Министерство образования и науки Российской Федерации

ВЕСТНИК ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия: Строительство и архитектура

Вып. 1(82) Научно-теоретический и производственно-практический журнал **2021**

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 ВолгГТУ

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ОСНОВАНИЯ, ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Абрамян С. Г., Бурлаченко О. В., Галда З. Ю. Объемные блок-модули как разновидность модульных конструкций быстровозводимых строительных систем 5

Богомолова О. А., Позднякова А. П. Определение предельной высоты изолированного вертикального откоса и вертикальных бортов траншей 14

Голиков А. В., Федоров А. Н. Применение круглой стали в большепролетных структурных покрытиях 25

Горсков И. А., Голиков А. В., Кузнецов Д. Г. Эффективные конструкции большепролетных арок комбинированного типа 47

Пшеничкина В. А., Петренко А. В. Комплексный подход к прогнозированию долговечности железобетонных мостов 63

Сабитова Т. А., Ященко С. О., Соболева Е. Д. Сравнительный анализ традиционных методов построения топографических планов и трехмерного лазерного сканирования 79

Степанов М. А., Брагарь Е. П., Нурпеисова А. А. Влияние процесса подтопления территорий на характеристики грунтов основания зданий и сооружений 89

Ушаков А. Н. О распределении напряжений на контурах подземных горизонтальных выработок различных форм поперечного сечения 101

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

Алексиков С. В., Альшанова М. И., Лескин А. И., Гофман Д. И. Обеспечение ровности и шероховатости покрытий региональных дорог Волгоградской области 118

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

Калашников С. Ю., Гурова Е. В., Калиновский С. А. Практические способы применения инкрементальных условий пластичности в задачах внецентренного сжатия стержней 132

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Бурханова Р. А., Евстафьева Н. Ю., Акчурин Т. К. Оценка работоспособности наполненной двухкомпонентной полимерной системы холодного отверждения в качестве покрытия для защиты бетонных поверхностей от воздействия агрессивной среды 143

Гнедаш Е. Е., Стефаненко И. В., Акчурин Т. К. Структурообразующие факторы формирования жаростойких композиций на основе вторичных ресурсов региона 153

Исакулов Б. Р., Акулова М. В., Кульшаров Б. Б., Исакулов А. Б., Сартова А. М. Детоксикация промышленных отходов для получения серосодержащих вяжущих строительных материалов 163

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВА

Анопин В. Н., Кузнецова С. В., Махова С. И., Махов И. Д. Экологические последствия сброса загрязненных вод промышленными предприятиями Волгоградской агломерации и методы их снижения 173

Глинянова И. Ю., Фомичев В. Т., Асанова Н. В. Оценка токсичности атмосферного воздуха в обеспечении экологической безопасности населенных пунктов 184

Глинянова И. Ю., Фомичев В. Т., Асанова Н. В. Исследование токсичности атмосферного воздуха в поселке Киляковка Среднеахтубинского района Волгоградской области 200

Иванова Ю. П., Сахарова А. А., Иванова О. О., Азарова М. Д. Исследование климатических параметров как факторов, влияющих на загрязнение городской воздушной среды линейного города 214

Игнатьев А. В., Сидоренко В. Ф., Аброськин А. А. Ранжирование городских территорий, относящихся к множеству Эджворта — Парето 220

АРХИТЕКТУРА ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ. ТВОРЧЕСКИЕ КОНЦЕПЦИИ АРХИТЕКТУРНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Етеревская И. Н. Особенности социально-пространственной организации креативных пространств современного города 231

Ишмаметов Р. Х. Вопросы качества территориально-пространственной организации вахтовых поселений 245

Ишмаметов Р. Х. Современные тенденции формирования вахтовых поселений нефтегазовой отрасли 254

Сасова Е. А., Птичникова Г. А. Особенности проектирования современных бульваров в городах Нижнего Поволжья 267

Серебряная В. В., Дергилёв В. Я. Ревитализация объекта культурного наследия — комплекса казенного винного склада в г. Камышине 279

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

Олейников П. П. Купцы Рысины и их роль в общественном развитии Царицына 292

ГРАДОСТРОИТЕЛЬСТВО. ТЕОРИЯ РАЗВИТИЯ ГОРОДА

Прокопенко В. В., Плешаков И. Н. Формирование функциональных связей города с пригородной зоной на примере Волгограда 313

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И АРХИТЕКТУРЕ

Абрамян С. Г., Бурлаченко О. В., Оганесян О. В., Бурлаченко А. О., Шаюнусов А. Р. BIM-технологии в строительстве: функции, развитие и опыт применения 323

Арушонок Ю. Ю. Применение электротензометрии и цифровых технологий при испытании конструкций 333

От редколлегии 347

Content

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

Abramyan S. G., Burlachenko O. V., Galda Z. Yu. Three-dimensional block modules as a variety of modular structures of prefabricated building systems 5
Bogomolova O. A., Pozdnyakov A. P. Determination of the maximum height of an isolated vertical slope and vertical sides of trenches 14
Golikov A. V., Fedorov A. N. Application of round steel in large span structural coatings 25
Gorskov I. A., Golikov A. V., Kuznetsov D. G. Efficient constructions of large span combined type arches 47
Pshenichkina V. A., Petrenko A. V. An integrated approach to the forecasting of reinforced concrete bridges durability 63
Sabitova T. A., Yashchenko S. O., Soboleva E. D. Features construction of digital topographic plans using 3d laser scanning in the construction industry 79
Stepanov M. A., Bragar' E. P., Nurpeisova A. A. The influence of the area flooding process on the buildings soilbase characteristics 89
Ushakov A. N. About stress distribution on the contours of underground horizontal workings of various form of cross-sections 101

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

Aleksikov S. V., Alishanova M. I., Leskin A. I., Gofman D. I. Ensuring smoothness and roughness of regional road surfaces in the Volgograd Region 118

STRUCTURAL MECHANICS

Kalashnikov S. Yu., Gurova E. V., Kalinovskii S. A. Practical methods of application of incremental plastic conditions in problems of off-center compression of rods 132

BUILDING MATERIALS AND ARTICLES

Burkhanova R. A., Evstaf'eva N. Yu., Akchurin T. K. Estimation of the performance of a filled two-component cold curing polymer system as a coating for protecting concrete surfaces from exposure to an aggressive environment 143
Gnedash E. E., Stefanenko I. V., Akchurin T. K. Structure-forming factors of formation of heat-resistant compositions based on secondary resources of the region 153
Isakulov B. R., Akulova M. V., Kulsharov B. B., Isakulov A. B., Sartova A. M. Detoxification of industrial wastes for production of sulfur-containing binding building materials 163

ENVIRONMENTAL ISSUES IN URBAN PLANNING

Anopin V. N., Kuznetsova S. V., Makhova S. I., Makhov I. D. Environmental consequences of the discharge of polluted water by industrial enterprises of the Volgograd agglomeration and methods of their reduction 173
Glinyanova I. Yu., Fomichev V. T., Asanova N. V. Assessment of the toxicity of atmospheric air in ensuring the environmental safety of settlements 184
Glinyanova I. Yu., Fomichev V. T., Asanova N. V. Study of the toxicity of atmospheric air in the village Kilyakovka of the Sredneakhtubinsky district of the Volgograd Region 200
Ivanova Yu. P., Sakharova A. A., Ivanova O. O., Azarova M. D. Research of climatic parameters as factors affecting urban air pollution of a linear city 214
Ignatyev A. V., Sidorenko V. F., Abroskin A. A. Ranking of urban areas related to the Edgworth — Pareto set 220

GENERAL ARCHITECTURE. CREATIVE CONCEPTS OF ARCHITECTURAL ACTIVITY

Eterevskaya I. N. Features of the socio-spatial organization of creative spaces of a modern city 231
Ishmametov R. Kh. The concept of quality of the territorial spatial complex of mobile settlements 245
Ishmametov R. Kh. Modern trends in the formation of shift settlements in the oil and gas industry 254
Sasova E. A., Ptichnikova G. A. Design features of modern boulevards in the cities of the Lower Volga region 267
Serebryanaya V. V., Dergilev V. Ya. Revitalization of the object of cultural heritage — the complex of the state wine warehouse in Kamyshin 279

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

Oleinikov P. P. Merchants Ryisin and their role in social development of Tsaritsyn 292

URBAN PLANNING. THEORY OF URBAN DEVELOPMENT

Prokopenko V. V., Pleshakov I. N. Formation of functional links of the city with the suburban area on the example of Volgograd 313

INFORMATION TECHNOLOGY IN CONSTRUCTION AND ARCHITECTURE

Abramyan S. G., Burlachenko O. V., Oganesyan O. V., Burlachenko A. O., Shayunusov A. R. BIM-technologies in construction: functions, development and experience 323

Arushonok Yu. Yu. Application of electrotensometry and digital technologies in structural testing 333

From Editorial Team 347

УДК 69.05:624.011

С. Г. Абрамян, О. В. Бурлаченко, З. Ю. Галда

Волгоградский государственный технический университет

ОБЪЕМНЫЕ БЛОК-МОДУЛИ КАК РАЗНОВИДНОСТЬ МОДУЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ БЫСТРОВОЗВОДИМЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены виды модульных конструкций, применяемых при строительстве быстровозводимых зданий и сооружений. Отмечено, что здания из объемных блок-модулей являются разновидностью быстровозводимых строительных систем. Приведены основные конструктивные схемы быстровозводимых зданий и сооружений из объемных блок-модулей. Подчеркнута необходимость разработки классификации строительных систем из объемных блок-модулей.

К л ю ч е в ы е с л о в а: модульные конструкции, объемные блок-модули, конструктивные схемы, классификация, строительные системы.

Совершенствование современных строительных технологий направлено на повышение энергоэффективности выполнения работ, что в конечном итоге определяет уровень устойчивого развития строительного производства. При этом отметим, что устойчивое развитие строительного производства необходимо рассматривать как целостную систему, поскольку применяемые материальные и энергетические ресурсы как подсистемы строительного производства также должны отвечать требованиям энергоэффективности [1—3].

Что касается строительных технологий, способствующих устойчивому развитию строительного производства, то в последние 10 лет авторы научных публикаций особое внимание обращают на цифровые технологии [4—6], в том числе аддитивные [7, 8], и технологии быстровозводимых зданий [9, 10].

Анализ научных публикаций [4—12], освещающих обозначенную проблему, показывает, что особый интерес к цифровизации и технологиям быстровозводимых строительных систем (БСС) связан с рентабельностью, экологичностью и безопасностью выполнения работ, а также со строительством в условиях плотной городской застройки.

Вместе с тем наблюдается некоторая неопределенность в терминологии, особенно применительно к быстровозводимым зданиям и сооружениям. Например, быстровозводимые здания отождествляют[1] с модульными объемными зданиями, со зданиями с металлическим каркасом или со зданиями, несущие конструкции которых возводят в несъемной опалубке, и т. д.

В других источниках[2] подчеркивается, что «быстровозводимые здания — это здания высокой заводской готовности, сборка которых на готовом фундаменте занимает от нескольких дней до месяца. Быстрота и технологичность сборки быстровозводимого здания позволяют осуществлять строитель-

[1] Быстровозводимые здания: что это, процесс строительства. URL: https://sportstyle-shop.com/articles/bystrovozvodimye-zdaniya;

Быстровозводимые здания. URL: https://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/350782;

Что такое быстровозводимые здания. URL: https://www.skmsk.ru/information/building/bvz.

[2] Быстровозводимые здания: вопросы и ответы. URL: https://www.vagondoma.com/prefab/faq.html.

ство даже в условиях ограниченного строительного сезона и в удаленных регионах, где капитальное строительство затруднено или невозможно».

Исходя из основных преимуществ быстровозводимых зданий, которые приведены в [9], можно дать следующее определение быстровозводимых строительных систем.

Быстровозводимыми называются здания и сооружения с минимальными сроками строительства, что обусловлено, в частности, следующими факторами: конструктивными особенностями зданий, технологичностью выполнения работ, высокой заводской готовностью, вплоть до наружной и внутренней отделки, что позволяет минимизировать трудовые затраты, и, как следствие, такие здания обладают низкой стоимостью.

Считается, что самыми распространенными видами быстровозводимых строительных систем являются:

- *бескаркасные*;
- *каркасные* (особенно каркасно-монолитные, возведенные в несъемной и одноразовых опалубках);
- *объемно-блочные* (модульные, модульно-блочные);
- *ствольные;*
- *оболочковые* (каркасно-тентовые, каркасно-мембранные) [13, 14].

Конструктивная схема представляет собой вариант конструктивной системы по признакам состава и размещения в пространстве основных несущих конструкций (продольному, поперечному, смешанному, каркасному). Однако для БСС применяют укрупненные модули сборных конструктивных элементов: колонны на несколько этажей, ригели на несколько ячеек, плиты перекрытия на ячейку, плиты покрытия, стеновые панели на несколько квартир и т. д.

Для наглядности на рис. 1 приведены БСС с применением объемных модульных блоков.

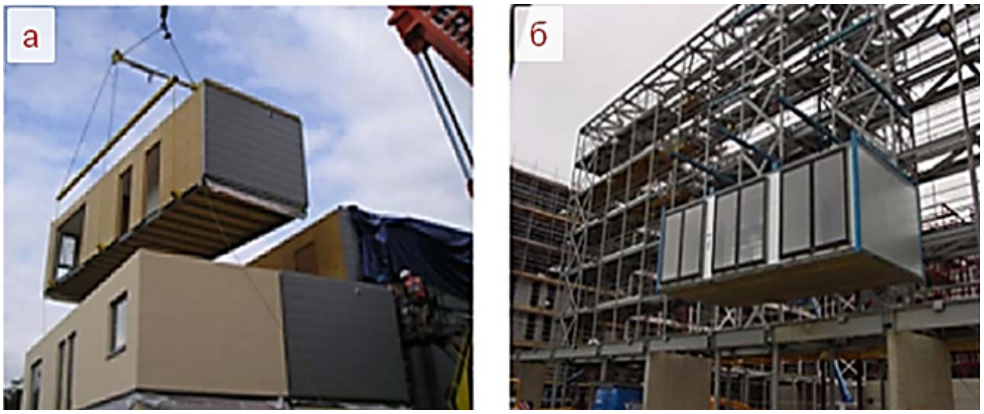


Рис. 1. Модульные здания: *а* — бескаркасной схемы с самонесущими объемными блок-модулями; *б* — каркасной схемы с объемными блок-модулями с опорой на раму [12]

Популярность применения объемных блок-модулей на рынке недвижимости позволила разработать несколько видов конструктивных схем, некоторые из которых представлены на рис. 2.

В качестве объемных блок-модулей многие архитекторы в последнее десятилетие рассматривают объемные блоки на несколько этажей. Уникальные зда-

ния, построенные с применением объемных блоков на несколько этажей, опираются на монолитное железобетонное или стальное ядро жесткости (рис. 3).

В работе [12] объемные блоки на несколько этажей рассматриваются как малоэтажные блок-здания. Блок-здания — это стандартизированные строительные блоки, изготовленные с максимальной степенью отделки, по сравнению со сборными компонентами, панелями, модулями и гибридами. Основные работы выполняются в контролируемой заводской среде, предоставляя возможность производителю брать на себя контроль качества и скорость производства конечного продукта. Однако иногда их большие размеры и вес представляют трудности при транспортировке и монтаже на строительной площадке [12].

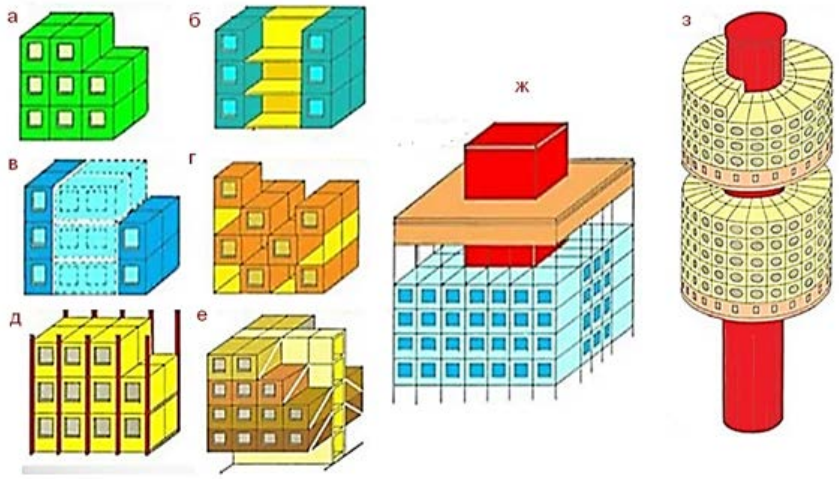


Рис. 2. Основные конструктивные схемы быстровозводимых зданий и сооружений из объемных блок-модулей: *а* — однородная блочная; *б* — блочно-панельная; *в* — неоднородная блочная; *г* — блочно-панельная, с шахматным расположением блоков; *д* — каркасно-блочная; *е* — из навесных объемных блоков; *ж* — из ненесущих (висячих) блоков; *з* — блочно-спиральная, опирающая на ядро жесткости

Рис. 3. Внешний вид уникальных зданий из объемных блок-модулей на несколько этажей

Часто для возведения многоэтажных или высотных точечных зданий используются трансформирующиеся объемные модули на квартиру.

Строительство уникальных зданий из нескольких малоэтажных блок-зданий можно вести несколькими методами, как традиционными, так и методом подъема этажей. Поскольку это весьма сложный процесс, стадия строительства должна выполняться с применением цифровых технологий.

Технологии БСС из объемных модульных блоков зависят не только от конструктивной системы и схемы, но и от применяемых материалов и изделий. Опираясь на анализируемые научные публикации [9], можно отметить, что каркасы объемных блок-модулей бывают:

- стальными (в том числе из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) и легких металлических конструкций (ЛМК));
- деревянными (в том числе из деревянных пустотелых коробчатых элементов и поперечно-клееной древесины);
- железобетонными, в форме колпака или стакана.

Для изготовления отдельных конструктивных элементов кроме стали, дерева и бетона (железобетона) используют различные композитные материалы.

Для возведения БСС кроме объемных блок-модулей используются плоскостные (двухмерные конструктивные панели) сборные модульные конструкции.

В [15] отмечается, что в настоящее время к числу лидирующих компаний, выпускающих плоскостные сборные модульные конструкции, относятся такие широко известные в мире производители как американская компания Clark Pacific, ряд компаний из Великобритании — Arupand Partners, Britspace, Yorkon и Японии — Sekisui Chemicals, Daiwa, Misawa, National, Sekisui Heim, Toyota Homes. Следует отметить, что каждая из перечисленных компаний специализируется на изготовлении тех или иных модулей в рамках конкретного ассортимента.

Таким образом, строительные системы из объемных блок-модулей (ОБМ) относятся к БСС, хотя и не являются ими. И основные характеристики, присущие БСС, свойственны и строительным системам из ОБМ. Как показывает анализ перечисленных работ и [16], главными из них являются:

- высокая степень заводской готовности,
- высокая монтажная технологичность,
- энергоэффективность, рентабельность,
- экономичность,
- вторичное использование блоков,
- низкая отходоемкость.

Несмотря на огромную популярность модульного строительства, в настоящие время не существует единой классификации строительных систем из ОБМ. На рисунке 4 приведена некая общая классификация ОБМ по одиннадцати признакам (характер действия, функциональный характер и назначение, класс, мобильность, этажность, конструктивная схема, размеры ОБМ, материалы, изменение габаритных размеров и др.).

Далее приведены классификации ОБМ по отдельным признакам: конструктивной схеме (рис. 5), по функциональному назначению (рис. 6), по этажности (рис. 7).

Рис. 4. Общая классификация строительных систем из ОБМ

Рис. 5. Классификация строительных систем из ОБМ по конструктивной схеме

Рис. 6. Классификация строительных систем из ОБМ по функциональному назначению

Рис. 7. Классификация строительных систем из ОБМ по этажности

В общих признаках классификации строительных систем из ОБМ (см. рис. 4) приведены признаки долговечности и огнестойкости, которые зависят также от применяемых материалов.

Необходимость разработки классификации строительных систем из ОБМ отмечается в работе [15], где подчеркивается рассмотрение и следующих признаков: легковесность, сборность, технологичность и экологичность.

Разработанная классификация может служить основой для создания полной классификационной схемы по зданиям и сооружениям, возводимым из ОБМ.

Концепция быстровозводимых строительных систем, в т. ч. из ОБМ, основана на степени заводской готовности и ряде других показателей, которые зависят от размера и сложности модульных компонентов или конструктивной особенности и конфигурации конечного продукта. Уменьшение размеров сборных элементов повышает степень трудоемкости строительных работ на объекте и наоборот. Степень заводской готовности влияет на технологичность выполнения работ.

В заключение отметим, что система модульного строительства более эффективна в удовлетворении глобальных требований, чем традиционный метод. Применение объемных модулей позволяет решать не только градостроительные задачи, но и ряд глобальных экологических проблем. Модульные объемные структуры (блоки) имеют значительный запас прочности, поэтому эксплуатационные характеристики модульных зданий лучше, чем у традиционных зданий, и это позволит во многих странах мира постепенно перейти к строительству зданий из ОБМ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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.

2. *Абрамян С. Г.* Строительное производство и концепция устойчивого развития // Интернет-журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 5. URL: https://naukovedenie.ru/PDF/64EVN517.pdf.

3. *Alwan Z., Jones P., Holgate P.* Strategic sustainable development in the UK construction industry, through the framework for strategic sustainable development, using Building Information Modeling // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 140. Iss. 1. SI. Pp. 349—358. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.085.

4. *Eleftheriadis S., Mumovic D., Greening P.* Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities // Renewable & Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 67. Pp. 811—825. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.028.

5. *Абрамян С. Г., Бурлаченко О. В., Оганесян О. В., Бурлаченко А. О.* Роль цифровых технологий при строительстве и повышении остаточного ресурса промышленной и строительной продукции // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 4(81). С. 429—437.

6. *Dos Santos J. E., Galhardo C. X., Dos Santos V. M. L.* Innovations in the Civil Construction Sector Provided by Information Technologies // Revista Geintec-Gestao Inovacao E Tecnologias. 2019. Vol. 9. Iss. 4. Pp. 5131—5145. DOI: 10.7198/geintec.v9i4.1382.

7. *Poluektova V. A., Shapovalov N. A, Vladykin V. N.* From Nano-scale to Macrostructure in Composite for Additive Technologies // Proceedings of the International Conference Actual Issues of Mechanical Engineering 2017 (AIME 2017). AER-Advances in Engineering Research. 2017. Vol. 133. Pp. 614—619.

8. 3D-печать в строительстве / Н. И. Ватин, Л. И. Чумадова, И. С. Гончаров, В. В. Зыкова, А. Н. Карпеня, А. А. Ким, Е. А. Финашенков // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2017. № 1(52). С. 27—46.

9. *Абрамян С. Г., Илиев А. Б.* Основные требования к быстровозводимым строительным системам // Инженерный вестник Дона. 2017. № 4. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_53_Abramian.pdf.

10. *Gunawardena T., Ngo T., Mendis P., Alfano J.* Innovative Flexible Structural System Using Prefabricated Modules // Journal of Architectural Engineering. 2016. Vol. 22. Iss. 4. Article number: 05016003. DOI: 10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000214.

11. *Бурлаченко О. В., Бурлаченко А. О., Оганесян О. В.* Выбор оптимальных технологических решений в условиях плотной городской застройки на основе BIM-технологий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 1(78). С. 329—335.

12. New advancements, challenges and opportunities of multi-storey modular buildings — A state-of-the-art review / W. Ferdous, Yu Bai, T. Ngo, A. Manalo, P. Mendis // Engineering Structures. 2019. Vol. 183. Pp. 883—893.

13. Теория и практика использования быстровозводимых зданий в обычных условиях и чрезвычайных ситуациях в России и зарубежом / А. Н. Асаул, Ю. Н. Казаков, В. Л. Быков, И. П. Князь, П. Ю. Ерофеев, под ред. Ю. Н. Казакова. СПб.: Гуманистика, 2004. 472 с.

14. *Мушинский А. Н., Зимин С. С.* Строительство быстровозводимых зданий и сооружений // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2015. № 4(31). С. 182—193.

15. Модульные конструкции и энергоэффективная реконструкция современных строительных систем / С. Г. Абрамян, Р. Х. Ишмаметов, О. В. Оганесян, И. А. Улановский, А. А. Дикмеджян // Инженерный вестник Дона. 2019. № 6. URL: ivdon.ru/uploads/article/pdf/IVD_11__7y2019_Abramian.pdf_596bc5dfc1.pdf.

16. *Ramaji I. J., Memari A. M.* Product Architecture Model for Multistory Modular Buildings // Journal of Construction Engineering and Management. 2016. Vol. 142. Iss. 10. Article number: 04016047. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001159.

© Абрамян С. Г., Бурлаченко О. В., Галда З. Ю., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Абрамян С. Г., Бурлаченко О. В., Галда З. Ю. Объемные блок-модули как разновидность модульных конструкций быстровозводимых строительных систем // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 5—13.

Об авторах:

Абрамян Сусанна Грантовна — канд. техн. наук, доц., проф. каф. технологий строительного производства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; susannagrant@mail.ru

Бурлаченко Олег Васильевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологий строительного производства, зам. директора по научной работе, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; info@vgasu.ru

Галда Захар Юрьевич — магистрант, каф. технологий строительного производства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерацтя, Волгоград, 400074, ул. Академическая, 1; zakharkb@gmail.com

Susanna G. Abramyan, Oleg V. Burlachenko, Zakhar Yu. Galda

Volgograd State Technical University

THREE-DIMENSIONAL BLOCK MODULES AS A VARIETY OF MODULAR STRUCTURES OF PREFABRICATED BUILDING SYSTEMS

The article discusses the types of modular structures used in the construction of pre-fabricated buildings and structures. It is noted that buildings made of volumetric block modules are a type of pre-fabricated building systems. The main structural diagrams of pre-fabricated buildings and structures from three-dimensional block modules are presented. The need to develop a classification of building systems from three-dimensional block modules is emphasized.

K e y w o r d s: modular structures, three-dimensional block modules, structural schemes, classification, design schemes.

For citation:

Abramyan S. G., Burlachenko O. V., Galda Z. Yu. [Three-dimensional block modules as a variety of modular structures of prefabricated building systems]. *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], 2021, iss. 1, pp. 5—13.

About authors:

Susanna G. Abramyan — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; susannagrant@mail.ru

Oleg V. Burlachenko — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; info@vgasu.ru

Zakhar Yu. Galda — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; zakharkb@gmail.com

УДК 624.131

О. А. Богомолова, А. П. Поздняков

Волгоградский государственный технический университет

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНОЙ ВЫСОТЫ ИЗОЛИРОВАННОГО ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТКОСА И ВЕРТИКАЛЬНЫХ БОРТОВ ТРАНШЕЙ

Приведены результаты исследования устойчивости однородного изолированного вертикального откоса и вертикальных откосов (бортов) отработанной в однородном грунте траншеи. На основе анализа напряженного состояния грунтового массива, выполненного при помощи метода конечных элементов, установлены особенности процесса образования и развития областей пластических деформаций в грунтовом массиве, который является причиной разрушения (потери устойчивости) исследованных объектов. Установлено, что на этот процесс оказывают свое влияние численные значения физико-механических свойств грунта, в том числе и величина коэффициента бокового давления. Показано, что при расчете устойчивости вертикальных бортов траншеи следует учитывать их взаимное влияние: чем больше абсолютная величина отношения d/H (ширины траншеи к ее глубине), тем меньше картины напряжений и пластических областей будут отличаться от построенных при тех же условиях для изолированного откоса, а при $d/H \geq 6$ наблюдается полное их совпадение. Численные значения величин коэффициентов запаса устойчивости $K_{тр}$ вертикальных бортов траншей при всех прочих равных условиях и при $d/H \leq 6$ будут всегда больше, чем величина K для изолированного откоса, но при $d/H \geq 6$ эти величины будут совпадать. Основным результатом исследования являются формулы и графики, позволяющие определить предельно допустимые значения высоты однородного откоса и глубины траншеи, при которых в грунтовом массиве отсутствуют области пластических деформаций, что обеспечивает длительную устойчивость рассмотренных в работе объектов.

К л ю ч е в ы е с л о в а : однородный вертикальный откос, траншея в однородном грунте, напряженное состояние грунтового массива, физико-механические свойства грунта, коэффициент бокового давления, взаимное влияние бортов траншеи, предельная высота однородного откоса и вертикальных бортов траншеи.

