mass emission at electrochemical oxidation of hydrogen sulfur]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 134—139.

About authors:

Churikova Valeriya Igorevna — Postgraduate student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, vachurikova@yandex.ru

Golovanchikov Aleksandr Borisovich — Doctor of Engineering Science, Professor, Head of Processes and Instruments of Chemical Productions Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 28, Lenin Avenue, Volgograd, 400005, Russian Federation.

Chicherina Galina Vladimirovna — Candidate of Chemical Science, Docent of General and Applied Chemistry Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, galinachicherina@rambler.ru

УДК 69.001.5

Р. Х. Ишмаметов, В. Ф. Сидоренко

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ МАЛЫХ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ
НА ТРАССАХ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ**

Рассмотрены вопросы совершенствования методов оценки экологической безопасности при строительстве малых населенных пунктов на магистральных трассах нефтегазопроводов.

К л ю ч е в ы е с л о в а: экологическая безопасность, магистральные трассы трубопроводов, техногенные загрязнения, природоохранное законодательство.

Взаимодействие Человека с Природой во все времена имело свои неповторимые, специфические особенности. Наделенный разумом человек всегда имел возможность осознать свое уникальное место в природе, определить предназначение, отведенное ему на планете.

Человек создавал особую неповторимую среду обитания, которую назвал цивилизацией, при этом являясь частью самой природы. Эта цивилизация по мере своего развития все больше вступала в противоречие с природой. Сейчас человечество уже подошло к осознанию того, что дальнейшая бездумная и потребительская эксплуатация природы может угрожать его собственному существованию.

Ни одна из ныне существующих наук в отдельно взятом виде не способна решить в комплексе все задачи, связанные с совершенствованием взаимодействия человечества и природы, так как это взаимодействие имеет как социальные, экономические, технологические, географические, так и другие научные аспекты — медицинские, физические, биологические, химические и т. п. Решить эти задачи способна лишь интегрированная (обобщающая) наука, какой и является на сегодняшний день современная инженерная экология.

Инженерная экология — сравнительно новое, молодое направление в экологии, изучающее взаимодействие природы и техники, закономерности формирования региональных и локальных природно-технических сбалансированных систем, а также способы управления ими, основываясь на принципах защиты сформировавшейся природной среды и совершенствования системы обеспечения экологической безопасности. Инженерная экология позволяет решать возникающие вопросы соответствия техники и технологии промышленных объектов экологическим требованиям.

Во второй половине XX в. завершается становление экологии как самостоятельной науки, имеющей собственную теорию и методологию, круг проблем и подходы к их решению. Математические модели постепенно становятся более реалистичными: их предсказания могут быть проверены в эксперименте или наблюдениями в природе. Сами же эксперименты и наблюдения

все чаще планируются и проводятся так, чтобы полученные результаты позволяли принять или опровергнуть заранее выдвинутую гипотезу.

Громадный прогресс в конце XX столетия достигнут в изучении круговорота веществ и потока энергии. Прежде всего это связано с совершенствованием количественных методов оценки интенсивности тех или иных процессов, а также с растущими возможностями широкомасштабного применения этих методов.

Задачи оптимального управления природной средой, стоящие перед человечеством, требуют рассмотрения в качестве составляющих сложной системы не только элементов живой и неживой природы, но и воздействующих на них сооружений, механизмов, машин, созданных человеком.

К сожалению, использование природных богатств на протяжении всей истории осуществлялось человеком при полном незнании законов экологии, что привело к тяжелым и часто непоправимым последствиям, в частности, к истощению природных ресурсов и колоссальному загрязнению среды обитания. Прежде чем человеку удастся найти решение ряда жизненно важных проблем третьего тысячелетия (таких как удовлетворение потребностей в воде и пище возрастающего населения планеты), необходимо срочно предпринять хотя бы паллиативные меры, позволяющие обеспечить жизнь человеку завтрашнего дня. Но чтобы действовать, надо знать как. Экология и оказывается тем биологическим и мировоззренческим фундаментом, на который может опереться человек в принятии превентивных мер по сохранению окружающей природы.

На рубеже 50—60-х годов XX в. в России началось грандиозное по своим масштабам строительство магистральных трубопроводов нефти, газа и нефтепродуктов. В Западной Сибири и Средней Азии были разведаны колоссальные запасы углеводородов, а их отдаленность от потребителей, расположенных в Европе, предопределило бурное и интенсивное развитие трубопроводного транспорта.

Особенно стремительное развитие строительство магистральных трубопроводов получило в 70-х — начале 80-х гг. прошлого столетия, когда было построено несколько десятков тысяч километров нефтепроводов и газопроводов диаметром от 800 до 1400 мм, что явилось основополагающим фактором создания в России самой мощной в мире трубопроводной транспортной системы.

В сложившейся современной геополитической ситуации в мире, начиная с 2014 г., на Россию со стороны Западной Европы и США оказывается мощнейшее экономическое давление с целью разрушить экономику Российской Федерации, сильно зависящую от экспорта нефти и газа. Следствием этого стали политические и экономические санкции Запада в отношении России, что в свою очередь привело к переориентации долгосрочных экономических связей РФ от Западной Европы в сторону Востока (Китай, Индия, Япония, Корея и т. д.), остро нуждающихся в качественных российских углеводородах. Таким образом, возникла необходимость строительства новых, многокилометровых транспортных нефтяных и газовых трубопроводов в сложных климатических условиях, существенно изменяющихся по всей длине строительства.

Для перекачки нефти и газа по транспортным магистралям необходимы компрессорные станции, обслуживаемые большим количеством людей.

В РФ протяженность существующих магистральных нефтяных и газовых трубопроводов составляет более 300 тыс. км. Для их функционирования используются около 800 компрессорных и нефтеперекачивающих станций. Значительное количество магистральных трубопроводов уже эксплуатируется более 30 лет. При этом аварии и катастрофы, связанные со сбросом продуктов перекачки, составляют до 60 % техногенных чрезвычайных ситуаций с экологическими последствиями.

Разработка новых месторождений на Сахалине, Камчатке, Дальнем Востоке вызвала необходимость строительства новых трубопроводов в районах вечной мерзлоты, сейсмической активности, заболоченной местности и других экстремальных природно-климатических условиях.

Магистральные трубопроводы проходят, как правило, по территориям, находящимся вдали от населенных пунктов: тайга, леса, болота, степи и т. п., где природа богата и разнообразна. Возникает необходимость обслуживания и эксплуатации трубопроводов, для чего нужно строить новых малые населенные пункты и перекачивающие компрессорные станции. При этом климатические условия, в которых будут строиться такие поселения, существенно отличаются друг от друга. Так, климат Черноморского побережья Турции или Болгарии совсем не похож на климат среднего Урала, Сибири или Китая.

Однако у всех этих будущих поселений есть одно очень существенное и важное сходство: они наносят необратимый вред природе, разрушают сложившийся экологический баланс на данных территориях, загрязняют водные бассейны, приводят к эрозийным процессам в почве, являются причиной вынужденной миграции животных и птиц.

Обеспечение надежности и оценки количественных показателей прочности, безотказности и долговечности конструкций проектируемых нефтяных и газовых трубопроводов приобрела еще большую актуальность. Это достаточно сложная проблема, так как нормативный (детерминированный) метод расчета прочности конструкций по предельным состояниям не позволяет оценивать надежность проектируемых конструкций в ее современном понимании, так как не учитывает вероятностную природу характеристик несущей способности и нагрузки [1].

Вероятностная методология расчета строительных конструкций на надежность и безопасность, получившая свое развитие в работах В. В. Болотина, А. Р. Ржаницына, Н. С. Стрелецкого и других ученых, практически не встречает возражений ни у теоретиков, ни у практиков. В последние годы появились новые концепции решения задач оценки надежности проектируемых строительных конструкций, задач статистической динамики, анализа отказов и механики разрушения, в связи с чем совершенствуются методы проектирования и строительства нефтегазопроводов на основе нормативного вероятностного подхода [2].

Таким образом, исследования в данной области проводятся учеными регулярно и достаточно основательно. А вот исследования в области воздействий и их последствий на природно-экологический баланс территорий при

строительстве сопутствующих трубопроводам жилых поселений еще должным образом не проводились.

В связи с этим задача обоснования методов оценки экологической безопасности при строительстве малых населенных пунктов на трассах магистральных нефтегазопроводов в настоящее время становится все более актуальной.

Одной из задач исследований было выявление, систематизация и оптимизация методов оценки экологической безопасности при строительстве малых населенных пунктов на трассах магистральных трубопроводов.

Магистральные трубопроводы проходят по территориям, где техногенные загрязнения способны вызывать экологические катастрофы. Это особенно актуально, так как в последние годы загрязнение окружающей среды приобретает планетарный масштаб. Проблема осложняется тем, что нефтегазопроводы, в основном, проходят по территориям лесных государственных фондов. Поэтому постоянно возникает необходимость в обосновании уничтожения в зоне действия нефтяных и газовых компаний растительности.

Традиционный механизированный метод строительства, основанный на применении бетона и кирпича, является трудоемким, имеет большую продолжительность и оказывает необратимые воздействия на почву, вызывая изменения русел подводных рек, их загрязнения из-за сброса через многочисленные бытовые септики фекальных стоков. Более того, широко применяемые бульдозерные технологии с использованием тяжелой строительной техники экологически вредны и приводят к потере верхнего гумусового слоя почв, его уплотнению, формированию крупных раскорчеванных валов, впоследствии приводящих к образованию овражных углублений.

Поэтому существует необходимость в разработке и внедрении в производство технологий, отвечающих требованиям экологической безопасности и способствующих хозяйственной эффективности как собственно производственного процесса, так и строительства сопутствующих поселений.

В настоящее время одной из основных причин нарушения экологического равновесия является строительство инженерных и транспортных коммуникаций. Для их прокладки вырубается огромные площади лесов, необходимые для строительства не только самих коммуникаций, но и для устройства охраняемых и санитарных зон.

Производственные отходы предприятий нефтегазового комплекса (солевые отложения и шлам, элементы технологического оборудования и конструкций, почва и грунты с повышенным содержанием природных радионуклидов и др.) являются неперенными сопутствующими элементами хозяйственной деятельности человека.

Ученым еще предстоит определить степень губительного воздействия на экологию природного комплекса в целом, вызванного электромагнитными волнами, излучаемыми высоковольтными линиями электропередач.

Следует учитывать, что ресурсы разработанных месторождений углеводородов лимитированы, и рано или поздно определенные технологические объекты и сопутствующие поселения придется закрывать. Таким образом, перед строительной наукой возникает еще одна проблема, связанная как с созданием материалов и технологий, позволяющих минимизировать вредные последствия

на экосистему в процессе строительства и эксплуатации зданий, так и обеспечением экологически безвредных процессов самоуничтожения объектов человеческой деятельности и восстановления природно-экологического баланса территории, пусть даже в пределах установленных нормативов качества окружающей среды и допустимого воздействия на нее, при соблюдении которых обеспечивается устойчивое функционирование естественных экологических систем и сохраняется биологическое разнообразие.

В последние годы наблюдается тенденция ужесточения природоохранного законодательства как у нас в стране, так и за рубежом. Решить проблемы производства без привлечения научного потенциала очень сложно. Все это требует иных подходов к решению существующих задач.

Должны быть определены необходимые и достаточные условия для создания организованного и четко управляемого государственного механизма, ориентированного в первую очередь на обеспечение систематического повышения уровня экологической безопасности и качества жизни населения. Также должны быть сформированы современные экономические механизмы, стимулирующие снижение экологической опасности, и разработаны формы участия в этой работе органов местного самоуправления, природопользователей, общественных организаций и населения.

Обеспечение экологической безопасности, являющейся неотъемлемым условием устойчивого развития регионов, должно стать одним из приоритетных направлений деятельности. Естественная экологическая система — объективно существующая часть природной среды, которая имеет пространственно-территориальные границы и в которой живые (растения, животные и другие организмы) и неживые ее элементы взаимодействуют как единое функциональное целое и связаны между собой.

Природный объект — естественная экологическая система, природный ландшафт и составляющие их элементы, сохранившие свои природные свойства.

Природно-антропогенный объект — природный объект, измененный в результате хозяйственной и иной деятельности, или объект, созданный человеком, обладающий свойствами природного объекта и имеющий рекреационное и защитное значение. Воздействие на них человеком должно быть разумным, строго выверенным, с четким представлением о неизбежных последствиях, и обеспечено необходимым комплексом мероприятий по саморегенерации и восстановлению в начальное состояние.

Ответственная политика по отношению к окружающей среде будет возможна лишь с учетом надежных данных о современном состоянии среды, обоснованных знаниях о взаимодействии важных экологических факторов, если будут разработаны новые методы уменьшения и предотвращения вреда, наносимого природе человеком.

Главная задача экологии человека — поддержание равновесия внутри человечества, между ним, внешним миром и его средой. Достижение этой стратегической цели в глобальном масштабе невозможно без ее достижения на микротерриториальном уровне, а так как человек большую часть времени находится на урбанизированных территориях, то нет никаких оснований счи-

тать изменение природной среды (отход от естественного состояния) ее ухудшением.

На решение экологических проблем застроенных территорий направлены три взаимодополняющие науки: урбоэкология, экологическая инфраструктура и ландшафтная архитектура. Они объединяют экологический подход к решению проблем и направлены на проектирование систем расселения с учетом рационального взаимодействия человека и природы и обеспечения высокого качества окружающей среды [3].

Неблагоприятное качество окружающей среды, рост влияния негативных факторов на здоровье населения, повышенный риск возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, истощение природных ресурсов и деградация природных комплексов являются основными причинами экологической опасности.

Кроме того, объекты, находящиеся на одной территории, могут быть источниками экологической опасности не только для других субъектов Российской Федерации, но и представлять опасность в глобальном, мировом масштабе.

Официальные данные, содержащиеся в государственных докладах о состоянии окружающей среды в Российской Федерации за последние годы, свидетельствуют о высоком техногенном воздействии на окружающую среду в целом.

Преобладание ресурсодобывающих и ресурсоемких секторов в экономике России с опасными техногенными нагрузками на окружающую среду приводит к деградации естественных экологических систем, вследствие чего окружающая среда дестабилизируется, утрачивается ее способности поддерживать надлежащее качество, необходимое для жизнедеятельности общества в настоящее время и в будущем.

Концепция экологической безопасности при строительстве малых населенных пунктов на магистральных нефтяных и газовых трубопроводах представляет собой систему методов экологического строительства, обеспечивающую поддержание качества окружающей природной среды, сохранение и развитие природных комплексов и объектов как на территории России, так и за рубежом. Вопросам комплексной оценки и повышения энергоэффективности, тепловой защиты и эксплуатационной безопасности зданий посвящены работы [4—11].

С учетом вышеизложенного актуальность рассматриваемой задачи определена следующими факторами:

- 1) возрастающими темпами строительства магистральных нефтегазопроводов и малых населенных пунктов на их трассах в различных природно-климатических районах;
- 2) возможностью негативных последствий при строительстве и эксплуатации малых населенных пунктов на трассах магистральных нефтегазопроводов на окружающую среду и как следствие, воздействием окружающей среды на жизнь и здоровье человека;
- 3) необходимостью оценки факторов окружающей среды на стадии проектирования, строительства и эксплуатации малых населенных пунктов.

Целью проведенной в этом направлении работы являлось обеспечение экологической оптимизации процессов строительства и эксплуатации малых населенных пунктов на трассах нефтегазопроводов. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Произведен анализ существующих методов оценки влияния окружающей среды на строительство малых населенных пунктов (МНП) на трассах магистральных трубопроводов.
2. Разработана методика и проведены исследования пофакторной оценки воздействия МНП на окружающую среду на стадиях проектирования, строительства и эксплуатации.
3. Разработана методика комплексной оценки окружающей среды на строительство МНП на трассах магистральных трубопроводов на основе системного подхода при проектировании, строительстве и эксплуатации.
4. Разработана методика создания экологической карты для проектирования малых населенных мест на трассах магистральных трубопроводов.
5. Разработаны принципы и системы экологического мониторинга для проектирования и строительства малых населенных пунктов на трассах магистральных трубопроводов.
6. Разработана методика выбора планировочной (градостроительной) структуры для проектирования и строительства МНП на трассах магистральных трубопроводов в синтезе с современными технологиями и экономическими аспектами.
7. Разработан комплекс мероприятий для снижения воздействий малых населенных пунктов на окружающую среду.
8. Произведена оценка эффективности мероприятий по экологической безопасности при проектировании, строительстве и эксплуатации малых населенных пунктов на трассах магистральных нефтегазопроводов.

Объектами исследования являлись как существующие населенные пункты, расположенные на трассах нефтегазопроводов, так и планируемые к строительству, в том числе и за рубежом.

Предметом исследования являлось взаимодействие малых населенных пунктов на трассах магистральных нефтегазопроводов с природной средой на всех стадиях: проектирования, строительства и эксплуатации.

Методы исследования определялись в соответствии с поставленной целью. Решение поставленных задач осуществлялось с использованием обобщенного отечественного и зарубежного опыта строительства и эксплуатации как малых населенных пунктов, так и магистральных трубопроводов; теоретических исследований; математического и графического методов; построения математической модели определения выбора места под строительство.

Для максимального сохранения экологического баланса, уменьшения стороннего воздействия на окружающую среду необходимо активно использовать альтернативные источники энергоснабжения, например газогенераторные станции на трассах газопроводов. На нефтетрассах и нефтепродуктопроводах — теплоэлектростанции. Исследования в данном направлении активно ведутся учеными России, особенно в последние годы [12—13].

Все более широкую популярность приобретают предложения по возможности использования открытых, но не разработанных нефтяных скважин или отработанных скважин для процесса выработки электрической энергии, что является серьезным шагом по сохранению природной среды, так как минимизирует необходимость строительства новых или дополнительных транспортных высоковольтных линий электропередач [14].

Важно максимально эффективно и широко использовать имеющиеся в определенных климатических зонах природные источники энергоснабжения, такие как солнечную и ветровую энергию.

Новые методы строительства и новейшие технологии производства строительных материалов делают возможным решение задачи по снижению давления строящихся зданий и сооружений на почвенный слой. Облегчая вес конструкций, можно свести к минимуму процесс воздействия на грунтовые воды, изменения их русла и направления течения.

Строительство централизованной системы переработки и очистки фекальных, бытовых и технологических канализационных стоков, предложенной голландскими производителями, делают возможным превратить данный технологический цикл не только в экологически безопасный и эстетически привлекательный, но и прибыльный. Такие технологии, кроме всего прочего, обеспечивают население новыми рабочими местами, позволяя на каждом уровне очистки производить сельскохозяйственную продукцию в виде цветов, грибов и овощных культур. Сокращается санитарно-защитная зона между очистными сооружениями и жилыми зданиями, а самое главное — исключается возможность отравления почвенных слоев различной глубины бытовыми септиками индивидуальных жилых домов.

Одна из причин ухудшения состояния окружающей среды — медленная экологизация всей жизни и сознания современного человека. Этот процесс идет поэтапно — от фрагментарного решения отдельных проблем к глобальному подходу, постепенно затрагивающему все сферы жизнедеятельности человека. Глобально-экологический подход стимулирует, в свою очередь, развитие «глубокой» экологии, которая связана с изучением внутренних (биотических, социальных, психологических) закономерностей взаимодействия человека и окружающей среды [15].

Проведенный анализ имеющихся в литературе данных позволил наметить направления дальнейших исследований в рамках рассмотренных проблем:

- совершенствование пофакторной и комплексной оценки качества окружающей среды при строительстве МНП на магистральных трассах нефтегазопроводов;

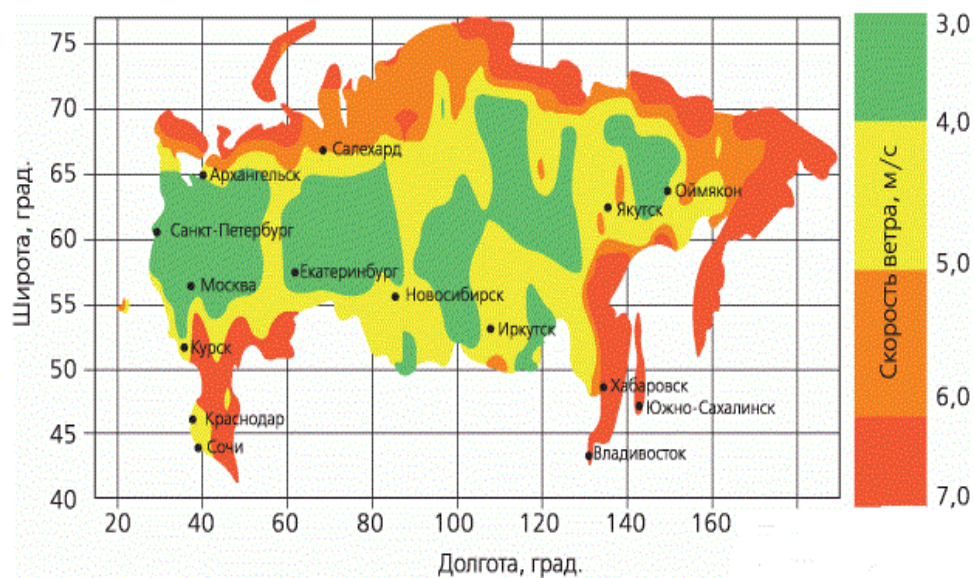
- совершенствование мониторинга экологических условий для строительства;

- создание информационной базы и банка данных по взаимному воздействию малых населенных пунктов и окружающей среды;

- совершенствование компьютерных программ по расчету факторов окружающей среды.