Существует большое количество формул для определения предельной высоты однородного откоса, которые получены исходя из разных соображений и посылок, и дают значительно отличающиеся по величине результаты.

Одним из наиболее часто применяющихся выражений для вычисления значения предельной высоты вертикального откоса H_{90}, является формула, которая легко получается путем приравнивания величины сжимающего напряжения, возникающего в точке перехода откоса в подошву, сопротивлению грунта одноосному сжатию:

$$\sigma_{сж} = \frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi} = \gamma H + q\,, \tag{1}$$

откуда получается, что

$$H_{90} = \frac{2c\cos\varphi}{\gamma\left(1-\sin\varphi\right)} - \frac{q}{\gamma}\,. \tag{2}$$

При этом предполагается, что предельное напряженное состояние возникает от действия равномерно распределенной поверхностной нагрузки интенсивности q и собственного веса грунта (рис. 1).

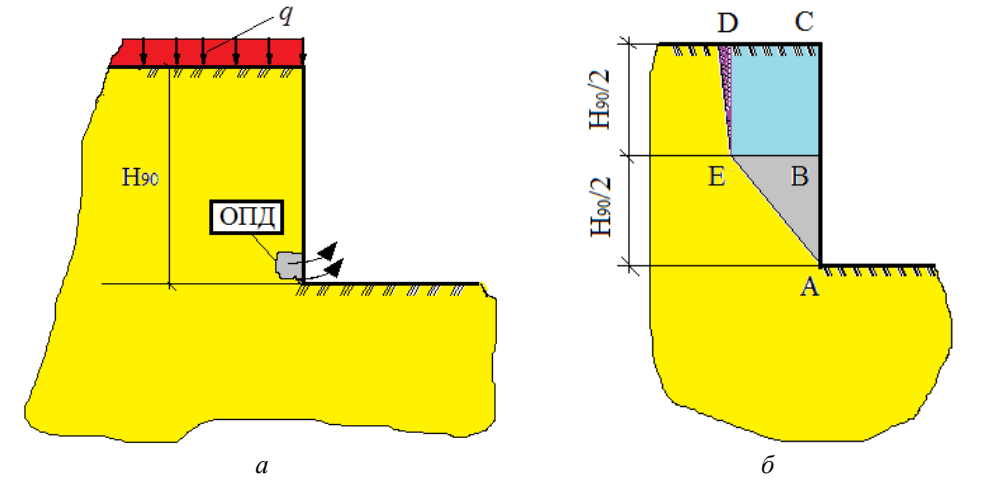


Рис. 1. Расчетная схема к определению предельной высоты вертикального откоса: *а* — по методу В. В. Соколовского; *б* — по методу К. Терцаги

Эта же формула может быть получена при подстановке в условие упругопластического состояния грунта значений напряжений равных

$\sigma_z = \gamma H_{90}$;

$\sigma_x = \tau_{zx} = 0$.

Если интенсивность поверхностной нагрузки $q = 0$, то выражение (2) полностью совпадает с формулой, полученной В. В. Соколовским [1, 2].

Если положить, что $q = 0$ и $\varphi = 0$, т. е. грунт является идеально связным, то получим формулу, приводимую Н. А. Цытовичем [3].

Анализируя формулу (2) можно сделать замечания о том, что она получена:

- без учета нормального горизонтального σ_x и касательного τ_{xz} напряжений;
- для неизвестного значения величины коэффициента бокового давления грунта ξ_o;
- без учета фактора концентрации напряжений в области перехода откоса в подошву и др.

При этом существует мнение, что формула (2) содержит неопределенный запас, ввиду того, что возникновение предельного состояния лишь в одной точке не равносильно потере устойчивости всем грунтовым массивом.

К. Терцаги [4] была предпринята попытка повысить достоверность результатов, получаемых при помощи формулы (2). На основе результатов моделирования и натурных наблюдений им была уточнена кинематика разрушения вертикальных откосов, что позволило учесть образование в верхней части откоса вертикальной трещины (трещины закола), вызываемое возникновением области растягивающих нормальных горизонтальных напряжений σ_x. Высота этой трещины, по мнению К. Терцаги, равна половине высоты откоса.

После образования трещины *ED* (отрыва верхней части призмы обрушения от основного массива грунта) (рис. 1, *б*) отделившаяся от основного массива часть *EDCB* выполняет функцию внешней нагрузки. Общая максимально возможная высота откоса отыскивается из условия предельного равнове-

сия призмы обрушения *AEDCB* (см. рис. 1, *б*) со сдвигом по плоскости скольжения *AE* по формуле

$$H_{90} = \frac{kc\cos\varphi}{\gamma(1-\sin\varphi)}, \qquad (3)$$

где $k = 2{,}76$.

Вообще говоря, численное значение безразмерного множителя k в числителе формулы (3) может принимать различные значения. Об этом свидетельствует тот факт, что для различных типов грунтов при прочих равных условиях глубина трещины закола *DE* имеет разное значение.

Поэтому исследования по определению предельно допустимой высоты вертикального откоса и предельной глубины траншей, отрабатываемых в однородных грунтах, являются и по сей день актуальными.

На рисунке 2 представлены картины изолиний безразмерных (в долях γH) горизонтальных нормальных напряжений σ_x в теле вертикального откоса при различных численных значениях величины коэффициента бокового давления грунта. Из рисунков видно, что толщина H_p области, где горизонтальные нормальные напряжения σ_x являются растягивающими, зависит от величины коэффициента бокового давления грунта ξ_o. Причем H_p тем больше, чем больше величина ξ_o. Все вычисления выполнены при помощи компьютерных программ [5, 6], в которых для определения напряжений формализован метод конечных элементов и методики, представленные в работах [7, 8] (построение наиболее вероятных линий скольжения, областей пластических деформаций, решение смешанной задачи теории упругости и теории пластичности грунтов и т. д.).

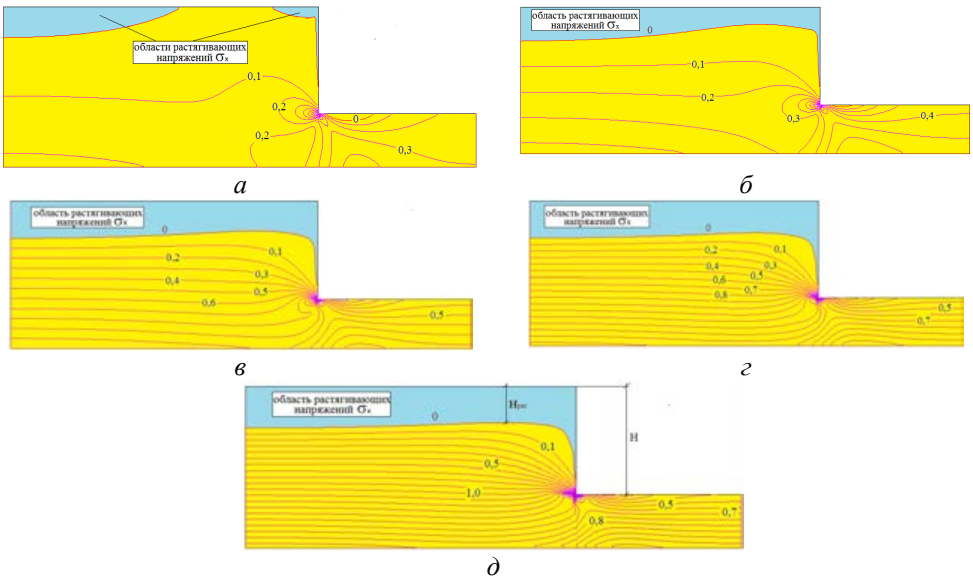


Рис. 2. Картины изолиний безразмерных (в долях γH) горизонтальных нормальных напряжений σ_x в теле вертикального откоса при величинах коэффициента бокового давления грунта: *а* — $\xi_o = 0{,}1$; *б* — $\xi_o = 0{,}2$; *в* — $\xi_o = 0{,}5$; *г* — $\xi_o = 0{,}75$; *д* — $\xi_o = 0{,}9$

На рисунке 3 представлена графическая интерпретация зависимости вида $H_p/H = f(\xi_o)$, анализ которой говорит о том, что при увеличении значения ξ_o от 0,1 до 0,9 толщина области растягивающих нормальных горизонтальных напряжений σ_x возрастает от 0 до $\approx 0{,}35H$ (H — высота откоса).

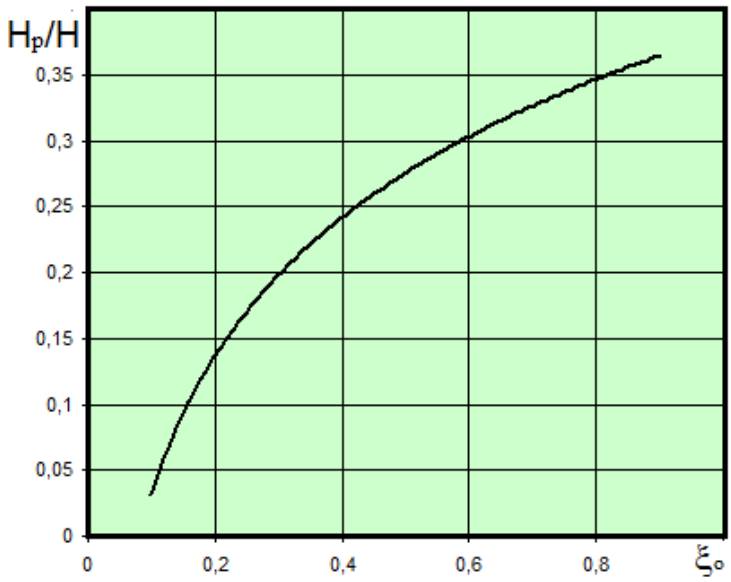


Рис. 3. Графическая зависимость вида $H_p/H = f(\xi_o)$ для однородного изолированного откоса

Уравнение этой кривой может быть записано в виде

$$\frac{H_p}{H} = 0{,}1516\ln(\xi_o) + 0{,}3805. \quad (4)$$

Выбор величины численного значения коэффициента ξ_o зависит от вида грунта. Его диапазон очень широк: для особо прочных горных пород $\xi_o \to 0$, а для пластичных глин $\xi_o \to 1$.

В работе [9] на основе анализа напряженного состояния грунтового массива показано, что для определения величины коэффициента бокового давления грунта в предельном состоянии следует использовать формулу (5), приведенную в работе [10]:

$$\xi_o = \mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right), \quad (5)$$

или формулу (6), полученную авторами [9]:

$$\xi_o = -0{,}3141\ln(\varphi) + 1{,}3993. \quad (6)$$

Отметим, что численные значения коэффициентов бокового давления грунта в предельном состоянии, вычисленные по формулам (5) и (6), отличаются друг от друга максимум на 1,9 %.

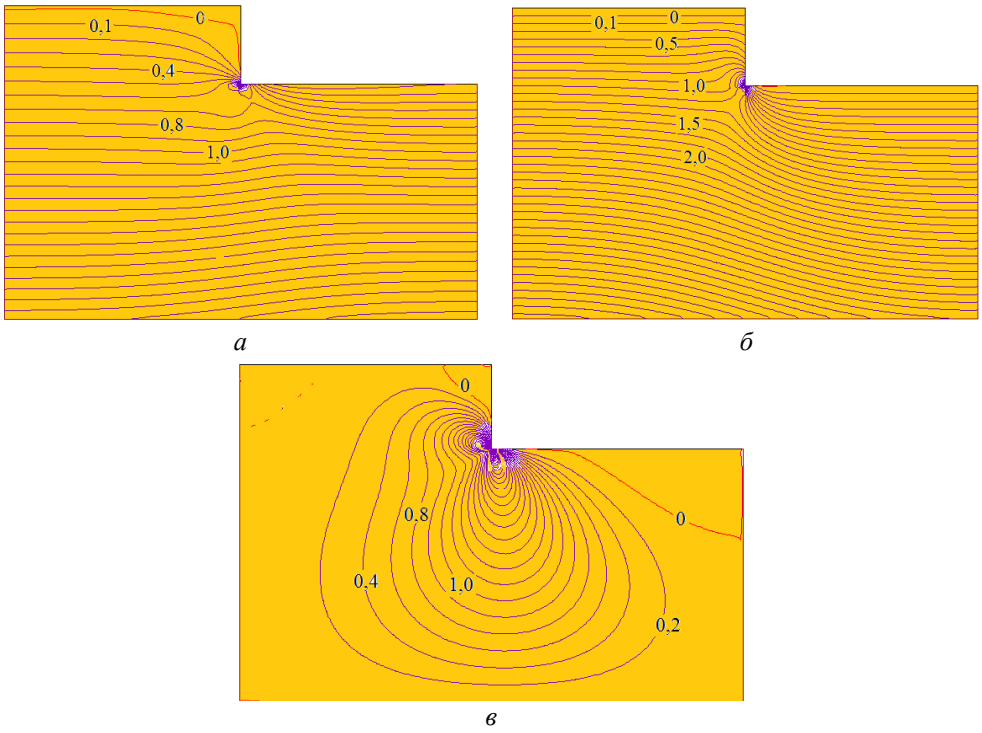
С использованием компьютерных программ [5, 6] были выполнены расчеты напряженного состояния однородного изолированного вертикального откоса, построены наиболее вероятные линии скольжения и области предельного состояния грунта. Для получения количественных зависимостей было принято, что угол внутреннего трения грунта в процессе компьютерного моделирования изменяется в пределах $\varphi \in [5°\ldots40°]$, а величина приведенного давления связности — $\sigma_{св} \in [0\ldots6]$.

$$\sigma_{св} = C(\gamma H \mathrm{tg}\varphi)^{-1}, \qquad (7)$$

где C, φ, γ — удельное сцепление, угол внутреннего трения и объемный вес грунта соответственно; H — высота откоса.

Кроме того, все вычисления выполнены для четырех значений коэффициента бокового давления грунта $\xi_o = 0{,}3;\ 0{,}5;\ 0{,}75;\ 0{,}9$.

На рисунке 4 в качестве примера приведены картины изолиний безразмерных компонент напряжения σ_x (*а*), σ_z (*б*) и τ_{zx} (*в*) в теле однородного изолированного вертикального откоса при величине коэффициента бокового давления грунта ξ_o=0,75.



а *б* *в*

Рис. 4. Картины изолиний безразмерных компонент напряжения в теле однородного изолированного вертикального откоса при величине коэффициента бокового давления грунта $\xi_o = 0{,}75$: *а* — σ_x; *б* — σ_z; *в* — τ_{zx}

Анализируя построенные изолинии напряжений, можно сказать, что в области перехода откоса в подошву наблюдается существенная концентрация всех трех компонент напряжения; в верхней части откоса возникает полоса

(зона) растягивающих нормальных горизонтальных напряжений σ_x, толщина которой зависит от величины коэффициента бокового давления грунта ξ_o; практически вся вертикальная поверхность откоса растянута в горизонтальном направлении. Все это предопределяет характер процесса образования и развития областей пластических деформаций в приоткосной области.

На рисунке 5 в качестве примера изображены области пластических деформаций, возникающих в теле вертикального откоса при различных значениях величины угла внутреннего трения, построенные на основе условия пластичности [11] в виде, предложенном G. Cagout [12].

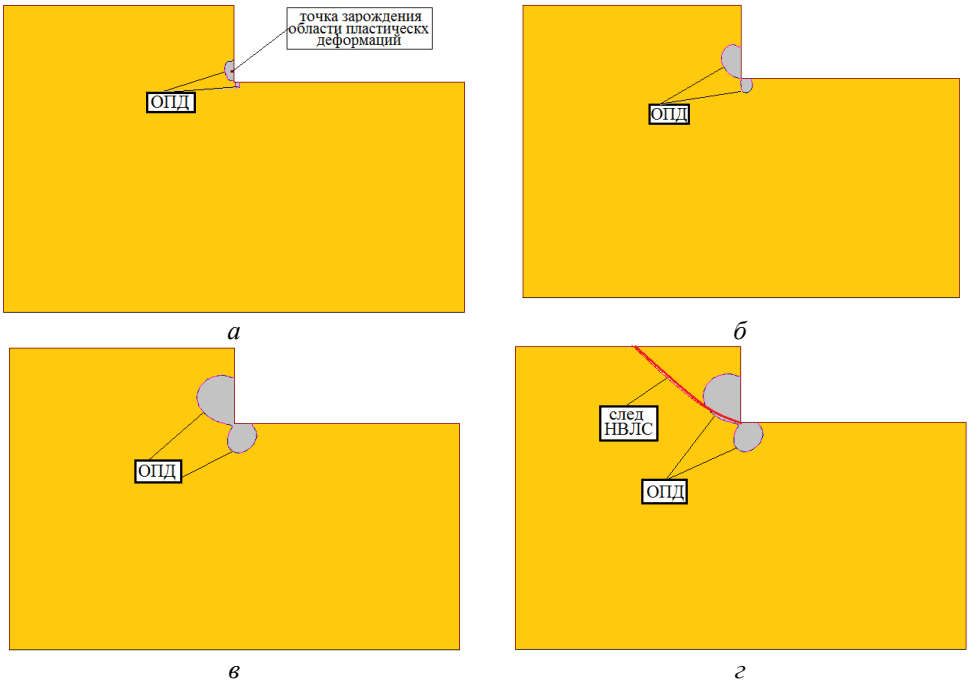


Рис. 5. Области пластических деформаций в изолированном вертикальном однородном откосе при $\xi_o = 0{,}75$, $\sigma_{св} = 0{,}5$: *а* — $\varphi = 25^o$; *б* — $\varphi = 20^o$; *в* — $\varphi = 15^o$; *г* — след наиболее вероятной линии скольжения при $\sigma_{св} = 0{,}5$ и $\varphi = 15^o$

На рис. 5, *г* приведено изображение следа наиболее вероятной поверхности скольжения, который при заданных условиях имеет практически прямолинейное очертание.

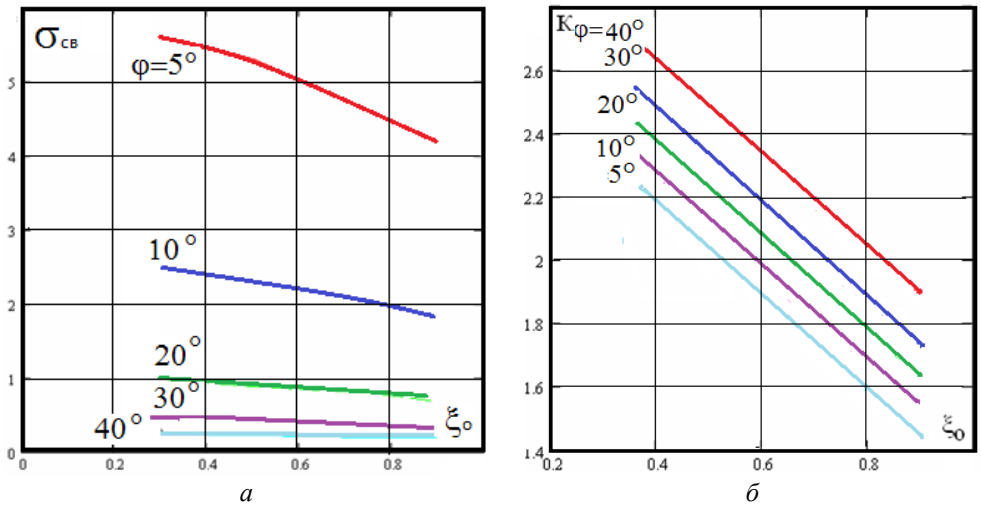
Анализ изображений ОПД, часть которых приведена на рис. 5, позволяет констатировать:

- что зарождение областей пластических деформаций происходит в точке, расположенной на вертикальной поверхности откоса, на некоторой высоте от его подошвы;
- увеличение численных значений угла внутреннего трения φ и приведенного давления связности $\sigma_{св}$ влечет за собой уменьшение размеров пластических областей;
- при некоторых значениях физико-механических свойств и высоты откоса области пластических деформаций возникают и в его подошве;

• существуют такие сочетания численных значений физико-механических свойств грунта, слагающего откос, и его высоты, когда области пластических деформаций отсутствуют.

Для получения количественных зависимостей, позволяющих проводить оценку длительной устойчивости изолированного вертикального откоса (определение величины H_{90}), выполнены расчеты при упомянутых выше значениях интервалов изменения физико-механических свойств грунтов, в результате чего установлены сочетания физико-механических свойств грунта, при которых в приоткосной зоне отсутствуют области пластических деформаций.

В результате математической обработки результатов вычислений построены графические зависимости, изображенные на рис. 6.



а *б*

Рис. 6. Графические зависимости при различных численных значениях угла внутреннего трения φ для определения безопасных параметров вертикального откоса вида: *а* — $\sigma_{св} = f(\xi_o)$; *б* — $K = f(\xi_o)$

На рис. 6, *а* приведены кривые, позволяющие определить для всех рассмотренных значений φ и ξ_o величину приведенного давления связности $\sigma_{св}$, которая гарантирует отсутствие в приоткосной зоне областей пластических деформаций. Подставляя в формулу $\sigma_{св} = C(\gamma H \mathrm{tg}\varphi)^{-1}$ величину приведенного давления связности, определенное по графику 6, *а*, находят безопасную высоту вертикального откоса H_{90}. Разрушение откоса такой высоты за счет внутреннего процесса перераспределения напряжений и образования областей пластических деформаций невозможно.

Совместное использование графиков, приведенных на рис. 6, *а*, *б*, позволяет определить величину коэффициента запаса устойчивости *K* вертикального изолированного откоса безопасной высоты.

В наших работах [13—15] уже рассматривались вопросы, связанные с изучением длительной устойчивости вертикальных бортов траншей, однако в них не были приведены расчетные формулы по определению величины $H_{90тр}$. В настоящей статье этот недостаток устраняется.

При помощи упоминавшихся компьютерных программ [5, 6] проведены вычисления, аналогичные тем, что выполнены для изолированного откоса, при условии, что физико-механические свойства грунта изменяются в указанных выше пределах. Разница состоит в том, что вычисления выполнены для траншей с вертикальными бортами при условии, что отношение ширины траншеи d к ее глубине H изменяется в пределах $d/H \in [0{,}1\ldots6{,}0]$.

На рисунках 7 и 8 в качестве примеров приведены картины безразмерных (в долях γH) напряжений σ_x; σ_z; τ_{xz} и границы областей пластических деформаций в окрестностях траншей при двух значениях отношения ширины траншеи к ее глубине $d/H = 0{,}04$; 1,0 и $\xi_o = 0{,}75$; $\sigma_{св} = 0{,}5$; $\varphi = 25^o$.

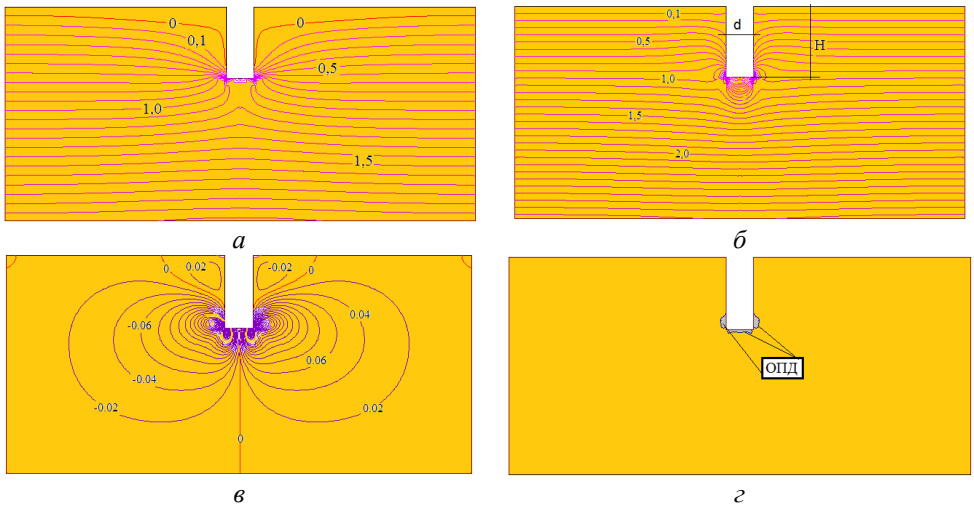


Рис. 7. Картины безразмерных (в долях γH) напряжений: *а* — σ_x; *б* — σ_z; *в* — τ_{xz}; *г* — границы областей пластических деформаций в окрестностях траншеи при $d/H = 0{,}4$ и $\xi_o = 0{,}75$, $\sigma_{св} = 0{,}5$, $\varphi = 25^o$

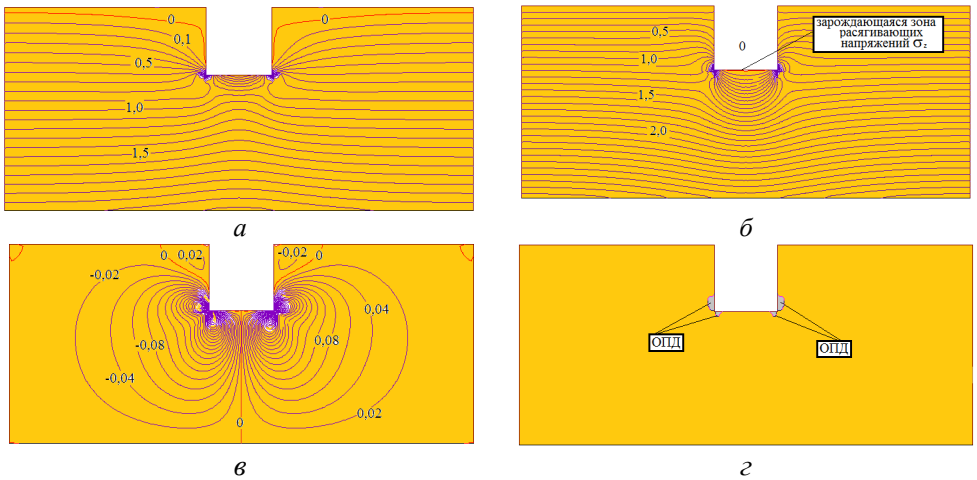


Рис. 8. Картины безразмерных (в долях γH) напряжений: *а* — σ_x; *б* — σ_z; *в* — τ_{xz}; *г* — границы областей пластических деформаций в окрестностях траншеи при $d/H = 1{,}0$ и $\xi_o = 0{,}75$, $\sigma_{св} = 0{,}5$, $\varphi = 25^o$

Анализ результатов вычислений и полученных изображений пластических областей позволил установить:

- чем больше абсолютная величина отношения d/H, тем меньше получаемые картины напряжений и пластических областей будут отличаться от построенных при тех же условиях для изолированного откоса, а при $d/H \geq 6$ наблюдается полное их совпадение;
- численные значения величин коэффициентов запаса устойчивости $K_{тр}$ вертикальных бортов траншей при всех прочих равных условиях и при $d/H \leq 6$ будут всегда больше, чем величина K для изолированного откоса, но при $d/H \geq 6$ эти величины будут совпадать.

Следовательно при оценке длительной устойчивости вертикальных бортов траншей необходимо учитывать их взаимное влияние.

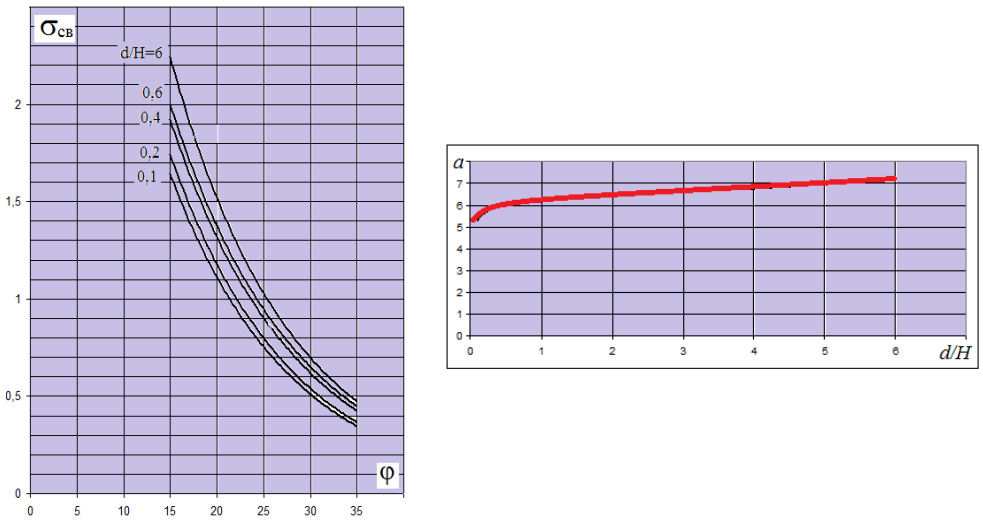
В результате математической обработки результатов построены графики, позволяющие в зависимости от угла внутреннего трения φ и величины отношения d/H (где d и H — соответственно ширина и глубина траншеи) определять величину приведенного давления связности, при которой в грунтовом массиве близ стенок траншеи отсутствуют области пластических деформаций (рис. 9).