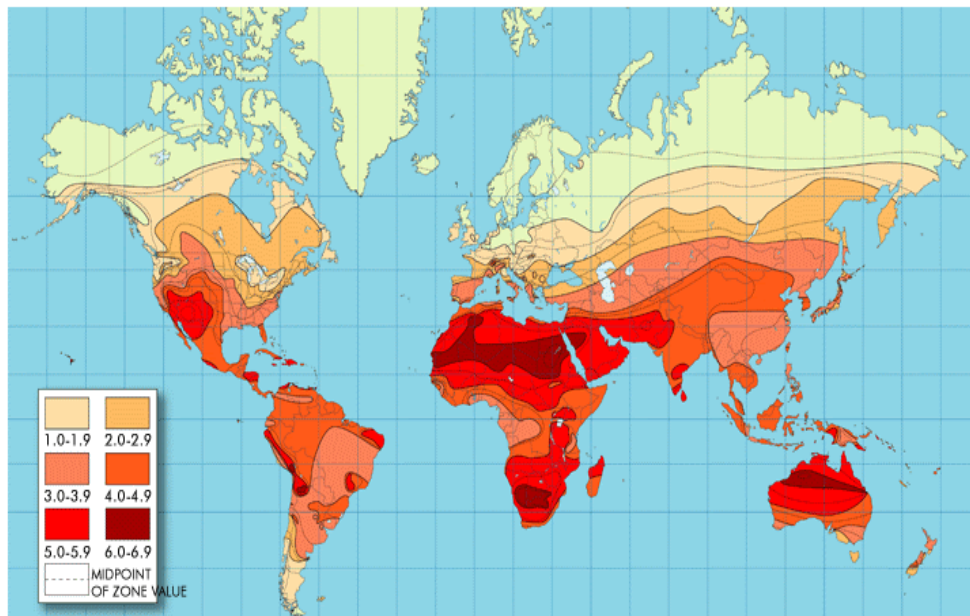
Схема существующих нефтепроводов в РФ



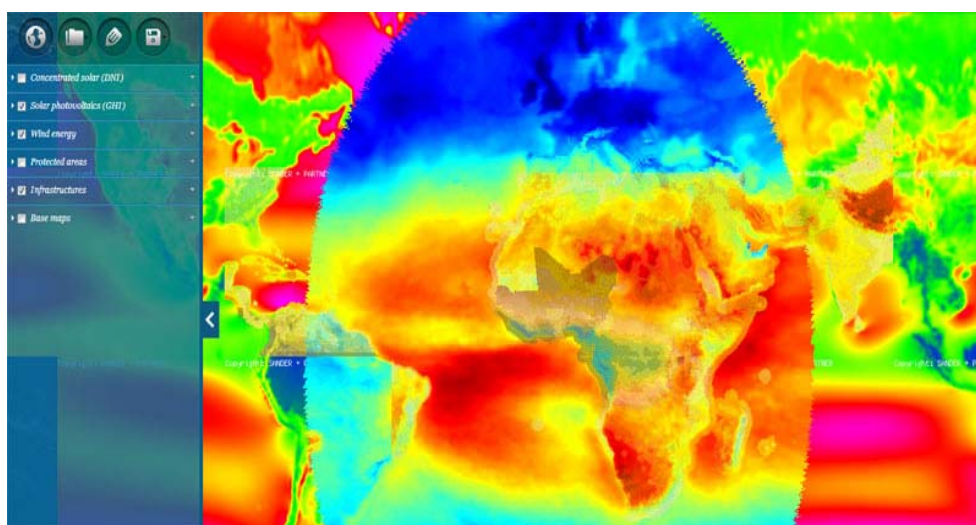
Карта скоростей ветра на территории России

World Insolation Map

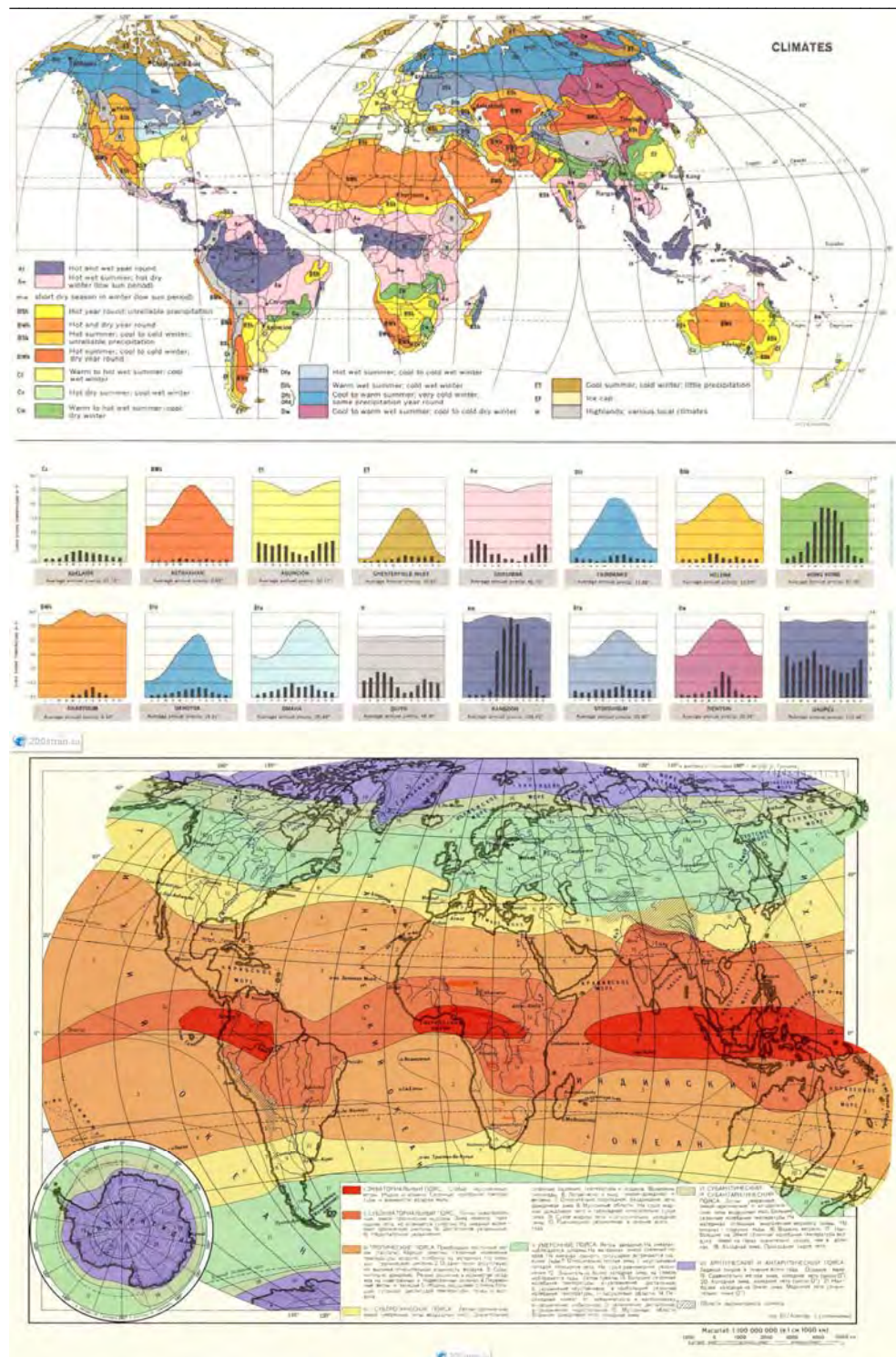
This map shows the amount of solar energy in hours, received each day on an optimally tilted surface during the worst month of the year. (Based on accumulated worldwide solar insolation data.)



Карта активности солнечной энергии в часах в различных районах земного шара



«Глобальный Атлас» с данными о возобновляемой энергии



Климатическая карта мира

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аграфенин С. И. Технологические методы повышения промышленной и экологической безопасности промысловых трубопроводов // Труды ин-та «Гипровостокнефть». 2006. Вып. 65. С. 5—7.
2. Кодзаев М. Ю., Дудников Ю. В. Повышение экологической безопасности при эксплуатации магистральных нефтегазопроводов. Уфа: ГУП «ИПТЭР», 2012.
3. Сидоренко В. Ф. Теоретические и методологические основы экологического строительства. Волгоград: ВолгГАСУ, 2000. 200 с.
4. Корниенко С. В. Комплексная оценка энергоэффективности и тепловой защиты зданий // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2014. № 11(26). С. 33—48.
5. Корниенко С. В. Многофакторная оценка теплового режима в элементах оболочки здания // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 8(52). С. 25—37. doi: 10.5862/MCE.52.4
6. Корниенко С. В. Комплексная оценка эксплуатационной безопасности жилого здания // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. 2013. Вып. 1(25). Ст. 14. Режим доступа: <http://www.vestnik.vgasu.ru>
7. Korniyenko S. The Experimental Analysis and Calculative Assessment of Building Energy Efficiency // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vol. 618. Pp. 509—513.
8. Korniyenko S. Thermal Comfort and Energy Performance Assessment for Residential Building in Temperate Continental Climate // Applied Mechanics and Materials. (2015). Vol. 725—726. Pp. 1375—1380.
9. The energy-efficient heat insulation thickness for systems of hinged ventilated facades / N. I. Vatin, A. S. Gorshkov, D. V. Nemova, A. A. Staritsyna, D. S. Tarasova // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 941—944. Pp. 905—920. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.905
10. Zadvinskaya T. O., Gorshkov A. S. Comprehensive method of energy efficiency of residential house // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 953—954. Pp. 1570—1577. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.953-954.1570
11. Reconstruction of administrative buildings of the 70's: The possibility of energy modernization / N. I. Vatin, D. V. Nemova, V. Murgul, V. Pukhkal, A. Golik, E. Chizhov // Journal of Applied Engineering Science. 2014. Vol. 1. Pp. 37—44.
12. Кудрявцев Л. В., Ефремова Т. В., Куля Н. Г. Сравнительный анализ надежности распределительных газопроводов малых населенных пунктов // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air and environmental quality: материалы XIII Международной научной конференции 15—28 апреля 2015 г., Сиань. Волгоград, 2015.
13. Уляшева В. М., Кошкарев А. Ю., Ермоленко М. Н. Использование утилизированной теплоты для отопления и вентиляции компрессорной станции // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air and environmental quality: материалы XIII Международной научной конференции 15—28 апреля 2015 г., Сиань. Волгоград, 2015.
14. Гришкова А. В., Мишнев Г. С., Гвоздков И. А. Новое использование нефтяных скважин // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air and environmental quality: материалы XIII Международной научной конференции 15—28 апреля 2015 г., Сиань. Волгоград, 2015.
15. Иовлев В. И. Экологические основы формирования архитектурного пространства (на примере Урала): дис... канд. арх. М., 2009.

© Ишаматов Р. Х., Сидоренко В. Ф., 2015

Поступила в редакцию
в мае 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Ишаматов Р. Х., Сидоренко В. Ф. Совершенствование методов оценки экологической безопасности при строительстве малых населенных пунктов на трассах нефтегазопроводов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 140—153.

Об авторах:

Ишаматов Рамиль Хамидулович — доцент кафедры архитектурно-проектной практики, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, ramil.euro-lux@mail.ru

Сидоренко Владимир Федорович — д-р техн. наук, проф., заслуженный деятель науки РФ, зав. кафедрой экологического строительства и городского хозяйства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

R. Kh. Ishmametov, V. F. Sidorenko

IMPROVEMENT OF METHODS OF ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL SAFETY AT CONSTRUCTION OF SMALL SETTLEMENTS ON ROUTES OF OIL AND GAS PIPELINES

Issues of improvement of methods of an assessment of environmental safety at construction of small settlements on the trunk routes of oil and gas pipelines are considered.

Key words: environmental safety, trunk pipeline route, man-made pollution, environmental legislation.

REFERENCES

1. Agraferin S. I. [Technological methods of increase of industrial and environmental safety of field pipelines]. *Trudy instituta «Giprovostokneft»* [Works of "Giprovostokneft" Institute], 2006, iss. 65, pp. 5—7.
2. Kodzaev M. Yu., Dudnikov Yu. V. *Povyshenie ekologicheskoi bezopasnosti pri ekspluatatsii magistral'nykh neftegazoprovodov* [Increase of environmental safety when operating main oil and gas pipelines]. Ufa, "IPITER" Publ., 2012.
3. Sidorenko V. F. *Teoreticheskie i metodologicheskie osnovy ekologicheskogo stroitel'stva* [Theoretical and methodological principals of ecological building]. Volgograd, VSUACE Publ., 2000. 200 p.
4. Kornienko S. V. [Complex assessment of energy efficiency and thermal performance for buildings]. *Stroitel'stvo unikal'nykh zdanii i sooruzhenii* [Construction of Unique Buildings and Structures], 2014, no. 11(26), pp. 33—48.
5. Kornienko S. V. [Multifactorial forecast of thermal behavior in building envelope elements]. *Inzhenerno-stroitel'nyi zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2014, no. 8(52), pp. 25—37. doi: 10.5862/MCE.52.4
6. Kornienko S. V. [Complex assessment of operational safety of residential building]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2013, no. 1(25), paper 14. Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru>
7. Korniyenko S. The Experimental Analysis and Calculative Assessment of Building Energy Efficiency. [Applied Mechanics and Materials], 2014, vol. 618, pp. 509—513.
8. Korniyenko S. Thermal Comfort and Energy Performance Assessment for Residential Building in Temperate Continental Climate. *Applied Mechanics and Materials*, 2015, vol. 725—726, pp. 1375—1380.
9. Vatin N. I., Gorshkov A. S., Nemova D. V., Staritsyna A. A., Tarasova D. S. The energy-efficient heat insulation thickness for systems of hinged ventilated facades. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 941—944, pp. 905—920. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.941-944.905
10. Zadvinskaya T. O., Gorshkov A. S. Comprehensive method of energy efficiency of residential house. *Advanced Materials Research*, 2014, vol. 953—954, pp. 1570—1577. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.953-954.1570
11. Vatin N. I., Nemova D. V., Murgul V., Pukhkal V., Golik A., Chizhov E. Reconstruction of administrative buildings of the 70's: The possibility of energy modernization // *Journal of Applied Engineering Science*, 2014, vol. 1, pp. 37—44.
12. Kudryavtsev L. V., Efremova T. V., Kulya N. G. [Comparative analysis of reliability of gas distribution pipelines in small settlements]. *Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air and environmental quality. Proc. of XIII Int. Conf., 15—28 April, 2015, Sian. Volgograd*, 2015.
13. Ulyasheva V. M., Koshkarev A. Yu., Ermolenko M. N. [Use of disposed warmth for heating and ventilation of compressor station]. *Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air and environmental quality. Proc. of XIII Int. Conf., 15—28 April, 2015, Sian. Volgograd*, 2015.

14. Grishkova A. V., Mishneva G. S., Gvozdkov I. A. [New use of oil wells]. *Качество внутреннего воздуха и окружающей среды = Indoor air and environmental quality. Proc. of XIII Int. Conf., 15—28 April, 2015, Sian*. Volgograd, 2015.

15. Iovlev V. I. *Ekologicheskie osnovy formirovaniya arhitekturnogo prostranstva (na primere Urala)* [Ecological principals of formation of architectural space (by the example of the Urals. Cand. Arch. Diss.]. Moscow, 2009.

For citation:

Ishmametov R. Kh., Sidorenko V. F. [Improvement of methods of assessment of environmental safety at construction of small settlements on routes of oil and gas pipelines]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 140—153.

About authors:

Ishmametov Ramil' Khamidullovich — Docent of Architectural and Design Practice Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, ramil.euro-lux@mail.ru

Sidorenko Vladimir Fedorovich — Doctor of Engineering Science, Professor, honoured science worker of RF, the Head of Ecological Building and Municipal Facilities Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 625.72

С. В. Алексиков, Д. Н. Симончук

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СТРОИТЕЛЬСТВА ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА В ЗАСУШЛИВЫХ РАЙОНАХ ЮГА РФ

Приведена технология повышенного уплотнения грунтов дорожного полотна в засушливых районах.

К л ю ч е в ы е с л о в а: автомобильные дороги, земляное полотно, грунты повышенной плотности, влажность.

Опыт дорожного строительства Украины, Казахстана, Новосибирской, Омской, Тюменской, Тамбовской и других областей показывает, что наименее затратным и достаточно эффективным является повышенное уплотнение глинистых грунтов рабочего слоя насыпи [1—8]. Современная уплотняющая техника позволяет достичь коэффициентов уплотнения грунтов $1,01 \dots 1,10$ при допустимой влажности грунтов $0,9 \dots 1,05 W_0$ и достаточно четкой организации и технологии земляных работ. Повышенное уплотнение грунтового основания на дорогах IV-A-р, IV-B-п и IV категорий позволяет снизить стоимость строительства дорожных одежд до $10 \dots 15 \%$ [1, 2]. Наибольший эффект наблюдается в районах с засушливым климатом и дефицитом каменных материалов, что характерно для территории Заволжья Волгоградской области, Астраханской области и республики Калмыкия.

Для обеспечения повышенной плотности грунтов важно в процессе уплотнения обеспечить их допустимую влажность. В условиях жаркого климата грунт дополнительно увлажняется. Технологические карты на сооружение земляного полотна рекомендуют расход воды из расчета 10% от половины объема [2, 3] или 3% от массы грунта [4]. При этом не учитывается тип грунта и погодные условия. Известно, что норма увлажнения грунта перед уплотнением зависит от интенсивности его просыхания m .

Экспериментально-теоретические исследования позволили установить зависимость для определения удельного расхода воды в сутки P_y в зависимости от коэффициента уплотнения грунта K_y , его типа, дефицита влажности ΔW , температуры воздуха T и скорости ветра V при производстве работ:

$$P_y = a K_y^{x_1} T^{x_2} V^{x_3} \Delta W^{x_4}, \text{ л/м}^3, \quad (1)$$

где a , x_1 , x_2 , x_3 , x_4 — коэффициенты, принимаются по табл. 1 в зависимости от типа грунта.

Исследования [1—6] и производственный опыт строительства дорог в засушливых районах Юга РФ позволили определить организационно-технологические особенности строительства земляного полотна из грунтов повышенной плотности.

Т а б л и ц а 1

Значения коэффициентов уравнения

Тип грунта	Значения коэффициентов				
	<i>a</i>	<i>x1</i>	<i>x2</i>	<i>x3</i>	<i>x2</i>
Песок	12,4556	1,0004	0,4142	0,1399	0,0014
Супесь	6,2887	1,0008	0,4131	0,1194	0,0033
Суглинок	3,0605	1,0036	0,4898	0,1382	0,0053
Глина	0,8106	1,0230	0,6421	0,1442	0,0149

Влажность грунта при уплотнении должна быть не выше $0,45W_t$ для легких супесей и $0,5W_t$ для суглинков. Работы рекомендуется выполнять в период, когда влажность в грунтовых резервах близка к оптимальной, а испаряемость минимальна: весной — апрель — май, осенью — сентябрь — октябрь. Для сохранения влаги в грунтовом резерве его поверхность целесообразно разрыхлить в предшествующий осенний период на глубину 15...20 см, а весной, когда влажность достигает максимального уровня, провести боронование и прикатку легким катком. При сооружении насыпи укатку грунта следует выполнять немедленно после отсыпки, не допускать его пересыхания и не растягивать фронт земляных работ.

При устройстве насыпи из пересушенных грунтов увлажнение грунта до оптимальной или допустимой влажности производится поливочными машинами. Для равномерного распределения влаги необходимо рыхление грунта и его перемешивание фрезой до и после полива. Потребности воды для увлажнения грунта определяется расчетом по (1) в зависимости от типа грунта, коэффициента его уплотнения, температуры воздуха и скорости ветра в период производства работ.

Для обоснования требований к технологии повышенного уплотнения грунтов проведен натурный эксперимент. Экспериментальные работы по повышенному уплотнению земляного полотна показали характер изменения объемной массы грунта в процессе его укатки пневмокотком 25 т. При увеличении числа проходов катка до 35...40 по следу коэффициент уплотнения достиг 1,07...1,10. Суглинок легкий уплотнялся более интенсивно, чем супесь легкая (рис. 1). Плотность грунтов стабилизировалась при 30 проходах катка по следу. При этом отмечено увеличение однородности объемной массы. Снижение коэффициента вариации плотности происходит в большей степени на суглинистом грунте (рис. 2). Однородность уплотнения грунта имеет лучшие показатели на глубине слоя, чем на его поверхности. Коэффициент вариации объемной массы суглинка снизился с 0,06 до 0,02, супеси — с 0,25 до 0,015 (рис. 2). По результатам эксперимента установлено, что при сооружении земляного полотна из переуплотненных грунтов предпочтительно использование суглинков. Число проходов катка должно быть увеличено в два раза при толщине слоя 30 см.

Из-за начальной неоднородности влажности грунта просыхание отдельных объемов уложенного грунтового слоя до допустимой (оптимальной) влажности растянуто во времени, происходит по поверхности грунтового слоя неодинаково. Поэтому для эффективной проработки всего объема грун-

та уплотняющими нагрузками необходимо организовать работы таким образом, чтобы отдельные объемы грунта уплотнялись по мере их просыхания до оптимальной влажности.

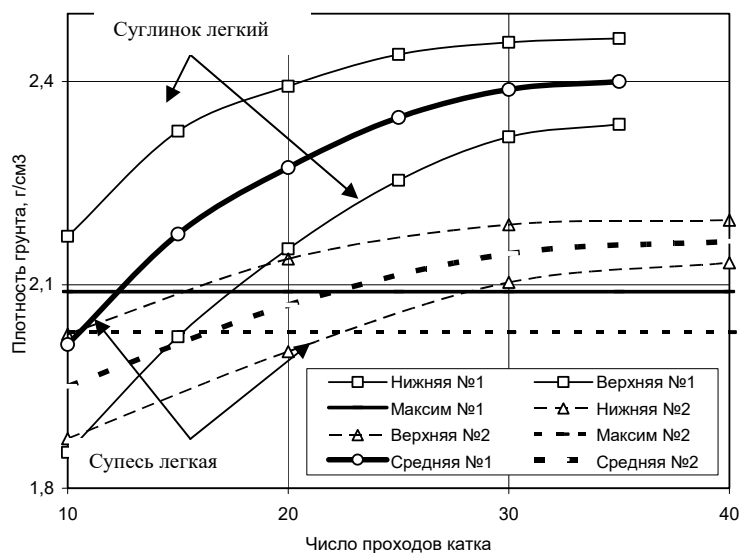


Рис. 1. Изменение плотности грунтов при уплотнении пневмокатком 25 т

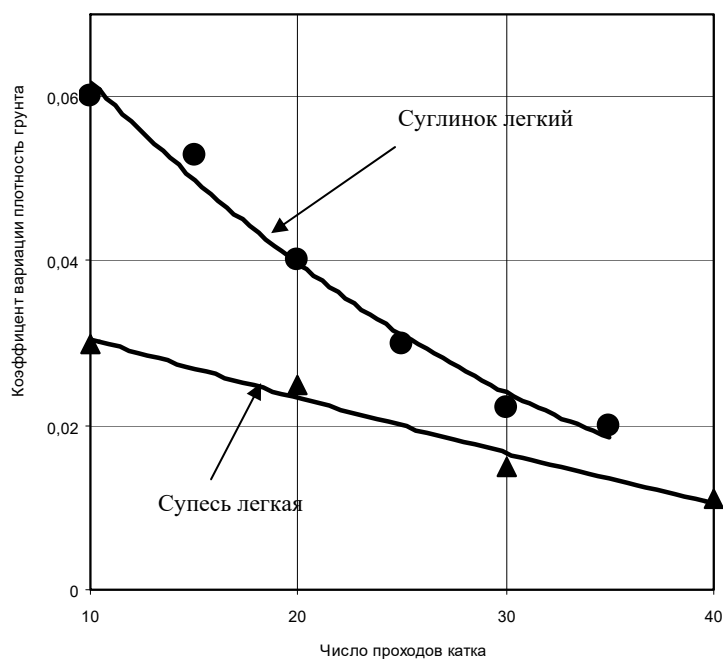


Рис. 2. Изменение вариации плотности грунтов при уплотнении пневмокатком 25 т

В связи с этим предлагается схема комплексного уплотнения грунта катком и землеройно-транспортными машинами (автосамосвалы или скреперы). Однородность уплотнения грунта повышается при этом не менее чем в два раза (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Эффективность комплексного уплотнения грунтов [6]

Вид грунта	Технология комплексного уплотнения грунта	Значения коэффициента вариации объемной массы скелета грунта	
		при уплотнении катком	при комплексном уплотнении
Суглинок	Катком с подкаткой автосамосвалами	0,08	0,014
Супесь		0,10	0,05...0,07
Суглинок	Скреперами при регулированном движении по ширине насыпи	0,14	0,07...0,08
Глина		0,19	0,09...0,10

На первой стадии уплотнения, при влажности, обеспечивающей проходимость машин по отсыпанному слою грунта, производится подкатка грунта построечным транспортом (автосамосвалы, скреперы). На второй стадии, при достижении основного объема грунта допустимой (оптимальной) влажности $W_{\text{доп}}$ производится уплотнение грунтовым катком. Начало работы катка $\bar{T}_y$ после отсыпки грунта в полотно или его увлажнения определяется по формуле

$$\bar{T}_y = \frac{\bar{W}_n - W_{\text{доп}}}{m}, \quad (2)$$

где $\bar{W}_n$ — математическое ожидание начальной влажности грунта при его укладке в насыпь или при его дополнительном увлажнении.

На третьей стадии производится доуплотнение грунта груженными автосамосвалами или автоскреперами, движение которых регулируется по ширине насыпи вешками или флажками. При этом уплотнение грунта указанными машинами возможно до $K_y = 0,99...1,02$ [5—8]. Учитывая нормальность распределения влажности грунта [5], время окончания уплотнения T_y рассчитывается по формуле

$$T_y = \frac{\bar{W}_n(1 + tC_v) - W_{\text{доп}}}{m}, \quad (3)$$

где t — нормируемое отклонение; C_v — коэффициент вариации влажности грунта на начало его уплотнения.

Общая продолжительность комплексного уплотнения грунта T_y зависит от уровня надежности и вариации влажности. Исследования показывают, что коэффициент вариации влажности грунта изменяется в пределах 0,1...0,26, надежность проектных решений — 80...98 % [9—12].

Исследования продолжительности уплотнения грунта в зависимости от коэффициента вариации его начальной влажности выполнены для песков мелких, супеси, суглинка легкого и глины. Расчеты выполнены для следую-

щих климатических условий: температура воздуха $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, скорость ветра 5 м/с . Результаты показали, что T_y линейным образом увеличивается с ростом коэффициента вариации влажности. Для песка с оптимальной влажностью 10% уплотнение рекомендуется завершить в течение $1,6\ldots 7$ ч, для супеси с оптимальной влажностью 12% — за $6\ldots 19$ ч (рис. 3).

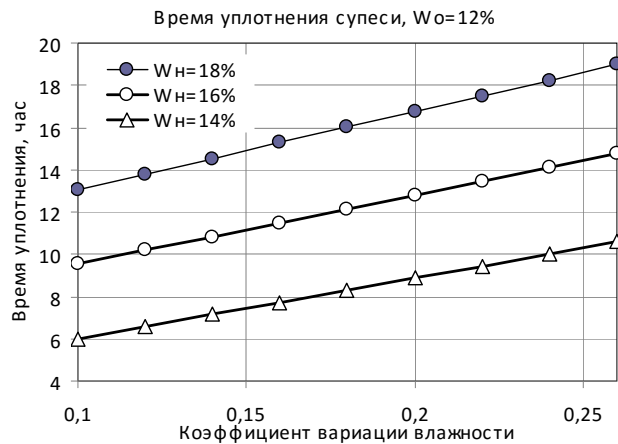


Рис. 3. Продолжительность уплотнения супеси в зависимости от начальной влажности и ее вариации (уровень надежности 90%)

Для суглинка с оптимальной влажностью 16% уплотнение рекомендуется завершить за $5\ldots 27$ ч (рис. 4). Для глины с оптимальной влажностью 23% уплотнение рекомендуется завершить в течение $14\ldots 68$ ч. При дальнейшем увеличении продолжительности уплотнения укатка грунта неэффективна из-за его низкой влажности.

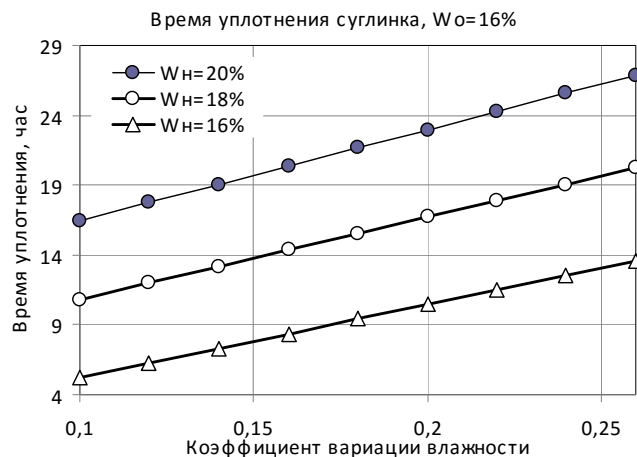


Рис. 4. Продолжительность уплотнения суглинка в зависимости от начальной влажности и ее вариации (уровень надежности 90%)

Результаты исследования влияния уровня надежности на продолжительность комплексного уплотнения представлены на рис. 5, 6. Расчеты показали,

что при увеличении надежности с 85 до 95 % время комплексного уплотнения грунтов следует увеличивать: для супеси — в 1,4...2,2 раза; для суглин-ка — в 1,4...2,2 раза; для глины — в 1,6...2,2 раза.

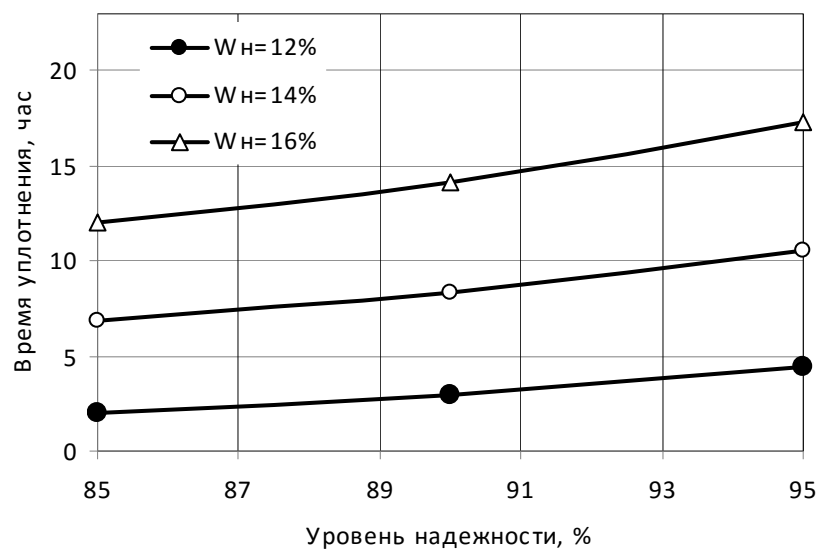


Рис. 5. Продолжительность уплотнения супеси в зависимости от уровня надежности проектных решений (коэффициент вариации влажности 0,1)

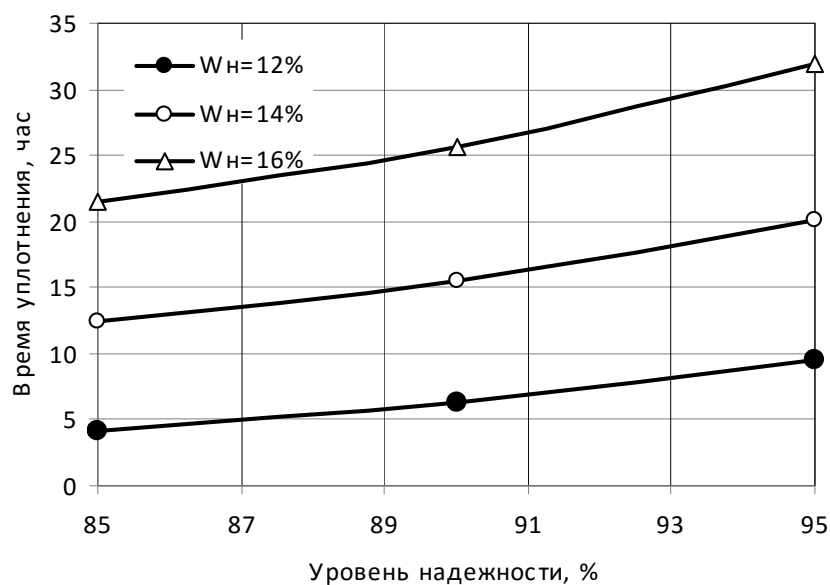


Рис. 6. Продолжительность уплотнения суглинка в зависимости от уровня надежности проектных решений (коэффициент вариации влажности 0,1)

Основную номенклатуру машин для уплотнения грунтов в дорожном строительстве составляют самоходные вибрационные катки. Наибольшее применение в практике дорожного строительства нашли катки массой

6...10 т и 11...13 т. Кулачковые катки применяются только при уплотнении глинистых грунтов и обязательно в паре с гладковальцовыми, так как кулачковый валец, уплотняя слой внизу, разрыхляет верхний слой на толщину 8...10 см. Тяжелые виброкатки весом 14...16, 18...20 т и более 20 т применяются в дорожном строительстве редко, обычно при объемах работ > 300 тыс. м³ на суглинках, более 500 тыс. м³ — на супеси, более 600 тыс. м³ — на песках. Обзор технических параметров отечественных и зарубежных грунтовых вибрационных катков [9—18] позволил обосновать толщину уплотняемого слоя и число проходов катка для различных грунтов при их оптимальной влажности и коэффициенте уплотнения >1,0 (табл. 3).

Т а б л и ц а 3

Рекомендуемая толщина слоя и количество проходов катков

Тип катка	Масса катка, т	Толщина слоя, см		Число проходов по следу	
		связного грунта	несвязного грунта	связного грунта	несвязного грунта
На пневматических шинах	10	10	20	15...20	10...15
	25	15...20	20...25	16...18	10...15
	50	20...25	25...30	12...15	10...15
Вибрационный каток	10	10	25...28	8...12	6...8
	15	15...20	40...45	8...12	6...8
	20	20...25	60...70	8...12	6...8
	25	25...30	70...80	8...12	6...8

На основе выполненных исследований авторами разработаны Рекомендации по строительству земляного полотна из грунтов повышенной плотности в засушливых районах Нижнего Поволжья, применение которых повышает качество уплотнения, прочность и надежность грунтового основания под дорожной одеждой путем обеспечения в период строительства оптимальной влажности грунтов и режимов уплотнения до коэффициента уплотнения более 1,0. Внедрение рекомендаций в производство позволяет снизить стоимость строительства на сумму от 58,9 тыс. р. до 2,2 млн р. на 1 км дороги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Альбом рекомендуемых технических решений для применения в дорожном строительстве. М.: Росагропромдорпроект, 1990. 103 с.
2. Методические рекомендации по повышению прочности грунтов земляного полотна автомобильных дорог в засушливых районах Казахстана. М.: Союздорнии, 1979. 24 с.
3. Методические рекомендации по уточнению плотности грунтов насыпей автомобильных дорог в различных региональных условиях. М.: Союздорнии, 1988. 19 с.
4. Сиденко В. М., Батраков О. Т., Покутнев Ю. А. Дорожные одежды с парогидроизоляционными слоями. М.: Транспорт, 1894. 144 с.
5. Боровик В. С., Алексиков И. С., Алексиков С. В. Строительство дорожных одежд на переуплотненных грунтах в засушливых районах Заволжья // Надежность и долговечность строительных материалов и конструкций : материалы III междунар. науч.-техн. конф. Волгоград : ВолгГАСУ, 2003. Ч. VI. С. 143—145.
6. Калужский Я. А., Батраков О. Т. Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд. М.: Транспорт, 1971. 160 с.
7. Руководство по сооружению земляного полотна автомобильных дорог / Минтрансстрой СССР. М.: Транспорт, 1982. 160 с.

8. *Самойлова Л. И.* Повышенные требования к плотности грунта с учетом ее однородности: автореф. дис... канд. техн. наук. М., 1987. 20 с.
9. *Beavis H. M.* Observations on sections of rural roads at three sites in Western Australia and South Australia, 1967 to 1982 // Australian Road Research. 1984. Vol. 14. № 2. Pp. 78—81.
10. *Casagrande A.* Classification and identification of soils // Trans. ASCE. 1948. Vol. 113. P. 901—991.
11. *Casagrande A.* The structure of clay and its importance in foundation engineering // Proc. Boston Soc. Civ. Eng. 1932. Vol. 19. Pp. 168—208.
12. *Groney D.* The design and performance of road pavements // Transport and road research laboratory. London, 1977. 673 p.
13. *Martin H. Az.* Automobiltehnische Zeitschriften 9, 1965. Pp. 293—296.
14. *Mitchel J. K.* Fundamentals of soil behavior. New York: John Wiley & Sons, 1993. 438 p.
15. *Mitchel J. K.* The fabric of natural clays and its relation to engineering properties // Proc. Highway Res. Board. Washington, 1956. Vol. 35. Pp. 693—713.
16. *Prakash Sh.* Soil dynamics. New York: McGraw-Hill book company, 1981. 276 p.
17. *Radovskiy B., Bondar N.* Shakedown of subgrade soil under repeated // Transportation research record 1547, TRB, National research council. Washington, 1996. Pp. 82—88.
18. *Rosenquist J. T.* The influence of physico-chemical factors upon the mechanical properties of clays // Clay and clay mineral. Oxford, 1962. Pp. 12—27.

© Алексиков С. В., Симончук Д. Н., 2015

Поступила в редакцию
в сентябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Алексиков С. В., Симончук Д. Н. Повышение качества строительства дорожного полотна в засушливых районах юга РФ // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 154—162.

Об авторах:

Алексиков Сергей Васильевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, al34rus@mail.ru

Симончук Дмитрий Николаевич — аспирант кафедры строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, al34rus@mail.ru

S. V. Aleksikov, D. N. Simonchuk

INCREASE OF QUALITY OF CONSTRUCTION OF A ROADWAY IN ARID REGIONS IN THE SOUTH OF THE RUSSIAN FEDERATION

The article describes the technology of soil compaction of a roadway in arid regions.

Key words: roads, earthwork, soils of high density, humidity.

REFERENCES

1. *Al'bom rekomenduemykh tekhnicheskikh reshenii dlya primeneniya v dorozhnom stroitel'stve* [Album of recommended technical solutions for use in road construction]. Moscow, Rosagropromtorg Publ., 1990. 103 p.
2. *Metodicheskie rekomendatsii po povysheniyu prochnosti gruntov zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog v zasushlivykh raionakh Kazakhstana* [Methodological recommendations on improvement of the strength of subgrade soil roads in drylands of Kazakhstan]. Moscow, Soyuzdornii Publ., 1979. 24 p.
3. *Metodicheskie rekomendatsii po utochneniyu plotnosti gruntov nasypei avtomobil'nykh dorog v razlichnykh regional'nykh usloviyakh* [Methodological recommendations on specification of density of soil embankments of roads in different regional contexts]. Moscow, Soyuzdornii Publ., 1988. 19 p.

4. Sidenko V. M., Batrakov O. T., Pokutnev Yu. A. *Dorozhnye odezhdy s parogidroizolyatsionnymi sloyami* [Road pavement with vapor-damp-proof layers]. Moscow, Transport Publ., 1894. 144 p.
5. Borovik V. S., Aleksikov I. S., Aleksikov S. V. [Construction of road pavement on compacted soils in arid areas of the TRANS-Volga region]. *Nadezhnost' i dolgovechnost' stroitel'nykh materialov i konstruktsov : materialy III mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [The Reliability and durability of construction materials and structures. Proc. of the III Intern. scien.-tech. conf.]. Volgograd, VSUACE Publ., 2003. Pt. VI. Pp. 143—145.
6. Kaluzhskii Ya. A., Batrakov O. T. *Uplotnenie zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd* [Compaction of subgrade and road pavement]. Moscow, Transport Publ., 1971. 160 p.
7. *Rukovodstvo po sooruzheniyu zemlyanogo polotna avtomobil'nykh dorog* [Guideline for construction of subgrade of highways]. Moscow, Transport Publ., 1982. 160 p.
8. Samoilova L. I. *Povyshennye trebovaniya k plotnosti grunta s uchetom ee odnorodnosti* [High requirements to the density of the soil with regard to its uniformity. Cand. Eng. Sci. Dis.]. Moscow, 1987. 20 p.
9. Beavis H. M. Observations on sections of rural roads at three sites in Western Australia and South Australia, 1967 to 1982. *Australian Road Research*, 1984, 14(2), pp. 78—81.
10. Casagrande A. Classification and identification of soils. *Trans. ASCE*, 1948, vol. 113, pp. 901—991.
11. Casagrande A. The structure of clay and its importance in foundation engineering. *Proc. Boston Soc. Civ. Eng.*, 1932, vol. 19, pp. 168—208.
12. Groney D. The design and performance of road pavements. *Transport and road research laboratory*. London, 1977. 673 p.
13. Martin H. Az. *Automobiltehnische Zeitschriften* 9, 1965. Pp. 293—296.
14. Mitchel J. K. *Fundamentals of soil behavior*. New York, John Wiley & Sons, 1993. 438 p.
15. Mitchel J. K. The fabric of natural clays and its relation to engineering properties. *Proc. Highway Res. Board*. Washington, 1956. Vol. 35. Pp. 693—713.
16. Prakash Sh. *Soil dynamics*. New York, McGraw-Hill book company, 1981. 276 p.
17. Radovskiy B., Bondar N. Shakedown of subgrade soil under repeated. *Transportation research record 1547*, TRB, National research council. Washington, 1996. Pp. 82—88.
18. Rosenquist J. T. The influence of physico-chemical factors upon the mechanical properties of clays. *Clay and clay mineral*. Oxford, 1962. Pp. 12—27.

For citation:

Aleksikov S. V., Simonchuk D. N. [Increase of quality of construction of a roadway in arid regions in the south of the Russian Federation]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 154—162.

About authors:

Aleksikov Sergei Vasil'evich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, al34rus@mail.ru

Simonchuk Dmitrii Nikolaevich — Postgraduate Student of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, al34rus@mail.ru

УДК 62-82:69.002.5

Н. А. Фоменко^а, В. И. Богданов^б, О. В. Бурлаченко^а, С. В. Алексиков^а

^а *Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет*

^б *Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолгГАСУ*

РАЗГРУЗОЧНЫЙ КЛАПАН СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ГИДРОПРИВОДА МАШИН

Разработана конструкция разгрузочного клапана запорного устройства системы защиты строительно-дорожных машин от несанкционированного выброса рабочей жидкости при разрушении рукавов высокого давления.

К л ю ч е в ы е с л о в а : гидропривод, гидравлическая система, рукав высокого давления, защита гидропривода, запорное устройство.

Анализ отечественных и зарубежных источников показывает, что гидрофицированные машины и агрегаты имеют ряд преимуществ, среди которых: удобство управления рабочими органами; высокая скорость и плавность изменения положения рабочей машины; реверс рабочего органа; раздельное управление рабочими машинами; точность позиционирования и дозирования силового воздействия на рабочие органы; компактность; высокие кинематические характеристики агрегата. Определилась область применения гидравлических систем в подъемно-транспортных механизмах, системах регулирования глубины рабочего органа при планировке поверхности, механизмах включения отбора мощности и ведущих мостов транспортных средств, привода тормозов, управления трансмиссией, регулирования колес, отбора мощности для привода активных рабочих органов, привода ходовой системы мобильных тягово-транспортных средств и др.

Гидросистема строительно-дорожных [1] машин работает в условиях значительных колебаний наружной температуры (от -50 до $+60$ °C) и влажности окружающего воздуха (от 5 до 100 %). При этом существенно меняется и внутренняя температура — температура рабочей жидкости (от 30 до 60 °C). Все это приводит к ухудшению свойств материала, из которого изготовлены агрегаты гидросистемы, и снижает надежность всей конструкции. Дальнейшее увеличение мощности гидропривода за счет повышения рабочего давления нередко приводит к разрушению рукавов высокого давления и несанкционированному выбросу рабочей жидкости в атмосферу (46...335 л за один выброс).

Выброс в атмосферу такого количества рабочей жидкости (минерального масла — нефтепродуктов) наносит значительный ущерб экологической безопасности (фауне, флоре) [2—9], приводит к невозможным материальным потерям биоресурсов и др.

По этой причине рабочее давление в гидросистемах тягово-транспортных средств, мобильных грузоподъемных машинах, манипуляторах ограничено 18...20 МПа, что не позволяет поднять энергоемкость гидропривода и, соответственно, нагрузку на рукава высокого давления.

В этой связи целесообразно продолжать исследования по совершенствованию способов и устройств защиты гидравлической системы [10].

В настоящее время борьба с потерями рабочей жидкости при несанкционированном выбросе в атмосферу ведется по двум направлениям: повышение прочности рукавов [11, 12] и создание способов и систем защиты.

Создано множество типов защиты гидравлической системы, которые отличаются по принципу действия, месту расположения, функциональным параметрам, типу сигнального устройства и методу устранения потерь рабочей жидкости.

По принципу действия можно выделить несколько типов: поплавковые, пневмоэлектрические, гидропневматические, гидромеханические. У большинства защитных устройств потери после срабатывания составляют 3...10 л, например, у пневмоэлектрической системы защиты — 6...8 л, поплавковой — до 10 л.

Существует широкая номенклатура металлических трубопроводов диаметром 4...42 мм и толщиной стенок 1,5...4 мм с запасом прочности от 4 до 8 раз, обеспечивающим герметичность при номинальном давлении 10...63 МПа. Повышение прочности металлических трубопроводов приводит к увеличению материалоемкости. Применение таких трубопроводов в приводах рабочих органов, имеющих несколько степеней свободы, усложняет конструкцию шарнирных сочленений и не гарантирует герметичности.

Надежность гидравлических систем современных машин во многом определяется конструкцией гибких рукавов высокого давления. Для повышения их прочности применяют оплеточное или навивочное металлическое армирование гибких трубопроводов, новые типы соединений концевой арматуры (например, шариковые муфты), силовой каркас изготавливают из высокопрочного полиэфирного волокна и многослойной арматуры, камеры рукава — методом экструзии из высококачественной синтетической резины с твердым внутренним покрытием, применяют полиуретан, полиамид или оплетку из нержавеющей стали. Установлено, что в условиях циклических нагрузок оплеточная арматура по прочности уступает навивочной. Однако как оплеточные, так и навивочные рукава не выдерживают длительных циклических нагрузок при номинальном давлении в гидравлической системе за границей третьего исполнения (18...20 МПа).

С целью повышения надежности трубопровода высокого давления авторами разработано конструктивное решение и которое существенно улучшает долговечность рукавов [13—15]. Но даже всех вышеперечисленных мер недостаточно для полной защиты гидропривода от выброса рабочей жидкости при аварийных ситуациях.

При несанкционированном разрушении рукавов высокого давления для гидропневматической системы защиты потери рабочей жидкости составляют 0,5...1,2 л, а для гидромеханической — до 0,17 л. Исследования показывают, что наиболее эффективным является гидромеханический способ защиты. Разработано несколько вариантов этого способа защиты [16, 17, 14, 10], однако результаты исследований не полностью удовлетворяют поставленной задаче.

Известна система защиты гидропривода [4], включающая гидробак, насос, соединенный напорной линией с гидродвигателем через распределитель, и запорное устройство, установленное в напорной линии и подключенное своей входной полостью к выходу насоса. Запорное устройство включает корпус с размещенным в нем подпружиненным плунжером, выполненным со стороны

входной полости осевого канала, сообщенным отверстием через пружинную полость с установленным в ней упором с упорным стержнем, выходной полостью, подключенной к входу распределителя, а в плунжере выполнены радиальные отверстия, сообщающие осевой канал с линией слива.

Недостатком системы защиты гидропривода является низкая эффективность работы его запорного устройства. Это обусловлено тем, что в момент сообщения радиальных отверстий плунжера с линией слива давление во впускной полости существенно падает и не поддерживается, что вызывает колебательный процесс плунжера из-за возврата его в данный момент пружинами. Это снижает эффективность перекрытия осевого канала упорным стержнем и увеличивает время срабатывания устройства.

Кроме этого, недостатком данной системы защиты гидропривода является отсутствие регуляции порога срабатывания запорного устройства, определяемого перепадом давления между входной и выходной полостями. Это обуславливает низкую универсальность запорного устройства для установки его в системах защиты гидропривода различных машин.

Наиболее близким по технической сущности и достигаемому результату является система защиты гидропривода [6]: гидробак; насос, соединенный напорной гидролинией с гидроприводом через распределитель; линия слива в гидробак; запорное устройство, включающее корпус с входной, выходной и глухой полостями, входным, выходным и сливным штуцерами с каналами, установленное в напорной линии и подключенное своей входной полостью к выходу насоса, а выходной — к распределителю, с размещенным во входной полости подпружиненным плунжером с кольцевой проточкой и радиальными отверстиями; выполненным со стороны входной полости осевым каналом, сообщенным с выходной полостью, в которой установлен подпружиненный подвижный клапан со штоком, при этом шток клапана, гидравлически сообщенный через цилиндрическую глухую полость с напорной линией, свободно перемещается в упоре.

Недостатком данной системы защиты гидропривода является низкая эффективность работы его запорного устройства. Это обусловлено тем, что в момент сообщения входной полости через радиальные отверстия плунжера и канал сливного штуцера с линией слива давление во входной полости существенно падает и не поддерживается, а плунжер пружинами возвращается в исходное положение и перекрывает канал сливного штуцера. Возникшим из-за перекрытия канала сливного штуцера давлением во входной полости плунжер, сжимая пружины, перемещается для перекрытия канала выходного штуцера, после чего входная полость опять сообщается с каналом сливного штуцера, что вызывает колебательный процесс плунжера. Возникающие колебания запорно-регулирующего элемента — плунжера — сопровождаются интенсивными ударами клапана о седло и колебаниями давления в системе, которые являются причиной износа и потери герметичности клапана. При этом увеличивается время перекрытия канала выходного штуцера, что снижает быстродействие запорного устройства.

Кроме того, недостатком данной системы защиты гидропривода является снижение экологической безопасности использования гидропривода машин и эффективности системы защиты гидропривода в целом из-за того, что для надежного перекрытия потока рабочей жидкости конусным клапаном, кон-

тактирующим с седлом по линии окружности, требуется значительное усилие пружины, а это способствует жесткой работе клапана запорного устройства, и из-за износа его рабочей поверхности по окружности контакта снижается эксплуатационная надежность устройства.

Недостатком данной системы защиты гидропривода является также то, что после перекрытия плунжером канала выходного штуцера и при перекрытом посредством клапана осевом канале рабочая жидкость в этом положении плунжера оказывается замкнутой в объеме выходной полости между плунжером и упором. Так как жидкость не сжимаема, то плунжер своим правым торцом достигает всего лишь кромки канала выходного штуцера, обращенной к упору, поэтому не имеет возможности достичь торца упора и выполнить перекрытие своей наружной поверхностью канала выходного штуцера. Ход равен длине поверхности от кромки канала выходного штуцера до упора.

Низкая эффективность работы запорного устройства обусловлена тем, что закрытие плунжером канала выходного штуцера без достаточного перекрытия не обеспечивает абсолютно полного прекращения поступления рабочей жидкости из выходной полости в канал выходного штуцера, так как при большом давлении в гидросистеме будет происходить просачивание рабочей жидкости в канал выходного штуцера корпуса запорного устройства через зазор между цилиндрической поверхностью выходной полости корпуса и плунжером с обильным пенообразованием рабочей жидкости, заполнением пеной нагнетательной гидролинии до разрушенного рукава и выбросом пены в окружающую среду.

Кроме этого, недостатком данной системы защиты гидропривода является то, что не регулируется порог срабатывания запорного устройства, определяемый перепадом давления между входной и выходной полостями. Это обуславливает низкую универсальность запорного устройства для установки его в системах защиты гидропривода различных машин.