Все кривые, приведенные на рис. 9, *а*, с точностью не меньшей 98 % аппроксимируются выражением

$$\sigma_{св} = ae^{-0{,}077\varphi}, \tag{8}$$

где a — безразмерный коэффициент, определяемый по графику, приведенному на рис. 9, *б*, или вычисляемый по формуле (7) (погрешность аппроксимации не превышает 3,5 %); φ — модуль угла внутреннего трения:

$$a = 0{,}4664\ln(d/H) + 6{,}3652. \tag{9}$$



а *б*

Рис. 9. График для определения предельной величины: *а* — приведенного давления связности $\sigma_{св}$; *б* — коэффициента a в формуле (8)

Определяя по графикам численное значение величины приведенного давления связности и подставляя его в выражение $\sigma_{св} = C(\gamma H \mathrm{tg}\varphi)^{-1}$, можно вычислить предельную глубину траншеи $H_{90тр}$, при которой ей обеспечена длительная устойчивость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Соколовский В. В.* Статика сыпучей среды. М.; Л.: АН СССР, 1942. 207 с.
2. *Соколовский В. В.* Теория пластичности. М.: АН СССР, 1946. 520 с.
3. *Цытович Н. А., Тер-Мартиросян З. Г.* Основы прикладной геомеханики в строительстве. М.: Высшая школа, 1981. 317 с.
4. *Терцаги К., Пек Р.* Механика грунтов в инженерной практике. М.: Госстройиздат, 1958. 608 с.
5. FEA / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, А. В. Редин, А. Н. Ушаков // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617889 Российская Федерация; 23.07.2015. Правообладатель: ФГОУ ВО ВолгГАСУ.
6. Устойчивость (Напряженно-деформированное состояние) / А. Н. Богомолов, О. А. Богомолова, М. Ю. Нестратов, Н. Н. Потапова, М. М. Степанов, А. Н. Ушаков, С. И. Шиян // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009613499 Российская Федерация. 30.06.2009. Правообладатель: ВолгГТУ.
7. *Богомолов А. Н.* Расчет несущей способности оснований сооружений и устойчивости грунтовых массивов в упругопластической постановке. Пермь: ПГТУ, 1996. 150 с.
8. *Богомолов А. Н., Ушаков А. Н.* Методы теории функций комплексного переменного в задачах геомеханики. Волгоград: Перемена, 2014. 227 с.
9. *Богомолов А. Н., Вихарева О. А., Шиян С. И.* К вопросу о минимальных значениях коэффициента бокового давления грунтов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Естественные науки. 2007. Вып. 6(23). С. 110—114.
10. *Флорин В. А.* Основы механики грунтов. Т. 1. М.; Л.: Госстройиздат, 1959. 356 с.
11. *Coulomb C.* Application des rigles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L`architecture // Memories de savants strangers de L`Academlie des sciences de Paris. 1773.
12. *Cagout G.* Eguilibre des massifs a frottemenet interne. Paris, 1934.
13. Длительная устойчивость вертикальных стенок траншей / О. А. Богомолова, И. В. Иванов, А. С. Иванов, А. В. Соловьев, С. И. Шиян // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 28(47). С. 57—53.
14. *Богомолов А. Н., Нестратов М. Ю., Соловьев А. В., Богомолова О. А.* Новый критерий оценки длительной устойчивости однородных откосов на основе анализа напряженно-деформированного состояния // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2009. Вып. 14(33). С. 5—12.
15. *Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Echevsky A. V.* Energy approach to the stability calculation of loaded Slopes // The materials of The International Practical Conference on the subject “The mutual activities of the local executive power and municipalities in the preparation of the people, economy and environment for the protection”. Baki, 2011. Pp. 122—124.

© Богомолова О. А., Поздняков А. П., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Богомолова О. А., Поздняков А. П. Определение предельной высоты изолированного вертикального откоса и вертикальных бортов траншей // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 14—24.

Об авторах:

Богомолова Оксана Александровна — канд. техн. наук, доц. каф. математики и информационных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; banzaritcyn@mail.ru

Поздняков Андрей Петрович — канд. физ.-мат. наук, доц., Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; pozd74@mail.ru

Oksana A. Bogomolova, Andrey P. Pozdnyakov

Volgograd State Technical University

DETERMINATION OF THE MAXIMUM HEIGHT OF AN ISOLATED VERTICAL SLOPE AND VERTICAL SIDES OF TRENCHES

The results of a study of the stability of a homogeneous isolated vertical slope and vertical slopes (sides) of a trench worked in a homogeneous soil are presented. Based on the analysis of the stress state of the soil mass, performed using the finite element method, the features of the process of formation and development of areas of plastic deformations in the soil mass, which is the cause of destruction (loss of stability) of the studied objects, are established. It is established that this process is influenced by the numerical values of the physical and mechanical properties of the soil, including the value of the lateral pressure coefficient. It is shown that when calculating the stability of the vertical sides of the trench, their mutual influence should be taken into account: the greater the absolute value of the ratio d/H (the width of the trench to its depth), the less the stress patterns and plastic areas will differ from those constructed under the same conditions for an isolated slope, and at $d/H \geq 6$, their complete coincidence is observed. The numerical values of the values of the coefficients of the $K_{тр}$ stability margin of the vertical sides of the trenches, under all other equal conditions and at $d/H \leq 6$, will always be greater than the value of K for the isolated slope, but at $d/H \geq 6$, these values will coincide. The main result of the study is formulas and graphs that allow us to determine the maximum permissible values of the height of a uniform slope and the depth of the trench, at which there are no areas of plastic deformation in the soil mass, which ensures the long-term stability of the objects considered in the work.

K e y w o r d s: homogeneous vertical slope, trench in homogeneous soil, stress state of the soil mass, physical and mechanical properties of the soil, the coefficient of lateral pressure, the mutual influence of the sides of the trench, the maximum height of the homogeneous slope and the vertical sides of the trench.

For citation:

Bogomolova O. A., Pozdnyakov A. P. [Determination of the maximum height of an isolated vertical slope and vertical sides of trenches]. *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], 2021, iss. 1, pp. 14—24.

About authors:

Oksana A. Bogomolova — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; banzaritcyn@mail.ru

Andrey P. Pozdnyakov — Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; pozd74@mail.ru

УДК 692.446

А. В. Голиков, А. Н. Федоров

Волгоградский государственный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ КРУГЛОЙ СТАЛИ В БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ СТРУКТУРНЫХ ПОКРЫТИЯХ

Выполнено моделирование сводчатого большепролетного структурного покрытия с двумя варьируемыми параметрами: общая высота сечения конструкции покрытия и высота подъема стрелы основных арок свода. Проанализированы 12 вариантов расчетных схем, определены наиболее рациональные соотношения между габаритными геометрическими размерами сооружения.

Изучение характера работы конструкции проведено в два этапа. На первом этапе установлено, при каких соотношениях габаритных параметров сооружения реализуется большая площадь растянутых зон. На втором этапе выполнена оценка изменения металлоемкости при варьировании основных габаритных размеров сооружения и с учетом введения в работу стержней, выполненных из круглой стали.

Конструктивная схема с отношением высоты сечения оболочки структуры к пролету равным 1:15 и отношением высоты подъема стрелы основных арок к пролету равным 1:3 установлена в качестве наиболее эффективной в применении.

Обосновано, что наиболее рациональной конструктивной формой структурных большепролетных сооружений по критерию стоимости является конструкция, в которой в качестве растянутых элементов применены элементы из круглой стали.

Установлено, что снижение металлоемкости предложенной конструктивной схемы покрытия достигается применением эффективных соотношений между габаритными размерами сооружения и применением в качестве сечения растянутых стержней сортамента круглой стали.

К л ю ч е в ы е с л о в а: большепролетные покрытия, сводчатые покрытия, пространственные покрытия, структурные покрытия, круглая сталь, геометрия сводов, рациональное конструктивное решение.

Введение

Большепролетные покрытия реализуют основные достоинства стали, такие как легкость и надежность, позволяя выполнять свободным значительное пространство в объектах гражданского строительства.

Основной областью применения большепролетных покрытий являются спортивные сооружения, покрытия крупных производственных объектов и уникальных сооружений.

Отсутствие промежуточных опор на протяженных участках позволяет размещать производства, технологические процессы которых невозможны при меньших свободных пространствах. Яркими примерами сооружений данного типа являются ангары для самолетов, концертные залы, выставочные павильоны, здания вокзалов.

Для перекрытия значительных пролетов зачастую применяют не ряд плоских рам, объединенных посредством связевой системы в единую конструкцию, а, например, пространственные перекрестные рамы, в которых в работу под нагрузкой включается как поперечные, так и продольные рамы. Указанная конструктивная система, в отличие от плоской, позволяет снизить расход металла, что в современной индустрии имеет немаловажное значение.

Наряду с рамами в практике строительства существенное распространение получили пространственные стержневые оболочки. Пространственные оболочки делают возможными реализовать стремления архитекторов к созданию необычных, более совершенных архитектурных форм и перекрытию больших свободных пространств. Вместе со стремлением к более эстетичным и функциональным сооружениям актуальной в части исследования остается проблема совершенствования конструктивной формы, способной решить задачи упрощения изготовления конструкции и задачи снижения металлоемкости.

Обзор современных типов большепролетных структурных конструкций выполнен в работах ряда ученых, таких как Н. В. Канчели, Liu Xi-Liang, T. T. Lan, Z. S. Makowski и G. M. Gasii [1—5].

Вопросы оптимизации конструктивной формы и методы проектирования пространственных структурных конструкций описаны в работах В. И. Шумейко, О. А. Кудинова, В. Н. Шимановского, И. И. Зуева, W. Schueller, J. M. Gerrits, X. Yang [6—11].

Результаты разработки новых конструктивных типов узлов и совершенствования узлов, существующих в практике строительства, приводятся в работах Y. Bai, Z. S. Makowski, И. С. Холопова [12—14].

Анализ стержневых систем описан в работах М. Н. Кирсанова, Р. И. Хисамова и зарубежных коллег: J. Chilton, E. Allen, G. A. R. Parke, A. C. Edmondson, Z. S. Makowski, D. Maranzano, R. M. Usama, G. S. Ramaswamy [15—24].

Анализ наколенного опыта проектирования и результатов проведенных исследований в направлении оптимизации конструктивной формы большепролетных пространственно-стержневых конструкций позволил выявить основные существующие проблемы:

- сложность изготовления узловых деталей структурных конструкций;
- сложность изготовления стержневых элементов структурных конструкций в опорной зоне;
- высокая сложность монтажа;
- в некоторых структурных системах узловые и стержневые элементы не всегда представляется возможным унифицировать.

Использование сортамента круглой стали в качестве стержней структурных конструкций дает новые технологические возможности изготовления и конструирования узлов сопряжения стержней между собой.

Целью данного исследования является выявление наиболее рациональной конструктивной схемы большепролетного сводчатого покрытия по критерию минимальной металлоемкости и критерию снижения затрат труда на изготовление.

Объект исследования данной работы — конструктивная форма структурного большепролетного покрытия в виде свода для случая применения круглой стали в качестве сечений несущих растянутых стержней.

Предмет исследования данной работы — явление изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) структурного сводчатого покрытия при варьировании основных геометрических размеров и формы сечения стержней.

Данное исследование выполнено путем создания в среде программного комплекса «ЛИРА-10» линейки моделей с выбранной матрицей варьируемых параметров с последующим анализом характера изменения НДС покрытия.

Исследование проводится в несколько этапов путем решения ряда задач:

- создание ряда моделей с варьируемыми геометрическими параметрами;
- статический расчет в первом приближении;
- анализ результатов статической работы покрытия по РСУ;
- определение растянутых зон структуры и выбор оптимальных вариаций модели;
- подбор сечений с применением сортамента круглой стали в растянутых зонах;
- обобщение и систематизация полученных результатов, выводы по результатам расчетов и выбор наиболее рациональной конструктивной схемы.

Ключевая задача, которая поставлена при выполнении исследования, заключается в разработке такой геометрии конструктивной схемы, которая позволит максимально увеличить количество растянутых элементов, соответственно, снизив количество сжатых элементов.

По результатам исследования выявлены наиболее эффективные геометрические параметры большепролетного сводчатого структурного покрытия с применением эффективных стержней из круглой стали.

В качестве инструментов исследования были применены: табличный процессор Microsoft Excel, программный комплекс автоматизированного проектирования AutoCAD и расчетный комплекс «ЛИРА-10».

Основная часть

Для исследования выбрано большепролетное покрытие положительной гауссовой кривизны пролетом 60 м. В ходе работы было создано 12 различных моделей структурного покрытия с габаритными размерами 60×60 м.

Варьируемыми параметрами являются:

- высота конструкции стержневой оболочки (*h*);
- высота подъема стрелы основных арок (*f*).

Для расчета в 1-м приближении жесткостные характеристики всех стержней были приняты равными. Условно сечение одного стержня было принято в форме полой стальной трубы диаметром 83 мм и толщиной 8 мм со следующими характеристиками материала: объемный вес — 7,85 тс\м^3; модуль Юнга — 21 000 000 тс\м^2; коэффициент Пуассона — 0,3.

Расчет 2-го этапа выполнен после определения растянутых зон структуры. Для решения задач 2-го этапа стрежням, испытывающим усиление растяжения, назначены сечения по сортаменту круглой стали.

Матрица варьируемых в исследовании геометрических размеров моделей представлена в табл. 1.

Таблица 1

Параметры варьируемых моделей

h/f		*f/L*		
		1/3	1/2	2/3
h/L	1/12	5/20	5/30	5/40
	1/15	4/20	4/30	4/40
	1/20	3/20	3/30	3/40
	1/30	2/20	2/30	2/40

Матрица исследуемых параметров табл. 1 представлена в относительных единицах: в первом столбце и первой строке таблицы указаны высота структуры h и высота подъема основных арок f в долях от заданного пролета L. Исследования выполнены для поверхности габаритными размерами в плане L = 60 м.

Построение поверхности покрытия положительной гауссовой кривизны (рис. 1) выполнено по функции вида:

$$z = -kx^2 y^2, \tag{1}$$

где k — коэффициент, определяющий отношение высоты подъема стрелы арки к ее пролету.

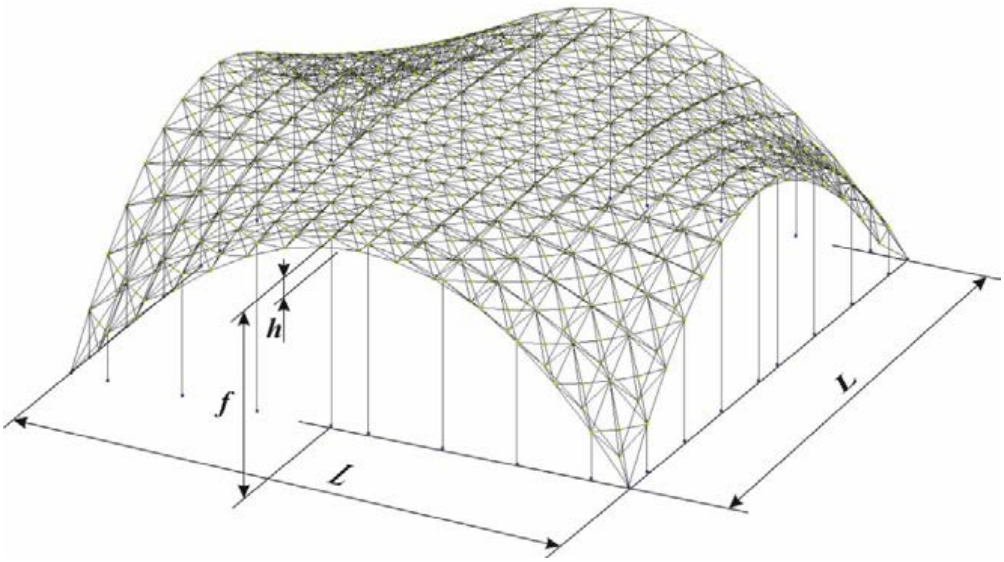


Рис. 1. Пространственная модель структурного покрытия

Таким образом, задав параметры высоты стрелы и пролета, можно построить необходимую криволинейную поверхность, которая в свою очередь разбивается на равные сегменты заданным количеством.

Для построения верхней сетки оболочки гауссовой кривизны задаемся высотой подъема стрелы f и пролетом L, тогда коэффициент k будет равен:

$$k = \frac{f}{(L/2)^4}, \tag{2}$$

где f — высота подъема стрелы основных арок; L — пролет основных арок.

Для построения нижней сетки оболочки коэффициент k вычисляем по формуле:

$$k = \frac{f - h - a/2}{((L-a)/2)^4}, \tag{3}$$

где h — высота конструкции, a — размер одной ячейки.

Вычисленные коэффициенты сводим в табл. 2.

Таблица 2

Коэффициенты функции моделирования оболочки

h/f	$k_в$	$k_н$	*h/f*	$k_в$	$k_н$
5/20	2,47E–05	2,12E–05	4/20	2,47E–05	2,28E–05
5/30	3,70E–05	3,74E–05	4/30	3,70E–05	3,90E–05
5/40	4,94E–05	5,37E–05	4/40	4,94E–05	5,53E–05
3/20	2,47E–05	2,44E–05	2/20	2,47E–05	2,60E–05
3/30	3,70E–05	4,07E–05	2/30	3,70E–05	4,23E–05
3/40	4,94E–05	5,69E–05	2/40	4,94E–05	5,86E–05

При расчете использовались сочетания нагрузок, которые включали нагрузки от собственного веса, веса снегового покрова, а также средней и пульсационной составляющих ветрового воздействия в соответствии с требованиями СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия».

Сбор нагрузок и расчет конструкций выполнен с учетом следующих условий площадки строительства (табл. 3).

Таблица 3

Условия площадки строительства

Уровень ответственности здания по ГОСТ 27751—2014	1а
Коэффициент надежности по ответственности по ГОСТ 27751—2014	1.1
Снеговой район по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»	V
Ветровой район по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»	III
Тип местности при расчете ветровой нагрузке по СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия»	А

Анализ распределение усилий в структурном покрытии по данным результатов расчета показал, что усилия распределяются приблизительно одинаково во всех вариантах моделей. В каждом варианте прослеживается закономерность смещения пиков плотности усилий относительно нуля: верхняя сетка — смещение в сторону сжимающих усилий, нижняя сетка — в сторону растягивающих усилий, раскосная решетка и горизонтальные связи принимают относительно равные соотношения растягивающих и сжимающих усилий. Гистограммы распределения усилий приведены на рис. 2—13.

Графики зависимости максимальных и средних значений усилий показаны на рис. 14—18. На графиках рис. 14—18 и 21, 22 параметр *x* означает долю от *L*.

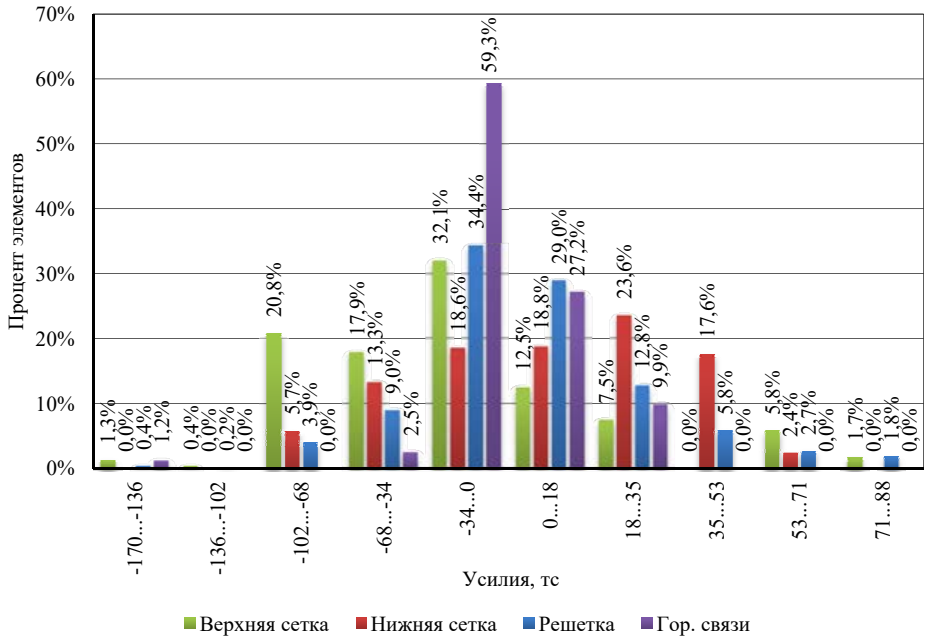


Рис. 2. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/30)L = 2$ м и $f = (1/3)L = 20$ м

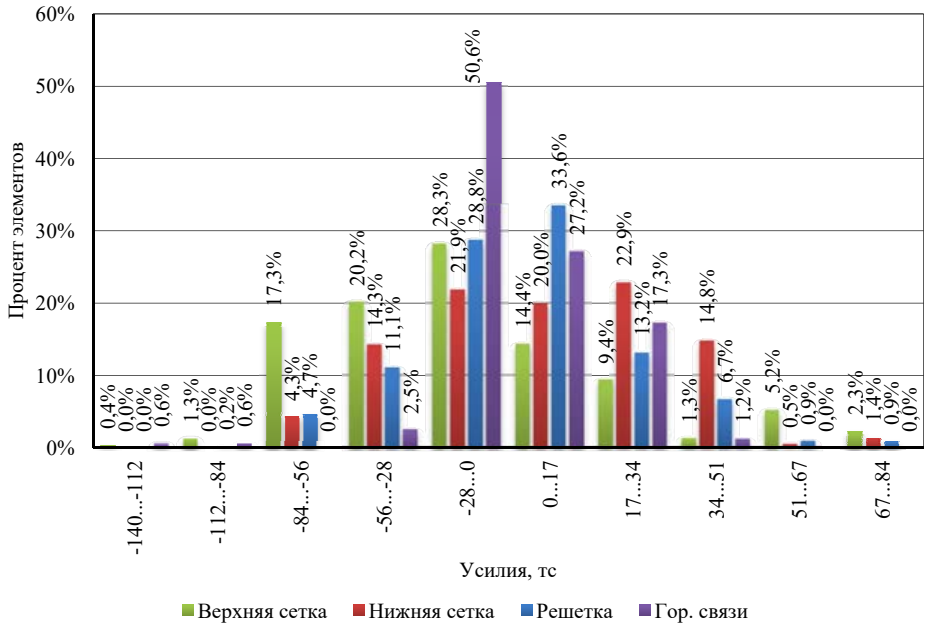


Рис. 3. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/30)L = 2$ м и $f = (1/2)L = 30$ м

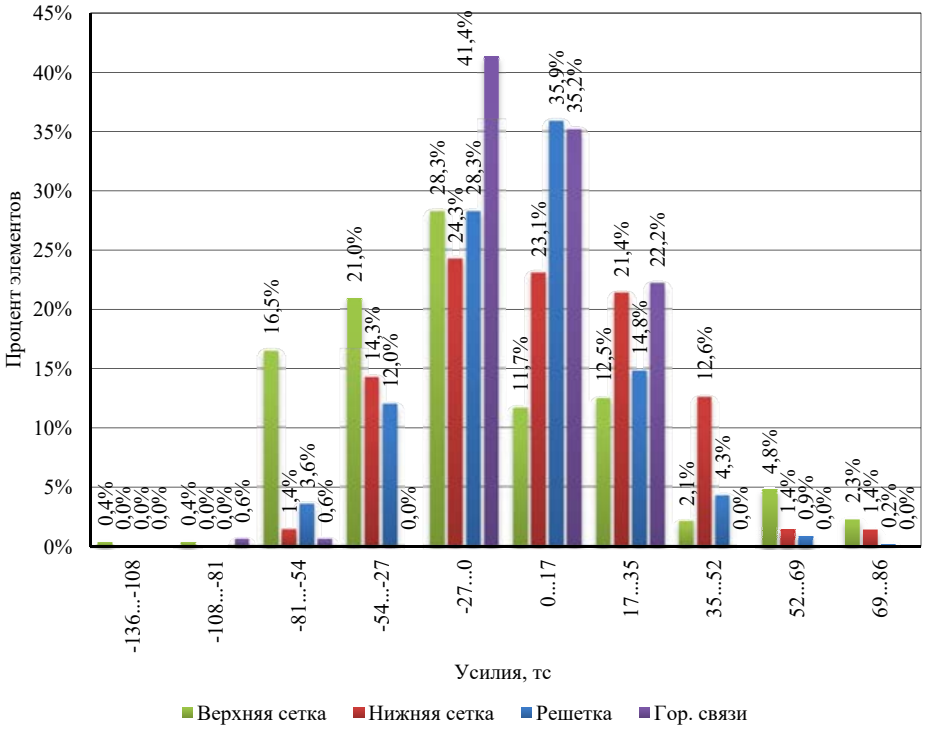


Рис. 4. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/30)L = 2$ м и $f = (2/3)L = 40$ м

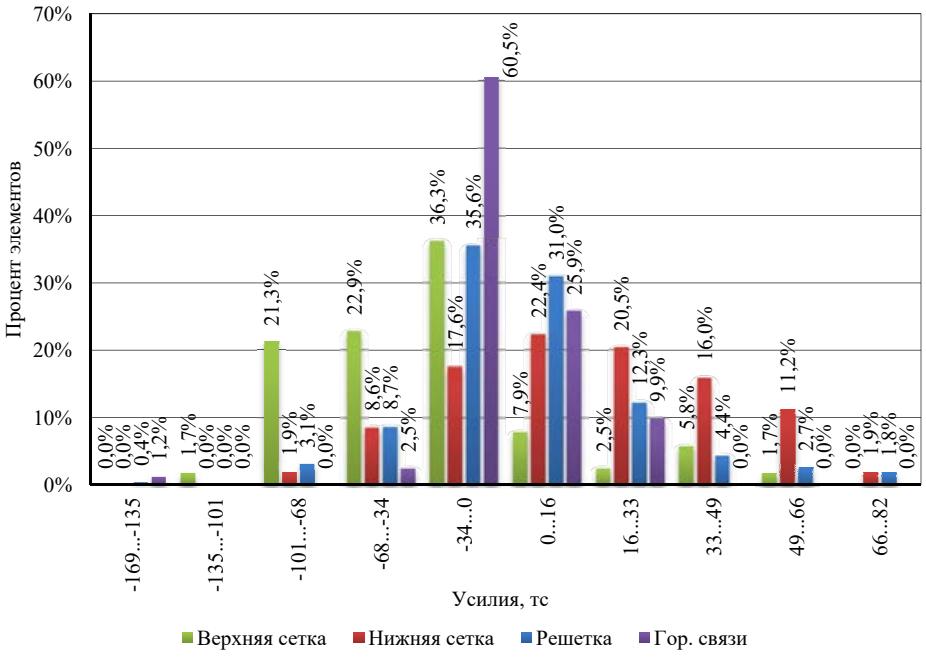


Рис. 5. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/20)L = 3$ м и $f = (1/3)L = 20$ м