Для устранения перечисленных недостатков разработаны и запатентованы авторами ряд технических решений [18, 5], которые существенно повышают эксплуатационную надежность системы защиты гидропривода. Один из вариантов предлагаемого конструктивного решения позволяет повысить эффективность работы системы защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости из гидросистемы при разрушении рукавов высокого давления путем устранения сопротивления несжимаемого объема рабочей жидкости, образованного в замкнутом пространстве между плунжером и упором, препятствующего перемещению плунжера в конце его хода, и, соответственно, обеспечивает надежное перекрытие поврежденной гидролинии.

Техническое решение может быть использовано для защиты от несанкционированного выброса рабочей жидкости из гидравлических систем строительного-дорожных, сельскохозяйственных, мелиоративных, лесотехнических, промышленных машин и оборудования с гидроприводом рабочих органов.

Технический результат предлагаемого конструктивного решения можно получить за счет повышения эффективности системы защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости из гидравлической системы при разрушении рукавов высокого давления путем снижения колебательного процесса плунжера, повышения быстродействия срабатывания за-

порного устройства при одновременном повышении эксплуатационной надежности гидропривода и экологической безопасности использования гидропривода машин.

Система защиты гидропривода включает гидробак, насос, соединенный напорной гидролинией с гидроприводом через распределитель, линию слива в гидробак и запорное устройство, включающее корпус с входной, пружинной, выходной и глухой полостями, входным, выходным и сливными штуцерами с каналами, установленное в напорной гидролинии и подключенное своей входной полостью к выходу насоса, а выходной — к распределителю. Во входной полости размещен подпружиненный плунжером, имеющий кольцевую проточку, совмещенную с радиальными отверстиями, и осевой канал, сообщенный с выходной полостью, перекрываемый подпружиненным плунжерным клапаном, имеющим гидравлический подпор от гидронасоса. Запорное устройство системы защиты гидропривода дополнительно оснащено разгрузочным клапаном со сливным штуцером, выполненным в виде полого цилиндра, по наружной поверхности которого нанесена резьба, посредством которой разгрузочный клапан монтируется в упоре запорного устройства, при этом цилиндрическая полость разгрузочного клапана сообщается с выходной полостью корпуса запорного устройства посредством канала. Кроме этого внутри цилиндрической полости разгрузочного клапана размещен подпружиненный поршень, снабженный уплотнительным кольцом.

Сущность технического решения заключается в том, что в запорном устройстве системы защиты гидропривода установлен разгрузочный клапан, включающий корпус, совмещенный с сливным штуцером, выполненный в виде полого цилиндра, по наружной поверхности которого нанесена резьба, посредством которой разгрузочный клапан монтируется в упоре запорного устройства, при этом цилиндрическая полость разгрузочного клапана сообщается с выходной полостью корпуса запорного устройства посредством канала. Кроме этого внутри цилиндрической полости разгрузочного клапана размещен подпружиненный поршень, снабженный уплотнительным кольцом, что позволяет исключить колебательный процесс плунжера, возникающий при неполном перекрытии им выходной полости запорного устройства из-за препятствия несжимаемого объема жидкости (гидравлической «подушки»), заключенной между торцами плунжера и упора, перетеканию этого объема жидкости в цилиндрическую полость разгрузочного клапана. При этом, сжимая пружину разгрузочного клапана, перемещается поршень, обеспечивая полный ход плунжера запорного устройства $h + t$, равный сумме проходного сечения h канала B выходного штуцера и расстояния t от кромки перекрытия до торца упора, и надежное перекрытие канала выходного штуцера, что существенно повышает быстродействие срабатывания защиты, тем самым повышая надежность, эксплуатационные свойства и эффективность защиты гидропривода. Кроме того, снижается колебательный процесс плунжера и обеспечивается быстродействие перекрытия поврежденной гидролинии.

На рис. схематично представлен общий вид устройства.

Система защиты гидропривода включает в себя гидробак 1, насос 2, напорную гидролинию 3, линию слива в гидробак 4, гидрораспределитель 5, гидродвигатель 6, запорное устройство 7, разгрузочный клапан 8.

Запорное устройство 7 включает в себя корпус 9, снабженный входным 10, выходным 11 и сливным 12 штуцерами с каналами, а также упором 13. Внутри корпуса 9 запорного устройства 7 размещен подпружиненный плунжер 14 с входной полостью *A*. Плунжер 14 размещается в корпусе 9 на расстоянии его полного хода $h + t$ от упора 13 с образованием выходной полости *B*, сообщающейся с каналом *B* выходного штуцера 11 и замкнутого несжимаемого объема жидкости *V*. По наружной поверхности плунжера 14 выполнена кольцевая проточка 15 на расстоянии от вертикальной оси сливного штуцера 12 $h + t$, равном полному ходу плунжера 14 входной полости *A*, и радиальные отверстия 16 на расстоянии от вертикальной оси сливного штуцера 12 $h + t$, равном также полному ходу плунжера 14 входной полости. Входная полость *A* сообщается с выходной полостью *B* корпуса 9 посредством осевого канала 17, который перекрывается подпружиненным плунжером 18 с возможностью свободного перемещения в сквозном отверстии 19 упора 13. Плунжеры 14 и 18 подпружинены упругими элементами 20 и 21. При этом плунжер 18, снабженный конусом 22 и буртиком 23, является упором пружины 20. Упор 13 снабжен разгрузочным клапаном 8 со сливным штуцером 24, выполненным в виде полого цилиндра, образующего полость *E*, заключенную между торцом в расточке упора 13 под разгрузочный клапан 8 и поршнем 25, а также пружинную полость *Ж*, заключенную между поршнем 25 и торцом сливного штуцера 24. По наружной поверхности полого цилиндра клапана 8 выполнена резьба для монтажа его в упоре 13. Внутри разгрузочного клапана 8 размещен подпружиненный поршень 25, снабженный уплотнительным кольцом 26 из эластичного материала, например резины или полиуретана, а в пружинной полости *Ж* размещена пружина 27. Полость *Ж* через резьбовой штуцер 24 сообщается со сливной гидролинией 4. В упоре 13 выполнен канал 28, сообщающий выходную полость запорного устройства *B* и полость *E* разгрузочного клапана 8 и предназначенный для вытеснения несжимаемого объема жидкости *V* запорного устройства в полость *E* разгрузочного клапана 8, что позволяет беспрепятственно преодолеть плунжером 14 расстояние t до торца упора 13 и обеспечить надежное перекрытие канала *B* выходного штуцера 11. Пружинная полость *Ж* разгрузочного клапана 8 служит не только компенсатором для разгрузки замкнутого объема жидкости *V* в конце хода плунжера 14, но и для сбора из поршневой полости разгрузочного клапана 8 утечки жидкости через уплотненный элемент 26 поршня 25 с последующими сливом ее в гидробак 1.

Система защиты гидропривода работает следующим образом: в неработающем гидроприводе давление рабочей жидкости в полостях *A*, *B* и *B* запорного устройства 7 одинаково и равно номинальному. При этом плунжер 14 входной полости подпирается пружиной 21 и находится в крайнем левом положении. Плунжер 18 выходной полости *B* находится в равновесном состоянии под действием пружины 20, упирающейся в упор 13, и силы давления, создаваемой в глухой полости *D* на плунжер 18 выходной полости *B* так, что полости *A* и *B* сообщаются через осевой канал 17 плунжера 14.

При включении гидрораспределителя 5 рабочая жидкость через канал 17 из входной полости *A* поступает в выходную полость *B* и через канал *B* выходного штуцера 11 под рабочим давлением поступает в гидродвигатель 6.

направляется в полость Γ и далее на слив в гидробак 1. Использование разгрузочного клапана 8 позволяет устранить возникающий в момент перекрытия выходного канала B несжимаемый объем жидкости V (гидравлическую «подушку»), препятствующий перемещению плунжера 14 на величину t , обеспечивающую надежное перекрытие выходного канала 11, а также устраняет негативный колебательный процесс плунжера 14, повторяющиеся ударные нагрузки на седло канала 17 и дросселирование рабочей жидкости в поврежденную гидролинию через неполностью закрытый выходной канал 11.

Полный ход плунжера 14, равный $h + t$, обеспечивается за счет разгрузки несжимаемого пространства V путем вытеснения его объема в полость E разгрузочного клапана 8 через канал 28, выполненный в упоре 13 и сообщающий выходную полость запорного устройства B и поршневую полость E разгрузочного клапана 8. При этом под давлением рабочей жидкости, вытесняемой из полости B , сжимая упругий элемент — пружину 27, поршень 25 перемещается, обеспечивая заполнение полости E вытесняемым объемом V . Пружинная полость разгрузочного клапана 8 служит не только компенсатором для разгрузки замкнутого объема жидкости в конце хода плунжера 14, но и для сбора утечки жидкости из поршневой полости через уплотненный элемент 26 поршня 25 с последующей транспортировкой по каналу штуцера 24 на слив в гидробак 1. После устранения неисправности плунжер 14 возвращается в исходное положение, а рабочая жидкость из полости E поршнем 24 разгрузочного клапана 8 под действием пружины 27 вытесняется обратно в полость B .

Таким образом, предлагаемое конструктивное решение повышает эффективность системы защиты гидропривода от несанкционированного выброса рабочей жидкости из гидросистемы, существенно повышает быстродействие его запорного устройства, эксплуатационную надежность и экологическую безопасность использования гидропривода рабочих органов машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фоменко Н. А.* Совершенствование эксплуатационных свойств гидравлических систем машинно-тракторных агрегатов: дис... канд. техн. наук. Волгоград, 2002. 166 с.
2. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Алексиков С. В.* Ресурсосберегающая гидравлическая система строительной техники: сб. науч. тр. по материалам Международной науч.-практ. конф. Саратов, 2014. С. 221—224.
3. *Перельмитер В. И.* Гидравлическая система: пат. SU 1822471 A3 F 15 B 20/00.
4. Система защиты гидропривода: пат. SU1813937A1F15B20/00 / Н. А. Фоменко, С. В. Дубинский, Г. И. Голобута, Г. П. Лышко.
5. Снижение энергии гидравлического удара в запорном устройстве гидросистемы строительной дорожной техники / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков, Н. В. Сапожкова // Интернет-вестник ВолГАСУ. Сер.: Политематическая. 2015. Вып. 1 (37). Режим доступа: www.vestnik.vgasu.ru.
6. *Фоменко Н. А., Перельмитер В. И., Фоменко В. Н.* Система защиты гидропривода: пат. RU15763U17F15B21/00.
7. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В.* Система защиты гидропривода: пат. № 2549754C1 Рос. Федерация МПК F15B20/00(2006.01).
8. *Богданов В. И., Фоменко Н. А., Бурлаченко О. В.* Гидропривод : пат. заявка на изобретение № 2014152575 от 26.12.2014.
9. Гидравлическая система: пат. RU 15764 U1 7 F 15 B 21/00 / В. Н. Фоменко, В. И. Перельмитер, Н. А. Фоменко, В. П. Шевчук.
10. *Фоменко Н. А., Богданов В. И., Сапожкова Н. В.* Пути совершенствования гидропривода тягово-транспортных средств // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 36(55). С. 218—222.

11. Бурлаченко О. В., Сердобинцев Ю. П., Схиртладзе А. А. Повышение качества функционирования технологического оборудования. Старый Оскол : ТНТ, 2010. 411 с.
12. Система защиты гидропривода. Заявка на изобретение № 2014133230 от 12.08.2014 / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков.
13. Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В. Система защиты гидропривода. Заявка на патент № 2014133230.
14. Фоменко Н. А., Богданов В. И., Фоменко В. Н. Трубопровод высокого давления: пат. RU 2511926 С2 Рос. Федерация МПК F 15 В 20/00 (2006.01).
15. Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В. Система защиты гидропривода : заявка на патент 2014121185 ; Рос. Федерация.
16. Трубопровод гидросистемы строительно-дорожных машин / Н. А. Фоменко, С. В. Алексиков, В. И. Богданов, Н. В. Сапожкова // Вестник развития науки и образования. 2014. Вып. 3. С. 115—117.
17. Совершенствование гидравлической системы строительной техники / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков, Н. В. Сапожкова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 38(57). С. 120—124.
18. Система защиты гидропривода строительно-дорожных машин / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 40(59). С. 219—229.

© Фоменко Н. А., Богданов В. И., Бурлаченко О. В., Алексиков С. В., 2015

Поступила в редакцию
в сентябре 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Разгрузочный клапан системы защиты гидропривода машин / Н. А. Фоменко, В. И. Богданов, О. В. Бурлаченко, С. В. Алексиков // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 163—173.

Об авторах:

Фоменко Николай Александрович — канд. техн. наук, доц., Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Богданов Виктор Иванович — канд. техн. наук, доц., проф. кафедры технологических процессов и машин, Волжский институт строительства и технологий (ВИСТех) — филиал ВолГАСУ. Российская Федерация, 404111, г. Волжский, пр. Ленина, 72

Бурлаченко Олег Васильевич — д-р техн. наук, проф., проректор по учебно-воспитательной работе, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Алексиков Сергей Васильевич — д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолГАСУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, AL34rus@mail.ru

N. A. Fomenko, V. I. Bogdanov, O. V. Burlachenko, S. V. Aleksikov

RELIEF VALVE OF PROTECTION SYSTEM OF HYDRAULIC DRIVE OF A MACHINE

The authors develop the design of a relief valve of a locking device of protection system of road-construction machines against unapproved emission of power fluid at destruction of high-pressure hose.

Key words: hydraulic drive, hydraulic system, high-pressure hose, protection of the hydraulic actuator, locking device.

REFERENCES

1. Fomenko N. A. *Sovershenstvovanie ekspluatatsionnykh svoystv gidravlicheskikh sistem mashinno-traktornykh agregatov* [Improvement of operating properties of hydraulic systems of machine and tractor units. Dis. Cand. Eng. Sci.]. Volgograd, 2002. 166 p.
 2. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Aleksikov S. V. *Resursosberegayushchaya gidravlicheskaya sistema stroitel'noi tekhniki* [Resource-saving hydraulic system of construction equipment. Proc. of the Inter. sci.-pract. conf.]. Saratov, 2014. Pp. 221—224.
 3. Perel'miter V. I. *Gidravlicheskaya sistema* [Hydraulic system. Pat. RF, no. SU 1822471 A3 F 15 B 20/00].
 4. Fomenko N. A., Dubinskii S. V., Golobuta G. I., Lyshko G. P. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of Hydraulic Control Protection. Pat. RF, no. SU 1813937A1F15B20/00].
 5. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V., Sapozhkova N. V. [Reduce on energy hydraulic shock in lock protection device of the hydraulic system of construction and road machines]. *Internet-Vestnik VolgGASU*, 2015, no. 1(37), paper 3. Available at: <http://www.vestnik.vgasu.ru/>
 6. Fomenko N. A., Perel'miter V. I., Fomenko V. N. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of Hydraulic Control Protection. Pat. RF, no. RU15763U17F15B21/00].
 7. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Pat. RF no. 2549754C1 MPKF15B20/00(2006.01)].
 8. Bogdanov V. I., Fomenko N. A., Burlachenko O. V. *Gidroprivod* [Hydraulic gear. Pat. application for the invention no. 2014152575 from 26.12.2014].
 9. Fomenko V. N., Perel'miter V. I., Fomenko N. A., Shevchuk V. P. *Gidravlicheskaya sistema* [Hydraulic system. RF Patent no. 15764 U1 7 F 15 B 21/00].
 10. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Sapozhkova N. V. [Ways of improvement of a hydraulic actuator of traction vehicles]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, no. 36(55), pp. 218—222.
 11. Burlachenko O. V., Serdobintsev Yu. P., Skhirtladze A. A. *Povyshenie kachestva funktsionirovaniya tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Improvement of the quality of functioning of processing equipment]. *Staryi Oskol, TNT Publ.*, 2010. 411 p.
 12. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Application for the invention no. 2014133230 from 12.08.2014].
 13. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Application for the invention no. 2014133230].
 14. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Fomenko V. N. *Truboprovod vysokogo davleniya* [High pressure pipeline. Pat. RU 2511926 C2 Russian Federation MPK F 15 B 20/00 (2006.01)].
 15. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V. *Sistema zashchity gidroprivoda* [System of protection of a hydraulic gear. Pat. application 2014121185; Russian Federation].
 16. Fomenko N. A., Aleksikov S. V., Bogdanov V. I., Sapozhkova N. V. [Pipeline of the hydraulic system of construction-road machines]. *Vestnik razvitiya nauki i obrazovaniya* [Bulletin of Development of Science and Education], 2014, no. 3. pp. 115—117.
 17. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V., Sapozhkova N. V. [Improvement of hydraulic system of construction equipment]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 38(57), pp. 120—124.
 18. Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. [Protection system of hydraulic drive of road-building machines]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 40(59), pp. 219—229.
- For citation:
- Fomenko N. A., Bogdanov V. I., Burlachenko O. V., Aleksikov S. V. [Relief valve of protection system of hydraulic drive of a machine]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 163—173.

About authors:

Fomenko Nikolai Aleksandrovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Bogdanov Viktor Ivanovich — Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Technological Processes and Machines Department, Volzhskii Institute of Civil Engineering and Technology (VIS-Tech) — Affiliate Institute of VSUACE. 72, Lenin Avenue, Volzhskii, 404111, Russian Federation

Burlachenko Oleg Vasil'evich — Doctor of Engineering Science, Professor, Vice-Rector for Studies and Educational Work, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation

Aleksikov Sergei Vasil'evich — Doctor of Engineering Science, Professor, the Head of Construction and Operation of Transport Works Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, AL34rus@mail.ru

УДК 625.8

Чан Ван Зы

Воронежский государственный архитектурно-строительный университет

ОСНОВНЫЕ ПРИЧИНЫ ДЕФОРМАЦИЙ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА И ВЫБОР КОНСТРУКТИВНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЕ ПОЙМЕННЫХ УЧАСТКОВ АВТОДОРОГ ВЬЕТНАМА

Приведены причины снижения прочности и устойчивости конструктивных элементов автомобильных дорог в условиях затопления. Даются рекомендации по применению специальных откосных защитно-несущих конструкций для противодействия ударно-сдвигающим усилиям, возникающим в слоях грунта земляного полотна и дорожных одеждах от силовых, фильтрационных и размывающих воздействий паводковых вод.

Ключевые слова: автомобильные дороги, земляное полотно, откосы пойменных насыпей, зоны подтопления, регуляционные сооружения, габионные конструкции.

Высокий темп развития народного хозяйства и автомобилизации во Вьетнаме предъявляет все более высокие требования к транспортно-эксплуатационному состоянию дорожной сети страны. Однако нормальная эксплуатация автомобильных дорог затрудняется рядом климатических, рельефных и гидрогеологических особенностей местности. Расположенный на востоке Индокитайского полуострова в Юго-Восточной Азии, Вьетнам относится к зоне муссонного субэкваториального климата. Сезон дождей здесь длится с апреля по октябрь. В это время во Вьетнаме господствует экваториальный муссон с Тихого океана, приносящий примерно 80 % годовой нормы осадков (рис. 1).

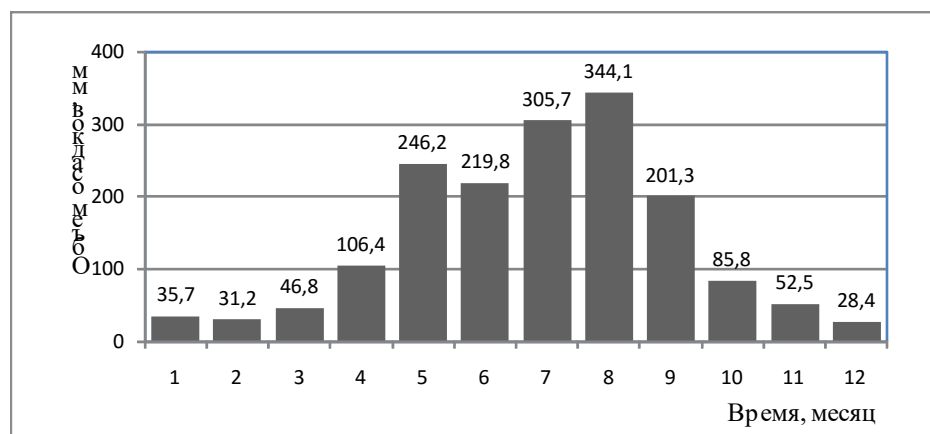


Рис. 1. График изменения количества осадков по месяцам

Выпадение такого количества осадков в сочетании с частыми стихийными бедствиями — тайфунами, цунами, штормами и др. — ежегодно приводит к образованию зон подтопления, которые практически парализуют движение транспорта (рис. 2).



Рис. 2. Улица Нгуен Чай в г. Ханой после дождя

Вьетнам является страной с разветвленной системой рек, поэтому большинство дорожно-транспортных сооружений Вьетнама обычно расположены на пойменных участках. Учитывая то, что в самой большой дельте Северного Вьетнама — дельте Красной реки — земли подняты над уровнем океана всего на 1...2 м, а уклоны горных рек в результате длительной и энергичной эрозии незначительны, то сток воды естественным путем достаточно затруднен. Это приводит к подтоплению и заболачиваемости территорий в период обильного выпадения муссонных дождей. Особенно неблагоприятные условия для движения транспортных средств возникают на пойменных участках, где автомобильные дороги расположены на земляных дамбах. Грунт полотна и его естественного основания из-за фильтрации и капиллярного поднятия от уровня грунтовых вод насыщается влагой из постоянных и временных водотоков и водоемов, пересекающих трассу дороги или расположенных рядом с ней. Насыщение земляного полотна влагой — крайне опасное явление, так как устойчивость всех элементов дороги из-за снижения несущей способности грунта сильно уменьшается, что приводит к деформациям и разрушениям земляного полотна, провалам дорожного покрытия, эрозии и размыву откосов, активизации оползневых явлений (рис. 3, 4). Поэтому одной из основных задач является своевременное проведение защитно-восстановительных работ и обеспечение наиболее быстрого открытия движения транспортных средств. Особое значение это приобретает для дорог с большой интенсивностью движения, в районах с малоразвитой дорожной сетью, а также дорог в отдаленной малообжитой местности, являющихся единственным средством сообщения.



Рис. 3. Размыв участка автомобильной дорог в области Фу Иен (Центральный Вьетнам)

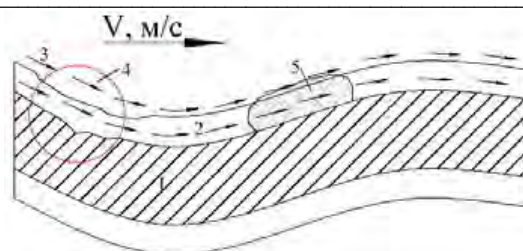


Рис. 4. Схема разрушения пойменных насыпей автомобильных дорог: 1 — асфальтобетонное покрытие; 2 — откосы автомобильных дорог; 3 — направление потока воды; 4 — воронка размыва (эрозия поверхности) откосов земляного полотна пойменных насыпи; 5 — отложение вымытого грунта

Требования по обеспечению устойчивости дорог от размывов и проведению защитно-восстановительных работ при нарушении функционирования дорог определяют необходимость проведения анализа основных причин и видов разрушений дорожных сооружений, разработки инженерных решений по способам и конструкциям укреплений как капитального, так и временного типов, а также выработки соответствующих рекомендаций для каждого конкретного объекта.

Степень достаточности требуемого функционирования откосных и прибрежных укрепительных сооружений определяется научно-технической обоснованностью и качеством проектно-строительных решений и эксплуатационных мероприятий. Важное значение имеет достоверность учета гидрометеорологических факторов и воздействий. Однако в большинстве случаев проектирование сооружений осуществляется с использованием только типовых решений, без взаимной увязки с другими сооружениями специального назначения и учета конкретных гидрометеорологических факторов и воздействий. Подобный подход к устройству укрепительных сооружений нередко является одной из основных причин разрушения дорожных сооружений (рис. 5) [15].



Рис. 5. Основные причины разрушения дорожных сооружений во Вьетнаме

Земляное полотно — фундамент дорожной одежды, его устойчивость определяет долговечность сооружения и обеспечивается приданием грунтовой насыпи полотна необходимых размеров и формы. Грунтовой массив обычно ограничивается боковыми откосами, крутизну которых назначают с учетом механических свойств грунта и высоты насыпи. Однако устойчивость земляного полотна обеспечивается не только его рационально проектируемыми конструкциями, характеристиками грунтов и условиями их сложения, но также особенностями сбора и отвода воды, водоотводных конструкций и технологии строительства. Практика показывает, что в тех случаях, когда вопросам обеспечения устойчивости откосов и их защиты от размыва не уделяется должного внимания, возникают деформации земляного полотна и откосозащитных сооружений — оползни, обвалы, плоскостная и линейная эрозия, русловые процессы, отложения твердого стока на конусах выноса и др., на устранение которых требуются немалые затраты времени и средств (рис. 6) [10, 11].

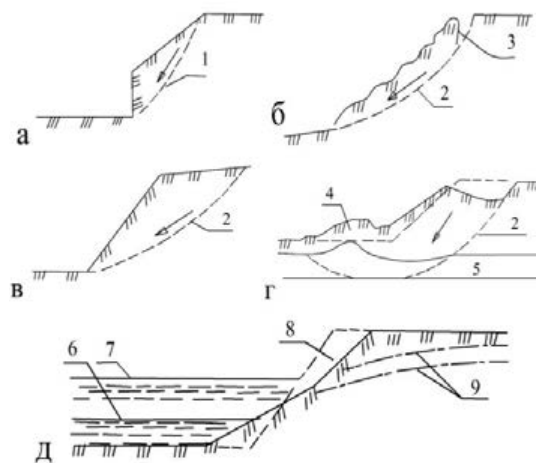


Рис. 6. Виды деформации откосов на пойменных участках: а — обрушение; б — сползание; в — оползень; г — оползень с выпором; д — оплывание: 1 — плоскость обрушения; 2 — плоскость скольжения; 3 — трещина растяжения; 4 — выпор грунта; 5 — слабый прослоек; 6, 7 — установившийся и первоначальный уровня воды; 8 — поверхность оплывания; 9 — кривые депрессии

Поэтому одной из актуальных задач для совершенствования дорожной сети Социалистической Республики Вьетнам (СРВ) является разработка организационных и конструктивных мероприятий по инженерной защите пойменных участков автодорог.

Выбор мероприятий, обеспечивающих прочность и устойчивость земляного полотна на весь период эксплуатации, зависит от физико-механических свойств грунтов земляного полотна, погодно-климатических факторов, гидрологического режима подтопления, высоты насыпи [2—12].

В целях защиты земляного полотна дороги от размыва на поймах рек в дорожном строительстве рекомендуется применять следующие регулирующие сооружения и мероприятия:

- регулирование стока плотинами;
- регулирование деформаций русла выправительными сооружениями;

возведение противоэрозионных берегоукрепительных сооружений;
расчистка берегов и русел рек;
спрямление речных извилин и др.

Однако указанные инженерные мероприятия часто требуют возведения капитальных сооружений. Так, например, для регулирования стока необходимо построить ответственное напорное гидротехническое сооружение, что влечет за собой большие экономические затраты.

Как уже отмечалось [14], в условиях муссонного климата во Вьетнаме одним из наиболее эффективных и достаточно экономичных способов защиты и сохранения прочности и устойчивости земляного полотна на весь период эксплуатации является устройство траверсов, представляющих собой сооружения, выдвинутые поперек паводкового течения, основное функциональное назначение которых — снижение скорости течения воды вдоль насыпи и уменьшение разрушающего воздействия на откосы (рис. 7).

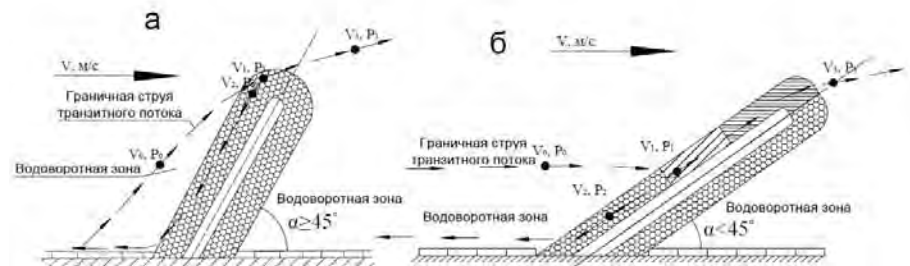


Рис. 7. Направление граничной струи транзитного потока при устройстве траверса: а — примыкание под углом $\alpha \geq 45^\circ$; б — примыкание под углом $\alpha < 45^\circ$

На пойменных участках, имеющих невысокую скорость течения потока вод, для укрепления откосов можно применять каменные наброски. Этот способ обеспечивает устойчивость низовой части конструкций насыпи при угрозе ее подмыва или понижения от развития эрозии (рис. 8) [11].

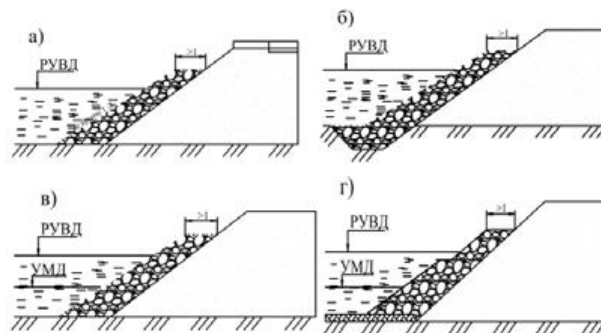


Рис. 8. Укрепление подтопляемых откосов каменной наброской: а — равномерным слоем; б — с упорной призмой; в — с бермой при наличии меженных вод; г — то же, с тюфячным укреплением

При скорости течения потока воды 4...6 м/с и более предпочтительно применять конструкции укрепления из габионов и/или матрацов Рено (рис. 9).

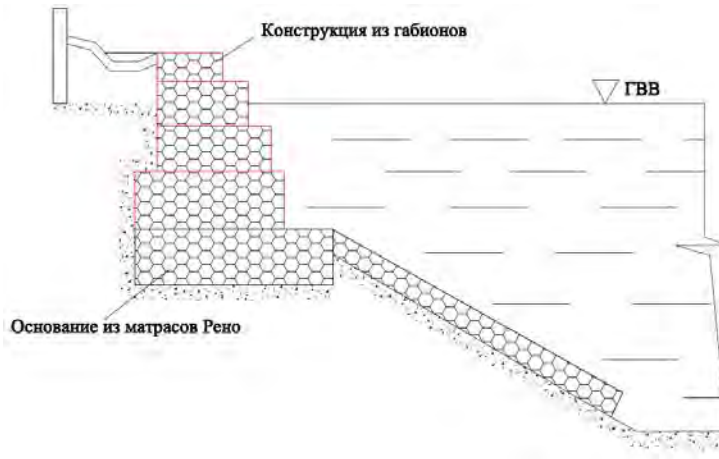


Рис. 9. Укрепление откосов пойменных насыпей от размыва с применением габионных конструкций и матрацов Рено

Габион — это каркас из металлической сетки с шестиугольными ячейками, который заполняется камнями, галькой или щебнем (рис. 10, а). Матрацы Рено — это специальные промышленные изделия, представляющие собой объемные конструкции из скрученной металлической проволоки в виде шестиугольных ячеек (рис. 10, б).

В районах с большим количеством ливневых осадков откосы могут разрушаться из-за развития процессов суффозионного вывала. Поэтому для предохранения откосов пойменных насыпей от размыва и суффозионных деформаций траверсы рекомендуется применять комбинированные укрепления [14]. В нижней части подтопленного откоса устраиваются габионы и/или матрацы Рено, а верхняя часть укрепляется засевом трав (рис. 10, в).



Рис. 10. Защитные конструкции: а — объемный габион; б — матрац Рено; в — комбинированное укрепление

Укрепление посевом трав применяется для любых откосов с различными уклонами. Для создания в короткие сроки на откосах устойчивого травяного дернового покрова, надежно защищающего земляного полотно от эрозионных разрушений, рекомендуется использовать злаковые многолетние травы, устойчивые к различным пыли- и газообразным загрязнениям, с мощной кор-

невой системой. Перечисленным требованиям наиболее полно удовлетворяют многолетние травы *Vetiver*, обладающие высокой скоростью прорастания и активным дернообразованием. Высота такого травяного покрова составляет 0,5...1,5 м, он устойчив ко всевозможным видам загрязнений, неприхотлив и нетребователен к водному и температурному режиму, растет в условиях с количеством осадков 200...6000 мм, с температурой от 9 до 45 °С.

Выбор габионных типов укреплений обоснован следующими соображениями. Этим конструкциям можно придать практически любую форму, а при осадке и давлении грунта они могут незначительно изгибаться, не теряя своих свойств. Устойчивые к деформации, структурные композиты способны адаптироваться под окружающую среду. При выборе качественных материалов конструкции каркаса и грамотной установке габионы могут прослужить более ста лет. Для монтажа не требуется масштабных подготовительных работ, блоки устанавливаются быстро и легко. Сооружения прекрасно пропускают воду, сквозь габионы могут прорасти растения, оживляя их, делая частью природного ландшафта. При этом ни вода, ни корни растений не влияют на прочность и целостность конструкции. Более того, при оседании в сооружение просыпаются частички почвы, что уплотняет конструкцию, защитные качества увеличиваются, не меняя пропорций, а становясь еще прочнее и лучше вписываясь в природный ландшафт. Это позволяет экономить на строительстве дополнительных дренажных систем. Чем больше возраст укладки габионной конструкции, тем выше ее свойства — естественность внешнего вида и механическая прочность содержимого. Габионные конструкции экономичны, выгодно вписываются в ландшафт, сохраняют экоравновесие и защищают почву от неблагоприятных воздействий окружающей среды.

Выводы:

1. Защита земляного полотна автомобильных дорог от переувлажнения является сложной, многофакторной, специфической и актуальной задачей, решать которую нужно во время их проектирования, строительства и в период эксплуатации.
2. Степень переувлажнения грунта земляного полотна и его естественного основания определяет его прочность и несущую способность и, в конечном итоге, прочность дорожной одежды, устойчивость земляного полотна по отношению к деформациям сдвига, вероятность образования общих и местных просадок, устойчивость по отношению к местным деформациям откосов.
3. Практика эксплуатации дорожно-транспортных сооружений на пойменных участках в условиях Вьетнама свидетельствует о необходимости применения конструктивных мероприятий по инженерной защите пойменных участков автодорог в зависимости от физико-механических свойств грунтов земляного полотна, погоднo-климатических факторов, гидрологического режима наводнения.
4. Оптимальным методом предотвращения повреждений и разрушений откосов земляного полотна является устройство на них защитных сооружений. Основным принципом использования всех предлагаемых в данной работе конструкций укрепления является обеспечение устойчивости и сохранения долговечности земляного в период активной эксплуатации дороги.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Строительство и реконструкция автомобильных дорог: справочная энциклопедия дорожника (СЭП). Т. I / А. П. Васильев, Б. С. Марышев, В. В. Силкин и др.; под ред. А. П. Васильева. М. : Информавтодор, 2005. 646 с.
2. Водно-тепловой режим земляного полотна и дорожных одежд / под. ред. И. А. Золоторя, Н. А. Пузакова, В. М. Сиденко. М. : Транспорт, 1971. 410 с.
3. *Зыонг Х. Х.* Исследование распределения влаги и тепла в земляном полотне в условиях равнины северного Вьетнама: автореф. дис. канд. техн. наук. Ханой, 1979. 20 с.
4. *Кокодеева Н. Е.* Регулирование высокого уровня грунтовой воды в весенний период года // Проблемы транспорта и транспортного строительства: межвуз. науч. сб. трудов. СГТУ, 2004. С. 95—98.
5. *Кокодеева Н. Е.* Управление влажностью грунта земляного полотна в весенний период года в целях повышения срока службы дорожной одежды // Автомобильные дороги: инфор. сб. М. : Информавтодор, 2005. Вып. 3. С. 1—10.
6. *Ле Ба Лыонг.* Возведение высоких дорожных насыпей на слабых грунтах в условиях повышения несущей способности их основания под массой возводимой насыпи: автореф. дис... д-ра техн. наук. М., 1982.
7. *Ле Ван Чунг, Черноусов Д. И.* Влияние изменения влажности грунтов на прочностные характеристики дорожных одежд в условиях Вьетнама при высоком уровне грунтовых вод // Вестник БГТУ им В. Г. Шухова. 2014. № 4. С. 90—95.
8. *Львович Ю. М., Дурикин В. Г.* Новый способ укрепления откосов земляного полотна автомобильных дорог // Экспресс-информация. М. : Оргтрансстрой, 1973. 23 с.
9. *Матвеев С. А.* Геосинтетические материалы в строительстве. Югра: дороги в будущее. 2005. № 2. С. 24—25.
10. Методические рекомендации по выбору конструкций укрепления конусов и откосов земляного полотна. Технологии и механизация укрепительных работ. М. : СоюздорНИИ, 1981. 112 с.
11. *Перевозников Б. Ф.* Автомобильные дороги. Откосно-прибрежные укрепления автомобильных дорог. Обзорная информация. М., 1993.
12. *Подольский Вл. П., Глагольев А. В., Поспелов П. И.* Технология и организация строительства автомобильных дорог. Т. 1. Земляное полотно: учеб. пособие. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2005. 528 с.
13. *Подольский Вл. П., Ле Ван Чунг.* Применение симплекс-метода для оптимизации значений параметров, влияющих на устойчивость откосов земляного полотна // Научный вестник ВГАСУ. Серия «Строительство и архитектура». 2014. Вып. № 1(33). С. 62—72.
14. *Чан Ван Зы.* Проблемы повышения деформативной устойчивости вьетнамской дорожной сети на переходах через пойму рек // Научный вестник ВГАСУ. Серия «Строительство и архитектура». 2014. Вып. № 4(36). С. 103—112.
15. *Le Xuan Kham.* Co scientific basis, proposes a number of measures to ensure the safety of bridges, rural roads in central disaster abnormal conditions // Journal of Science and Technology of Water Resources and Environment, no. 31-2011. 40 p.

© Чан Ван Зы, 2015

Поступила в редакцию
в мае 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Чан Ван Зы. Основные причины деформаций земляного полотна и выбор конструктивных мероприятий по инженерной защите пойменных участков автодорог Вьетнама // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 174—183.

Об авторе:

Чан Ван Зы — аспирант кафедры строительства и эксплуатации автомобильных дорог, Воронежский государственный архитектурно-строительный университет. Российская Федерация, 394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84, phuongngoc661986@gmail.com

Chan Van Zy

MAIN CAUSES OF STRAIN OF ROADBED AND CHOICE OF DESIGN ENGINEER PROTECTION MEASURES ON FLOODPLAIN HIGHWAYS IN VIETNAM

The article provides the examples of reduction of strength and stability of construction elements of roads in floodplains. The recommendations on use of special protective sloping load-bearing structures to counteract shock shear forces occurring in the layers of earth work and pavement against power, filtering and blurring effects of flood waters.

Key words: roads, earth work, embankment inundated slopes, flooding areas, regulatory structures, gabion structures.

REFERENCES

1. Vasil'ev A. P., Maryshev B. S., Silkin V. V. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya avtomobil'nykh dorog: spravoch'naya entsiklopediya dorozhnika (SEP). T. I* [Construction and reconstruction of roads: reference encyclopedia Roadman (BOT). Vol. I]. Moscow, Informavtodor Publ., 2005. 646 p.
2. Zolotar' I. A., Puzakov N. A., Sidenko V. M., ed. *Vodno-teplovoy rezhim zemlyanogo polotna i dorozhnykh odezhd* [Water and thermal regime of the subgrade and road pavement]. Moscow, Transport Publ., 1971. 410 p.
3. Duong H. H. *Issledovanie raspredeleniya vlagi i tepla v zemlyanom polotne v usloviyakh ravniny severnogo V'etnama* [The study of moisture and heat distribution in the subgrade under the conditions of plains of Northern Vietnam. Cand. Eng. Sci. Diss.], 1979. 20 p.
4. Kokodeeva N. E. [Regulation of high level of ground water in the spring]. *Problemy transporta i transportnogo stroitel'stva: mezhdvuzovskii sbornik nauchnykh trudov* [Problems of transport and transport construction. Hi. Sci. Col.]. Saratov, Saratov State Technical University Publ., 2004. Pp. 95—98.
5. Kokodeeva N. E. [Management of subgrade soil moisture in the spring, in order to increase the service life of the pavement]. *Avtomobil'nye dorogi: informatsionnyi sbornik* [Highways. Infor. coll.]. Moscow, Informavtodor Publ., 2005. Vyp. 3. Pp. 1—10.
6. Le Ba Luong. *Vozvedenie vysokikh dorozhnykh nasypei na slabykh gruntakh v usloviyakh povysheniya nesushchei sposobnosti ikh osnovaniya pod massoi vozvodyashcheisya nasypi: avtoreferat dissertatsiya doktora tekhnicheskikh nauk* [The construction of the high road embankments on soft soils in the conditions of the increase of bearing capacity of foundation under the weight of the erecting mound. Dr. Eng. Sci. Abstract]. Moscow, 1982.
7. Le Van Chung, Chernousov D. I. [Influence of change of soil moisture content on subgrade strength characteristics of pavement in Vietnam with a high level of groundwater]. *Vestnik BGTU im V. G. Shukhova* [Bulletin of BSTU named after V. G. Shukhov], 2014, no. 4, pp. 90—95.
8. L'vovich Yu. M. [New way to strengthen the slopes of subgrade roads]. *Ekspress-informatsiya* [Express information]. Moscow, Orgtranzstroi, 1973. 23 p.
9. Matveev S. A. [Geosynthetics in construction]. *Yugra: dorogi v budushchee* [Ugra: roads to the future], 2005, no. 2, pp. 24—25.
10. *Metodicheskie rekomendatsii po vyboru konstruktivnykh ukrepleniya konusov i otkosov zemlyanogo polotna. Tekhnologii i mekhanizatsiya ukrepleniya konusov i otkosov zemlyanogo polotna. Tekhnologii i mekhanizatsiya ukrepleniya konusov i otkosov zemlyanogo polotna. Tekhnologii i mekhanizatsiya ukrepleniya konusov i otkosov zemlyanogo polotna* [Methodological recommendations on choice of constructions for strengthening of cones and slopes of the subgrade. Technology and mechanization of protective works]. Moscow, SoyuzdorNII Publ., 1981. 112 p.
11. Perevoznikov B. F. *Otkosno-pribrezhnye ukrepleniya avtomobil'nykh dorog. Obzornaya informatsiya* [Roads. Coastal slope-strengthening of roads. Visibility]. Moscow, 1993.
12. Podol'skii V. P., Glagol'ev A. V., Pospelov P. I. *Tekhnologiya i organizatsiya stroitel'stva avtomobil'nykh dorog. T. 1: Zemlyanoe polotno: ucheb. posobie* [Technology and organization of construction of highways. Vol. 1. Subgrade. Study guide.]. Voronezh, Publishing house of Voronezh State University Press, 2005. 528 p.
13. Podol'skii V. P., Le Van Chung. [Application of Simplex Method for Optimizing the Values of the Parameters Affecting the Stability of the Slope of the Subgrade]. *Nauchnyi vestnik VGASU. Seriya «Stroitel'stvo i arkhitektura»* [Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture], 2014, iss. 1, pp. 62—72.
14. Chan Van Zy, Podol'skii V. P. [Problems of Improving Deformative Stability of Vietnamese Road Networks on River Slopes]. *Nauchnyi vestnik VGASU. Seriya «Stroitel'stvo i arkhitektura»*

[Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture], 2014, iss. № 4(36), pp. 103—112.

15. Le Xuan Kham. Co scientific basis, proposes a number of measures to ensure the safety of bridges, rural roads in central disaster abnormal conditions. *Journal of Science and Technology of Water Resources and Environment*, no. 31-2011. 40 p.

For citation:

Chan Van Zy. [Main causes of strain of roadbed and choice of design engineer protection measures on floodplain highways in Vietnam]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 174—183.

About author:

Chan Van Zy — Postgraduate Student of Construction and Road Operation Department, Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. 84, 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh, 394006, Russian Federation. phuongngoc661986@gmail.com

УДК 72.036:725.1

О. А. Пастух

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

ПРОЕКТНЫЕ КОНЦЕПЦИИ РАЗВИТИЯ ИСТОРИЧЕСКОЙ ТЕРРИТОРИИ ГОРОДА ОРЛА

Описаны основные этапы градостроительного развития исторического русского города окского бассейна — Орла. Дается краткая характеристика каждого исторического этапа развития города, включая неосуществленные проекты по его переустройству, повлиявшего на градостроительную структуру.

К л ю ч е в ы е с л о в а: проект реконструкции центра города, историческое ядро, регулярный план.

Одной из актуальных задач современного развития России является безусловное выполнение государственной программы «Малые города России»¹, которая предусматривает поддержку развития малых и средних городов. В связи с этим актуализируются проблемы изучения и обобщения практики планировки и застройки древних русских городов в процессе их развития в советский период, то есть в условиях, кардинально отличавшихся от исторических. Таких городов в Центральной России немало, но их изучение не должно быть разрозненным, не связанным едиными типологическими «скрепами». Одной из таких взаимосвязанных цепочек исторических городов являются города Приокского бассейна, имеющие тесные исторически и географически обусловленные хозяйственные и культурные связи. Среди этих городов своей значимостью и самобытностью выделяются Тула, Калуга и Орел, имеющие общие исторические корни и развивавшиеся по сопоставимым схемам именно как приречные поселения, защищавшие рубежи Московского государства. В этой взаимосвязанной цепочке трех городов Орел был самым молодым (он был основан как крепость в 1566 г. по указу Ивана IV), но занимал наиболее значимое положение среди Козельска, Белева, Болохова, Алексина и других окраинных мест с «крымской стороны» и оборонительных городов-крепостей юго-западной границы [1].

Представление о характере первоначального ядра города можно получить из отрывочных сведений, имеющихся в текстах немногочисленных документов, подкрепленных данными археологических находок, из которых следует, что центр военно-политической, торговой и культурной жизни в крепости Орел располагался на высоком мысу при впадении речки Орлик в Оку. По данным исследователей-краеведов² укрепленное ядро города в XVI—XVII вв. представляло собой крепость с планом в виде треугольника непра-

¹ «Федеральная целевая программа экономического и социального развития малых и средних городов Российской Федерации на 2009 – 2012 гг. и до 2017 г.».

² Предположительный план крепости (ostroга) в г. Орле XVI—XVII вв., выполненный П. С. Ткачевским в 20-х гг. XX в. хранится в Орловском государственном краеведческом музее.

вильной формы на стрелке между Окой и Орликом. На правом берегу Орлика расположился Малый Острог, а вся остальная территория обозначалась как Большой Острог [2]. Постепенно в самом центре города за пределами крепости сформировались первые районы застройки и первый общественный центр с торговыми и казенными учреждениями. От центра в разные стороны расходились дороги, которые шли в другие города: на Москву (современная Московская улица), Новосиль (современная Пушкинская улица), Курск (1-я Курская улица), Кромы (современные Комсомольская и Автовокзальная улицы), Брянск (Карачевская улица), Болхов (Ленинская улица и улица Горького). Эти направления в определенной степени структурировали свободную деревянную застройку древнего города.

Первый регулярный план Орла³, учитывавший все эти основные направления, был разработан екатерининской Комиссией каменного строения Санкт-Петербурга и Москвы в 1779 г. [3]. Этот план (рис. 1) охватил не только центр города, но и все прилегающие к нему слободы и посады, т. е. почти всю современную территорию города. При этом намеченная планом сетка улиц оказалась настолько органично соответствующей топографии и существовавшей градостроительной ситуации, что все основные направления сохранились до настоящего времени. Пятно застройки города по этому плану занимало территорию, ограниченную современными улицами Садово-Пушкарной, Октябрьской, Грузовой, Культурным переулком, линией железной дороги на Брянск и Песковской улицей. В соответствии с топографией местности город был разделен на три части — левобережную, в крутой излучине Оки, и две правобережных, по обе стороны (северную и южную) от реки Орлик. Согласно принципам классицистического градостроительства в каждой из этих частей была своя площадь, оставленная свободной от застройки: Воздвиженская — в районе современного кинотеатра «Родина», Кромская — теперь Комсомольская и уже несуществующая Полесская. Ранее почти необжитая нагорная часть города на левом берегу Оки была предназначена под будущую застройку.

Екатерининский план Орла предусматривал широкие и прямые улицы и регулировал каменное строительство. Составители плана учли остроугольную форму южной правобережной части города слияния Оки и Орлика и подчеркнули эту особенность топографии двумя радиально расходящимися от его центра (бывшей крепости) улицами, которые далее органично сочетались с фрагментами прямоугольной планировки. Элементы радиальной планировки имелись и в двух других частях города, но там все же преобладали фрагменты прямоугольной планировки, повернутые под разными углами по отношению друг к другу. Это обстоятельство придало всей планировке города довольно живописный, но в то же время наглядно организованный характер. Объемно-пространственная структурность города обеспечивалась и системой монументальных архитектурных доминант — храмами и некоторыми гражданскими зданиями, местоположение которых было сохранено в проекте екатерининской перепланировки города. Подобные композиционные приемы сочетания различных планировочных приемов и акцентирования обществен-

³ «План губернскому городу Орлу» 1779 г. был опубликован в «Книге чертежей и рисунков» Полного собрания законов Российской империи в 1839 г.