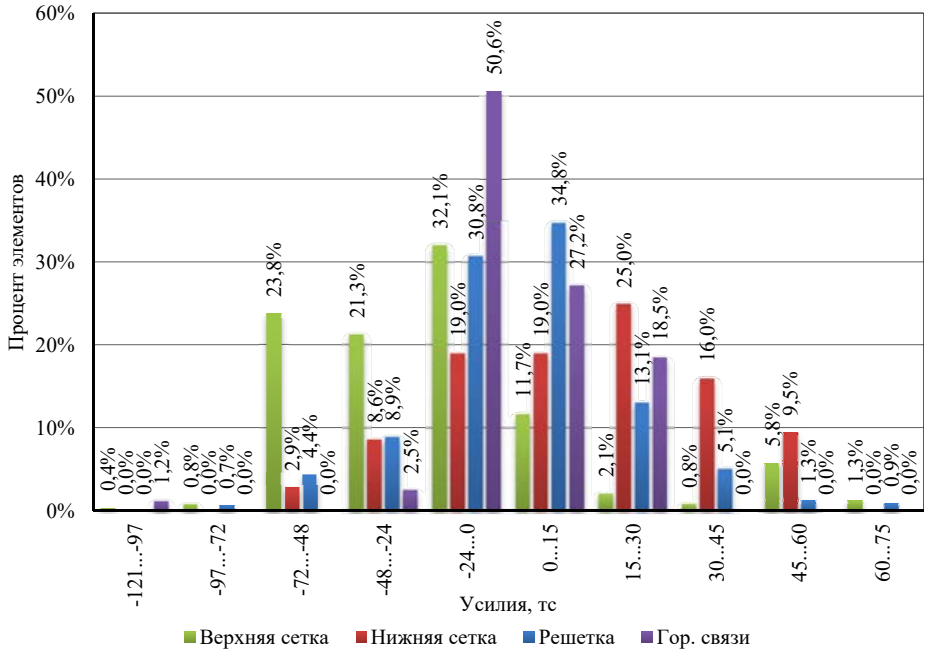


Рис. 6. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/20)L = 3$ м и $f = (1/2)L = 30$ м

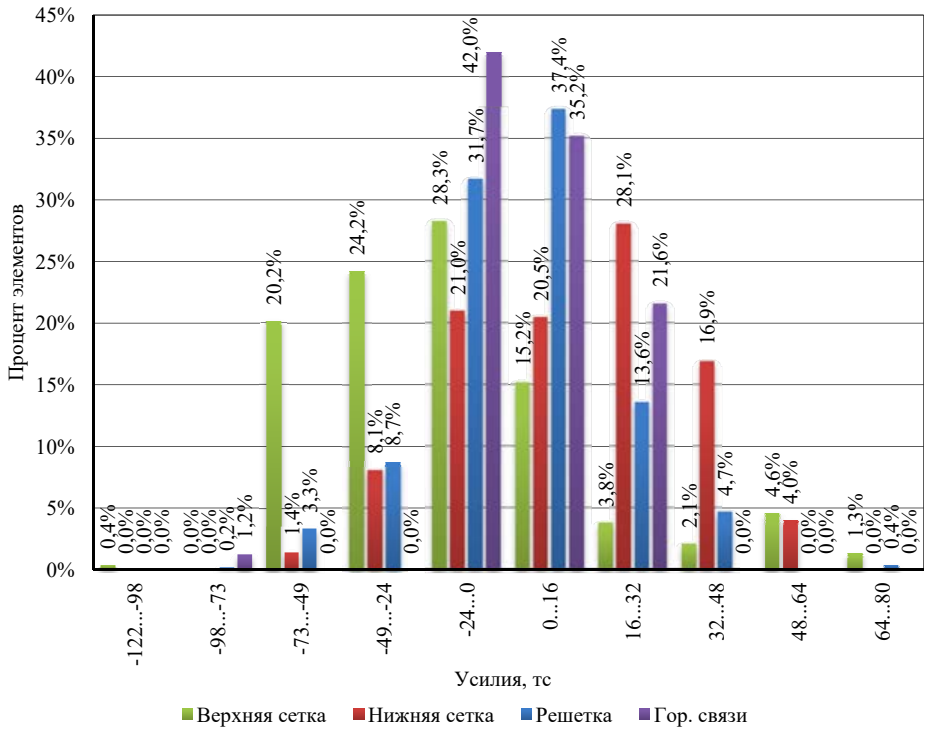


Рис. 7. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/20)L = 3$ м и $f = (2/3)L = 40$ м

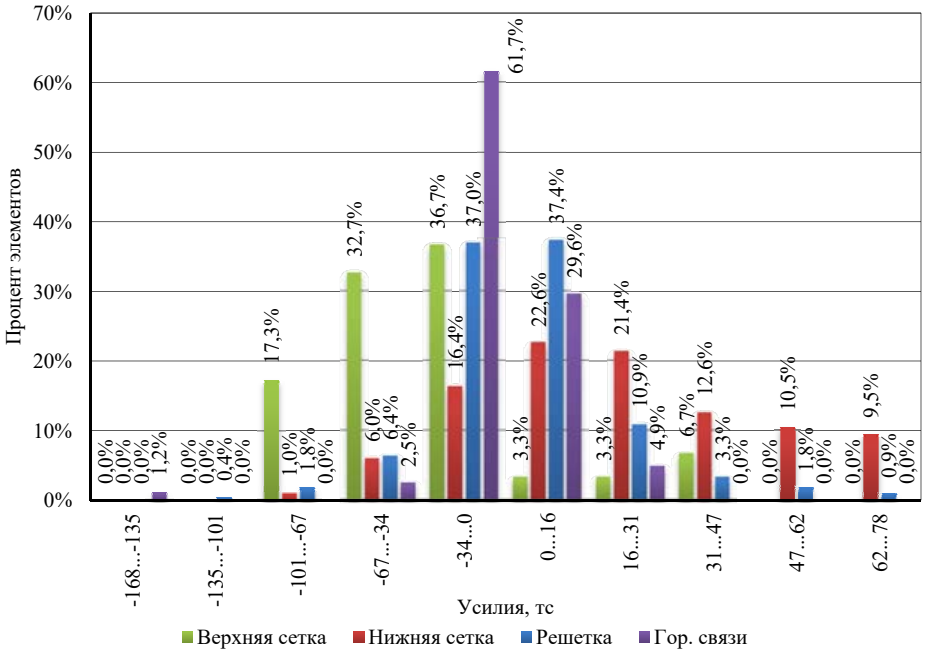


Рис. 8. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/15)L = 4$ м и $f = (1/3)L = 20$ м

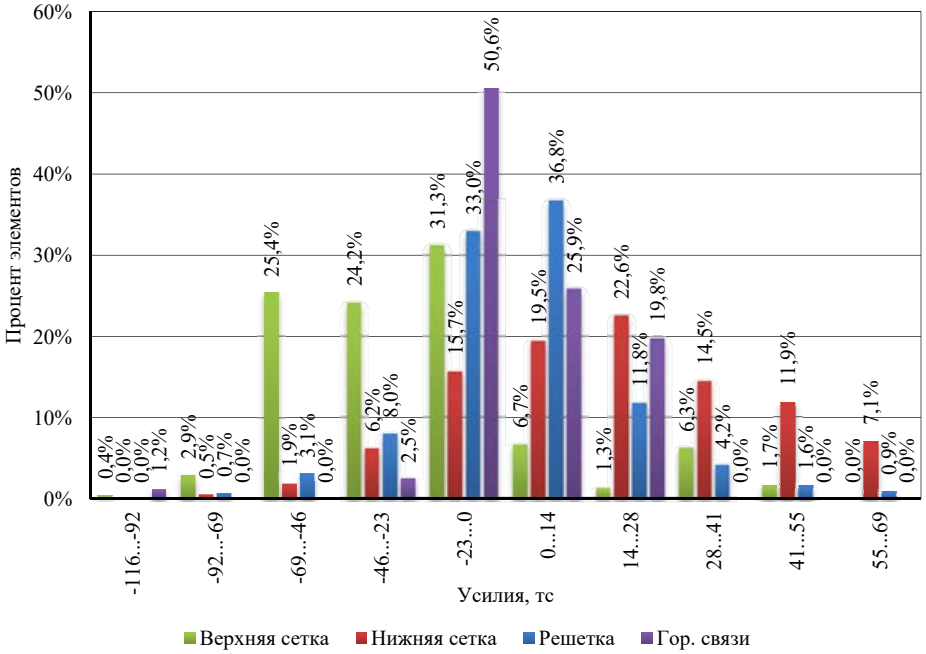


Рис. 9. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/15)L = 4$ м и $f = (1/2)L = 30$ м

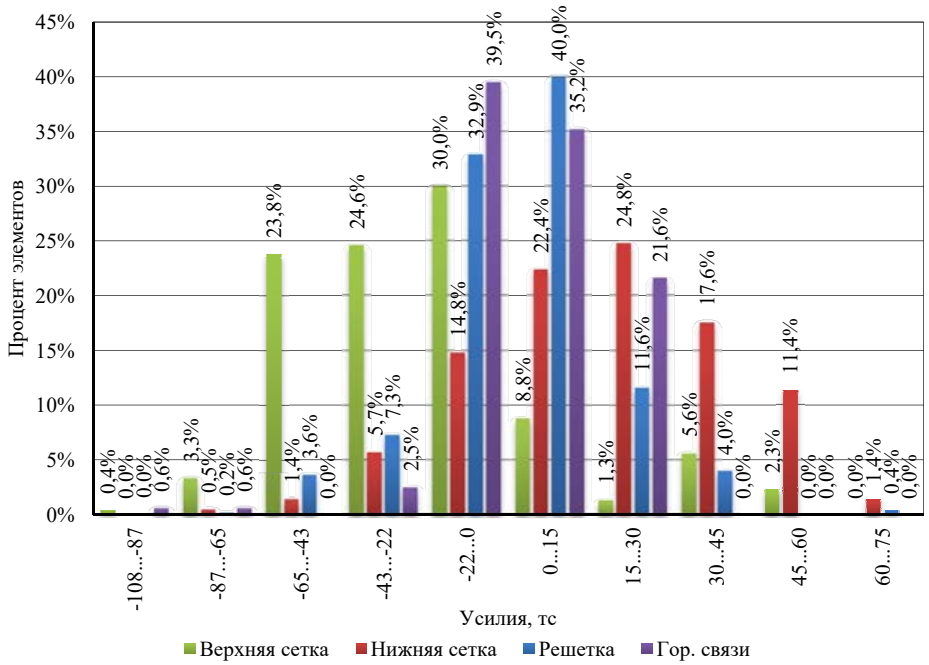


Рис. 10. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/15)L = 4$ м и $f = (2/3)L = 40$ м

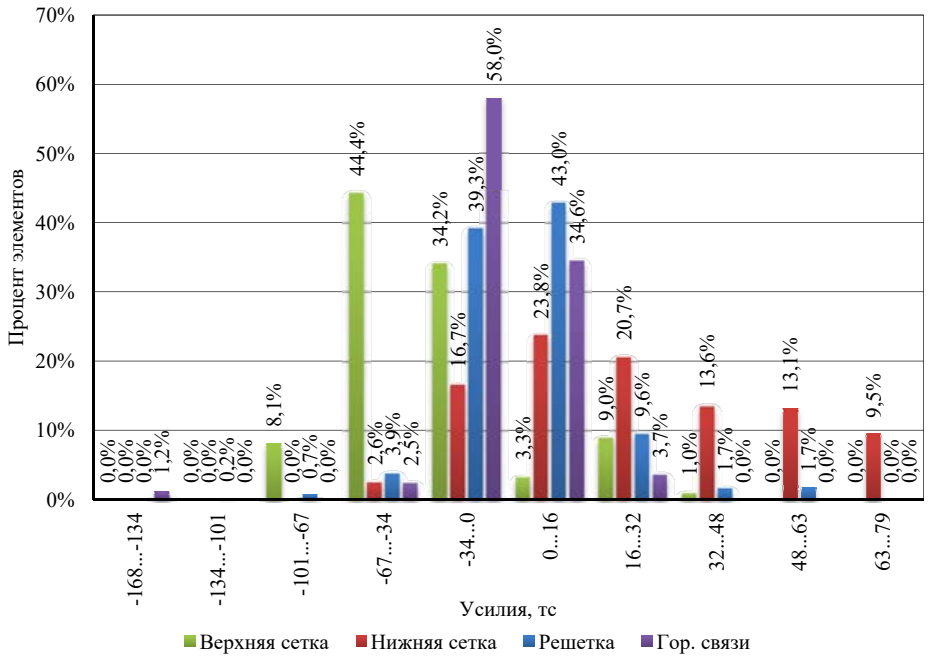


Рис. 11. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/12)L = 5$ м и $f = (1/3)L = 20$ м

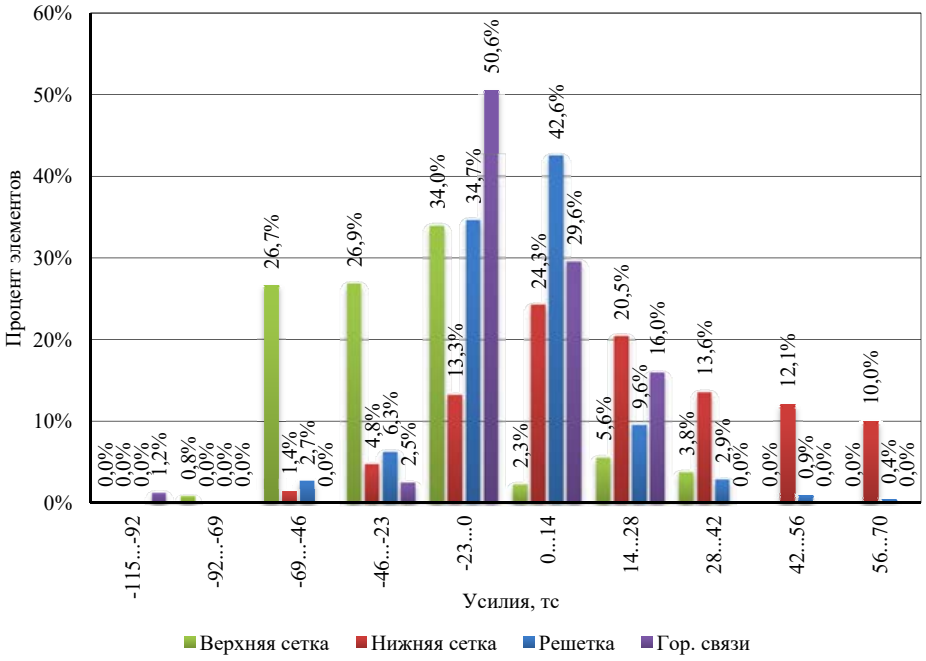


Рис. 12. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/12)L = 5$ м и $f = (1/2)L = 30$ м

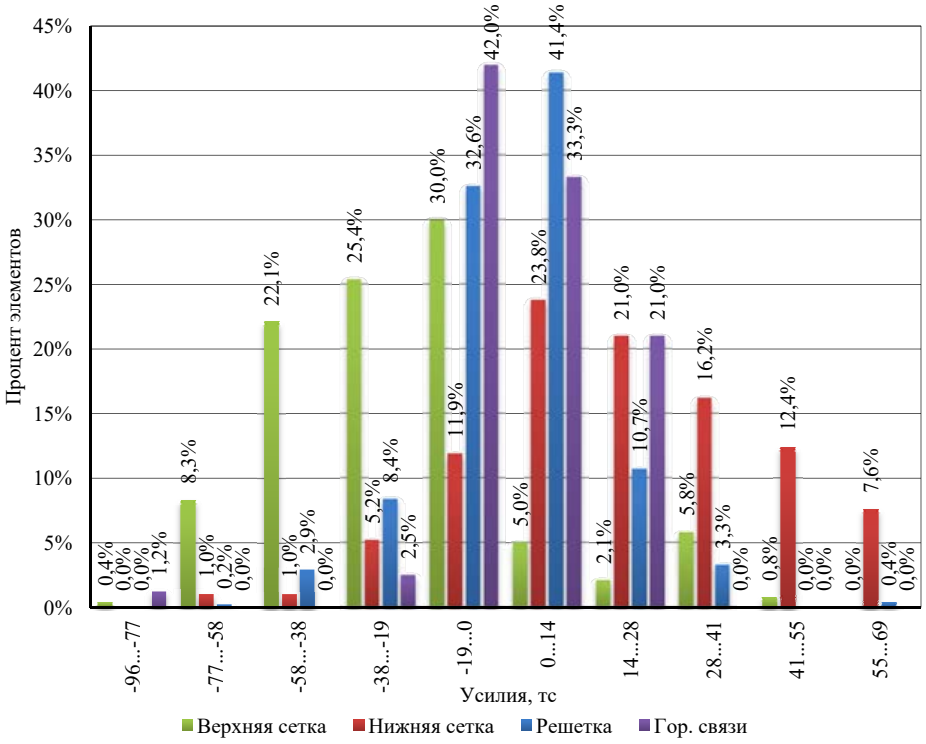


Рис. 13. Гистограмма плотности распределения усилий в структуре с параметрами $h = (1/12)L = 5$ м и $f = (2/3)L = 40$ м

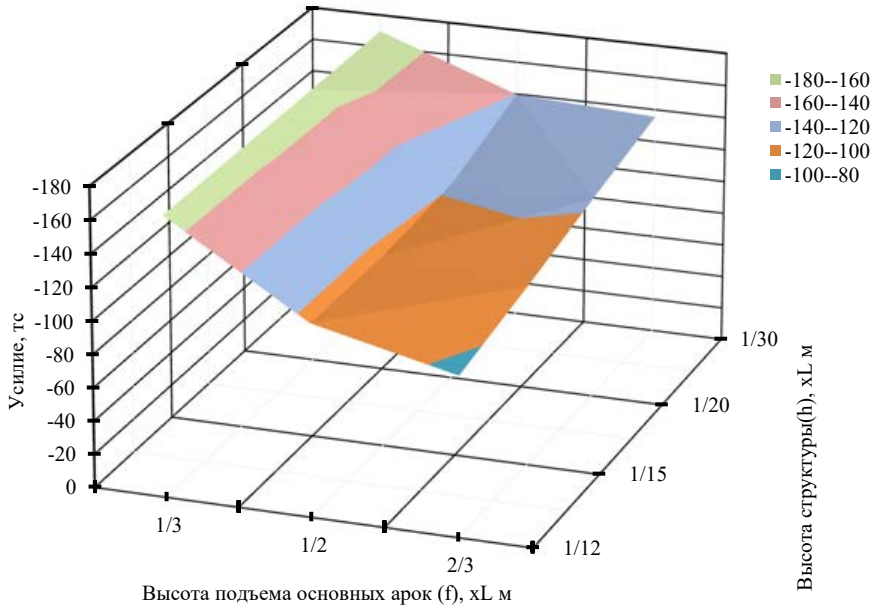


Рис. 14. График зависимости максимальных сжимающих усилий от высоты структуры *h* и высоты подъема основных арок *f*

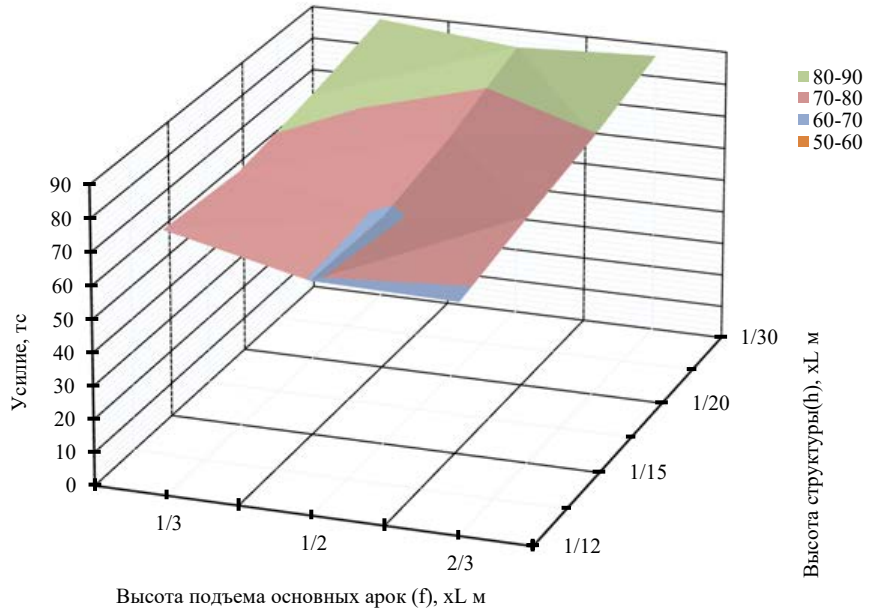


Рис. 15. График зависимости максимальных растягивающих усилий от высоты структуры *h* и высоты подъема основных арок *f*

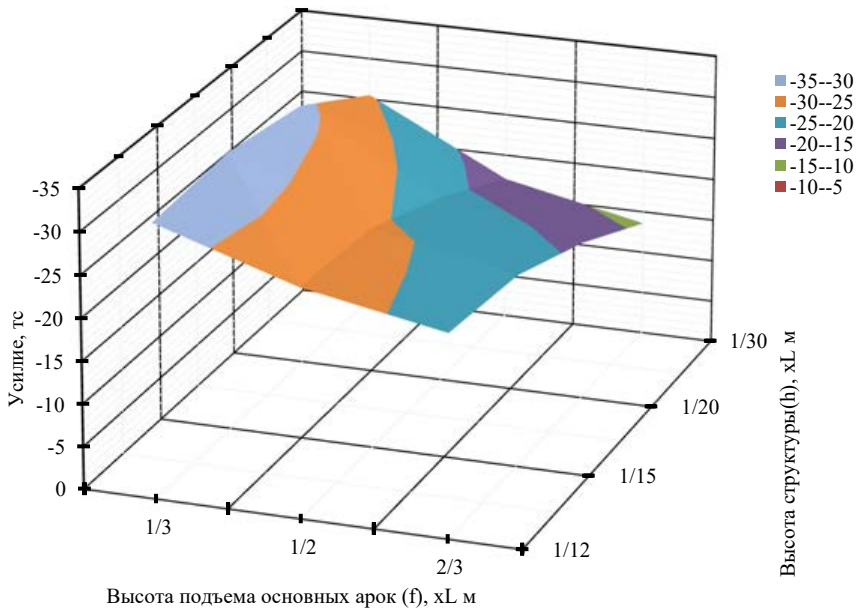


Рис. 16. График зависимости средних усилий в верхней сетке от высоты структуры *h* и высоты подъема основных арок *f*

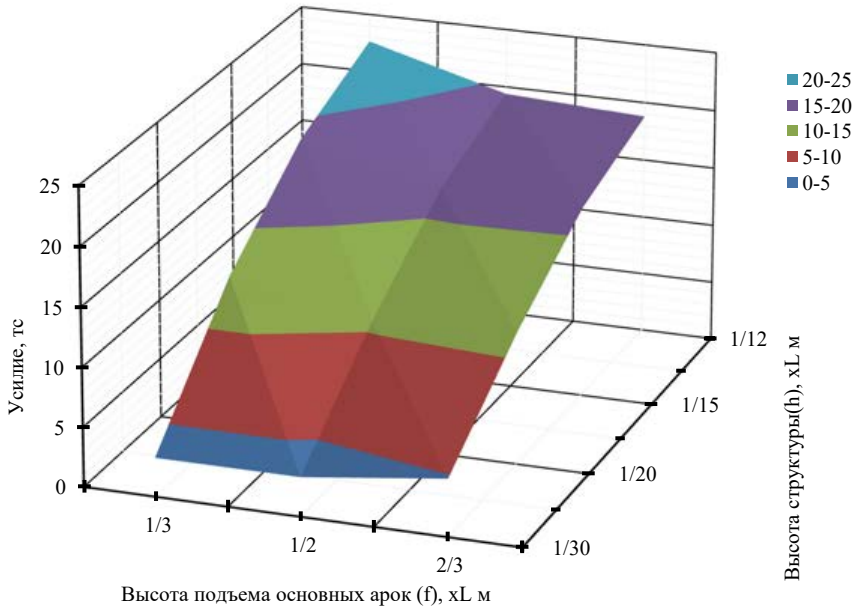


Рис. 17. График зависимости средних усилий в нижней сетке от высоты структуры *h* и высоты подъема основных арок *f*

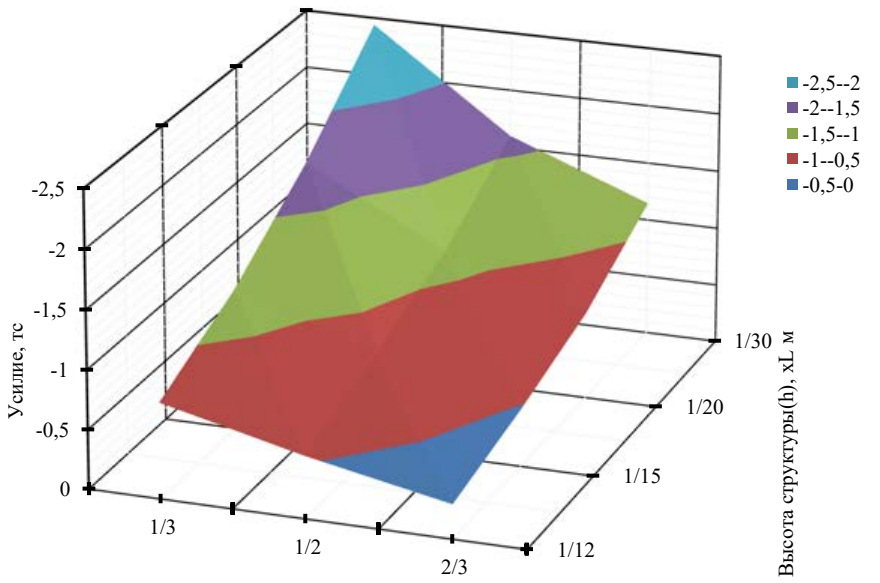


Рис. 18. График зависимости средних усилий в раскосной решетке от высоты структуры *h* и высоты подъема основных арок *f*

Изучив зависимости, представленные на графиках, можно сделать следующие выводы:

1) максимальные сжимающие усилия значительно возрастают при снижении высоты подъема стрелы арки (*f*) и незначительно убывают при увеличении высоты структуры (*h*);

2) максимальные растягивающие усилия незначительно убывают при увеличении высоты структуры (*h*);

3) средние усилия в верхней сетке равномерно возрастают при снижении высоты подъема стрелы арки (*f*) и при увеличении высоты структуры (*h*);

4) средние усилия в нижней сетке равномерно возрастают при увеличении высоты структуры (*h*);

5) средние усилия в раскосной решетке равномерно возрастают при снижении высоты подъема стрелы арки (*f*) и высоты структуры (*h*).

Для решения основной задачи исследования, заключающейся в обосновании эффективности применения круглой стали в большепролетных структурных покрытиях, выполнен анализ усилий в нижней сетке структуры. Для поиска наиболее подходящих параметров структурного покрытия выделяются зоны действия растягивающих усилий в нижней сетке структуры для каждого расчетного сочетания усилий.

Проанализировав зоны действия растягивающих и сжимающих усилий в нижней сетке структуры, выделяем стержни, испытывающие только растягивающие усилия. Так как снеговые и ветровые нагрузки характеризуются разнонаправленным действием, исключаем элементы, симметричные относительно осей *X* и *Y* сжатым стержням (рис. 19, 20).