ных центров, так выразительно проявившие себя в центре Санкт-Петербурга, использовались и в регулярных планах таких городов, как Ярославль (1778 г.), Ростов Великий (1779 г.), Кострома (1781 г.), Курск (1782 г.) и других [3]. В Орле наглядно и убедительно проявили себя формотворческие возможности принципа сочетания живописности и регулярности планировки, ставшего характерной чертой русского градостроительства со времен Петра I.

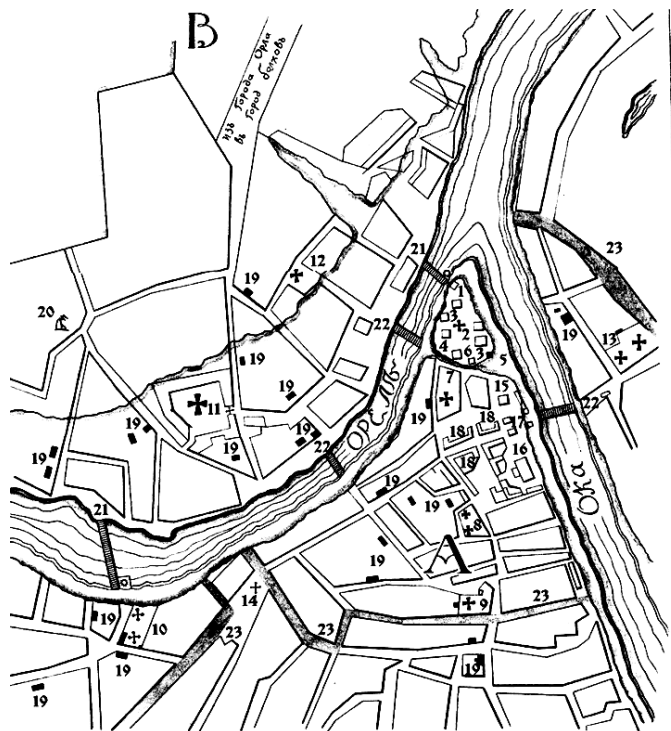


Рис. 1. План губернскому городу Орлу. 1779 г.

Разработка новых регулярных планов и перестройка старых городов происходили в условиях общего подъема русской культуры XVIII в. и крупномасштабных градостроительных мероприятий⁴. Тогда же начиналось формирование новых больших площадей, вынесенных за пределы исторического укрепленного ядра и доступных всем горожанам.

Старый центр Орла на стрелке между Окой и Орликом был территориально мал и не отвечал потребностям города. Поэтому еще в начале XIX в. центр административно-общественной жизни Орла переместился в новую нагорную часть правобережного города, расположенную на высоких берегах Оки и Орлика. Новый общественный центр с обширной площадью намечался также и на высоком левом берегу Оки. Планом 1779 г. на этой малозастроенной территории предусматривалась обширная (около 7,5 га), окруженная с трех сторон административными и общественными зданиями площадь. Своей четвертой стороной площадь раскрывалась во внешнее пространство — реку

⁴ Здесь речь идет о проведении генерального межевания в общегосударственном масштабе и о деятельности «Комиссии строений».

Оку. Тем не менее, здесь в конце XVIII в. были выстроены дома губернатора, кафедральный собор, театр, здания дворянского собрания и купеческого клуба, корпус Присутственных мест и др. Все это должно было обеспечить развитие левобережной части города. Однако длительное время левобережье все же оставалось малоосвоенной территорией, так как было удалено от центра города и основных путей сообщения.

Вплоть до конца XIX в. исторический центр города сохранялся на правом берегу Орлик, но его главная площадь переместилась за пределы старой крепости. Принципиально изменился и характер застройки общегородского центра. Некоторые из зданий, формировавших площадь, сохранились до нашего времени, правда, изменив свой внешний вид и назначение (здание Магистрата, Главное народное училище, торговые ряды, колокольня церкви Михаила Архангела). Если раньше главное место в городе занимало его укрепленное ядро-крепость, то на смену ему пришла центральная площадь.

После составления регулярных планов городов России конца XVIII — начала XIX вв. работ по градостроительному развитию и перепланировки города Орла практически не велось. Определенным импульсом развития стало открытие в 1868 г. железнодорожного сообщения с Тулой. Благодаря этому в городе стала развиваться промышленность, коммунальное и дорожное хозяйство. Но Орел еще долгие годы оставался провинциальным земледельческим и торговым городом с мелкой кустарной промышленностью.

Новый этап развития градостроительства в СССР начался во второй половине 1920-х гг., охватив к концу первой пятилетки более 150 крупных территорий, на которых происходило интенсивное промышленное, жилищно-коммунальное и культурно-бытовое строительство [4]. Значительные градостроительные работы предполагались во всей Центрально-Черноземной области, в составе которой до 1934 г. находился и Орел ⁵.

Развитие промышленного, жилищного и культурно-бытового строительства требовало безотлагательной разработки проекта планировки города, жесткого планирования его застройки в условиях исторически сложившейся сетки кварталов. Были проведены все необходимые изыскательные, геодезические, проектно-планировочные, технико-экономические работы и в 1939 г., спустя 160 лет после утверждения первого в истории города генерального плана, был разработан и утвержден его второй генеральный план. ⁶

Новая схема планировки предусматривала значительные работы по реконструкции города [5]. В структуре общегородского центра Орла по проекту 1939 г. (рис. 2) имелись особенности, характерные для проектов того времени: построение архитектурно-планировочных композиций по осям симметрии, раскрытие видовых перспектив на главные здания, периметральная застройка площадей и кварталов.

⁵ С 1934 г. — в составе Курской области. С 27 сентября 1937 г. — центр вновь образованной Орловской области.

⁶ Генеральный план не был реализован (ВОВ 1941—1945 гг. помешала осуществлению первого проекта перестройки Орла), но уникальная схема с городом будущего сохранилась. Очертания города можно узнать разве что в центре Заводского и Советского районов, а также в Железнодорожном районе. Очень значительные изменения предусматривались по окраинам нынешнего Советского района.

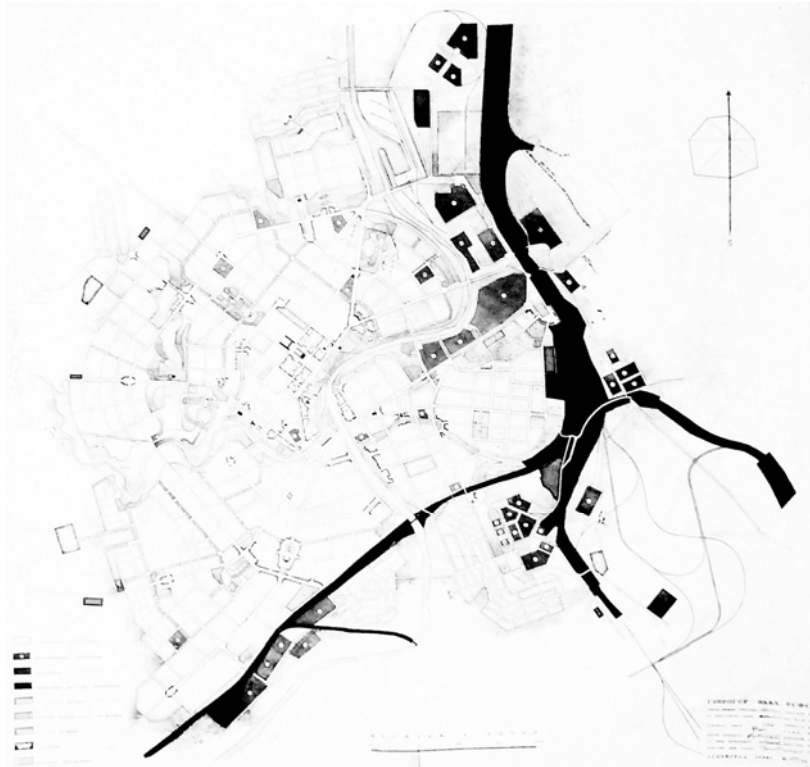


Рис. 2. Генеральный план застройки города Орла. «Ленгипрогор». Авторы: архитекторы А. М. Суборов, В. П. Яковлев; профессор В. А. Витман. 1938 г.

Планировалось развивать город по уже наметившейся радиально-кольцевой системе с определенными корректировками, учитывающими трудности движения городского транспорта в сложных ландшафтных условиях (большой перепад высот) [6]. Намечалось сооружение большой кольцевой транспортной магистрали, которая должна была в полосе зелени шириной 80 м обойти весь центральный район города и принять движение с выходящих на нее улиц. Недостатком этого предложения было то, что строительство такой магистрали требовало огромных затрат на снос существующей застройки и реализацию масштабных инженерных мероприятий, в результате которых городской центр все же не получал хорошей связи с периферийными районами.

По новому проекту предполагалось также организовать новую центральную площадь города в Советском районе на высоком левом берегу Оки. Для этого должна была быть решительно реконструирована уже существовавшая там площадь, имевшая вид огромного вытянутого и имевшего уклон в сторону реки прямоугольника, до 1917 г. служившая плацем для строевых учений. Застройку вдоль нее и прилегающих улиц (за редким исключением) планировалось снести и лишь небольшую часть реконструировать. Доминантой новой площади (и всего района) должен был стать Дом Советов. Планировка и застройка подчинялись строгой симметрии по оси, перпендикулярной берегу Оки. Кроме того, предполагалось устройство широкой береговой улицы-

бульвара с общественным характером застройки, обращенной в сторону реки. Столь жесткий, бескомпромиссный композиционный принцип устройства громадной площади с крупномасштабной прибрежной поддержкой был чужд уже сложившейся камерной исторической застройке, не имел органической связи с окружающим пространством и группой ансамблей меньшего градостроительного масштаба. Эту разобщенность особенно подчеркивали направления основных транспортных магистралей в сторону рек Оки и Орлика⁷. В реализованном виде площадь была бы случайной в плане города. Тем не менее, новый генплан, будучи первой попыткой решительной («социалистической») реконструкции целого города, имел большое значение для осмысления всех коренных проблем, связанных с преобразованием города из аграрно-ремесленного в индустриально и социально развитый.

Из-за начавшейся войны осуществить большую перестройку города по предвоенному генеральному плану не удалось. Но уже в 1943 г. проектные институты Москвы и Ленинграда начали разрабатываться проекты восстановления крупных разрушенных городов. Орел был одним из первых таких городов⁸. В кратчайшие сроки был разработан и утвержден новый генеральный план, по которому намечалось достаточно существенно перестроить город. Особенно масштабные перемены предполагались в его центральной части — Стрелка, сквер Танкистов, улица Ленина, площадь Победы (Ленина). Но при этом предполагалось сохранить исторически сложившуюся планировочную структуру улиц и кварталов, реконструировав лишь отдельные значимые узлы. Центральная часть Орла должна была получить прямую связь с районными площадями на левом и правом берегах Оки, задействовав в единую систему и новые проектируемые мосты, зеленые берега и водные пространства обеих рек. Несмотря на все недостатки первого послевоенного проекта генплана города, мало учитывающего экономику строительства и отражавшего тенденции военного времени к преобладанию в городах малоэтажной застройки, он имел огромное значение (как первый послевоенный градостроительный документ) не только на начальном этапе восстановления Орла, но и в последующие годы реконструкции.

Главным элементом центрального ансамбля Орла предполагалась левобережная площадь Победы (рис. 3), которая призвана была стать еще одним важным композиционным и функциональным центром города. Две диагональные магистрали по проекту соединяли площадь Победы с районными площадями. Общегородской центр Орла, таким образом, складывался из трех площадей, связанных между собой треугольником магистралей, в центре которого находилось историческое ядро города — стрелка между Окой и Орли-

⁷ Генеральная схема планировки города Орла. 1938 г. Ленинградский Гипрогор, арх. А. М. Суборов, В. А. Витман, В. П. Яковлев.

⁸ Планы застройки города Орла в 1944—1947 гг.: 1944 г. — панорама центральной площади г. Орла; арх. В. П. Микучанис (Гипрогор); 1945 г. — Генеральный план застройки города Орла; арх. В. А. Гайкович (Гипрогор); 1946 г. — детальный проект центральной площади; профессор В. Г. Гельфрейх; арх. В. А. Гайкович, Ю. В. Щуко (Государственные архитектурные мастерские); 1947 г. — детальный проект городского центра, профессор В. Г. Гельфрейх; арх. В. А. Гайкович, Ю. В. Щуко (Государственные архитектурные мастерские).

ком, на которой и возник в XVI в. город. Площадь задумывалась в едином стиле сталинского ампира с главной композиционной осью ансамбля, ориентированной на мыс исторической стрелки, сохраняя тем самым преемственность градостроительного планирования.



а



б

Рис. 3. Послевоенные варианты проектные предложения по реконструкции города Орла: *а* — генеральный план застройки города Орла. Автор: арх. В. А. Гайкович; 1945 г., Гипрогор; *б* — проект городского центра. Авторы: арх. В. А. Гайкович, Ю. В. Щуко, проф. Гельфрейх. 1946 г.

Первоначальный проект общественного центра Орла в дальнейшем претерпел значительные изменения: вместо двух параллельных улиц, уходивших в глубину Советского района, появилась одна широкая магистраль, начинавшаяся от полукруглой аванплощади перед задним фасадом Дома Советов. Это в еще большей степени удлинило главную ось композиции центрального ансамбля. На протяжении 1950-х гг. вносились корректировки и разрабатывались новые проектные предложения по планировке и застройке площади Победы [7].

Все они остались неосуществленными, так как требовали больших капитальных вложений по инженерной подготовке территории и сносу большого количества зданий, а городу, пережившему разрушительные военные годы,

средства требовались на более важные, жизненно необходимые работы по восстановлению инфраструктуры. Однако разработанное в 1952 г. проектное предложение орловских архитекторов Б. В. Антипова и В. В. Овчинникова оказалось наиболее близким к проекту центра Орла, разработанному Ленгипрогором в 1969 г. (рис. 4). Именно эти предложения стали основой дальнейшего развития древнего приокского города Орла.

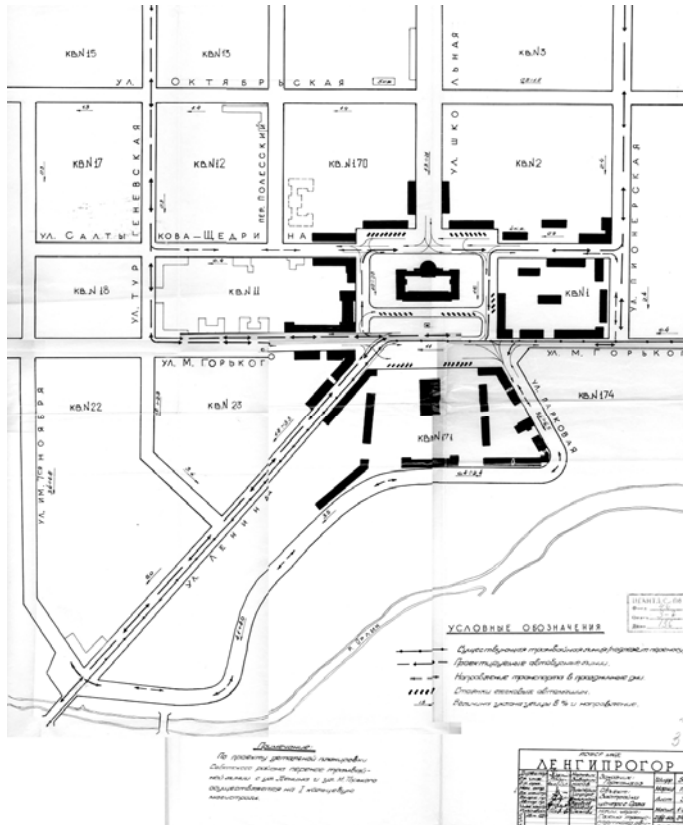


Рис. 4. Проект общественного центра г. Орла., Ленгипрогор, мастерская 1, Авторы: арх. Л. К. Вертоусов, З. И. Костко, Л. М. Бернирблай. 1969 г.

Основные выводы:

1. На первоначальную структуру г. Орла решающее влияние оказали исходный рельеф с двумя реками и подходящие к крепости пути сообщения. Влияние этих факторов сохранилось и в дальнейшем, включая генплан города 1960 г., где развивался принцип сочетания радиальной и прямоугольной планировки, структурированной архитектурными доминантами и системой площадей.

2. В развитии города имел место силовой перенос городского центра с правого на левый берег реки Орлика. Этот перенос был предусмотрен документом 1779 г., но более решительно планировался в проектных материалах 1938 г., что было во много обусловлено наличием на левом берегу железнодорожного узла. При этом сохранялось общественное и архитектурно-градостроительное значение исторического ядра в районе бывшей крепости,

в излучине Оки. Тем самым закреплялось противоречие между административным и историческим центрами города.

3. Особое значение в развитии города имел десятилетний период активной индустриализации, в результате которого произошла определенная локализация исторических районов, окруженных новыми промышленными зонами и рабочими поселками. Это способствовало сохранению историко-градостроительного наследия, но в дальнейшем вызвало проблемы территориального роста и качества селитебной территории города.

4. Процесс исторического развития города включал в себя и уменьшение размеров площадей вследствие стихийного уплотнения ранее очень свободной застройки. Этот процесс был остановлен новым неоклассицистическим планом 1939 г. Этот неосуществленный план повлиял на послевоенные градостроительные концепции 1944—1947 гг. и был лишь частично реализован в генплане 1960 г., который учитывал уже современные для того времени требования по организации движения, культурно-бытовые, административные нужды населения.

5. Проектные концепции развития Орла повлияли на современную архитектурно-планировочную структуру города, которая продолжает совершенствоваться и развиваться, максимально бережно относясь к историко-культурному наследию древнего русского города, учитывая при этом все современные требования и особенности инфраструктуры (рост городского населения, автомобилизацию, экологические и санитарные нормы)⁹.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Новосельский А. А. Борьба московского государства с татарами в первой половине XVII века. М. — Л., 1948. 429 с.
2. Ткачевский П. С., Лебедев П. П. Орел. 1927. Вып. 1. С. 102.
3. Федоров С. И. Очерки архитектуры Орла (памятники истории и культуры). 1987. С. 19—20.
4. Петров М. Н. Основные вопросы организации и методологии планировки городов. Реконструкция городов СССР. Т. 1. М., 1933. С. 46.
5. Федоров С. И. Архитектурные образы Орловщины. 1982. 112 с.
6. Беляков С. Орел. 1939. С. 125—128.
7. Антипов Б. В. Генеральный план строительства Орла // Орловская правда. 1952. № 232.

© Пастух О. А., 2015

Поступила в редакцию
в июне 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Пастух О. А. Проектные концепции развития исторической территории города Орла // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 184—193.

⁹ Новый Генеральный план города 2008 г. должен способствовать «повышению эффективности осуществления городом Орел функций научного, научно-производственного, инновационного, социально-культурного, культурно-образовательного, финансово-делового центра; части административных функций, осуществляемых им как административным центром Орловской области, ее промышленной, финансовой, научной и культурной столицей; повышению качества жизни в городе, в первую очередь как качества среды обитания ее граждан».

Об авторе:

Пастух Ольга Александровна — аспирант кафедры истории и теории архитектуры, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. Российская Федерация, 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, gvolia@yandex.ru

O. A. Pastukh

CONCEPTUAL DESIGN OF THE DEVELOPMENT OF HISTORICAL TERRITORIES OF OREL TOWN

The article describes the main stages of the urban development of the historical Russian town in Oka basin — Orel. The article gives a brief characteristic of each historical stage of the development of the city, including unrealised projects on its reconstruction that influenced the urban structure.

К е у w o r d s: project on redevelopment of the city centre, historical core, regular plan.

REFERENCES

1. Novosel'skii A. A. *Bor'ba moskovskogo gosudarstva s tatarami v pervoi polovine XVII veka* [Fight of Muscovite state against the Tartars in the first half of XVII century]. Moscow — Leningrad, 1948. 429 p.
2. Tkachevskii P. S., Lebedev P. P. *Orel* [Orel], 1927, iss.1, p. 102.
3. Fedorov S. I. *Ocherki arkhitektury Orla (pamyatniki istorii i kul'tury)* [Essays on architecture of Orel city (historical and cultural monuments)]. 1987. Pp. 19—20.
4. Petrov M. N. *Osnovnye voprosy organizatsii i metodologii planirovki gorodov. Rekonstruktsiya gorodov SSSR. T. 1* [Main issues of organization and methodology of city planning. Reconstruction of the cities of the USSR. Vol. 1]. Moscow, 1933. P. 46.
5. Fedorov S. I. *Arkhitekturnye obrazy Orlovshchiny* [Architectural images of Orel city]. 1982. 112 p.
6. Belyakov S. *Orel* [Orel city]. 1939. Pp. 125—128.
7. Antipov B. V. [Master plan of construction of Orel city]. *Orlovskaya pravda* [Orlovskaya Pravda], 1952, no. 232.

For citation:

Pastukh O. A. [Conceptual design of the development of historical territories of Orel town]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 184—193.

About author:

Pastukh Ol'ga Aleksandrovna — Postgraduate Student of History and Theory of Architecture Department, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. 4, 2ya Krasnoarmeyeskaya St., St. Petersburg, 190005, Russian Federation. gvolia@yandex.ru

УДК 711.424(470.43)

А. В. Фадеев

Самарский государственный архитектурно-строительный университет

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГРАНИЦ ИСТОРИЧЕСКОГО ЯДРА ГОРОДА САМАРЫ

Выявляется подход к определению границ исторически сложившегося ядра города с целью разработки стратегии его реконструкции. Анализ застройки исторического центра включает следующие позиции: определение места исторического ядра в структуре общегородского центра; изучение архитектурно-планировочной структуры; выявление особенностей сложившейся парцелляции кварталов; выявление архитектурных особенностей улиц; исследование функциональной структуры кварталов; определение коэффициента застройки и коэффициента плотности застройки; выявление мест концентрации объектов культурного наследия.

К л ю ч е в ы е с л о в а: историческое ядро города, самарский двор, домовладение, общегородской центр.

В каждом городе, имеющем как минимум вековую историю и прошедшем различные социально-культурные и стилистические этапы формирования, есть историческая часть города. Одной из основных проблем, связанных с градостроительным развитием таких городов, является сохранение историко-архитектурной среды «старого» города [1]. Она отличается от остального города своей идентичностью, заключающей в себе социальные и культурные особенности ушедшего времени. Сохранение аутентичности и привлекательности города рассматривается как ресурсы устойчивого социально-экономического развития города [2]. Зачастую данная часть города не имеет формальных границ, а ее расположение и габариты размыты и имеют неопределенный характер. В данной статье предлагается метод определения границ исторического ядра через аналитическое исследование отдельных позиций его структуры.

Историческое ядро Самары — фрагмент застройки в структуре исторической части города, характеризующийся определенными границами, целостностью среды и высокой концентрацией историко-архитектурных памятников конца XIX — начала XX веков.

Историческая часть Самары определяется как городской район, включающий в себя застройку всех эволюционных этапов развития города, начиная с основания первого фортификационного сооружения (деревянной крепости) до смены социально-экономической формации государства в начале XX в., локализирующуюся в границах регулярной планировки [3]. Историческое ядро входит в состав исторической части. Одним из критериев выявления границ исторического ядра города является концентрация ценной исторической застройки, внесенной в реестр объектов культурного наследия.

Общегородской центр — это система застройки и пространств социально-культурного, бытового назначения и других обслуживающих функций, формирующаяся вдоль городских магистралей. Общегородской центр включает в себя подсистемы, соответствующие разным эволюционным этапам развития города. Подсистема общегородского центра, входящая в состав ис-

торической части города, характеризуется наиболее продолжительным периодом развития, наличием уникальных функций, высокой концентрацией исторически ценной застройки, в основном конца XIX — начала XX вв.

В процессе пространственного развития Самары общегородской центр смещался вдоль общегородских магистралей в направлении от исторического центра к промышленному центру Безымянка [4]. Связано это было со строительством новых коммерческих, культурно-просветительских, административно-общественных зданий в структуре растущего города. В конце XIX — начале XX века общегородской центр концентрировался вдоль улиц Дворянской (ул. Куйбышева), Панской (ул. Ленинградской), на Алексеевской площади (площади Революции), Троицкой площади (сквер Высоцкого) [5]. В настоящее время земля в этих кварталах имеет самую высокую стоимость, здесь размещаются наиболее капитальные здания, кварталы имеют высокую плотность застройки низкой капитальности, на улицах сконцентрировались объекты, выполняющие уникальные общественные, административные и торговые функции.