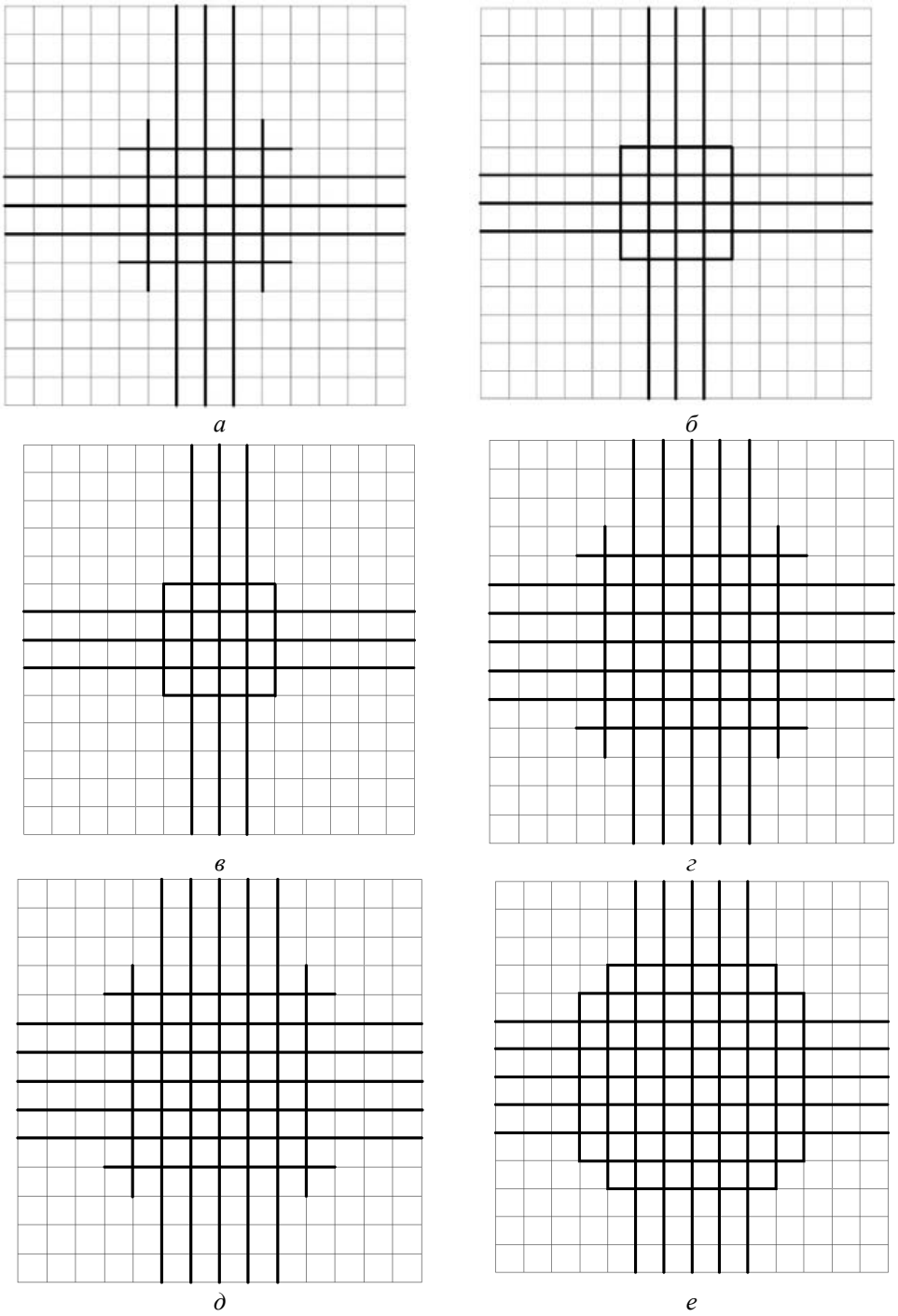


Рис. 19. Схемы растянутых стержней нижней сетки: *а* — при $h = (1/30)L = 2$ м и $f = (1/3)L = 20$ м; *б* — при $h = (1/30)L = 2$ м и $f = (1/2)L = 30$ м; *в* — при $h = (1/30)L = 2$ м и $f = (2/3)L = 40$ м; *г* — при $h = (1/20)L = 3$ м и $f = (1/3)L = 20$ м; *д* — при $h = (1/20)L = 3$ м и $f = (1/2)L = 30$ м; *е* — при $h = (1/20)L = 3$ м и $f = (2/3)L = 40$ м

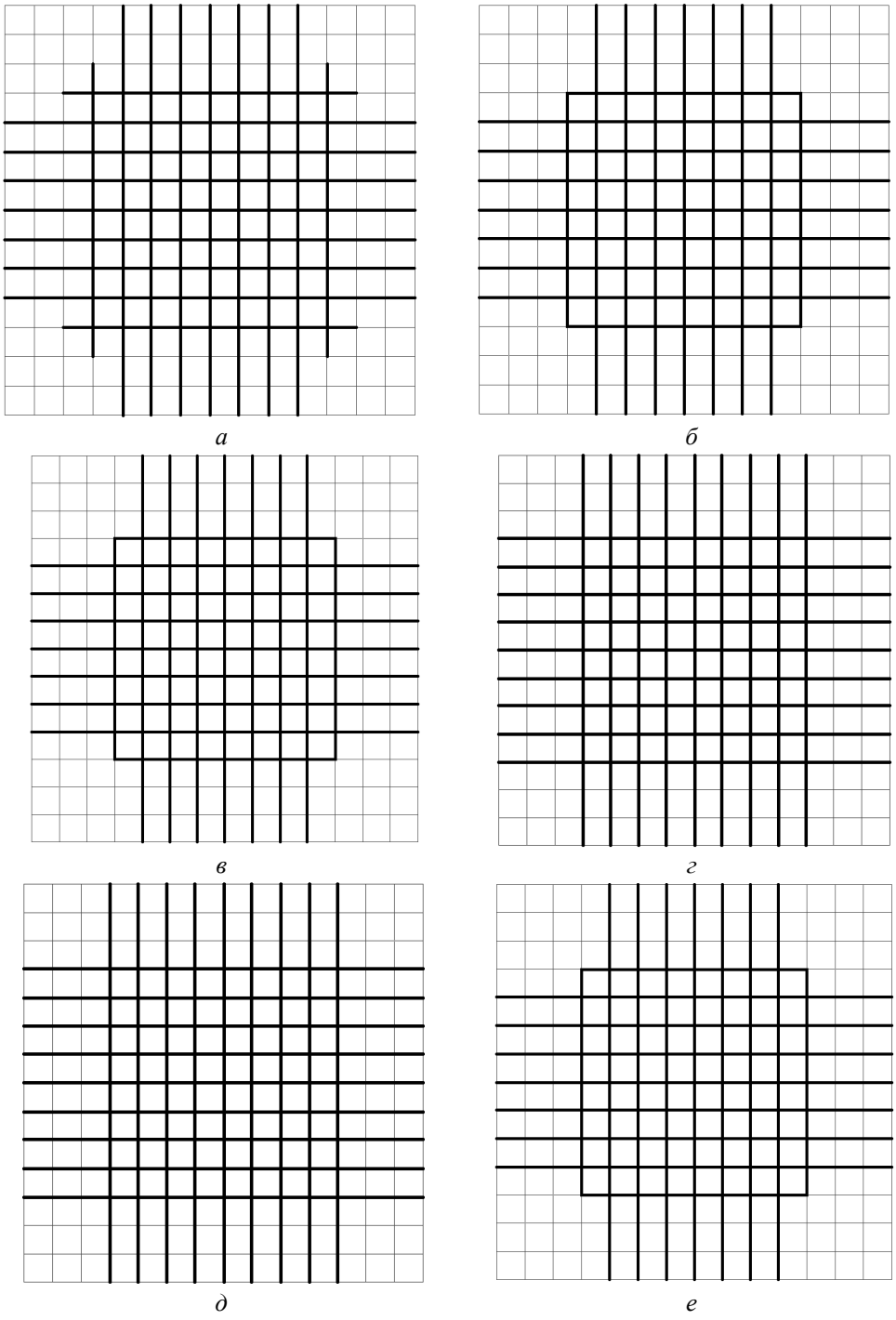


Рис. 20. Схемы растянутых стержней нижней сетки: *а* — при $h = (1/15)L = 4$ м и $f = (1/3)L = 20$ м; *б* — при $h = (1/15)L = 4$ м и $f = (1/2)L = 30$ м; *в* — при $h = (1/15)L = 4$ м и $f = (2/3)L = 40$ м; *г* — при $h = (1/12)L = 5$ м и $f = (1/3)L = 20$ м; *д* — при $h = (1/12)L = 5$ м и $f = (1/2)L = 30$ м; *е* — при $h = (1/12)L = 5$ м и $f = (2/3)L = 40$ м

Наиболее приемлемые результаты были получены для следующих соотношений геометрии сооружения: $h = (1/12)L$, $f = (1/3)L$; $h = (1/12)L$, $f = (1/2)L$.

Установлено, что для моделей с различной высотой сечения оболочки большее число растянутых элементов получено для случая минимальной высоты подъема основных арок $f = (1/3)L$. Отмечено, что количество растянутых элементов возрастало с увеличением высоты структуры h.

Произведен подбор сечений четырех расчетных моделей с общим параметром $f = (1/3)L$. Подобранные сечения приведены в табл. 4—7.

Таблица 4

Сечения при h = (1/30)L = 2 м и f = (1/3)L = 20 м

№	Наименование	Описание	Количество КЭ	Суммарная длина, м
1	Труба прок. 219×10	Верхняя сетка t10	280	1126,0
2	Труба прок. 219×6	Верхняя сетка t6	192	869,34
3	Труба прок. 219×10	Нижняя сетка t10	16	89,669
4	Труба прок. 219×6	Нижняя сетка t6	296	1243,2
5	Круг прок. 60	Нижняя сетка кр.	108	432,05
6	Труба прок. 219×12	Раскосы t10	128	512,24
7	Труба прок. 219×6	Раскосы t6	432	1527,8
8	Труба прок. 159×4	Раскосы 159	324	1117,6
9	Труба прок. 159×4	Связи 159	660	1902,3
10	Труба прок. 219×6	Связи 219	224	706,58
11	Труба прок. 377×10	Опорные стержни	40	191,23
12	Двутавр прок. 40К2	Фахверк	32	443,73
13	Пластина (1)	Покрытие	409	

Таблица 5

Сечения при h = 1/20L = 3 м и f = 1/3L = 20 м

№	Наименование	Описание	Количество КЭ	Суммарная длина, м
1	Труба прок. 159×6	Верхняя сетка	472	1995,4
2	Труба прок. 219×10	Нижняя сетка t10	72	343,58
3	Труба прок. 159х6	Нижняя сетка t6	192	787,51
4	Круг прок. 60	Нижняя сетка кр.	156	624,33
5	Труба прок. 219×10	Раскосы t10	128	547,38
6	Труба прок. 219×6	Раскосы t6	432	1772,2
7	Труба прок. 159×3	Раскосы 159	324	1328,0
8	Труба прок. 159×6	Связи 159	656	1891,0
9	Труба прок. 219×6	Связи 219	228	717,9
10	Труба прок. 325×12	Опорные стержни	40	191,23
11	Двутавр прок. 40К2	Фахверк	32	443,73
12	Пластина (1)	Покрытие	409	

Таблица 6

Сечения при h = 1/15L = 4 м и f = 1/3L = 20 м

№	Наименование	Описание	Количество КЭ	Суммарная длина, м
1	Труба прок. 219×6	Верхняя сетка 219	40	206,99
2	Труба прок. 159×6	Верхняя сетка 159	432	1788,4
3	Труба прок. 219×6	Нижняя сетка 219	32	160,05
4	Труба прок. 159×6	Нижняя сетка 159	216	897,85
5	Круг прок. 70	Нижняя сетка кр.	172	688,49
6	Труба прок. 219×8	Раскосы 219	240	1112,0
7	Труба прок. 159×3	Раскосы 159	644	3112,9
8	Труба прок. 159×6	Связи 159	656	1891,0
9	Труба прок. 219×6	Связи 219	228	717,9
10	Труба прок. 325×10	Опорные стержни	40	191,23
11	Двутавр прок. 40К2	Фахверк	32	443,73
12	Пластина (1)	Покрытие	409	

Таблица 7

Сечения при h = 1/12L = 5 м и f = 1/3L = 20 м

№	Наименование	Описание	Количество КЭ	Суммарная длина, м
1	Труба прок. 159×6	Верхняя сетка	472	1995,4
2	Труба прок. 219×6	Нижняя сетка 219	48	225,16
3	Труба прок. 159×6	Нижняя сетка 159	144	598,74
4	Круг прок. 70	Нижняя сетка кр.	228	913,93
5	Труба прок. 219×8	Раскосы 219	240	1225,6
6	Труба прок. 159×4	Раскосы 159	644	3631,4
7	Труба прок. 159×6	Связи 159	656	1891,0
8	Труба прок. 219×6	Связи 219	228	717,9
9	Труба прок. 325×10	Опорные стержни	40	191,23
10	Двутавр прок. 40К2	Фахверк	32	443,73
11	Пластина (1)	Покрытие	409	

На основе подобранных сечений выполнен анализ зависимости металлоемкости конструкции от ее геометрических параметров, а именно от высоты структуры (h). Гистограмма зависимости приведена на рис. 21. Максимальные вертикальные перемещения узлов структуры приведены в табл. 8.

Таблица 8

Максимальные прогибы (вертикальные перемещения) узлов структуры

Высота структуры, h	(1/30)L	(1/20)L	(1/15)L	(1/12)L
Максимальный прогиб, мм	226,58	184,64	159,06	129,53

Прогиб прогнозируемо убывает с увеличением высоты структуры h. Во всех комбинациях деформации удовлетворяют условию:

$$f < f_{и}, \quad (4)$$

где f — прогиб (выгиб) и перемещение элемента конструкции (или конструкции в целом), определяемые с учетом факторов, влияющих на их значения, в соответствии с приложением Е СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия; $f_и = 1/200 = 300$ м — предельный прогиб (выгиб) или перемещение, устанавливаемые настоящими нормами.

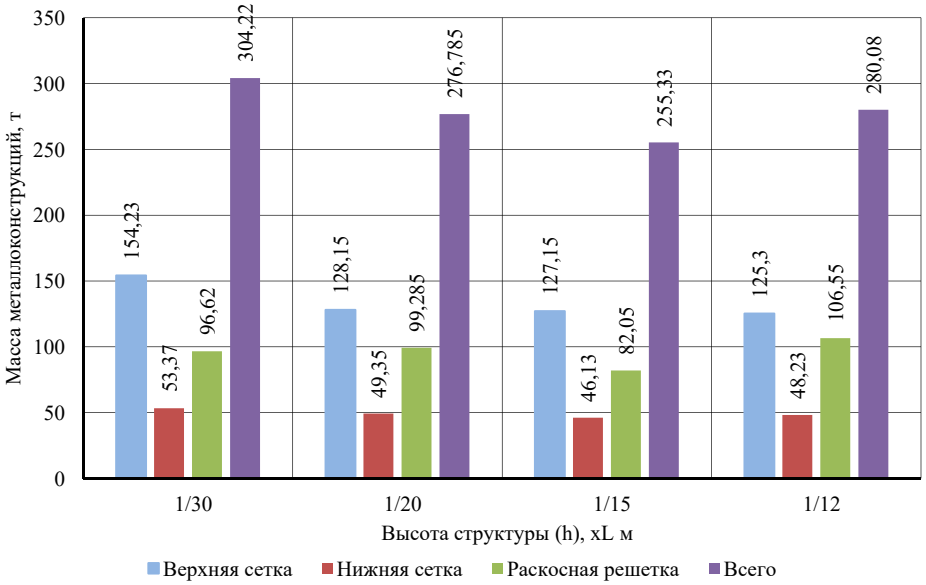


Рис. 21. Гистограмма зависимости массы металлоконструкций от высоты структуры (h)

Выводы

1. Предложена усовершенствованная конструктивная схема большепролетного сводчатого структурного покрытия с применением сортамента круглой стали и эффективными соотношениями между габаритными размерами сооружения.

2. В качестве критериев эффективности конструктивного решения были приняты показатели металлоемкости и величины областей растянутых зон, как потенциально подходящих к назначению сечений из круглой стали.

3. По результатам расчета 12-ти моделей с различными соотношениями габаритных размеров сооружения установлено, что наиболее эффективным является сооружение с соотношением высоты подъема стрелы основных арок к пролету $f : L$ равным 1:3.

4. Выбор наиболее эффективной геометрии конструкции с учетом изменения высоты сечения оболочки (h) был сделан на основании результатов расчета после назначения сечений из круглой стали и уточнения распределения усилий в структуре. Конструктивная схема с параметрами высоты структуры $h = (1/15)L$ и высоты подъема стрелы основных арок $f = (1/3)L$ выявлена как наиболее эффективная в применении.

5. Экономический эффект предложенной конструктивной схемы покрытия достигается, во-первых, снижением металлоемкости в случае применения эффективных соотношений между габаритными размерами сооружения и, во-вторых, применением в качестве сечения растянутых стержней сортамента

круглой стали. По результатам сравнения розничной стоимости тонны стали круглого профиля и стоимости тонны стальных круглых труб установлено, круглая сталь в среднем значении на 33 % дешевле.

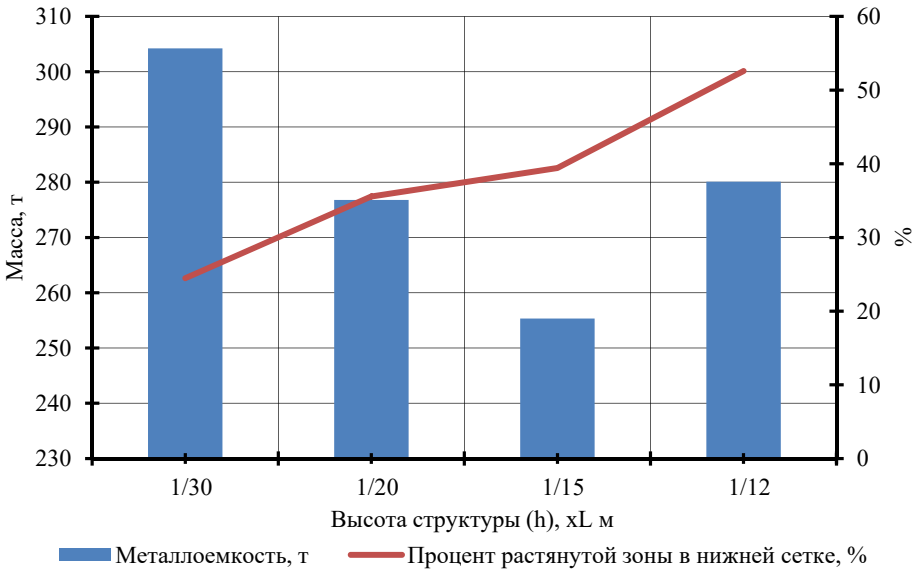


Рис. 22. Зависимость массы металлоконструкций и величины растянутых зон в нижней сетке от высоты структуры (*h*)

Как известно, уменьшение веса отдельных элементов и заводских отправочных марок в целом влечет за собой снижение трудозатрат на изготовление и снижение стоимости монтажа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Канчели Н. В.* Строительные пространственные конструкции. 3-е изд., доп. и перераб. М.: АСВ, 2009. 112 с.
2. *Liu Xi-Liang.* Development of Grid Structures in China // Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures. 2006. Vol. 47. Iss. 2. Pp. 101—110(10).
3. *Lan T. T.* Space Frame Structures I. Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. 129 p.
4. *Makowski Z. S.* Space Frames and Trusses // Constructional Steel Design, an International Guide. London: Elsevier, 1992. Pp. 791—843.
5. *Gasii G. M.* Structural and Design Specifics of Space Grid Systems. Science and Technique. 2017. Vol. 16. Iss. 6. Pp. 475—484. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-6-475-484.
6. *Шумейко В. И., Кудинов О. А.* Об особенностях проектирования уникальных, большепролетных и высотных зданий и сооружений // Инженерный Вестник Дона. 2013. № 4(27). С. 281.
7. *Шимановский В. Н., Гордеев В. Н., Гринберг М. Л.* Оптимальное проектирование пространственных решетчатых покрытий. Киев: Будівельник, 1987. 223 с.
8. *Зуева И. И., Иванова С. Л.* Особенности проектирования структурных конструкций типа «ЦПИИСК» // Вестник ПНИНУ: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 1. С. 91—97.
9. *Schueller W.* Horizontal-Span Building Structures. John Wiley and Sons, 1983. 594 p.
10. *Gerrits, J. M.* An Architectonic Approach of Choosing a Space Frame System // Lightweight Structures in Architecture. Engineering and Construction. 1998. Vol. 2. Pp. 992—999.
11. *Yang X., Bai Y., Ding F.* Structural Performance of a Large-Scale Space Frame Assembled Using Pultrudcd GFRP Composites // Composite Structures. 2015. Vol. 133. Pp. 986—996.

12. *Bai Y., Yang X.* Novel Joint for Assembly of All-Composite Space Truss Structures: Conceptual Design and Preliminary Study // Journal of Composites for Construction. 2012. Vol. 17. Iss. I. Pp. 130—138.

13. *Makowski Z. S.* Development of Jointing Systems for Modular Prefabricated Steel Space Structures // П Proceedings of the International Symposium. Warsaw: IASS Polish Chapter, 2002. Pp. 17—41.

14. *Холопов И. С., Бальзанников М. И., Алпатов В. Ю.* Применение решетчатых пространственных металлических конструкций в покрытиях машинных залов ГЭС // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 28(47). С. 225—232.

15. *Кирсанов М. Н.* Статический расчет и анализ пространственной стержневой системы // Инженерно-строительный журнал. 2011. Т. 24. № 6. С. 28—34.

16. *Хисамов Р. И.* Расчет и конструирование структурных покрытий. Киев: Будівельник, 1981. 79 с.

17. *Chilton J.* Space Grid Structures I J. Chilton. Boston: Architectural Press, 2000. 180 p.

18. *Allen E., Lano J.* Fundamentals of Building Construction. Materials and Methods: 6th ed. Wiley, 2013. 1024 p.

19. *Parke G. A. R., Disney P.* Space Structures 5. London: Thomas Telford Ltd, 2002. 1613 p.

20. *Edmondson A. C.* A Fuller Explanation: the Synergetic Geometry of R. Buckminster Fuller. Pueblo: Emergent World Press, 2007. 339 p.

21. *Makowski Z. S., Maranzano D., Parke G. A. R.* Influence of Boundary Conditions Upon Stress Distribution in Single-Layer Diagonal Grids. Shell and Spatial Structures: Computational Aspects, 1987. Pp. 159—172.

22. *Usama Rustom Madi.* The Elastoplastic Analysis of Pin-Jointed Spatial Structures // International Journal of Space Structures. 1985. Vol. 1. Iss. 4. Pp. 209—221.

23. *Ramaswamy G. S., Eckhout M., Suresh G. R.* Analysis Design and Construction of Steel Space Frames. London: Thomas Telford Ltd, 2002. 262 p.

24. *Lan T. T., Qian R.* A Study on the Optimum Design of Space Trusses-Optimal Geometrical Configuration and Selection of Type // Shells, Membranes and Space Frames. Proc. IASS Symp. Amsterdam: Elsevier, 1986. Pp. 191—198.

© Голиков А. В., Федоров А. Н., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Голиков А. В., Федоров А. Н. Применение круглой стали в большепролетных структурных покрытиях // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 25—46.

Об авторах:

Голиков Александр Владимирович — канд. техн. наук, доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; alexandr_golikov@mail.ru

Федоров Аркадий Николаевич — магистрант, каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; fedorov.arkadiy.nikolaevich@gmail.com

Alexander V. Golikov, Arkady N. Fedorov

Volgograd State Technical University

APPLICATION OF ROUND STEEL IN LARGE SPAN STRUCTURAL COATINGS

In this study, the modeling of a vaulted large-span structural cover with two variable parameters was carried out: the total height of the cover structure section and the height of the boom of the main

arch arches. After analyzing 12 variants of design schemes, the most rational relationships between the overall geometric dimensions of the structure were determined.

The study of the nature of the structure's work was carried out in two main stages. The calculation at the first stage made it possible to establish at what ratios of the overall parameters of the structure a large area of stretched zones is realized. Based on the results of a series of calculations at the second stage of the study, taking into account the introduction of rods with a cross section of round steel into operation, an assessment was made of the phenomenon of changes in metal consumption when varying the main overall dimensions of the structure.

The structural scheme with the ratio of the height of the section of the shell of the structure to the span equal to 1/15 and the ratio of the height of the boom of the main arches to the span equal to 1/3 is established as the most effective in application.

The results of the study substantiated that the most rational constructive form of structural large-span structures according to the cost criterion is a structure made using a range of round steel as sections of stretched elements.

It has been established that a decrease in the metal consumption of the proposed structural scheme of the coating is achieved, first of all, by the use of effective ratios between the overall dimensions of the structure and, secondly, by the use of round steel bars as a cross-section.

K e y w o r d s: large-span coatings, vaulted roofs, spatial roofs, structural roofs, round steel, arch geometry, rational constructive solution.

For citation:

Golikov A. V., Fedorov A. N. [Application of round steel in large span structural coatings]. *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], 2021, iss. 1, pp. 25—46.

About authors:

Alexander V. Golikov — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; alexandr_golikov@mail.ru

Arkady N. Fedorov — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; fedorov.arkadiy.nikolaevich@gmail.com

УДК 692.426

И. А. Горсков, А. В. Голиков, Д. Г. Кузнецов

Волгоградский государственный технический университет

ЭФФЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ АРОК КОМБИНИРОВАННОГО ТИПА

Выполнена оптимизация конструктивной схемы арочного большепролетного покрытия комбинированного типа на основании анализа существующих типов большепролетных покрытий, характера их статической работы, распределения усилий в стержнях, возникающих при работе конструкции, нагруженной различными сочетаниями нагрузок. Определены оптимальные геометрические параметры железобетонного пояса и стальной решетки для возможности дальнейшего проектирования на основе полученных расчетных данных.

Критерием оптимизации конструктивной схемы большепролетного арочного покрытия комбинированного типа является создание расчетной модели для перераспределения усилий в стержнях стальной решетки на основании суммарной составляющей изгибающих моментов, возникающих при действии сочетания различных нагрузок.

Исследование основывалось на численном и графическом моделировании, идеализации расчетных схем, обобщении полученных данных и их анализе.

Получена эффективная конструктивная схема большепролетного арочного покрытия комбинированного типа с геометрическими параметрами, соответствующими рациональному распределению усилий в стержнях стальной решетки и железобетонного пояса. Данная конструктивная схема подтверждает свою эффективность значительным снижением массы элементов за счет уменьшения сечения продольного армирования железобетонного пояса и перераспределения усилий, что позволило существенно снизить количество сжимаемых элементов.

Эта конструктивная схема большепролетного арочного покрытия комбинированного типа позволит выполнять проектирование соответствующих конструкций минимальной материалоемкости и стоимости, что достигается путем совместной работы железобетонной оболочки покрытия и стальной решетчатой арки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: большепролетные покрытия, арка, изгибающий момент, усилия, пояс фермы, железобетон, сталь, конструкции сталежелезобетонные, эффективная конструктивная схема, оптимизированное конструктивное решение.

Введение

Большепролетные конструкции покрытия в современном мире представлены разнообразными типами конструктивных схем, которые имеют различный характер работы, связанный с тем или иным эксплуатационным фактором. В России для промышленных предприятий преимущественно используются конструкции покрытий балочной системы, которые представлены в виде ряда конструктивных схем с применением ферм, рам, балок, арочных покрытий. Существующие типы покрытий выполнены либо стальными, либо реализованы в железобетоне. На сегодняшний день требуется разработка таких проектных решений, которые способны сократить себестоимость строительства и его сроки. Для совершенствования существующих конструктивных решений и разработки новых эффективных конструкций необходимо оптимизировать конструктивную схему сооружения, предложить оптимальные конструкции, усилия в которых при работе под нагрузкой будут распределены в соответствие с эффективной работой материала конструкций: стальные элементы — на растяжение, железобетонные — на восприятие сжимающих усилий.

Для определения направления рационализации несущих конструкций большепролетных зданий был изучен опыт создания конструктивной формы большепролетных покрытий, представленный в научных публикациях отечественных и зарубежных авторов.

Основные виды конструкций, применяемые при строительстве большепролетных зданий рассмотрены П. И. Клочко и Д. А. Протопоповой [1].

Эффективность применения и анализ работы сталебетонных сечений в большепролетных конструкциях рассмотрены в работах А. С. Бобкова, В. В. Веселова, Д. И. Назаренко, P. Krishna, L. Lisheng [2—7].

Особенности проектирования большепролетных конструкций и современные технологии монтажа описаны в работах А. А. Семенова, И. У. Манаповой [8, 9].

Особенности напряженно-деформированного состояния большепролетных конструкций рассмотрены в работе Г. М. Кравченко, Е. В. Труфановой [10].

Применение и характер работы арочных большепролетных покрытий, анализ и расчет криволинейных арочных покрытий рассмотрен в статьях А. С. Кудасовой, У. Т. Назарбая [11, 12].

Варианты усиления железобетонных большепролетных конструкций описаны в статье А. А. Давидюк, А. Е.Артемьевой [13].

Вопросы и методы оптимизации и поиска рациональных геометрических параметров большепролетных конструкций покрытий описаны в работах М. Р. Гарифуллина, А. В. Мущанова [14, 15].

Характер работы комбинированной фермы покрытия описан у Д. В. Говорок, К. А. Фролова [16].

Предметом данного исследования стало явление распределения усилий, напряжений и деформации в существующих и предлагаемых к внедрению в практику строительства конструктивных схемах большепролетных покрытий.

Объект исследования — конструктивная схема большепролетного покрытия.

Целью исследования является оптимизация конструктивной схемы большепролетного покрытия в направлении применения комбинированного типа конструкций и обоснование его эффективности.

Данное исследование выполнено путем анализа существующих конструктивных схем большепролетных покрытий с применением методов численного моделирования конструкций с последующим установлением качественных и количественных характеристик изменения напряженно-деформированного состояния (НДС). Моделирование и анализ конструктивных схем покрытия комбинированного типа выполнен в среде программного комплекса ЛИРА-САПР [17].

Методы, применяемые в данном исследовании: численное и графическое моделирование, идеализация, анализ, численный эксперимент, обобщение.

Новейшие разработки в области автоматизации процессов проектирования позволяют производить расчет строительных конструкций с полными численными характеристиками и достаточно точной визуализацией работы конструкций в целом и их отдельных элементов, с минимизацией временных затрат на рассмотрение множества различных вариантов таких схем, что создает предпосылки для разработки новых и оптимизации уже существующих конструктивных схем. Основная проблема практического внедрения полу-

ченных результатов связана с отсутствием обоснований эффективности и технологии производства, монтажа и испытаний подобных конструкций.

Научная новизна исследования состоит в установлении явлений распределения напряжений и деформаций в несущих конструкциях выбранного типа при варьировании основных геометрических параметров конструкции с учетом комбинированной работы стали и железобетона при действии основных сочетаний нагрузок.

Численные исследования работы существующих большепролетных покрытий на серии моделей позволяют выявить недостатки и определить достоинства таких конструкций, обосновать выбор направления оптимизации конструктивной схемы.

Практическая значимость исследования состоит в формализации полученных данных о явлении распределения НДС в виде рекомендаций по выбору эффективной конструктивной схемы и совершенствованной методики расчета несущих конструкций покрытия арочного типа.

В процессе исследования определен характер работы различных вариантов арочных большепролетных покрытий комбинированного типа, оптимизирована конструктивная схема для трех типов конструкции арок.

Исследование проводилось в несколько этапов, путем решения ряда задач:

- обзор и критический анализ существующих конструктивных схем, анализ работы под нагрузкой несущих конструкций покрытий;
- разработка численных моделей выбранных конструктивных схем большепролетных покрытий;
- сбор и приложение нагрузок, расчет усилий от действия отдельных нагрузок их сочетаний;
- анализ распределения усилий в конструктивных схемах трех типов арок;
- графическое моделирование эффективной геометрической схемы;
- анализ распределения усилий в полученных конструктивных схемах, выводы по результатам исследования.

При этом использовались автоматизированные системы проектирования, которые позволяют рассматривать множество конструктивных схем и определять характер их работы как в решении плоской задачи, так и в составе пространственной конструкции [17].

Результаты исследования позволили определить оптимальные геометрические параметры конструктивной схемы большепролетного покрытия комбинированного типа, получить расчетные данные для использования в проектировании.

При исследовании применены программный комплекс автоматизированного проектирования AutoCAD и расчетные комплексы «ЛИРА-САПР», SCAD Office [17, 18].

Основная часть

Большепролетные конструкции покрытий по статической работе делятся:

- на плоскостные (балки, фермы, рамы, арки);
- пространственные (оболочки, складки, висячие системы, перекрестно-стержневые системы и др.).

В данном исследовании рассмотрим плоскостные типы большепролетных конструкций.

Балочные, рамные и арочные плоскостные системы в своих конструктивных схемах не учитывают совместную работу всех несущих элементов, это приводит к значительному увеличению массы конструкций, что в свою очередь требует проектирования дополнительных связей для снижения массы конструкций и перераспределения нагрузок.

Применение балочных конструкций при больших пролетах ограничивается прогибом, который может компенсироваться увеличением строительного подъема либо увеличением сечения, но при этом увеличивается масса конструкции и металлоемкость. Таким образом, использование балок ограничивается величиной пролета до 40 м.

Применение решетчатых конструкций, таких как фермы, позволяет выполнять перекрытие пролетов до 60 м. При увеличении пролета конструкция становится неэффективной в результате значительного увеличения массы элементов поясов и решетки, а также их геометрических параметров, таких как высота.

Рамные конструкции, как и конструкция ферм, ограничены величиной прогиба ригеля, а также гибкостью вертикальных стоек. Это требует характерных конструктивных решений, связанных с увеличением сечения стоек, высоты строительного подъема ригеля.

Характерной особенностью арочных покрытий является работа в распор, за счет возникающих в поясе арке сжимающих усилий, максимальных в опорных зонах, что требует применения конструктивных решений способных компенсировать данные усилия. Такими мероприятиями являются устройство затяжек, свайных фундаментов с наклонными сваями, подпорных стенок. Преимуществом арочных покрытий является возможность их применения в больших и сверхбольших пролетах.

При использовании арочных покрытий в больших пролетах в стержневой системе арки в зависимости от типа закрепления и действующих нагрузок возникают изгибающие моменты, которые в современном строительстве компенсируются увеличением сечения поясов, увеличением сечения рабочей арматуры. При пролетах свыше 60 м данные мероприятия приводят к значительному увеличению массы покрытия.

Применение в арочных покрытиях большого пролета компенсационных мероприятий в виде включения в работу ферменной решетки стального сечения, способствует перераспределению изгибающих моментов в растягивающие и сжимающие усилия, что позволит значительно сократить массу конструкции. При использовании в качестве сжатого пояса арки стержней железобетонного сечения и ферменной решетки стального сечения достигается рациональное распределение усилий в стержнях в соответствии с характеристиками используемых материалов.

При определении параметров работы конструктивной схемы большепролетного арочного покрытия комбинированного типа при различных схемах закрепления и сочетании нагрузок принята местность строительства — город Салават Республики Башкортостан.

В соответствии с предшествующим исследованием эффективной рациональной схемой большепролетного арочного покрытия комбинированного типа является покрытие с пролетом 120 м, высотой 24 м. На основании исходных данных произведем сбор нагрузок.

Сбор нагрузок и расчет конструкций вели с учетом следующих условий строительства (табл. 1).

Таблица 1

Условия строительства

Уровень ответственности здания по ГОСТ 27751—2014	1а
Коэффициент надежности по ответственности по ГОСТ 27751—2014	1,2
Снеговой район по СП 20.133330.2016 «Нагрузки и воздействия»	V
Ветровой район по СП 20.133330.2016 «Нагрузки и воздействия»	III
Тип местности по ветровой нагрузке по СП 20.133330.2016 «Нагрузки и воздействия»	А

Собственный вес элементов покрытия учитывается программным комплексом.

Вес снегового покрова на 1 м^2 горизонтальной проекции земли в соответствии с СП 20.13330-2016 составляет S = 2,5 кН/м^2 (V снеговой район).

Величина снеговой нагрузки определена с использованием программного комплекса SCAD в приложении ВеСТ с параметрами большепролетного покрытия [18] (рис. 1, 2).

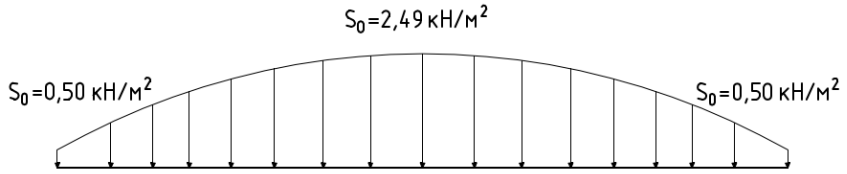


Рис. 1. Эпюра распределения снеговой нагрузки «Снег-1», кН/м^2

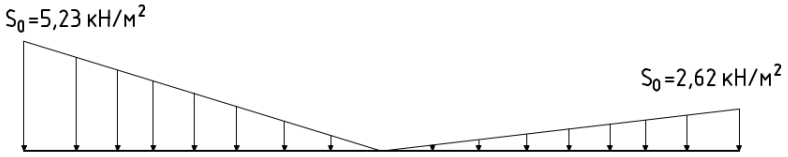


Рис. 2. Эпюра распределения снеговой нагрузки «Снег-2», кН/м^2

Нормативное значение ветровой нагрузки следует определять как сумму средней и пульсационной составляющих:

$$w = w_m + w_p, \quad (1)$$

где w_m — нормативное значение средней составляющей; w_p — нормативное значение пульсационной составляющей.

Нормативное значение средней составляющей определяется по формуле, в зависимости от эквивалентной высоты z_e:

$$w_m = w_0 k_{(z_e)} c, \quad (2)$$

где w_0= 0,38 кПа = 38 кгс/м^2 — нормативное значения ветрового давления.

Величина ветровой нагрузки определена с использованием программного комплекса SCAD в приложении ВеСТ с параметрами большепролетного покрытия [18] (рис. 3, табл. 2).

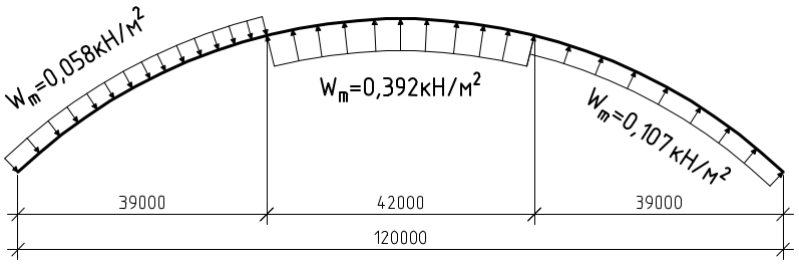


Рис. 3. Эпюра распределения ветровой нагрузки

Таблица 2

Основные значения ветровой нагрузки

Расстояние от края кровли, м	Нормативное значение, т/м^2	Расчетное значение, т/м^2
0…39	0,058	0,078
39…81	–0,392	–0,549
81…120	–0,107	–0,157

Значения пульсационной составляющей и собственного веса определяется программным комплексом ПК «ЛИРА» по СП 20.13330-2016 на основе модального анализа [17].

Нагрузка от покрытия определялась как суммарная составляющая нормативных нагрузок от конструкции кровельного покрытия и ребристых железобетонных плит (рис. 4).

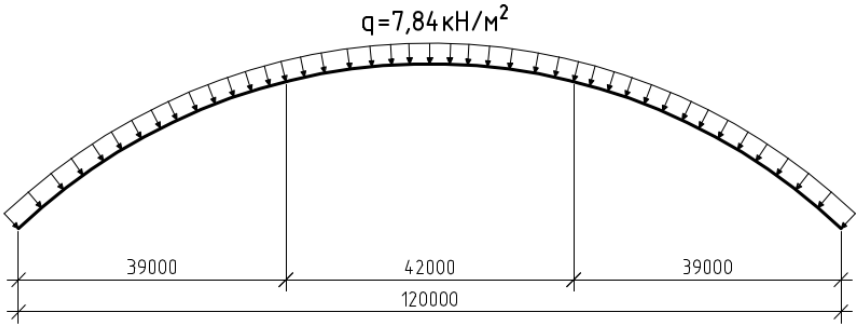


Рис. 4. Эпюра распределения нагрузки от покрытия

В целях анализа и определения характера работы большепролетных арочных покрытий при действии нагрузок было рассмотрено 3 варианта закрепления арок: бесшарнирное, двухшарнирное и трехшарнирное.

Эпюры распределения изгибающих моментов в бесшарнирной арке приведены на рис. 5—8.

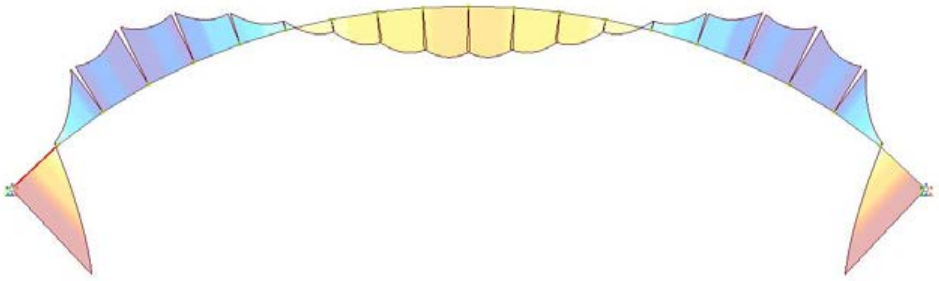


Рис. 5. Эпюра изгибающих моментов при действии нагрузки от веса покрытия для бесшарнирной арки

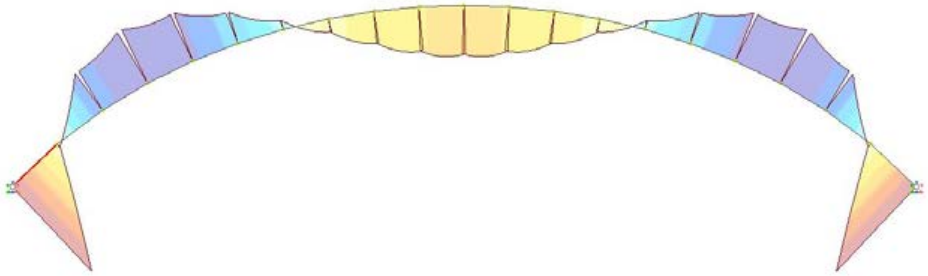


Рис. 6. Эпюра изгибающих моментов при действии нагрузки «Снег-1» для бесшарнирной арки

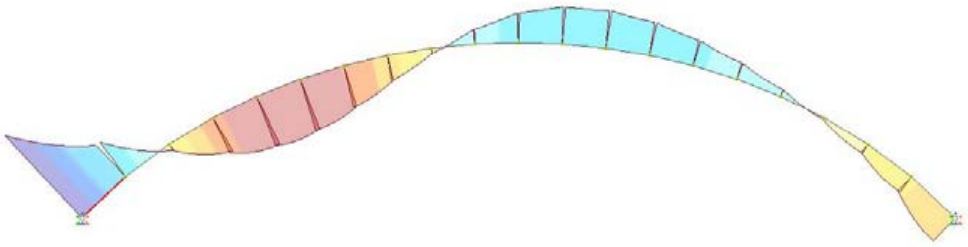


Рис. 7. Эпюра изгибающих моментов при действии нагрузки «Снег-2» для бесшарнирной арки

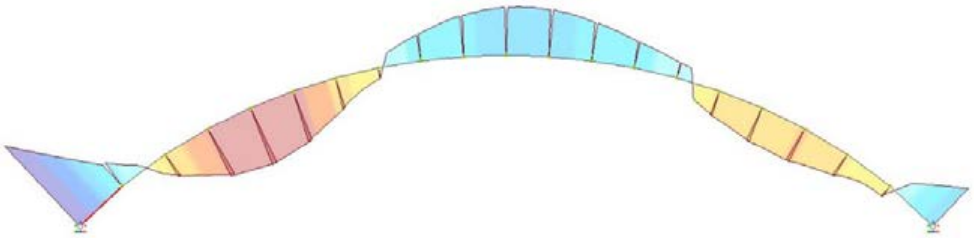


Рис. 8. Эпюра изгибающих моментов при действии нагружения «Ветер» для бесшарнирной арки

Основные значения усилий при различных нагрузках для бесшарнирной арки сведены в табл. 3.

Таблица 3

Основные значения усилий большепролетного бесшарнирного арочного покрытия

Наименование нагрузки	M_{min}, кНм	M_{max}, кНм	R_{x1}, кН	R_{z1}, кН	R_{x2}, кН	R_{z2}, кН
Покрытие	202,37	360,32	393,2	325,3	–393,2	325,3
Снег-1	1333,27	2558,74	1500,8	1009,8	–1500,8	1009,8
Снег-2	2310,25	4649,54	959,64	1569,5	–959,64	905,12
Ветер	495,20	940,35	–95,21	–72,3	165,19	–113,63

Эпюры распределения изгибающих моментов в двухшарнирной арке приведены на рис. 9—12.

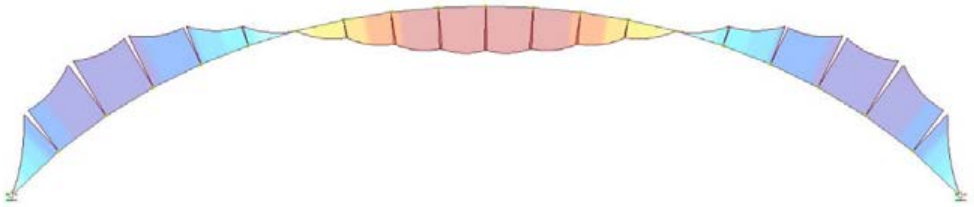


Рис. 9. Эпюра изгибающих моментов при действии нагрузки от покрытия для двухшарнирной арки

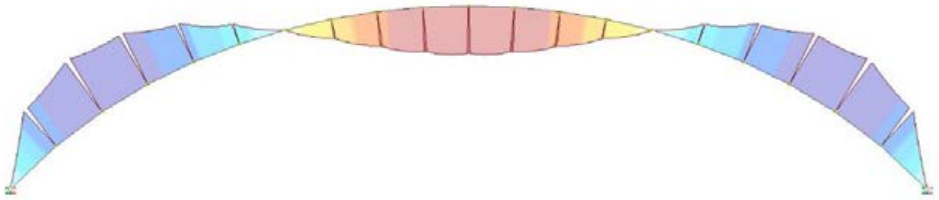


Рис. 10. Эпюра изгибающих моментов при действии нагружения «Снег-1» для двухшарнирной арки

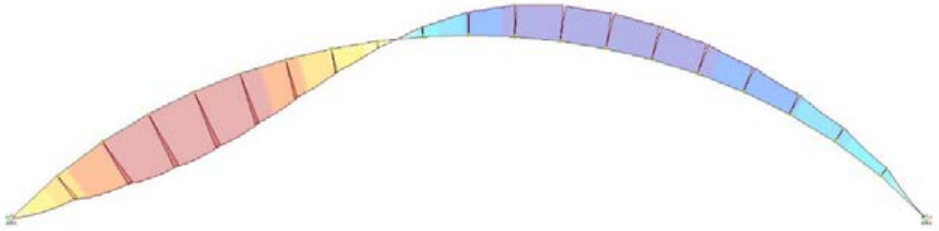


Рис. 11. Эпюра изгибающих моментов при действии нагружения «Снег-2» для двухшарнирной арки

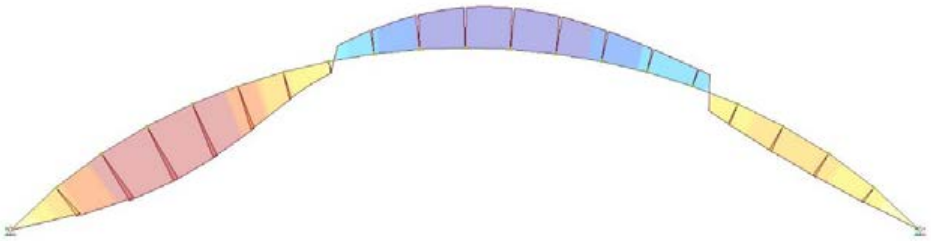


Рис. 12. Эпюра изгибающих моментов при действии нагружения «Ветер» для двухшарнирной арки

Основные значения усилий при различных нагрузках для двухшарнирной арки сведены в табл. 4.

Таблица 4

Основные значения усилий большепролетного двухшарнирного арочного покрытия

Наименование нагрузки	M_{min}, кНм	M_{max}, кНм	R_{x1}, кН	R_{z1}, кН	R_{x2}, кН	R_{z2}, кН
Покрытие	249,17	343,77	374,26	325,3	–374,26	325,3
Снег-1	1764,32	2256,88	1365,6	1009,8	–1365,6	1009,8
Снег-2	2533,23	4309,33	1049,2	1519,1	–1049,2	955,5
Ветер	785,94	1113,72	–221,4	–97,2	191,33	–128,35

Эпюры распределения изгибающих моментов в трехшарнирной арке приведены на рис. 13—16.

Рис. 13. Эпюра изгибающих моментов при действии нагрузки от покрытия для трехшарнирной арки

Рис. 14. Эпюра изгибающих моментов при действии нагружения «Снег-1»

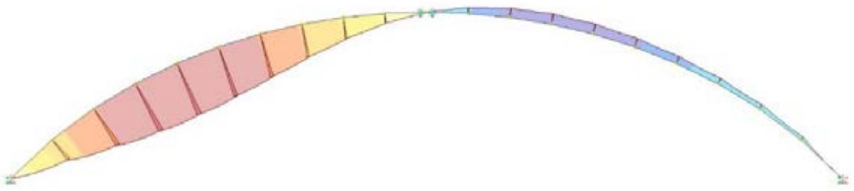


Рис. 15. Эпюра изгибающих моментов при действии нагружения «Снег-2»

Рис. 16. Эпюра изгибающих моментов при действии нагружения «Ветер»

Основные значения усилий при различных нагрузках для трехшарнирной арки сведены в табл. 5.

Таблица 5

Основные значения усилий трехшарнирного большепролетного арочного покрытия

Наименование нагрузки	M_{min}, кНм	M_{max}, кНм	R_{x1}, кН	R_{z1}, кН	R_{x2}, кН	R_{z2}, кН
Покрытие	15,01	442,66	384,2	325,3	–384,2	325,3
Снег-1	48,75	3056,2	1438,6	1009,8	–1438,6	1009,8
Снег-2	1017,59	5364,59	979,8	1519,1	–979,79	955,5
Ветер	163,88	1358,48	–22,0,95	–83,6	190,93	–114,7

На основании полученных эпюр изгибающих моментов для определения характера работы арочных покрытий были смоделированы обобщенные модели эпюр изгибающих моментов для наиболее неблагоприятных воздействующих нагрузок для каждого типа закрепления арки (рис. 17—19).

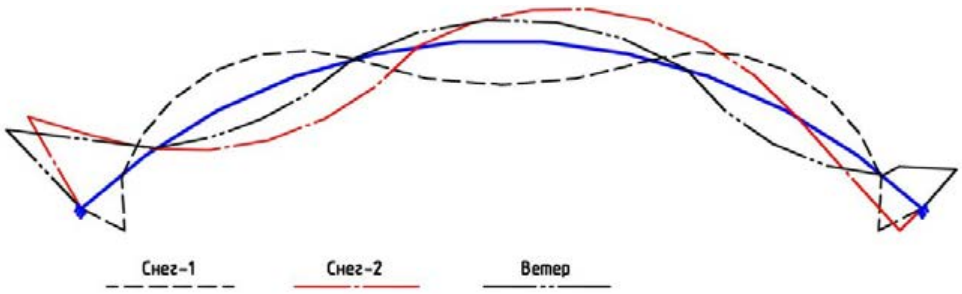


Рис. 17. Сочетание эпюр изгибающих моментов для бесшарнирного большепролетного арочного покрытия

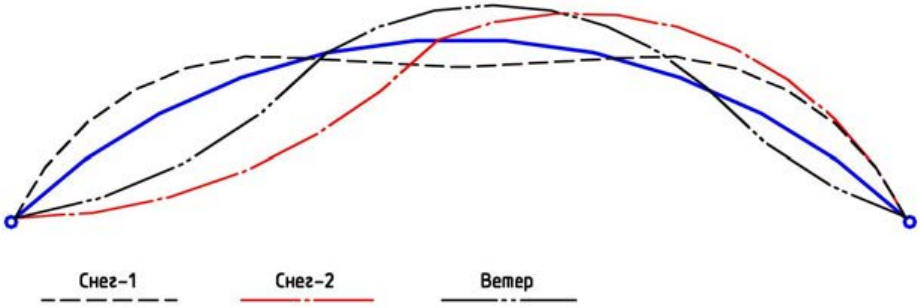


Рис. 18. Сочетание эпюр изгибающих моментов для двухшарнирного большепролетного арочного покрытия

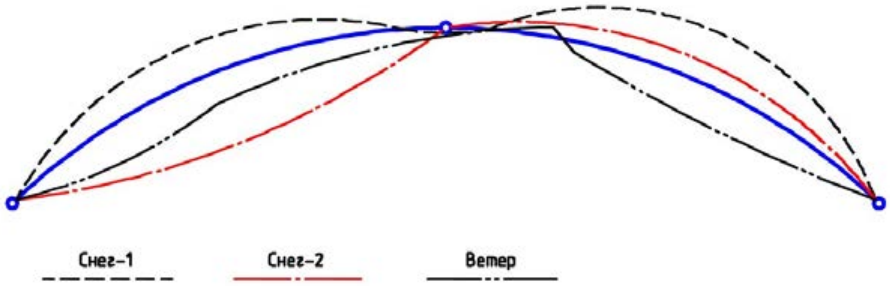


Рис. 19. Сочетание эпюр изгибающих моментов для трехшарнирного большепролетного арочного покрытия

На основании полученных сочетаний эпюр изгибающих моментов для трех типов большепролетных арочных покрытий с целью эффективного перераспределения усилий в стержнях были смоделированы конструктивные схемы арочного покрытия, представляющие собой верхний пояс из железобетона и нижний пояс в виде ферменной решетчатой конструкции из стальных стержней с геометрическими характеристиками, соответствующими совокупности очертаний эпюр изгибающих моментов.

Особенностью работы бесшарнирного арочного покрытия является возникновение изгибающего момента на опорах, что требует мероприятий по его компенсации. Единственным эффективным вариантом является применение решетчатой арки традиционного очертания, но с уменьшенной высотой арки (рис. 20, табл. 6).

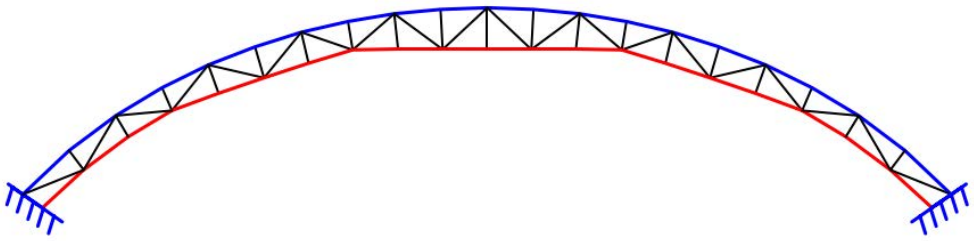


Рис. 20. Эффективная конструктивная схема бесшарнирного арочного большепролетного покрытия комбинированного типа

Таблица 6

Основные значения усилий оптимизированной конструктивной схемы арочного большепролетного покрытия при бесшарнирном закреплении

Наименование нагрузки	M_{max}, кНм	$N_{рас}$, кН	$N_{сж}$, кН
Покрытие	55,306	88,29	479,18
Снег-1	304,04	605,26	1877,8
Снег-2	1717	360,54	1898,9
Ветер	293,84	280,64	142,15

Отличительной особенностью работы оптимизированной конструктивной схемы двухшарнирного арочного покрытия от бесшарнирного является отсутствие изгибающего момента в опорной зоне конструкции. Максимальный изгибающий момент в данной схеме возникает в узле крепления нижнего стального пояса к верхнему железобетонному, что требует увеличения сечения железобетонного пояса (рис. 21, вар. 2, табл. 7), либо компенсирующих мероприятий в виде устройства оттяжек при применении классического решения (рис. 21, вар. 1).

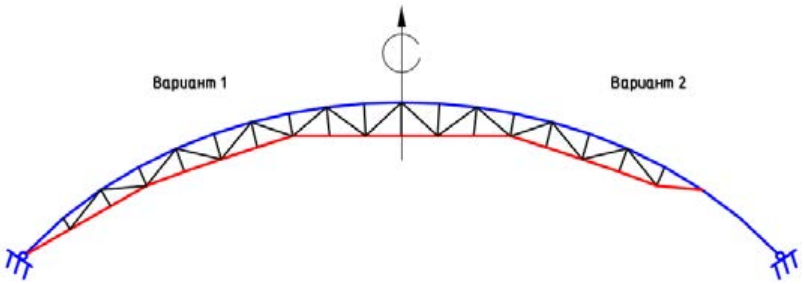


Рис. 21. Конструктивные схемы двухшарнирного арочного большепролетного покрытия: вариант 1 — классический тип; вариант 2 — эффективная конструкция комбинированного типа

Таблица 7

Основные значения усилий оптимизированной конструктивной схемы большепролетного арочного покрытия при двухшарнирном закреплении

Наименование нагрузки	M_{max}, кНм	$N_{рас}$, кН	$N_{сж}$, кН
Покрытие	59,94	93,151	484,2
Снег-1	302,74	644,79	1920,6
Снег-2	2174	631,78	1876,3
Ветер	410,25	294,06	155,58

Отличительной особенностью трехшарнирной схемы является характер работы ферменной решетки при различных типах загружений. Так, при статическом нагружении равномерно-распределенной вертикальной нагрузкой растягивающие усилия воспринимаются раскосами. При воздействии неравномерных нагрузок («Снег-2», «Ветер») растягивающие усилия воспринимаются поясами и стойками ферменной решетки (рис. 22, табл. 8).