Первым этапом методики определения границ исторического ядра является изучение эволюции планировочной структуры исторического центра, отражающей этапы градостроительного развития [6]. Историческая часть Самары застроена на основе регулярной планировки улиц, формирование которой началось с реализации плана 1782 г. [7]. Согласно ему кварталы получили прямоугольные очертания и размеры 120×60 саженей (256×128 м), а ширина улиц равнялась 12 саженям (25,5 м). Из-за особенностей рельефа и планировки форма и габариты некоторых кварталов получили иные (квадратные, трапециевидные, треугольные) очертания. застройка центра Самары была связана с реализацией планов 1782, 1804, 1839—1840, 1852, 1894 гг. [7].

Следующим этапом исследования структуры исторической застройки является выявление особенностей сложившейся парцелляции исторических кварталов. Для них было характерно деление на отдельные домовладения, берущие свое начало с городских усадебных мест [8]. Домовладения различаются по месту расположения в структуре квартала (рядовые, торцевые, угловые), по типологии застройки (периметральная, однорядная, двухрядная, продольно-осевая, периметрально-осевая, хаотичная), а также по функциональному использованию застройки (жилые дома с хозяйственными постройками, городская усадьба с доходными домами, жилые дома с торговыми лавками, жилые дома и производственные постройки, производственные постройки с торговыми лавками и др.) [5].

Квартал делится продольной межей пополам, образуя рядовые дворы одинаковой глубины и различной ширины, которые имеют следующие размеры: 5×30 саженей ($10,5 \times 64$ м), $7,5 \times 30$ саженей (16×64 м), 10×30 саженей (21×64 м), $12,5 \times 30$ саженей ($26,5 \times 64$ м), 15×30 саженей (32×64 м), 20×30 саженей ($42,5 \times 64$ м). Торцевые и угловые дворы имеют не только различную ширину, но и глубину. Торцевые дворы: $7,5 \times 10$ саженей (16×21 м), 5×15 саженей ($10,5 \times 32$ м), $7,5 \times 15$ саженей (16×32 м), 10×15 саженей (21×32 м), 15×15 саженей (32×32 м), 5×20 саженей ($10,5 \times 42,5$ м), $7,5 \times 20$ саженей ($16 \times 42,5$ м), 10×20 саженей ($21 \times 42,5$ м), 15×20 саженей ($32 \times 42,5$ м), 20×20 саженей ($42,5 \times 42,5$ м), 30×20 саженей ($60 \times 42,5$ м), 20×30 саженей ($42,5 \times 60$ м). Угловые дворы: $7,5 \times 15$ са-

женей (16×32 м), 10×15 саженей (21×32 м), $12,5 \times 15$ саженей ($26,5 \times 32$ м), 15×15 саженей (32×32 м), 20×15 саженей ($42,5 \times 32$ м), 10×20 саженей ($21 \times 42,5$ м), $12,5 \times 20$ саженей ($26,5 \times 42,5$ м), 15×20 саженей ($32 \times 42,5$ м), 20×20 саженей ($42,5 \times 42,5$ м), 30×20 саженей ($64 \times 42,5$ м), 15×25 саженей (32×53 м), 20×25 саженей (21×53 м), 15×30 саженей (32×64 м), 20×30 саженей ($42,5 \times 64$ м), 30×30 саженей (64×64 м). В процессе градостроительной эволюции произошла деформация структуры застройки исторического квартала, расширившая типологию дворов по конфигурации и по застройке. Так появились дворы, не являющиеся угловыми, но имеющие выход на две пересекающиеся улицы. Появились дворы, не имеющие выход на улицу ни одной из своих сторон, но связанные с ней через другие дворы [9].

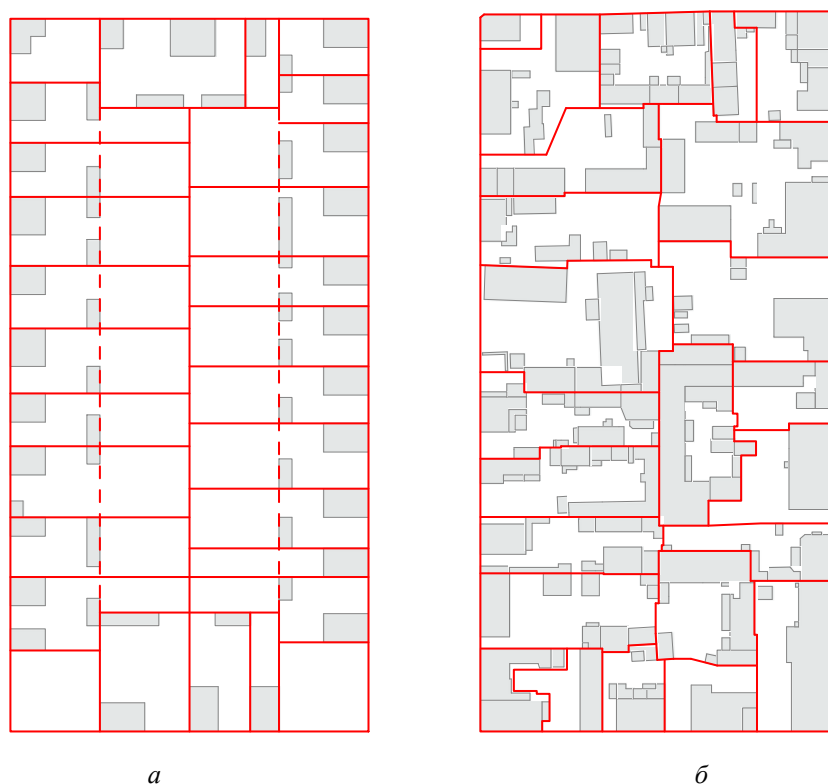


Рис. 1. Границы домовладений квартала № 4 в Самаре: *а* — проект застройки квартала и распределения границ домовладений на 1839—1840 гг.; *б* — границы домовладений на 2010 г.

Когда речь идет о сохранении архитектурно-градостроительных особенностей исторического города, следует учитывать архитектуру улиц, которая формируется внешним обликом кварталов. Фасады, выходящие на улицу, проектировались на основе образцовых типовых проектов и общих стилистических тенденций. Городское пространство Самары делится на частные внутридворовые пространства кварталов и общественные пространства улиц. Жилые купеческие или доходные дома, торговые лавки фасадами ставились на

красную линию. При этом сохранялась существенная разница между главными фасадами зданий по улице, украшенными декоративными элементами, и функциональными дворовыми фасадами квартала [10]. Целостный облик городской среды складывался благодаря масштабу застройки в 1—3 этажа, определенному строительными технологиями того времени, и эклектической стилистике зданий [11]. В данном аспекте исследования главной задачей стало выявление кварталов с сохранившимся обликом, передающим дух места и аутентичную атмосферу старого города.

Рассматривая функциональную составляющую кварталов исторической части Самары, можно выделить две позиции. Первая позиция характеризуется структурой распределения функций по кварталу, вторая выявляет характер функций. Многие дворы, независимо от наличия жилой функции усадьбы, имели, как правило, общественную функцию, связанную с услугами, мелким производством или торговлей, например доходные дома, торговые лавки и т. д. Каждый объект, находившийся на дворе участка, также имел определенное функциональное назначение. Квартал, состоящий из отдельных дворов, является полифункциональным образованием. Особенностью исторически сложившихся кварталов является концентрация уникальных общественных функций. Уникальные и значимые для функционирования города общественные объекты располагаются в структуре исторических кварталов и формируют центральную часть города Самары.

Выявляя морфологические особенности исторической застройки и соотнося их с другими кварталами и районами города, посредством объективных расчетных параметров можно выявить отличия исторической части от остальных районов города. Одним из объективных параметров определения границ исторического ядра может стать коэффициент застройки и коэффициент плотности застройки. Для исторических кварталов Самары характерен низкий коэффициент плотности застройки, обусловленный малой средней этажностью (1—3 этажа). Коэффициент застройки, характеризующий площадь застроенной территории, напротив, имеет самые высокие показатели по городу. Разница в коэффициентах становится заметна, если сравнить расчетные параметры трех кварталов, расположенных в исторической части города. Они имеют одинаковые габариты 120×60 саженей (256×128 м) и застроены в различные периоды развития города. Первый рассматриваемый квартал, № 110-Б, полностью застроен в начале XXI в., за исключением трех зданий: одного 5-этажного середины XX в. и 1—2-этажных конца XIX — начала XX века. Второй выбранный квартал, № 22, имеет примерно одинаковое соотношение застройки конца XIX — начала XX в. и застройки второй половины XX — начала XXI века. Третий квартал, № 38, имеет в основном аутентичную застройку конца XIX — начала XX века. Нормативные показатели в условиях реконструкции и застройки ее объектами средней и малой этажности исходя из региональных нормативов Самарского региона составляют: 0,6 — для коэффициента застройки, 2,0 — для коэффициента плотности застройки¹. Коэффициент застройки соответствует нормативному только у

¹ Региональные нормативы градостроительного проектирования Самарской области. Утв. приказом министерства строительства и жилищно-коммунального обслуживания Самарской области от 25.12.2008 № 496-п.

квартала № 38 и равен 0,6, остальные два квартала имеют одинаковые значения коэффициента — 0,46. Это говорит о том, что застройка кварталов № 22 и № 38 занимает меньшую площадь. Плотность застройки в кварталах № 38 и № 22 равна 1,23 и 1,33 соответственно, что не превышает нормативного значения и обусловлено малой этажностью. Также стоит отметить, что повышение этажности в квартале № 22 при уменьшении площади застройки не дает ощутимого прироста плотности застройки по сравнению с кварталом № 38. Средняя этажность квартала № 38 — 2 этажа, а квартала № 22 — 4—5 этажей. Такая высокая эффективность использования частной земли объяснялась правилами, регулирующими соседское право, существовавшими в Российской империи². Это позволяло избегать конфликта интересов собственников соседских домовладений в процессе застройки дворового участка. Квартал № 110-Б имеет коэффициент плотности застройки 3,95, что почти в два раза превышает нормативные показатели. Это становится возможным за счет строительства зданий в 10—20 этажей. Однако, как показывает опыт экспериментально-проектных разработок, подобных показателей плотности при реконструкции исторического квартала № 38 можно добиться, повысив среднюю этажность застройки до 4 этажей при сохранении существующего коэффициента застройки.

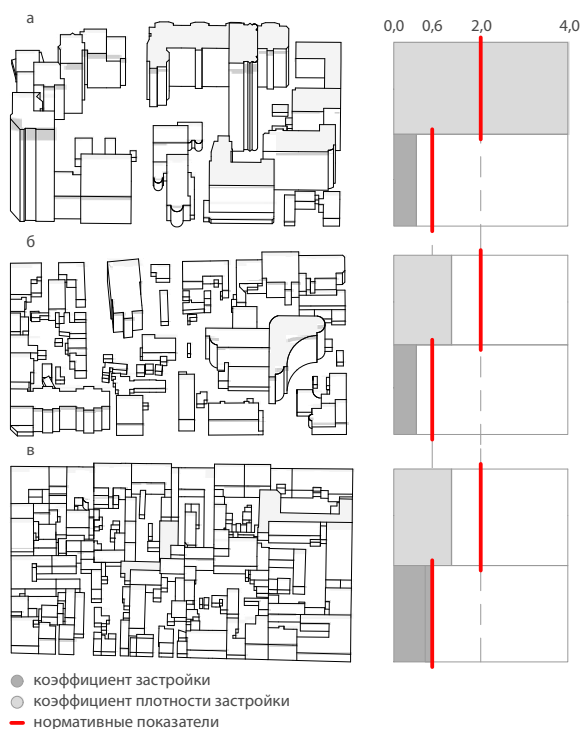


Рис. 2. Аксонометрия застройки кварталов и диаграмма коэффициента застройки и коэффициента плотности застройки: а — квартал № 110-Б; б — квартал № 22; в — квартал № 38

² Полное собрание законов Российской империи. Книга чертежей и рисунков (планы городов). Санкт-Петербург, типография 1859.

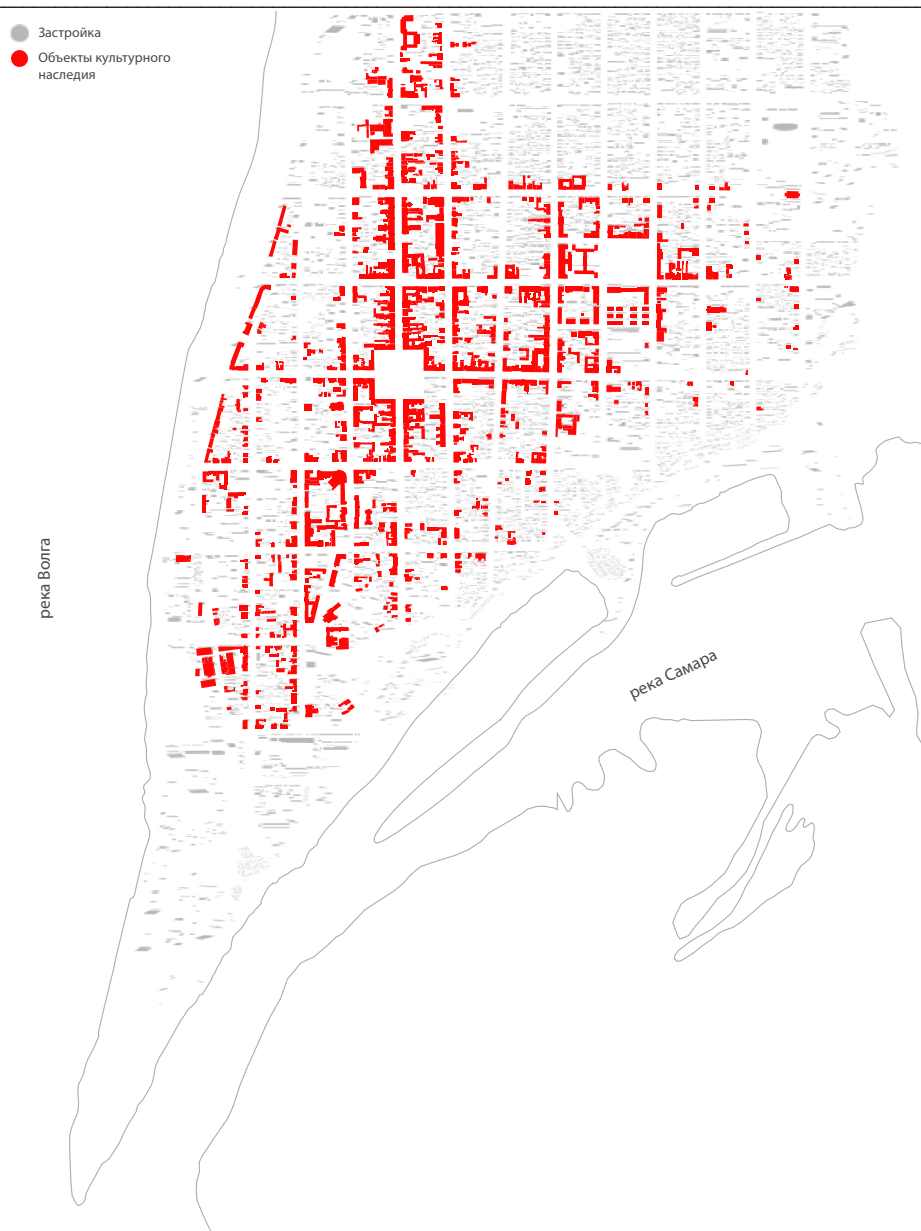


Рис. 3. Пример концентрации и распределения объектов культурного наследия в структуре застройки исторической части Самары

Таким образом, методический подход к определению границ исторического ядра города направлен на поиск целостной концепции развития и реконструкции исторической части Самары, которая должна завершиться разработкой правил землепользования и застройки с целью сохранения ее идентичности — архитектурной, градостроительной, функциональной, эстетической. Определение границ исторического ядра — первый этап на пути разработки эффективной стратегии сохранения и устойчивого развития исторического центра Самары.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахмедова Е. А., Шабанов В. А. Городская среда: проблема реконструкции. Куйбышев: Кн. изд-во, 1986. 136 с.
2. Ахмедова Е. А., Баранова Т. В., Малышева С. Г. Туристическая привлекательность исторического ядра города // СамАрх. 2002. № 1.
3. Каркарьян В. Г. Деревянное зодчество Самары, или осень патриархов. Самара: Агни, 2002. 152 с.
4. Синельник А. К., Самогоров В. А. Архитектура и градостроительство Самары 1920-х — начала 1940-х годов. Самара: ООО «Книга», 2010. 480 с.
5. Каркарьян В. Г. Старая Самара: история, дома и люди. Самара: Свир, 1998. 254 с.
6. Щенков А. С. Основы реконструкции исторических городов : учебное пособие. М., 2008. 154 с.
7. Синельник А. К. Градостроительная история Самарского края. Самара: Самарская государственная архитектурно-строительная академия, 2000. 192 с.
8. Рыбачева О. С. Особенности структурной организации застройки исторически сложившейся части Самары // Приволжский научный журнал. 2013. № 3. С. 66—71.
9. Самогоров В. А., Рыбачева О. С., Фадеев А. В. Особенности морфологии пространства и застройки исторических кварталов города Самары // Научное обозрение. 2015. № 4. С. 191—196.
10. Самогоров В. А., Рыбачева О. С. Методика выявления особенностей архитектурного облика «Самарских дворов» // Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук. 2013. № 16. С. 90—93.
11. Самогоров В. А., Сысоева Е. А., Черная Ю. Д. Деревянная и каменно-деревянная архитектура Самары конца XIX — начала XX веков. Самара: ООО «Книга», 2011. 400 с.

© Фадеев А. В., 2015

*Поступила в редакцию
в июне 2015 г.*

Ссылка для цитирования:

Фадеев А. В. Научные основы определения границ исторического ядра города Самары // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 194—201.

Об авторе:

Фадеев Артем Викторович — аспирант кафедры архитектуры, Самарский государственный архитектурно-строительный университет. Российская Федерация, 443001, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 194, art.fdv@me.com

A. V. Fadeev

SCIENTIFIC APPROACH TO DETERMINATION OF THE BOUNDARIES OF THE HISTORICAL CORE OF SAMARA CITY

Identified is the approach that enables to define the boundaries of the historical core of the city in order to develop the strategy of its reconstruction. Analysis of the historical center includes the following positions: finding of the position of the historical core in the structure of the city center; study of the architectural and town planning structure; identification of characteristics of the existing parceling of the city block; determination of the architectural features of streets; study of functional characteristics of a city block; determination of the coefficient of building density and the coefficient of cultural heritage.

Key words: historic core of the city, Samara yard, house and grounds, city center.

REFERENCES

1. Akhmedova E. A., Shabanov V. A. *Gorodskaya sreda: problema rekonstruktsii* [Urban environment: the problem of reconstruction]. Kuibyshev, Publishing house, 1986. 136 p.
2. Akhmedova E. A., Baranova T. V., Malysheva S. G. [Tourist appeal of the urban node]. *SamArk* [SamArk], 2002, no. 1.
3. Karkar'yan V. G. *Derevyannoe zodchestvo Samary, ili osen' patriarkhov* [Wooden architecture in Samara, or the autumn of patriarchs]. Samara, Agni Publ., 2002. 152 p.
4. Sinel'nik A. K., Samogorov V. A. *Arkhitectura i gradostroitel'stvo Samary 1920-kh — nachala 1940-kh godov* [Architecture and town planning of Samara in 1920s — early 1940s]. Samara, Kniga Publ., 2010. 480 p.
5. Karkar'yan V. G. *Staraya Samara: istoriya, doma i lyudi* [Old Samara: history, houses and people]. Samara, Svir Publ., 1998. 254 p.
6. Shchenkov A. S. *Osnovy rekonstruktsii istoricheskikh gorodov : uchebnoe posobie* [Principals of reconstruction of historical cities: manual]. Moscow, 2008. 154 p.
7. Sinel'nik A. K. *Gradostroitel'naya istoriya Samarskogo kraya* [Town-planning history of Samara Kray]. Samara, Samara State Academy of Architecture and Civil Engineering Publ., 2000. 192 p.
8. Rybacheva O. S. [Special features of the structural organization of building of historically developed part of Samara]. *Privolzhskii nauchnyi zhurnal* [Volga Scientific Journal], 2013, no. 3. pp. 66—71.
9. Samogorov V. A., Rybacheva O. S., Fadeev A. V. [Specific aspects of spatial morphology and historic area development of Samara]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2015, no. 4, pp. 191—196.
10. Samogorov V. A., Rybacheva O. S. [Methodology of determination of specific features of the architecture of "Samara yards"]. *Vestnik Volzhskogo regional'nogo otdeleniya Rossiiskoi akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk* [Bulletin of the Volga regional department of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences], 2013, no. 16, pp. 90 — 93.
11. Samogorov V. A., Sysoeva E. A., Chernaya Yu. D. *Derevyannaya i kamennno-derevyannaya arkhitektura Samary kontsa KhIKh — nachala KhKh vekov* [Wooden and stone-wooden architecture of Samara of the end of XIX — the beginning of XX centuries]. Samara, "Kniga" CJSC, 2011. 400 p.

For citation:

Fadeev A. V. [Scientific approach to determination of the boundaries of the historical core of Samara city]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 194—201.

About author:

Fadeev Artem Viktorovich — Postgraduate Student of Architecture Department, Samara State University of Architecture and Civil Engineering. 194, Molodogvardeyskaya St., 443001, Samara, Russian Federation. art.fdv@me.com

УДК 502: 69.055

С. Г. Абрамян, О. В. Оганесян

Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет

**УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
СТРОИТЕЛЬСТВА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ: ТЕХНОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ,
ВОЗДЕЙСТВУЮЩИЕ НА АТМОСФЕРУ. Часть I**

Вопросы и проблемы устойчивого развития и экологической безопасности строительства рассматриваются параллельно, так как только подобный подход может обеспечивать выявление влияния негативных факторов на человеческий капитал. Строительное производство рассматривается как многофакторная система воздействия на окружающую среду, в частности на атмосферу. Предлагается схема устойчивого развития применительно к строительному производству. Выявлены пути снижения техногенных факторов при выполнении строительных технологических процессов. Приведены причины заболеваемости детского и подросткового населения Ворошиловского района города Волгограда.

К л ю ч е в ы е с л о в а: устойчивое развитие, экологическая безопасность, строительное производство, техногенные факторы, строительные машины, выбросы вредных веществ в атмосферу.

Обеспечение национальной безопасности любой страны, да и планеты в целом заключается в комплексном подходе обеспечения ее составляющих, а именно: социальной, политической, военной, информационной, экономической, экологической безопасностей, основная цель которых — создание и сохранение устойчивого развития личности, общества и государства. Но если некоторые составляющие имеют чисто национальные характеристики и особенности, делятся на внутренние и внешние, экологическое составляющее имеет совершенно глобальный характер. Решение экологических проблем в отдельно взятой стране может коренным образом содействовать устойчивому развитию и других государств. Все заключается в применении идентичных технологий развития некоторых отраслей народного хозяйства.

Считается, что понятие устойчивого развития, основная задача которого — удовлетворять все потребности человечества настоящего времени без нанесения ущерба природным ресурсам и обеспечивать устойчивое развитие будущих поколений человечества, сформулировано канадским ученым-экономистом Джоном Хартвиком [1] в конце семидесятых годов XX в. Однако согласно исследованиям [2] термин “Nachhaltigkeit”, что означает устойчивость, впервые был использован в Германии в XIX в. при описании концепции устойчивого лесопользования, далее в начале XX в. российскими учеными применительно к устойчивому развитию сельскохозяйственных территорий. Проблемы устойчивого развития всегда рассматривались учеными в контексте с экологическими проблемами [3]. Широко используемое в семидесятых годах прошлого века в программах ООН по охране окружающей среде понятие «развитие без разрушения (development without destruction)» в дальнейшем было заменено понятием “экоразвитие” (ecodevelopment) как экологически приемлемое развитие, т. е. оказывающее наименьшее негативное воздействие на окружающую среду» [2]. Устойчивое разви-

тие применительно к градостроительству, строительному производству в последнее время широко исследуется как зарубежными учеными [4—8], так и отечественными [9—12].

Анализ исследований устойчивого развития и экологической безопасности строительного производства показывает, что в настоящее время существуют различные подходы к определению этого понятия. Во многих исследованиях устойчивое развитие отождествляется с экологической безопасностью.

В «Концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию»¹ под устойчивым развитием подразумевается «стабильное социально-экономическое развитие, не разрушающее своей природной основы», а также указано, что «улучшение качества жизни людей должно обеспечиваться в тех пределах хозяйственной емкости биосферы, превышение которых не приводит к разрушению естественного биотического механизма регуляции окружающей среды и ее глобальным изменениям».

В «Экологической доктрине Российской Федерации» указано, что одним из основных факторов деградации природной среды на мировом уровне является «деградация основных компонентов биосферы, включая сокращение биологического разнообразия, связанное с этим снижение способности природы к саморегуляции и, как следствие, невозможность существования человеческой цивилизации»².

Являясь частью биосферы и вторгаясь в нее крупномасштабными отрицательными воздействиями, человечество объявило войну практически самому себе, превращая экологические проблемы в проблемы глобального кризиса современной цивилизации.

Таким образом, экологические проблемы современности, связанные со строительным производством, имеющие планетарный характер, стали объектной областью научных исследований и изучаются обширно [13—16]. В работах [17, 18] подчеркивается негативное влияние строительного производства на экологический баланс окружающей среды, а именно снижение уровня экологической безопасности и ухудшение качества жизни человека, нарушение устойчивости природных систем, включая как биотопы, так и биоценозы.

Из вышеизложенного следует, что рассмотрение техногенных факторов, воздействующих на атмосферу, в контексте данной работы представляет особую актуальность, так как интенсивное развитие строительного производства, без которого немыслимо развитие любой цивилизации, столь же интенсивно разрушает экологическое равновесие окружающей среды путем негативного воздействия на все геосферные оболочки Земли и на биосферу.

Считается, что математическое выражение устойчивого развития состоит из трех составляющих: созданного человеком капитала, природного и человеческого капиталов (по Хартвику). Устойчивость обеспечивается тогда, когда сумма составляющих вырастает или остается неизменной, но при этом «уменьшение одного из видов капитала, например, природного, в ходе экс-

¹ Указ Президента РФ № 440 от 1 апреля 1996 г. «О концепции перехода Российской Федерации к устойчивому развитию» // СЗ РФ. 1996. № 15. Ст. 4133.

² Экологическая доктрина Российской Федерации. URL: <http://www.mnr.gov.ru/regulatory/detail.php?ID=133908>. Дата обращения: 24.03.2015.

плуатации природных ресурсов восполняется увеличением воспроизводственного и человеческого капиталов» [11]. Однако соглашаться с подобным умозаключением применительно к строительному производству не представляется возможным. Во-первых, не все природные ресурсы обладают способностью возобновляться, во-вторых, замена невозобновляемых природных ресурсов искусственными аналогами вряд ли сможет способствовать сохранению человеческого капитала (здесь имеется в виду здоровье).

Человек как объект биологического разнообразия не успевает адаптироваться к происходящим изменениям среды своего обитания, возникают новые болезни, как на индивидуальном уровне, так и на популяционном.

По мнению авторов, устойчивое развитие применительно к строительному производству состоит как минимум из четырех составляющих (рис. 1).



Рис. 1. Схема устойчивого развития применительно к строительному производству

Из приведенной схемы видно, что нельзя отождествлять понятия «устойчивое развитие» и «экологическая безопасность», так как две составляющие, направленные на приобретение капитала человечеством во имя обеспечения своего благосостояния (возведение зданий и сооружений и т. д. с точки зрения строительного производства), сохранение приобретенного капитала (реконструкция, реставрация, капитальный ремонт и содержание зданий и сооружений), имеют ярко выраженный социально-экономический характер. Другие составляющие имеют социально-экологический характер: сохранение природного капитала — прежде всего это сохранение экологического равновесия природной среды. Сохранение человеческого капитала подразумевает сохранение здоровья. В глобальном масштабе только совместное взаимодействие всех указанных составляющих обеспечивает сохранение человечеством своей экологической ниши. Устойчивое развитие в целом подразумевает сохранение человеческой цивилизации.

Негативное влияние территориально сосредоточенных объектов недвижимости рассмотрено в работах [14, 19]. Для предотвращения негативных воздействий концентрации объектов недвижимости предлагаются различные природоохранные мероприятия: устройство защитных экранов, вентилируемых фасадов, озеленение и т. д. Возможно ли регулирование и снижение выбросов загрязняющих веществ в атмосферу при строительстве зданий и сооружений?

Для этого необходимо выявить факторы строительного производства, негативно воздействующие на окружающую среду в контексте устойчивого развития; разработать методику расчета выбросов вредных веществ при возведении зданий и сооружений, выполнении конкретных технологических строительных процессов, приносящих максимальный ущерб атмосфере, с целью управления ими для сохранения экологического баланса.

С этой целью объектом исследования выбраны конкретные строительные технологические процессы, при экологически правильной организации которых можно сохранить экологический баланс окружающей среды. А предмет исследования — строительные машины и механизмы, с помощью которых выполняются отдельные технологические процессы.

Строительное производство — многофакторная система воздействия на окружающую среду, оно является сложной системой как с точки зрения организации, так и управления различными подсистемами, входящими в общую систему. Основными подсистемами, входящими в такую сложную динамическую систему, которыми можно управлять с целью сохранения экологического баланса, являются материальные и энергетические ресурсы, обеспечивающие функционирование отдельных технологических строительных процессов.

Негативное влияние строительства на экологическую безопасность региона на примере Волгоградской области рассмотрено в [20]. Волгоградская область, как и многие другие области РФ, «обладая мощным производственным потенциалом, относится к регионам с интенсивным и разнообразным по характеру и площади техногенным влиянием на природу. Под влиянием техногенных нагрузок ее естественные ландшафты в значительной мере преобразованы». Учитывая, что через территорию области проходят газопроводные магистрали федерального и международного значения («Средняя Азия — Центр», «Союз», «Оренбург — Новопсков», «Петровск — Новопсков», «Уренгой — Новопсков», «Починки — Изобильное») и то, что область является крупнейшим центром других транспортных сообщений: многочисленные железные дороги и автомобильные магистрали (М-6 «Каспий» Москва — Астрахань, 1Р-228 Сызрань — Саратов — Волгоград, М-21 Волгоград — Каменск-Шахтинский, подъезд к городу Элиста), в [20] были рассмотрены основные факторы влияния линейно-протяженных сооружений на экологию.

Исследования, выполненные в 2013 г. на основании анализа³, направленные на изучение причин заболеваемости у школьников г. Волгограда, показали, что Ворошиловский и Центральный районы, которые по площади намного уступают другим административным районам города, по плотности населения и по числу заболеваемости занимают лидирующее место.

³ Доклад «О состоянии окружающей среды Волгоградской области в 2012 году». Волгоград : СМОТРИ, 2013. 300 с.

Ворошиловский район г. Волгограда занимает первое место по заболеваемости детского населения, Центральный район — первое по заболеваемости подросткового и второе место — взрослого населения. Отметим, что столь большое количество заболеваемости (в том числе и онкологических) взрослого населения Центрального района объясняется тем, что восстановление послевоенного Сталинграда началось именно с Центрального района, поэтому и плотность взрослого населения в этом районе максимальная.

Резкий рост населения объясняется тем, что за последние десять лет в указанных районах рядом с существующими школами, детскими садами, поликлиниками интенсивно велось и ведется до настоящего времени строительство новых жилых комплексов, высотных и элитных зданий.

Привлекательность данных объектов налицо и объясняется относительно развитой инфраструктурой и выгодным малозатратным строительством для заказчиков (готовые к эксплуатации наружные инженерные сети и т. д.).

Далее выяснилось, что по статистическим данным контроля атмосферного воздуха на автомагистралях Ворошиловского района (ул. Рабоче-Крестьянская и ул. Череповецкая) содержание диоксида азота и формальдегида имеет тенденцию к снижению, а оксида углерода и пыли — к значительному росту⁴. Ведь по мере увеличения населения районов увеличивается и поток автотранспортных средств.

Для наглядности приведем средний уровень загрязнения атмосферного воздуха вдоль автомагистрали по ул. Рабоче-Крестьянская (рис. 2).

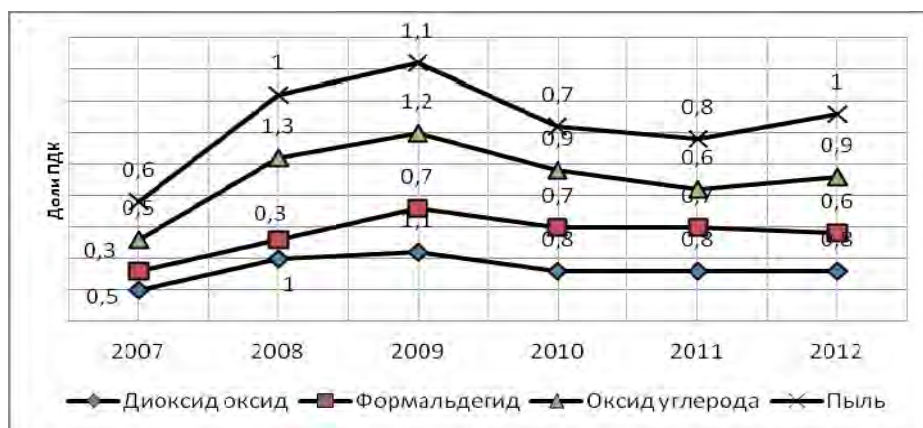


Рис. 2. Средний уровень загрязнения атмосферного воздуха вдоль автомагистрали по ул. Рабоче-Крестьянская (Ворошиловский район)⁵

Получается, что на здоровье детей влияет не только строительство, но и выхлопные газы, выделяемые машинами.

При изучении статистических документов, отчета Комитета охраны окружающей среды и природопользования Волгоградской области⁶ были выявлены:

⁴ Там же.

⁵ Там же.

⁶ Там же.

наиболее часто встречающиеся заболевания у детей (головная боль, астма, пневмония и т. д.);

резкий рост числа заболеваний в течение последних десяти лет;

по количеству обращений и жалоб на различные болезни детская поликлиника № 6 (ул. Рабоче-Крестьянская, дом 47—49) Ворошиловского района занимает первое место.

Рассмотрим, каким образом воздействует оксид углерода на организм человека. Приведем несколько фрагментов:

а) «дети и подростки, у которых легкие работают быстрее, чем у взрослых, достигают уровня интоксикации СО скорее, чем здоровые взрослые»;

б) «оксид углерода легко проникает через плаценту и воздействует на зародыш, который чувствителен к любой нехватке кислорода, причем это воздействие может быть настолько серьезным, чтобы подвергнуть опасности нормальное развитие плода»;

в) «повторяющиеся небольшие отравления оксидом углерода, которые не вызывают потерю сознания, постепенно приведут к омертвлению клеток мозга и в конечном счете к повреждению центральной нервной системы с большим количеством возможных симптомов типа головной боли, головокружения, раздражительности, ухудшения памяти и т. п.».

Только устранение или снижение отрицательных техногенных факторов может кардинально изменить экологическую обстановку. Для этого в первую очередь необходимо сократить количество одновременно работающих машин, механизмов и т. д. Нужно найти совершенно новый подход к экологическим проблемам при строительстве зданий и сооружений.

Характеризуя экологическое состояние страны на заседании Совета безопасности по вопросам охраны окружающей среды и природопользования в ноябре 2013 г., президент РФ Владимир Путин заявил, что Россия выделяет меньше денег на экологические проекты, чем другие развитые страны, — около 0,8 % ВВП. По словам директора Всемирного фонда дикой природы (WWF) России Игоря Честина, «при нашей структуре экономики, где основа — это добыча полезных ископаемых, у нас это должно быть где-то на уровне 6—7 % ВВП».

Инвестиции, направленные на создание базы данных, разработку различных экологических программ, коренным образом улучшат экологическую ситуацию в стране.

Практически все факторы, обеспечивающие функционирование строительного производства, негативно влияют на окружающую среду и, в частности, на атмосферу. Охватить весь спектр факторов в данной работе не представляется возможным. Поэтому исследования, которые выполнялись с 2011 г., позволили пока остановиться на строительных машинах и механизмах, детальное изучение которых будет приведено во второй части статьи.

Результаты исследования показывают, что при обнаружении выбросов, превышающих ПДК, путем переноса дат начала и окончания очередей строительства (или некоторых работ), замены машин и механизмов на аналоги, имеющие экологозащитные технические параметры, можно снизить уровень негативного воздействия на атмосферу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бегун Т. В. Устойчивое развитие: определение, концепция и факторы в контексте моногородов // Экономика, управление, финансы: материалы II междунар. науч. конф. (г. Пермь, декабрь 2012 г.). Пермь: Меркурий, 2012. С. 158—163.
2. Урсул А. Д. Стратегия национальной безопасности в ракурсе устойчивого развития // Национальная безопасность / nota bene. 2010. № 3. С. 16—26.
3. Brown L.R. World without Borders. N.-Y., 1972.
4. M. Essam Shaawat, Rehan Jamil A. Guide to environmental building rating system for construction of new buildings in Saudi Arabia // Emirates Journal for Engineering Research, 2014. Vol. 19. Iss. 2. Pp. 47—56.
5. Umberto Berardi. Sustainability Assessment in the Construction Sector: Rating Systems and Rated Buildings // Sustainable Development. 2011. Vol. 20. Iss. 6. Pp. 411—424. DOI: 10.1002/sd.532.
6. Dirlich S. A comparison of assessment and certification schemes for sustainable building and suggestions for an international standard system // IMRE Journal. 2011. Vol. 5. Iss. 1.
7. Amal Kamal Mohamed Shamseldin. Evaluate the continuity of meeting items requirements when assessing buildings environmentally // HBRC Journal. Available online 17 June 2015 doi:10.1016/j.hbrj.2015.05.003
8. Col R. Building environmental assessment methods: redefining intentions and roles // Building Research and Information. 2005. Vol. 33. Iss. 5. Pp. 455—467. DOI: http://dx.doi.org/10.1080/09613210500219063
9. Темуор А. Н. Экоквадраты в городе // Промышленное и гражданское строительство. 1996. № 9. С. 23.
10. Хайт В. Л. Архитектор и устойчивое развитие // Промышленное и гражданское строительство. 1997. № 3. С. 56.
11. Хаматханов Т. М. Оценка эколого-экономической устойчивости республики Ингушетия на основе применения показателя истинных сбережений // Вестник ЧелГУ. 2008. № 29. С. 69—77.
12. Ломакина Д. Ю. Фундаментальные исследования РААСН по градостроительству в стратегии инновационного развития России // Исследования и инновационные разработки РААСН: сб. статей к общему собранию РААСН. Т. 1. Москва — Иваново, РААСН-ИГАСУ, 2010. С. 53—57.
13. Большеротов А. Л. Методологические подходы и интерпретация математических моделей оценки экологической безопасности строительства // Вестник МГСУ. 2011. № 1. Т. 1. С. 39—44.
14. Теличенко В. И., Большеротов А. Л. Эффект экологического резонанса при концентрации строительства (недвижимости) // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 6. С. 14—16.
15. Salah Ahmad M., Atwood Denis. ONE Route Good Enough? // Using ArcGIS Network Analyst in pipeline alignment optimization. ArcUser. 2010. URL: http://www.esri.com/news/arcuser/0410/pipeline.html.
16. Defina John, Maitin Izak, Gray Arnold L. New Jersey Uses GIS To Collect Site Remediation Data. April — June 1998 // ArcUser. URL: http://www.esri.com/news/arcuser/arcuser/4.98/newjersey.html
17. Абрамян С. Г., Потапов А. Д. Обоснование экологически безопасной технологии реконструкции магистральных трубопроводов // Вестник МГСУ. 2014. № 8. С. 91—97.
18. Потапов А. Д., Абрамян С. Г., Ахмедов А. М. Экореконструкция городского пространства Волгограда на принципах субурбанизации городских территорий // Вестник МГСУ. 2014. № 6. С. 105—113.
19. Экологическое состояние Волгограда: проблемы, скрытые источники загрязнения / С. Г. Абрамян, В. И. Атопов, А. М. Ахмедов, Е. Н. Беспалая // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Сер.: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 36(55). С. 240—247.
20. Оганесян О. В. Влияние строительства на экологическую безопасность Волгоградской области // Материалы науч.-практич. конф. аспирантов, студентов и учащихся средних образовательных учреждений «М. В. Ломоносов — великий деятель Российской науки», посвященной 300-летию со дня рождения ученого. URL: http://vps-1011752-796.host4g.ru/attachments/sbornik.pdf

© Абрамян С. Г., Оганесян О. В., 2015

Поступила в редакцию
в августе 2015 г.

Ссылка для цитирования:

Абрамян С. Г., Оганесян О. В. Устойчивое развитие и экологическая безопасность строительства зданий и сооружений: техногенные факторы, воздействующие на атмосферу. Часть I // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2015. Вып. 42(61). С. 202—210.

Об авторах:

Абрамян Сусанна Грантовна — канд. техн. наук, доц., проф. кафедры технологии строительного производства, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Волгоград, 400074, ул. Академическая, 1, susannagrants@mail.ru

Оганесян Оганес Валерьевич — студент, Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет (ВолгГАСУ). Волгоград, 400074, ул. Академическая, 1, ogoganesyan@mail.ru

S. G. Abramyana, O. V. Oganesyana

SUSTAINABLE DEVELOPMENT AND ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION OF BUILDINGS AND FACILITIES: THE TECHNOGENIC FACTORS INFLUENCING THE ATMOSPHERE. PART I

Issues and problems of a sustainable development and ecological safety of construction are considered in parallel because such approach can provide identification of influence of negative factors on the human capital. Construction production system is considered as a multifactorial environmental impact, particularly in the atmosphere. The scheme of a sustainable development in relation to construction production is offered. Ways of decrease in technogenic factors when performing construction technology factors are revealed. The reasons of the incidence of child and adolescent population in Voroshilovskiy district in Volgograd are provided.

Key words: sustainable development, environmental safety, construction production, technological factors, construction machines, emission of harmful substances into the atmosphere.

REFERENCES

1. Begun T. V. [Sustainable development: definition, concept and factors in the context of monotowns]. *Ekonomika, upravlenie, finansy: materialy II mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii (Perm', dekabr' 2012 g.)* [Economics, management, finance. Proc. of II Intern. sci. con. (Perm, December, 2012)]. Perm' Merkurii Publ., 2012. Pp. 158—163.
2. Ursul A. D. [Strategy of national security in foreshorten of sustainable development]. *Natsional'naya bezopasnost' / nota bene* [National security / nota bene], 2010, no. 3, pp. 16—26.
3. Brown L.R. *World without Borders*. N.-Y., 1972.
4. M. Essam Shaawat, Rehan Jamil A. Guide to environmental building rating system for construction of new buildings in Saudi Arabia. *Emirates Journal for Engineering Research*, 2014, 19(2), pp. 47—56.
5. Umberto Berardi. Sustainability Assessment in the Construction Sector: Rating Systems and Rated Buildings. *Sustainable Development*, 2011, 20(6), pp. 411—424. DOI: 10.1002/sd.532.
6. Dirlich S. A comparison of assessment and certification schemes for sustainable building and suggestions for an international standard system. *IMRE Journal*, 2011, 5(1).
7. Amal Kamal Mohamed Shamseldin. Evaluate the continuity of meeting items requirements when assessing buildings environmentally. *HBRC Journal*. Available online 17 June 2015 [doi:10.1016/j.hbrj.2015.05.003](https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2015.05.003)
8. Col R. Building environmental assessment methods: redefining intentions and roles // *Building Research and Information*, 2005, 33(5), pp. 455—467. DOI: [http://dx.doi.org/10.1080/09613210500219063](https://doi.org/10.1080/09613210500219063)
9. Tetior A. N. [Ecological districts in the city]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 1996, no. 9, p. 23.

10. Khait V. L. [Architect and sustainable development]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 1997, no. 3, p. 56.
11. Khamatkhonov T. M. [Assessment of ecological and economic stability of the Republic of Ingushetia on the basis of use of the indicator of actual savings]. *Vestnik ChelGU* [Vestnik of ChelGU], 2008, no. 29, pp. 69—77.
12. Lomakina D. Yu. [Fundamental researches of RAACS on town planning in the strategy of innovative development of Russia]. *Issledovaniya i innovatsionnye razrabotki RAASN: sbornik statei k obshchemu sobraniyu RAASN. T. 1* [Researches and innovative developments of RAACS. Set of articles for the general meeting of RAACS. Vol. 1]. Moscow — Ivanovo, RAACS-IGASU, 2010. Pp. 53—57.
13. Bol'sherotov A. L. [Methodological approaches and interpretation of mathematical models of an estimation of ecological safety of building]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering], 2011, 1(1), pp. 39—44.
14. Telichenko V. I., Bol'sherotov A. L. [Effect of an Ecological Resonance at Concentration of Construction (Real Estate)]. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo* [Industrial and Civil Engineering], 2010, no. 6, pp. 14—16.
15. Salah Ahmad M., Atwood Denis. ONE Route Good Enough?. *Using ArcGIS Network Analyst in pipeline alignment optimization*. *ArcUser*. 2010. URL: <http://www.esri.com/news/arcuser/0410/pipeline.html>.
16. Defina John, Maitin Izak, Gray Arnold L. New Jersey Uses GIS To Collect Site Remediation Data. April — June 1998. *ArcUser*. URL: <http://www.esri.com/news/arcuser/arcuser4.98/newjersey.html>
17. Abramyan S. G., Potapov A. D. [Substantiation of Ecologically Safe Reconstruction Technology for Trunk Pipelines]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 8, pp. 91—97.
18. Potapov A. D., Abramyan S. G., Akhmedov A. M. [Ecoreconstruction of City Space of Volgograd Basing on Suburbanization Principles of City Territories]. *Vestnik MGSU* [Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering]. 2014, no. 6, pp. 105—113.
19. Abramyan S. G., Atopov V. I., Akhmedov A. M., Bespalaya E. N. [The ecological state of Volgograd: problems, hidden sources of pollution]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2014, iss. 36(55), pp. 240—247.
20. Oganessian O. V. [Influence of construction on ecological safety of Volgograd Oblast]. *Materialy nauchno-prakticheskoi konferentsii aspirantov, studentov i uchashchikhsya srednikh obrazovatel'nykh uchrezhdenii «M. V. Lomonosov — velikii deyatel' Rossiiskoi nauki», posvyashchennoi 300-letiyu so dnya rozhdeniya uchenogo* [Proc. of the sci.-pract. conf. of postgraduate students, students and pupils of secondary schools “M. V. Lomonosov — a great figure of the Russian science”]. URL: <http://vps-1011752-796.host4g.ru/attachments/sbornik.pdf>

For citation:

Abramyan S. G., Oganessian O. V. [Sustainable development and ecological safety of construction of buildings and facilities: the technogenic factors influencing the atmosphere. Part I]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2015, iss. 42(61), pp. 202—210.

About authors:

Abramyan Susanna Grantovna — Candidate of Engineering Science, Docent, Professor of Construction Technology Department, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, susannagrانت@mail.ru

Oganessian Oganess Valer'evich — Student, Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering (VSUACE). 1, Akademicheskaya St., Volgograd, 400074, Russian Federation, ogoganesyan@mail.ru

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.

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/attachments/ld-blank.pdf>), *анкеты* согласия автора на доступ к его персональным данным неограниченного круга лиц (скачать бланк по адресу <http://www.vgasu.ru/attachments/pdsog.pdf>), *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 завершается личной подписью автора (соавторов).

Объем статьи — от 10 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 (Сур) № 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 A4 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 подрисунковой 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 (Сур) № 10 (10 пунктов).

Пристатейные *библиографические списки* размещаются после основного текста статьи.

В библиографическом списке приводится только цитируемая в статье литература. Библиографический список должен состоять не менее чем из 15 статей в научных журналах, из них 8 — иностранные. 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 (Сур) № 9 (9 пунктов). Язык библиографических записей соответствует языку описываемых источников.

Библиографический список приводится дважды. Во втором варианте все русскоязычные библиографические записи приводятся в переводе на английский язык, 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.

Статьи проверяются на оригинальность с помощью системы «Антиплагиат». Требуемая оригинальность — не менее 80 %.

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. Корректур 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).

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-градоостроительной 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 *Наука / 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. (8442)-96-98-46. E-mail: vorobiov_51_vi@list.ru (ответственный секретарь журнала Владимир Иванович Воробьев).

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: mariaapes@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» — E85343

(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**, перерегистрирован ФГУП НТЦ «Информре-
гистр», свидетельство № **594 от 20.10.11**, номер гос. рег. **0421200065** (на 2012 г.), 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 **E 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 Наука / Научные журналы.

Научное издание

**ВЕСТНИК
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

**Серия: Строительство и архитектура
2015. Вып. 42(61)**

Редактор *М. Л. Песчаная, И. Б. Чижикова*
Перевод на английский язык *О.Ю. Юшко*
Компьютерная правка и верстка *А. Г. Сиволобова, М. А. Денисова*
Компьютерный дизайн обложки *О. Ю. Мелешин*

Подписано в печать 29.12.2015. Формат 70 × 108/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman.
Уч.-изд. л. 8,0. Усл. печ. л. 18,4. Тираж 500 экз. Заказ № 37

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего профессионального образования
«Волгоградский государственный архитектурно-строительный университет»
Редакционно-издательский отдел
Отдел оперативной полиграфии
400074, Волгоград, ул. Академическая, 1