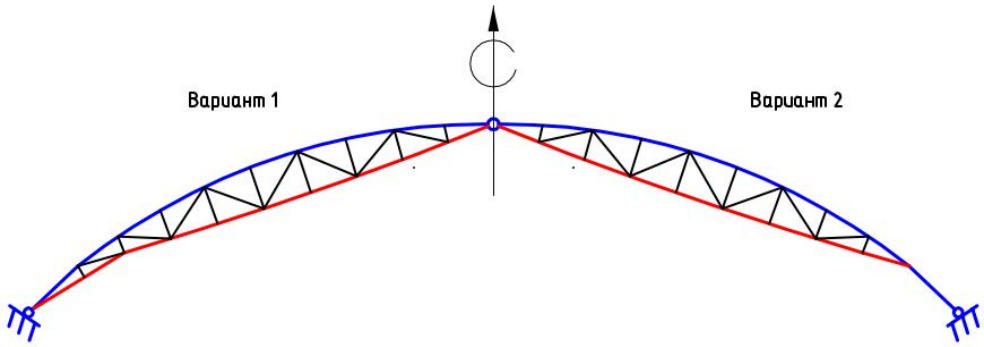


Рис. 22. Конструктивные схемы трехшарнирного арочного большепролетного покрытия: вариант 1 — классический тип; вариант 2 — эффективная конструкция комбинированного типа

Таблица 8

Основные значения усилий оптимизированной конструктивной схемы большепролетного арочного покрытия при трехшарнирном закреплении

Наименование нагрузки	M_{max}, кНм	$N_{рас}$, кН	$N_{сж}$, кН
Покрытие	46,003	53,46	380,39
Снег-1	230,49	351,73	1415,7
Снег-2	316,28	1208,1	2768,6
Ветер	414,72	242,32	77,96

Полученные оптимизированные конструктивные схемы большепролетного покрытия комбинированного типа отвечают условиям рационального распределения усилий в стержнях: основные растягивающие усилия — в нижнем поясе, выполненном из стали, максимальные сжимающие усилия — в верхнем поясе из железобетона.

Полученные результаты подтверждают эффективность использования большепролетных покрытий комбинированного типа.

Расчетные параметры и характер работы оптимизированных схем большепролетного покрытия комбинированного типа создают предпосылки для дальнейшего расчета и конструирования данного типа покрытий с углубленным изучением работы сечений поясов и ферменной решетки при расчете данных конструкций в условиях пространственных схем.

Выводы по результатам исследования

1. Разработаны эффективные комбинированные конструктивные схемы большепролетного покрытия трех типов — бесшарнирные арочные системы, двух- и трехшарнирные арочные системы с рациональной конфигурацией формы несущих арок, позволяющей эффективно воспринимать действующие усилия с минимизацией расчетной площади сечений конструктивных элементов.

2. Предложенный тип покрытий по отношению к аналогичным системам из стали позволяет снизить расход материала за счет объединения в совместную работу стальных плоских арочных ферм с железобетонной оболочкой диска покрытия и является перспективным для применения в качестве покрытий большепролетных сооружений.

3. Исследование большепролетного покрытия комбинированного типа показало, что данный тип конструкции по своим расчетным характеристикам превосходит однопоясные системы арочных покрытий по таким параметрам как снижение усилий в стержнях и, соответственно, по критерию снижения металлоемкости и себестоимости строительства.

Перспективы дальнейших исследований

Для внедрения предложенных комбинированных конструкций арок покрытия в практику строительства необходимо выполнить разработку и расчет основных узлов конструкций, разработку технологии изготовления комбинированных конструкций и разработку технологии монтажа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Клочко П. И., Протопопова Д. А.* Основные виды конструкций, применяемые при строительстве большепролетных зданий // Донской государственный технический университет. DOI: 10.18411/lj-01-2019-65.

2. *Опанасенко Е. В.* Эффективность применения сталебетонных конструкций в каркасах промышленных зданий // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе. 2013. № 3. С. 355—360.

3. *Бобков А. С., Савкин Г. А.* Исследование работы сталебетонных балок // Молодежный научный форум: технические и математические науки, 2016. № 10(39). С. 88—92.

4. *Веселов В. В., Егоров В. В., Козуб Ю. С.* Применение сталебетонных конструкций в каркасах современных зданий и сооружений // БСТ: Бюллетень строительной техники. 2020. № 2(1026). С. 47—49.

5. *Назаренко Д. И., Ныркова Е. В., Задорожный А. В.* Прочность нормальных сечений и жесткость сталежелезобетонных балок // Актуальные проблемы современной науки, техники и образования. 2016. № 2. С. 52—54.

6. *Krishna P.* A Review of Developments in Steel: Implications for Long-Span Structures // Trans Indian Inst Met. 2021. DOI: 10.1007/s12666-020-02173-7.

7. *Lisheng Luo, Xiaofeng Zhang.* Flexural Response of Steel-Concrete Composite Truss Beams // College of Civil Engineering and Architecture, Hainan University, Haikou 570228, China 2 College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China. Vol. 2019. Article ID 1502707. 15 p.

8. Вариантное проектирование конструкций покрытия большепролетного спортивного сооружения / А. А. Семенов, Д. А. Демидова, А. А. Нафикова, С. С. Зимин, Д. И. Николаев // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. № 5(68). С. 24—35.

9. *Манапова И. У.* Современные технологии строительства большепролетных зданий из железобетонных предварительно-напряженных конструкций // Colloquium-journal. 2020. № 2-2(54). С. 125—126.

10. *Кравченко Г. М., Труфанова Е. В., Суслопаров Д. А, Боженкова Ю. М.* Напряженно-деформированное состояние конструкций каркаса при варьировании снеговой нагрузки // Строительство и архитектура. 2019. № 2(7). С. 5—9.

11. *Кудасова А. С., Колотиенко М. А., Тютина А. Д.* Арочные опорные контуры большепролетных спортивных объектов с висячими покрытиями: конструктивные и архитектурные особенности // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. 2020. № 4(34). С. 43—47.

12. *Назарбай У. Т.* Анализ применения и расчет криволинейных железобетонных арочных конструкций в строительстве // Наука и инновационные технологии. 2018. № 8(8). С. 190—194.

13. *Давидюк А. А, Артемьев Е. А., Шевкунова М. В.* Сравнение способов усиления большепролетных изгибаемых железобетонных конструкций // Промышленное и гражданское строительство. 2020. № 12. С. 76—81.

14. Поиск рациональной геометрической схемы пространственной металлической конструкции покрытия большепролетного спортивного сооружения / М. Р. Гарифуллин, С. А. Семенов, С. В. Беляева, И. А. Порываев и др. // Строительство уникальных зданий и сооружений. № 2(17). 2014. С. 107—124.

15. *Мущанов А. В., Мущанов В. Ф., Роменский И. В.* Рациональные геометрические и жесткостные параметры большепролетного структурного покрытия // Строительство уникальных зданий и сооружений. № 2(41). 2016. с. 18—29.

16. *Говорок Д. В., Фролов К. А.* Работа гибридной фермы покрытия // Инновации и инвестиции. 2020. № 7. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/rabota-gibridnoy-fermy-pokrytiya.

17. *Ромашкина М. А., Титок В. П.* Программный комплекс ЛИРА-САПР ®: руководство пользователя. Обучающие примеры / под ред. академика РААСН А. С. Городецкого. 2018. 254 с.

18. SCAD Office. Вычислительный комплекс SCAD : учебное пособие для студентов, обучающихся по направлению 653500 «Строительство» / В. С. Карпиловский и др. 4-е изд., перераб. и доп. Серия: Интегрированная система анализа конструкций Structure CAD. 2009. 647 с.

© Горсков И. А., Голиков А. В., Кузнецов Д. Г., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Горсков И. А., Голиков А. В., Кузнецов Д. Г. Эффективные конструкции большепролетных арок комбинированного типа // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 47—62.

Об авторах:

Горсков Иван Александрович — магистрант, каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; gorskov.i.a@gmail.com

Голиков Александр Владимирович — канд. техн. наук, доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; alexandr_golikov@mail.ru

Кузнецов Денис Григорьевич — канд. техн. наук, доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; tanidin@yandex.ru

Ivan A. Gorskov, Alexander V. Golikov, Denis G. Kuznetsov

Volgograd State Technical University

EFFICIENT CONSTRUCTIONS OF LARGE SPAN COMBINED TYPE ARCHES

In this study, the optimization of the structural scheme of an arched large-span pavement of the combined type was carried out on the basis of an analysis of the existing types of large-span pavements, the nature of their static work, and the distribution of forces in the rods arising during the operation of a structure loaded with various combinations of loads. Based on the calculation results, the optimal geometric parameters of the reinforced concrete belt and steel lattice were determined for the possibility of further design based on the calculated data.

The criterion for optimizing the structural scheme of a large-span arched roof of the combined type is the creation of a design model for the redistribution of forces in the rods of a steel lattice based on the total component of bending moments arising under the action of a combination of various loads.

The study was based on numerical and graphic modeling, idealization of design schemes, generalization of the data obtained and their analysis.

The result of the study is an effective structural scheme of a large-span arched roof of a combined type with geometric parameters corresponding to a rational distribution of forces in the rods of a steel lattice and a reinforced concrete belt. The resulting structural scheme confirms its effectiveness by a significant decrease in the mass of elements due to a decrease in the section of the longitudinal reinforcement of a reinforced concrete belt, as well as due to the redistribution of efforts, which made it possible to significantly reduce the number of compressible elements.

The obtained effective structural scheme of a large-span arched roof of the combined type will allow the design of structures of this type with minimum material consumption and, accordingly, cost, which is achieved by the joint operation of the reinforced concrete shell of the roof and a steel lattice arch.

K e y w o r d s: large-span roofs, arch, bending moment, forces, truss belt, reinforced concrete, steel, steel-reinforced concrete structures, effective structural scheme, optimized structural solution.

For citation:

Gorskov I. A., Golikov A. V., Kuznetsov D. G. [Efficient constructions of large span combined type arches]. *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], 2021, iss. 1, pp. 47—62.

About authors:

Ivan A. Gorskov — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; gorskov.i.a@gmail.com

Alexander V. Golikov — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; alexandr_golikov@mail.ru

Denis G. Kuznetsov — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; tanidin@yandex.ru

УДК 624.21

В. А. Пшеничкина, А. В. Петренко

Волгоградский государственный технический университет

КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ПРОГНОЗИРОВАНИЮ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВ

С позиции анализа жизненного цикла изложены вопросы обеспечения долговечности железобетонных автодорожных мостов на стадии проектирования, строительства и эксплуатации. Обоснованы преимущества вероятностного подхода при априорной оценке долговечности новых сооружений и уточнении остаточного срока эксплуатации существующих конструкций. Срок их полезного использования определяется целевыми значениями индекса надежности. Приведенный методический подход позволяет обосновать долгосрочные затраты на техническое обслуживание железобетонных мостов, а также планирование инвестиций в новое строительство.

К л ю ч е в ы е с л о в а: железобетонные автодорожные мосты, жизненный цикл, срок службы, долговечность, индекс надежности, элементы системы, структурные схемы надежности, отказ системы.

Введение

В последнее десятилетие для каждого участника дорожного движения становится заметным и очевидным резкое увеличение уличного трафика, и, особенно, тяжелого транспорта, вследствие чего резко возрастает нагрузка на дорожное полотно и транспортные сооружения.

Пик строительства железобетонных мостов в России пришелся на 1960—1980 гг. прошлого столетия. При эксплуатации предварительно напряженных железобетонных мостов, построенных в этот период, приходится учитывать:

- непредсказуемый, непропорциональный рост интенсивного движения;
- высокий износ конструкций;
- коррозию материала;
- повреждение элементов конструкции из-за механического воздействия;
- воздействия окружающей среды.

Ко вновь проектируемым железобетонным мостам предъявляются самые высокие и разносторонние требования. Задача расчета моста должна заключаться в минимизации общей стоимости эксплуатации с учетом запланированного срока службы. Однако для этого необходим надежный прогноз развития ущерба, который в настоящее время уже в значительной степени может быть выполнен на основе вероятностных моделей, позволяющих в инженерной форме обеспечить определенное предельное состояние с соответствующим уровнем надежности [1].

В данной статье, исходя из современного состояния научных знаний в этой области, изложены основные положения методики прогнозирования срока службы и долговечности железобетонных и предварительно напряженных железобетонных мостов.

Следует отметить различие между прогнозированием срока службы существующей мостовой конструкции и расчетом долговечности проектируемого сооружения. Прогноз срока службы эксплуатируемой мостовой конст-

рукции проводится на основе диагностической информации об ее текущем состоянии, механизмах повреждения, данных о фактических нагрузках и взаимодействии с окружающей средой, условиях эксплуатации. Расчет долговечности проектируемой конструкции проводится в рамках действующих норм с использованием статистической априорной информации об аналогичных объектах. При проектировании новых мостовых сооружений не проводится обследование конструкций, но ведется контроль качества материалов и строительных работ, а также климатических условий во время строительства. Внедряются новые системы мониторинга, которые позволяют своевременно обнаруживать изменения в состоянии конструкций, особенно на начальной стадии эксплуатации [2].

Ожидаемая продолжительность эксплуатации моста как центральный элемент анализа жизненного цикла

Анализ жизненного цикла постепенно приобретает популярность в железобетонном строительстве. Под анализом жизненного цикла обычно понимают выявление, анализ и стоимостную оценку всех затрат на проектирование, строительство, эксплуатацию и, при необходимости, демонтаж сооружения в контексте целостного взгляда на общую продолжительность его эксплуатации (рис. 1) [3].

Основной целью оценки жизненного цикла является поддержание наилучшего состояния конструкции на запланированном этапе эксплуатации с минимальными капиталовложениями. Мониторинг или обследования конструкций, а также оценка состояния и прогнозирование срока службы позволяют технически и экономически оптимизировать их эксплуатацию. Центральным элементом анализа жизненного цикла является вероятностный прогноз продолжительности жизни [4].

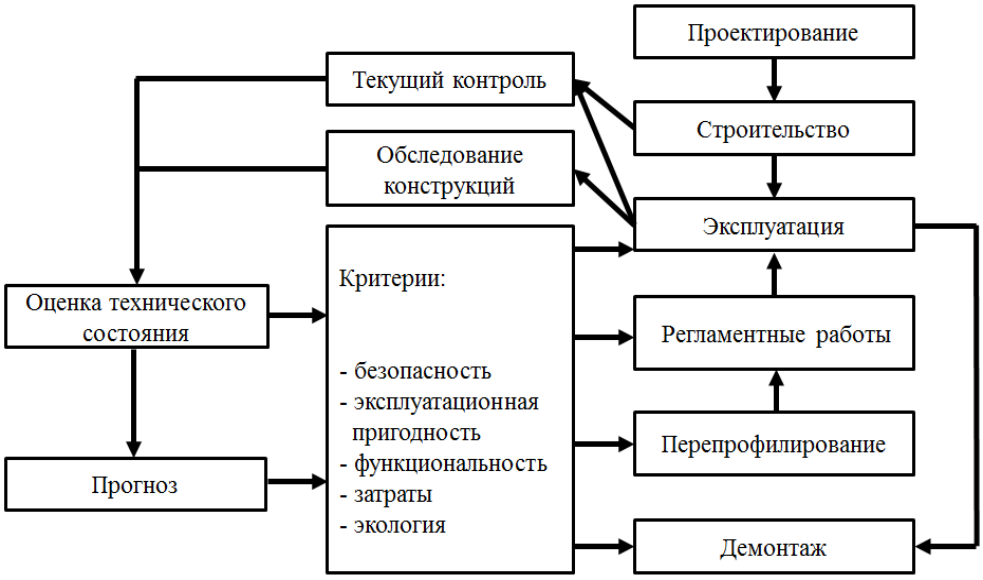


Рис. 1. Жизненный цикл сооружения, включающий контроль, управление качеством, прогноз и критерии принятия решения

Оценка и прогноз долговечности железобетонных конструкций

Согласно ГОСТ 27751-2014 долговечность конструкции считается гарантированной, если при ее проектировании учитываются:

- условия эксплуатации по назначению;
- расчетное влияние окружающей среды;
- свойства применяемых материалов, возможные средства их защиты от негативных воздействий среды, а также возможность деградации их свойств.

При проектировании железобетонных автодорожных мостов учитывается возможное влияние на них таких условий эксплуатации как попеременное замораживание и оттаивание, использование противоледных реагентов, выбросы промышленных производств, воздействие динамических нагрузок и др. С этой целью вводится классификация бетонов по стойкости по видам коррозии (ГОСТ 25192). Классы воздействия назначаются в качестве конкретных минимальных требований к сопротивлению, которые должны соблюдаться как предельные значения. Эта, так называемая *детерминированная модель проектирования*, основана на ожидаемом среднем сроке службы 50 лет с учетом «разумных» усилий по техническому обслуживанию. Конкретная технологическая информация стандарта основана на эмпирических данных и опыте эксплуатации. Применение стандарта зачастую приводит к неэкономичным или несовершенным строительным решениям, когда срок полезного использования сооружения или его части отличается от установленного в стандарте.

Другим существенным недостатком детерминированной концепции, заложенной в нормы, является то, что она не позволяет количественно оценить уровень надежности проектного решения.

На стадии эксплуатации расчеты остаточных сроков службы мостовых сооружений основаны, как правило, на экспертных оценках [5], которые носят субъективный характер, а результат напрямую зависит от квалификации экспертов.

Численные величины безопасности и долговечности можно оценить только на основе вероятностного подхода. Согласно *вероятностной концепции* изменяющееся во времени состояние конструкции может быть описано с помощью функций воздействия S_t и сопротивления R_t, действительных для соответствующего процесса повреждения (рис. 2, верхняя диаграмма). Поскольку процессы воздействия и сопротивления подвержены рассеиванию, как показано кривыми распределения, соответствующие физические модели должны быть сформулированы вероятностно. Площадь области перекрытия двух кривых распределения, которая увеличивается со временем, численно равна вероятности отказа конструкции P_f [6].

Расчет долговечности или прогнозирование срока службы требует не только знания функций воздействия и сопротивления, но также изучения физико-химических процессов разрушения и старения материалов конструкций с использованием аппарата теории вероятностей и теории надежности.

Старение и деградация материала конструкции

Ожидаемая продолжительность жизни конструкции в решающей степени зависит от того, насколько точно составлена модель старения конструкции. Помимо увеличения эксплуатационных нагрузок необходимо учитывать про-

цессы деградации бетона, вследствие которых уменьшается несущая способность конструкций. Наиболее опасными факторами, снижающими эксплуатационные качества железобетонных мостовых конструкций, являются карбонизация защитного слоя бетона и хлоридная коррозия.

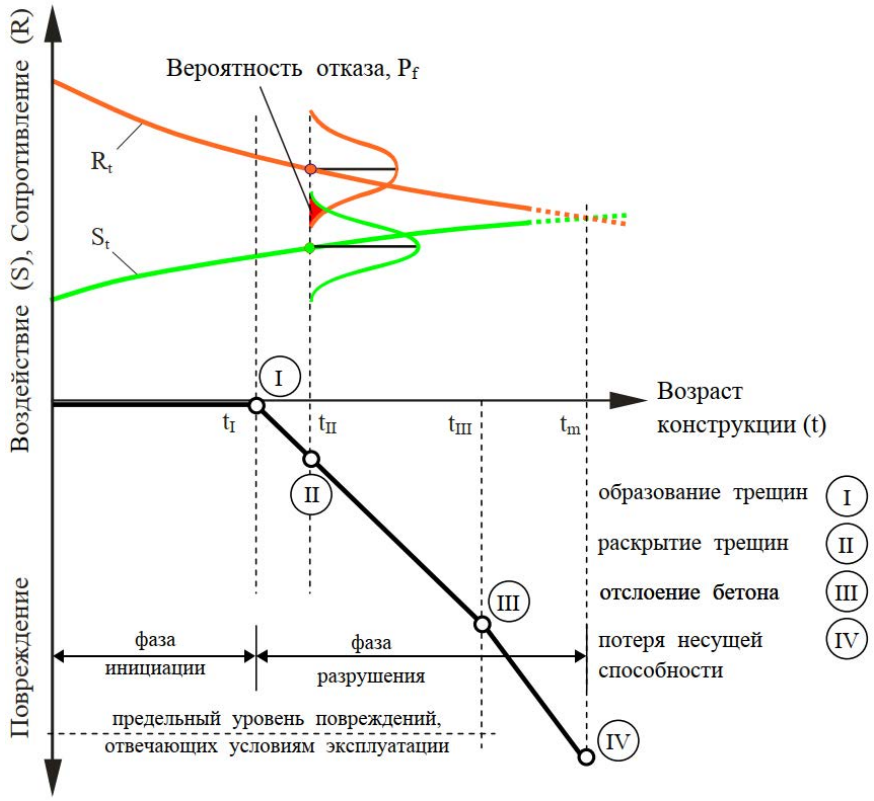


Рис. 2. Развитие состояния железобетонной конструкции при возрастающей нагрузке и убывающем характере несущей способности [6]

Для описания коррозионных процессов и их прогнозирования в настоящей работе рассматриваются модели карбонизации и диффузии хлоридионов в бетоне [7]. В процессе повреждения материал конструкций проходит несколько стадий. Каждая стадия (фаза) повреждения в общем случае описывается своим законом во времени. На рисунке 2 (нижняя диаграмма) показаны увеличивающиеся с течением времени повреждения и соответствующие им предельные состояния. В случае коррозии арматуры, вызванной карбонизацией, возможное предельное состояние достигается при снятии пассивирующей защиты арматурной стали, т. е. момент, когда фронт карбонизации достиг арматурной стали и наступил конец фазы инициирования. Тогда воздействием на конструкцию является глубина карбонизации d_c:

$$S(t) = d_c(t),$$

а сопротивление — защитный слой бетона c:

$$R(t) = c = \text{const}.$$

Инициирование процесса коррозии арматуры рассматривается как отказ конструкции. Такой подход изложен в работах Е. А. Гузеева [8—10].

Вероятность отказа и срок полезного использования

На основе сравнения сопротивления R и воздействия S, которые в анализе долговечности являются переменными во времени случайными параметрами, можно определить функцию резерва прочности G:

$$G = R - S, \quad (1)$$

предельное состояние конструкции достигается при $G = 0$.

Для нормально распределенной функции предельного состояния G вероятность отказа P_f может быть определена по формуле:

$$P_f = P(G \le 0) = \Phi(-\beta), \quad (2)$$

где $\Phi(-\beta)$ — стандартная функция нормального распределения (функция Лапласа); β — величина, обратная изменчивости резерва прочности, названная в работе [9] характеристикой безопасности или индексом надежности.

Поскольку проблемы долговечности бетонных конструкций связаны с процессами повреждения, зависящими от времени, при оценке надежности необходимо определить базовый период (срок их полезного использования). Срок полезного использования является переменной планирования. Инженерные сооружения, такие как мосты или туннели, проектируются в соответствии с планом на период использования 100 лет и более. Таблица 1 содержит целевые значения индекса надежности β для элемента конструкции к окончанию запланированного срока его полезного использования 100 лет. Классификация значений индекса надежности β в табл. 1 отражает тот факт, что с учетом уже предпринятых при проектировании и строительстве мероприятий для обеспечения надежности конкретного компонента (например, качества бетона), оправдан выбор низкого уровня достоверности в конце предполагаемого срока его полезного использования.

Таблица 1

Целевые значения индекса надежности β для предельных состояний по эксплуатационной пригодности [10]

Индекс надежности β	Уровень стоимости мер безопасности
1,3	Высокий
1,7	Средний
2,3	Низкий

Используя приведенные целевые значения β, можно рассчитать зависящую от времени вероятность достижения предельного состояния. При расчете на долговечность данный термин является не фактическим разрушением конструкции, а нежелательной степенью ее повреждения, при которой достигается экономическая непригодность к дальнейшей эксплуатации.

Процедура прогноза долговечности

Ожидаемый срок службы может относиться как к отдельным элементам конструкции, которые могут подвергаться различным по интенсивности воздействиям, так и к сооружению в целом. Общий методический подход к решению задачи прогнозирования долговечности приведен в табл. 2.

Таблица 2

Основные этапы прогнозирования долговечности

I	**Обследование элементов конструкций:** 1. Определение технического состояния и оценка повреждения конструкции*. 2. Установление критериальных параметров долговечности. 3. Сбор статистических данных, классификация и количественная оценка воздействий $S(t)$ и сопротивления конструкции $R(t)$ по каждому параметру. 4. Определение типа ущерба и характера его развития во времени. 5. Обоснование выбора расчетных моделей и количественная оценка их параметров
II	**Установление критериев предельных состояний долговечности:** 6. Определение предельно допустимых состояний для соответствующих процессов повреждения. 7. Определение нормативногосрока службы и допустимой вероятности отказа, или требуемойнадежности
III	**Аналитико-статистические исследования:** 8. Статистическое моделирование параметров воздействия и функции сопротивления конструкции. 9. Расчет по предельным состояниям или оценка вероятности отказа. 10. Оценка срока службы или оставшегося срока службы рассматриваемого элемента конструкции

* Пропускается при определении срока службы для нового строительства.

Существующая мостовая конструкция

Определение остаточного срока эксплуатации по признаку полной карбонизации защитного слоя бетона рассмотрим на примере конструкции пролетного строения существующего железобетонного моста. За критерий предельного состояния принимаем депассивацию поверхностного слоя арматуры. Запишем предельное неравенство в детерминированной и вероятностной постановке:

$$t \geq t_f ,$$

где t — текущий или расчетный срок службы конструкции; t_f — время инициации коррозии.

$$\beta \geq \beta_f ,$$

где β_f — индекс надежности, соответствующий началу коррозии арматуры

На рисунке 3 показана конструкция проезжей части моста, подверженная влиянию карбонизации, в запредельном состоянии. Следствием этого процесса является коррозия арматуры с последующим отрывом защитного слоя бетона над корродирующей арматурной сталью.

Функция снижения индекса надежности $\beta(t)$ при карбонизации защитного слоя бетона железобетонного моста приведены на рис. 4. Принято целевое значение индекса надежности $\beta = 1{,}7$ (табл. 3), что соответствует вероятности депассивации (отказа) $P_f = 4{,}5$ %, которая должна быть достигнута или не превышена через 100 лет. Защитный слой бетона рассматривается как случайная величина со средним значением $c = 39$ мм. Выбор функции для аппроксимации зависимости «время — повреждение» основывался на информации, содержащейся в [13].

Рис. 3. Разрушение защитного слоя бетона на мосту, вызванное коррозией арматуры

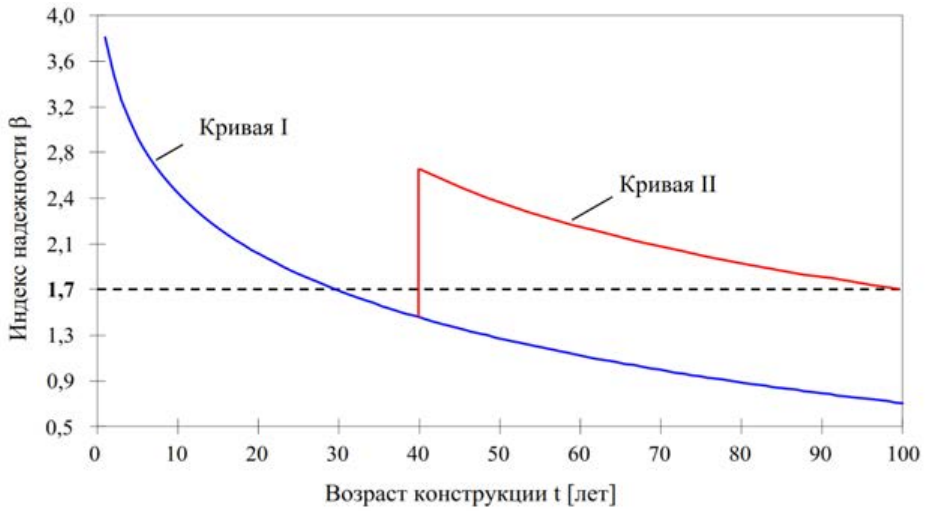


Рис. 4. Временная зависимость надежности строительных конструкций, подверженных карбонизации: кривая I — без ремонта; кривая II — с ремонтом через 40 лет

Линия I на рис. 4 показывает, что требуемый индекс надежности β и соответственно принятое предельное состояние «депассивация арматуры» достигается уже через $t \approx 30$ лет. Это объясняется несоответствием стойкости железобетонных конструкций моста фактическим условиям эксплуатации: недостаточной плотностью бетона, возможными смещениями арматуры за пределы допуска в толщине защитного слоя, механическими повреждениями, растрескиванием бетона при замораживании и оттаивании.

Для бетона большей плотности и однородности линия кривой I смещается вверх на определенную величину с более высокими значениями β. Можно подобрать такие характеристики бетонного покрытия, при которых за 100 лет уровень индекса надежности β = 1,7 не будет пересечен. Это повышает стоимость строительства, но снижает эксплуатационные расходы. Повысить индекс надежности можно путем проведения ремонтно-восстановительных работ (кривая II, рис. 4). Так, ремонт, выполненный через 40 лет эксплуатации сооружения, гарантирует, что надежность в конце срока службы не упадет ниже целевого значения.

Оценка долговечности для нового строительства

Проверка принятых проектно-конструктивных и технологических решений, призванных обеспечить требуемую долговечность рассматриваемого сооружения или отдельной его конструкции, является неотъемлемой частью комплексного анализа жизненного цикла. Для этой цели после производства конструкции проводится проверка ее фактических параметров методами неразрушающего контроля, первоначальный анализ надежности и прогноз ее срока службы.

В таблице 3 обобщены результаты статистического анализа влияния толщины защитного слоя бетона на долговечность конструкций пролетной части моста [14].

Таблица 3

Влияние параметров защитного слоя бетона в пролетной части моста на его срок службы

	Защитный слой бетона		Анализ надежности		
	Среднее значение $\overline{c}$, мм	Стандартное отклонение s, мм	Индекс надежности β	Вероятность отказа P_f,%	Достижение предельного состояния β = 1,7, год
A	55	5	1,7	4,5	100
B	55	15	1,5	7,1	74
C	45	5	1,3	9,9	62

Случай *A* соответствует прогнозируемому состоянию, при котором, согласно проекту, среднее значение защитного слоя бетона $\overline{c} = 55$ мм, стандартное отклонение s = 5 мм. Целевой показатель надежности β = 1,7 достигается после срока полезного использования 100 лет, что соответствует вероятности отказа $P_f = 4{,}5$ %.

Для случая *B* предполагается, что требуемая средняя величина защитного слоя бетона соблюдается при производстве бетонной конструкции, но стабильность размеров имеет низкое качество, которое выражается в трехкратном увеличении стандартного отклонения до s = 15 мм. Как следствие, вероятность отказа увеличилась в 1,6 раза до $P_f \approx 7$ % через 100 лет. Принятый уровень безопасности β = 1,7 снижается уже после 74 лет эксплуатации. Чтобы поддерживать этот уровень безопасности до конца срока службы, должны быть выполнены мероприятия по техническому обслуживанию.

В случае *C* среднее значение защитного слоя бетона $\overline{c} = 45$ мм, (вместо $\overline{c} = 55$ мм,), но стандартное отклонение размеров s = 5 мм сохраняется. В этом случае вероятность отказа в конце срока службы конструкции более чем в 2 раза превышает проектную. Таким образом, возникает необходимость в ремонтно-восстановительных работах раньше запланированного срока. Очевидно, что эксплуатация моста экономически нецелесообразна.

Приведенные данные наглядно показывают, что даже небольшие отклонения статистических характеристик толщины защитного слоя бетона от проектной документации или основных нормативных документов оказывают существенное влияние на срок службы моста. Это еще раз подтверждает, что

особое внимание должно быть уделено контролю качества используемых материалов и выполненных работ.

Толщины защитного слоя является определяющим параметром долговечности железобетонной конструкции. Но в свою очередь она зависит от класса бетона, который является основным критерием его качества при проектировании, и параметров окружающей среды. Поэтому при расчете долговечности конструкции необходимо учитывать сразу несколько параметров, при этом комплексная оценка не позволит отдельным параметрам принимать нереальные значения. Свойства материала выбираются таким образом, чтобы требуемая надежность конструкции была достигнута в конце установленного срока службы (рис. 5). Например, если индекс надежности $\beta = 1{,}7$ должен быть достигнут в конце срока службы конструкции 100 лет, это может быть обеспечено при средней толщине бетонного покрытия $\overline{c} = 60$ мм, для бетона «низкого качества» или $\overline{c} = 50$ мм, для «высокого качества» бетона (с высокой диффузионной стойкостью).

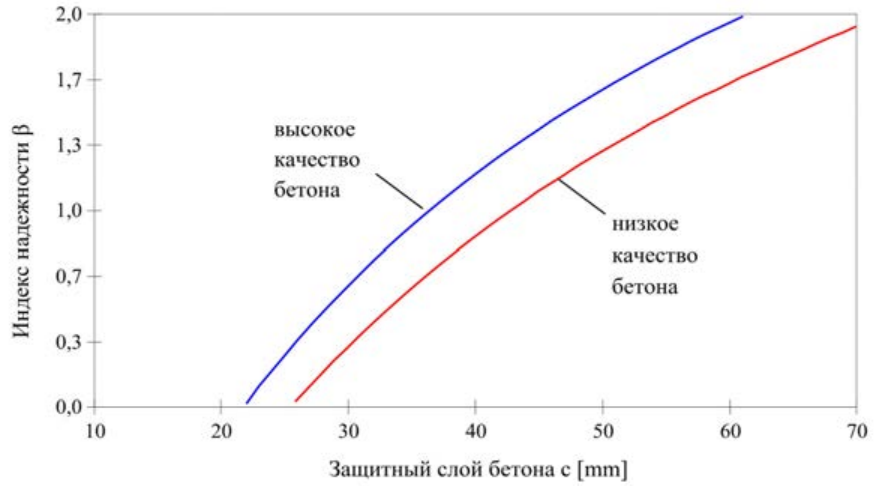


Рис. 5. Долговечность железобетонной конструкции в зависимости от толщины защитного слоя бетона и качества используемого материала на период 100 лет [9]

Продолжительность жизни мостов

Изложенное выше относится к отдельным элементам мостовой конструкции. Для оценки надежности и долговечности конструкции в целом как сложной системы необходимы следующие дальнейшие шаги (табл. 4).

Таблица 4

Элементы анализа риска

I	Проведение системного анализа: • описание системы; • анализ последствий отказов; • анализ дерева отказов
II	Определение вероятности отказа элементов системы и анализ отказа системы
III	Количественная оценка риска

Важным аспектом в исследовании надежности конструкции является оценка возможного отказа отдельных ее компонентов в сочетании с последствиями их повреждения. Для решения этой проблемы используем системный анализ и методы анализа рисков.

Системный анализ

Системный анализ исследует взаимодействие между компонентами системы и включает в себя описание системы, анализ последствий отказов и анализ дерева отказов.

Описание основных элементов системы выполняется в табличном и графическом виде. На рисунке 6 показано разделение системы «пролетное строение моста» на наиболее важные конструктивные элементы.

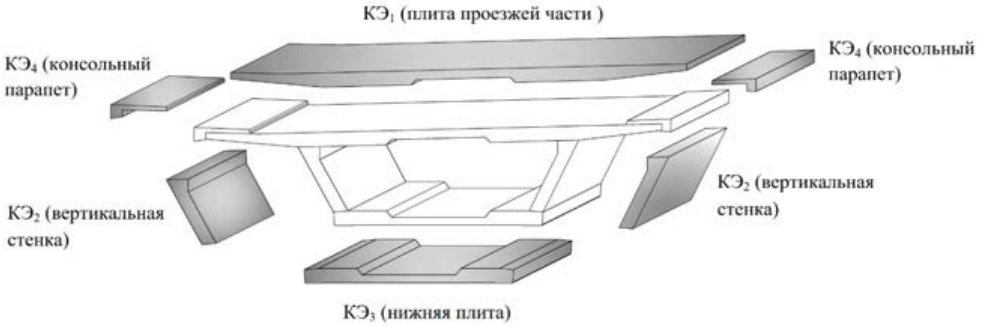


Рис. 6. Разделение конструкции на элементы

Каждому элементы системы $КЭ_1$—$КЭ_4$ должны быть отнесены соответствующие повреждения бетона, связанные с показателями долговечности и выявленные в ходе строительного осмотра (табл. 5).

Таблица 5

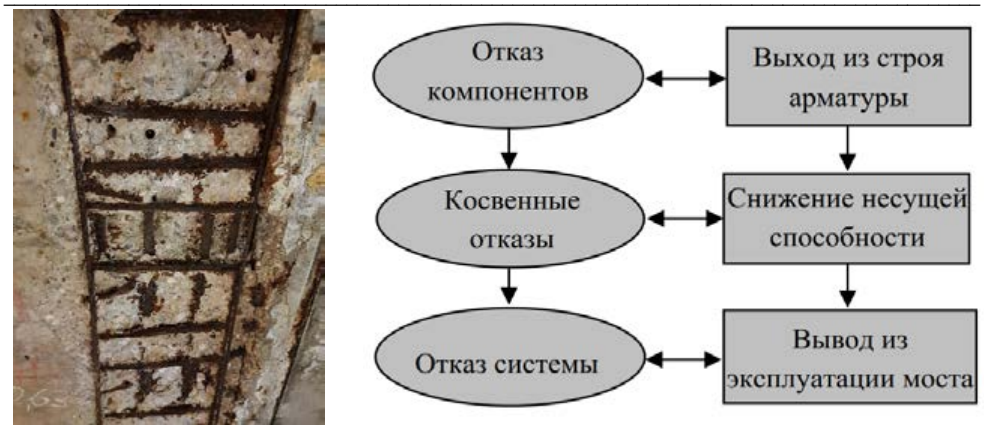
Сопоставление повреждений соответствующим конструктивным элементам моста

Элемент	Описание	Основной вид повреждений
$КЭ_1$	Плита проезжей части	• коррозия арматуры, вызванная хлоридами
$КЭ_2$	Вертикальная стенка	• коррозия арматуры, вызванная карбонизацией; • морозное повреждение
$КЭ_3$	Нижняя плита	• коррозия арматуры, вызванная карбонизацией
$КЭ_4$	Консольный парапет	• коррозия арматуры, вызванная хлоридами; • морозное повреждение

Требуемый уровень детализации описания системы зависит, в числе прочего, от повреждения отдельных элементов системы, и их можно сравнительно легко выбрать даже в больших сооружениях [9].

Анализ отказов

Элементы конструкции выполняют определенные функции и находятся во взаимодействии друг с другом. В зависимости от способа их функционального соединения одиночный или комбинированный отказ элементов может привести к отказу системы или отказу определенных элементов системы. Чтобы прояснить эту ситуацию, на следующем этапе анализа должен быть выполнен анализ последствий отказа (рис. 7).



а *б*

Рис. 7. Анализ влияния отказа на примере корродированного армирования: *а* — внешний вид; *б* — схема проведения анализа

Целью анализа эффектов отказа является исследование поведения системы в случае отказа отдельных ее элементов, это означает исследование влияния возможных механизмов отказа.

Анализ дерева отказов

Целью анализа дерева отказов является систематическая дедуктивная идентификация всех возможных причин, которые приводят к нежелательному событию [9] (рис. 8). Анализ дерева отказов уже представляет собой важный компонент для определения общего отказа системы.

а *б*

Рис. 8. Схема анализа дерева отказов: *а* — I_i = событие *i*, *б* — переход к карбонизации или вызванная хлоридами арматурная коррозия

Используя математические зависимости, основанные на расчете последовательных и параллельных структурных схем надежности, можно определить вероятность отказа всей системы. Вероятность отказа при последовательном соединении элементов системы находится в следующих пределах:

$$\max\left[P_{fi}\right] \le P_{f,\text{серия}} \le 1-\prod_{i=1}\left(1-P_{fi}\right) < \sum_{i=1} P_{fi}, \quad (3)$$

Формула (4) используется для определения верхнего и нижнего пределов вероятности отказа системс параллельным соединением элементов:

$$\prod_{i=1}^{n} P_{fi} \le P_{f,\text{парал.}} \le \min\left[P_{fi}\right], \tag{4}$$

где $P_{f,\text{пос}}$ и $P_{f,\text{пар.}}$ — вероятности отказов последовательной и параллельной систем, а P_{fi} — вероятности отказов соответствующих элементов системы [11].

Долговечность элементов системы при заданной вероятности отказа

Анализ долговечности компонентов пролетного строения моста (плита проезжей части, вертикальная стенка, нижняя плита, консольный парапет) был проведен для случая коррозии, вызванной карбонизацией и хлоридами, с использованием модели DuraCrete и для повреждения от замерзания с использованием модели по Фагерлунду [13]. В рамках проекта DuraCrete были определены скорости развития коррозии арматуры в зависимости от класса условий эксплуатации бетона.

Модель шведского исследователя Г. Фагерлунда основана на предположении, что морозное разрушение произойдет после первого цикла размораживания / оттаивания при достижении насыщения бетоном определенного критического уровня. Следуя этому предположению, определяется потенциальный срок службы конструкции. Планируемый срок службы мостовой конструкции принят равным $t = 100$ лет. Целевое значение индекса надежности установлено равным $\beta = 1{,}7$. В таблице 6 приведены результаты проведенного анализа.

Как показано в табл. 6, после 27 лет службы необходимо принять соответствующие меры для ремонта поврежденных конструктивных элементов пролетного строения.

Таблица 6

Результаты анализа долговечности элементов конструкции [13]

Вид воздействия	Элемент конструкции	Предельное состояние	Время наступления предельного состояния ($\beta = 1{,}7$), лет
Хлориды	Плита проезжей части	Критическое содержание хлоридов, вызывающих коррозию в арматуре	≈ 27
Морозное повреждение	Вертикальная стенка	Отслоение более 65 % защитного слоя бетона	≈ 35
Карбонизация	Нижняя плита	Фронт карбонизации достигает армирования	≈ 30

Долговечность конструкции как сложной системы

Проведем оценку долговечности системы при сочетании трех факторов: хлоридной коррозии арматуры (плита проезжей части, $КЭ_1$), морозного повреждения (вертикальная стенка, $КЭ_2$) и коррозии арматуры, вызванной карбонизацией (нижняя плита, $КЭ_3$). Не зная точных соотношений между этими

факторами, принимаем, что элементы системы соединены последовательно. Тогда вероятность отказа $P_{f,\text{серия}}$ для системы «пролетное строение» находится в соответствии с формулой (3). Отказ системы происходит при отказе одного из ее элементов КЭ$_1$, КЭ$_2$ или КЭ$_3$. На рисунке 9 показана принципиальная схема отказа в сочетании с соответствующим деревом отказов.

Рис. 9. Принципиальная схема и дерево отказов пролетного строения моста для модели системы с последовательным соединением элементов

Результат расчета приведен на рис. 10. Анализ проведенного расчета показывает, что при комбинированном воздействии рассмотренных факторов, приводящих к отказу системы, время вмешательства для проведения ремонтных работ должно составлять примерно 14 лет от начала эксплуатации, если подтверждаются принятые в расчетной модели механизмы повреждения элементов системы. Если между элементами нет взаимозависимостей, то решающее значение для определения времени начала ремонта имеет самый слабый компонент — плита проезжей части. Согласно табл. 7 оно составляет 27 лет.

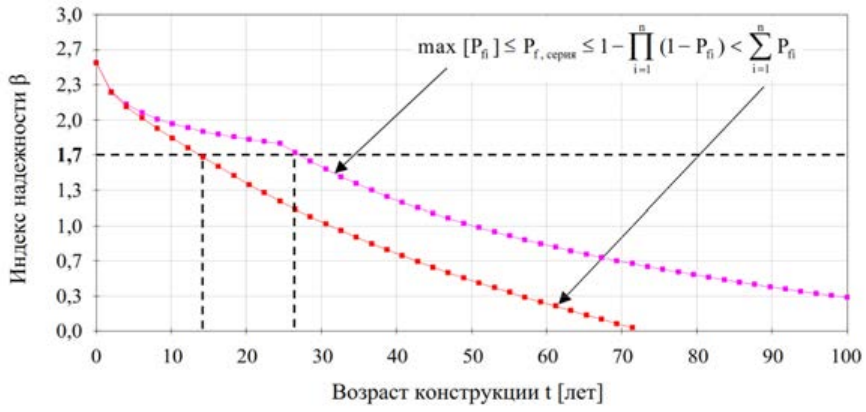


Рис. 10. Изменение индекса надежности во времени для последовательной системы «пролетное строение моста»

Следует отметить, что количественное значение вероятности отказа системы в целом всегда выше вероятности отказа ее отдельных компонентов.

В дополнение к оценке состояния пролетного строения моста с учетом требований, относящихся к долговечности, проводится анализ безопасности системы на действие механической нагрузки с учетом деградации материала. Вероятность разрушения конструкции к концу срока ее службы, согласно требованиям Евронорм [13—15], не должна превышать минимально допустимый уровень $P_f = 7{,}2 \cdot 10^{-5}$, что соответствует индексу надежности $\beta_m = 3{,}8$.

Количественная оценка риска

Величина риска R_{ges} нежелательного события вычисляется по формуле:

$$R_{ges} = \sum P_i K_{vi}, \tag{5}$$

где P_i — вероятность возникновения события i, а K_{vi} — стоимость ущерба при реализации события i. Используя уравнение (5), можно связать рассчитанную вероятность отказа всей системы или отдельных ее элементов с ожидаемыми затратами от ущерба.

Выполнение и оценка анализа рисков дает следующую информацию для установления оптимальной стратегии обслуживания железобетонных мостов:

- идентификация компонентов моста или зон с наибольшей вероятностью отказов;
- концентрация инспекционных или надзорных мер на выявленных недостатках в конструкциях;
- планирование и реализация ремонтных мероприятий в зависимости от ожидаемых последствий ущерба.

Принимая во внимание эти аспекты, можно реализовать экономичное обслуживание мостовых сооружений. Это означает, что финансовые средства расходуются только в необходимых, рассчитанных и обоснованных объемах.

Выводы

В рамках комплексной эксплуатации сооружения прогнозирование ущерба в сложных бетонных конструкциях, таких как бетонные мосты, является важным компонентом для обеспечения долговечности в течение запланированного срока их службы. Значительный вклад в это вносят оценка долговечности для новых сооружений или прогноз развития состояния, а также регулярное обновление прогноза для новых и существующих конструкций. Основное преимущество инструментов и методов, представленных в этой статье, объясняется тем фактом, что долговечность, в отличие от подходов ГОСТ 27751-2014, количественно определяется с точки зрения проектирования. Вероятная степень повреждения, связанного с повреждением бетонной конструкции, на основе ранее определенных нежелательных состояний компонентов и определенного уровня безопасности может быть определена путем расчета. Таким образом бетонные мосты с учетом срока службы можно создавать с меньшими финансовыми затратами и улучшенными характеристиками, что позволит избежать преждевременного повреждения. Кроме того, уже необходимые затраты на техническое обслуживание стальных и предварительно напряженных железобетонных мостов могут быть оптимизированы — минимизированы в экономическом смысле. Для существующих конструкций возможна надежная технико-экономическая оценка мер по увеличе-

нию продолжительности жизни. Поскольку на основе созданного также можно правильно рассчитать долгосрочные затраты на техническое обслуживание, становится возможным экономическое планирование инвестиций в отношении нового строительства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Bergmeister K., Fingerloos F., Wörner J.-D.* Beton-Kalender 2015: Bauen im Bestand / Brücken. Ernst & Sohn GmbH & Co. KG., 2015. 1194 p.

2. *Krause M., Wiggenhauser H.* Materialtechnische Untersuhung beim Abbruch der Talbrücke Haiger. BAST, 2002. 112 p.

3. *Tonias D., Zhao J.* Bridge Engineering Rehabilitation, and Maintenance of Modern Highway Bridges. McGraw-Hill Education, 2017. 475 p.

4. *Stapelberg R. F.* Handbook of Reliability, Availability, Maintainability and Safety in Engineering Design. Springer-Verlag London Limited, 2009. 827 p.

5. *Евтушенко С. И., Крахмальная М. П., Крахмальный Т. А.* К вопросу об остаточном ресурсе длительно эксплуатируемых мостов через водопроводящие каналы // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 35(54). С. 166—170.

6. *Becker A., Müller H. S.* Betonbauwerke im Untergrund — Infrastruktur für die Zukunft. 5 // Symposium Baustoffeund Bauwerkserhaltung Universität Karlsruhe (TH), 2008. Pp. 51—67.

7. *Stark J., Wicht B.* Dauerhaftigkeit von Beton. Springer Verlag, 2013. 479 p.

8. *Гузеев Е. А.* Основы расчета и проектирования железобетонных конструкций повышенной стойкости в коррозионных средах : автореф. дис. … д-ра техн. наук. М., 1981. 48 с.

9. *Гузеев Е. А.* Особенности проектирования железобетонных конструкций, эксплуатируемых в растворах сернистого натрия // Коррозионностойкие бетоны и железобетонные конструкции. М., 1981. С. 102—110.

10. *Гузеев Е. А., Савицкий Н. В.* Расчет железобетонных конструкций с учетом кинетики коррозии третьего вида // Коррозионная стойкость бетона, арматуры и железобетона в агрессивных средах. М., 1988. С. 16—19.

11. *Ржаницын А. Р.* Теория расчета строительных конструкций на надежность. М.: Стройиздат, 1978. 239 с.

12. *Müller H. S., Vogel M., Neumann T.* Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse. BAST, 2011. 43 p.

13. The European Union — Brite EuRam III: Statistical Quantificationofthe Variables in the Limit State Functions. DuraCrete: Probabilistic Performance basedDurability Design of Concrete Structures, Contract BRPR-CT95-0132, Project BE95-1347, Document BE95-1347/R9, January2000.

14. *Müller H. S.* Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklungen Brücken. BAST, 2014. 51 p.

15. *Nawy E.G.* Concrete Construction Engineering Handbook. Taylor & Francis Group, 2008. 1563 p.

© Пшеничкина В. А., Петренко А. В., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Пшеничкина В. А., Петренко А. В. Комплексный подход к прогнозированию долговечности железобетонных мостов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 63—78.

Об авторах:

Пшеничкина Валерия Александровна — д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; rap_hm@list.ru

Петренко Александр Вадимович — инженер каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; petravad@list.ru

Valeriya A. Pshenichkina, Alexander V. Petrenko

Volgograd State Technical University

AN INTEGRATED APPROACH TO THE FORECASTING OF REINFORCED CONCRETE BRIDGES DURABILITY

A set of issues on ensuring the durability of reinforced concrete motorway bridges at the stages of design, construction and operation is presented in terms of life cycle analysis. The authors prove the advantages of the probabilistic approach in the a priori assessment of the durability of new facilities and in the refinement of the residual life of existing structures. Their useful lives are determined by the target values of the reliability index. The given methodological approach allows justifying the long-term expenses for the engineering maintenance of reinforced concrete bridges, as well as the planning of investment in new construction.

K e y w o r d s: reinforced concrete motorwaybridges, life cycle, service life, durability, reliability index, elements of the system, reliability block diagrams, system failure.

For citation:

Pshenichkina V. A., Petrenko A. V. [An integrated approach to the forecasting of reinforced concrete bridges durability]. *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], 2021, iss. 1, pp. 63—78.

About authors:

Valeriya A. Pshenichkina — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; rap_hm@list.ru

Alexander V. Petrenko — Engineer, Foundations and Safety of Constructions Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; petravad@list.ru

УДК 528.42

Т. А. Сабитова, С. О. Ященко, Е. Д. Соболева

Волгоградский государственный технический университет

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТРАДИЦИОННЫХ МЕТОДОВ ПОСТРОЕНИЯ ТОПОГРАФИЧЕСКИХ ПЛАНОВ И ТРЕХМЕРНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Рассмотрены вопросы оптимизации топографической съемки методом трехмерного лазерного сканирования при сборе топографических данных. Выявлены особенности и преимущества данного метода и на их основе сделаны выводы о целесообразности использования лазерного сканера при топографической съемке.

К л ю ч е в ы е с л о в а : геодезия, топографическая съемка, лазерное сканирование.

Топографический план — это графическое изображение определенного участка местности, на котором отображаются все сооружения и коммуникации в пределах границ земельного участка различного назначения (леса, сады, поля и т. д.) [1]. Топографические планы составляются специалистами по результатам геодезических исследований и используются для разработки строительной документации — генпланов, рабочих чертежей, технических планов. Топографическая карта используется для изображения рельефа местности, отображая высоту поверхности земли обычно через контурные линии или отметки точек. На карте указываются горизонтальные и вертикальные положения представленных объектов.

Топографическое картографирование сегодня стало намного более эффективным и точным благодаря достижениям в методах съемки, новейшему оборудованию и технологиям печати, а также использованию аэрофотосъемки и спутниковых данных. Применение соответствующего оборудования и программного обеспечения (ПО) сделало возможным создание трехмерных топографических цифровых и интерактивных карт, которые детально иллюстрируют весь ландшафт дорог, гор, рек, зданий и сооружений.

Топографическую съемку можно проводить в различных условиях с использованием нескольких основных методов.

1. Географические информационные системы (ГИС) внесли большой вклад в развитие картографии. ГИС позволяют комбинировать слои цифровых данных из разных источников, а также управлять ими и анализировать, как разные слои соотносятся друг с другом. Процесс преобразования трехмерных топографических карт в цифровую форму включает преобразование растров в векторные объекты с помощью программного обеспечения на основе САПР, такого как AutoCAD.

2. Съемка с использованием теодолита, который определяет исключительно углы, а расстояния измеряются либо стальной лентой, либо также электронным дальномерами. Дальномер может очень быстро и точно измерять большие расстояния (несколько километров) с помощью света и радиоволн. Его разработка стала важной вехой в развитии методов измерения при проведении обследований.

3. Созвездие спутников глобальной системы позиционирования (GPS), вращающихся вокруг Земли, используется для определения положения наземных приемников GPS при их перемещении от точки к точке. Собранные данные могут обрабатываться либо в офисе для определения местоположения приемника GPS (контрольные исследования), либо в полевых условиях, чтобы дать полевому геодезисту немедленное положение приемника (GPS-съемка в реальном времени) для использования [1—5].

4. В настоящие время непрерывно совершенствуется оборудование и степень автоматизации процесса съемки. В последние годы в России активно внедряют новые технологии информационного моделирования зданий и сооружений. Информационное моделирование сооружений (BIM) — процесс комплексного создания и использования информации о сооружении, формирующий надежную основу для всех решений на протяжении жизненного цикла объекта [5—9]. На протяжении последних лет в практику топографо-геодезического производства входит технология 3D-лазерного сканирования [9—15].

Основным принципом лазерного сканирования является получение объемного изображения объекта съемки (облако точек с трехмерными координатами) с помощью специальных устройств — сканеров. После сканирования полученное в результате облако точек обрабатывается с помощью специальных компьютерных программ [6—10]. Трехмерная лазерная съемка предполагает безопасное, быстрое и точное решение для получения данных измерений на местности.

Технология и области применения лазерного сканирования

Лазерный сканер представляет собой прибор, использующий технологию, основанную на применении специальных датчиков лазерного света и изображения, собранных на подвижной конструкции, расположенной на опорном штативе, который непосредственно установлен на земле. Лазерные сканеры могут использоваться для определения уровня и измерения расстояний, для определения расстояния между ориентиром и обозначенной точкой путем оценки времени, прошедшего между двумя импульсами, или путем оценки разности фаз между передаваемой и принятой волной.

За счет автоматического и последовательного повторения этого процесса в течение периода времени лазерный сканер может создавать облако точек. Лазерный 3D-сканер обеспечивает большую скорость измерений, так как сервопривод автоматически поворачивает измерительную головку в обеих (горизонтальной и вертикальной) плоскостях.

Сканер равномерно покрывает пространство точками, координаты которых определяются с помощью датчиков и одновременно регистрирует уровень сигнала, отраженный от каждой точки. Во время измерений на дисплее прибора воспроизводится изображение местности. Полученные в результате измерения снимки в реальном времени записываются в память прибора на внешний или внутренний носитель.

Результатами обработки данных лазерного сканирования могут быть цифровые топографические карты и планы, цифровые модели рельефа, местности и различные растровые геопространственные модели в различных системах координат. В дальнейшем они могут использоваться в различных форматах файлов, таких как .dwg, .dxf в масштабе 1:100, 1:200, 1:500, 1:1000, 1:1200; 1:5000.

При использовании данного метода исследуемые объекты можно сканировать дистанционно, что позволяет снизить риски при работе в опасной зоне или на высоте. В этом случае нет необходимости дополнительного обучения технике безопасности или правилам использования опасного оборудования [15, 16].

Но сканеры не идеальны для управления настройками:

- программное обеспечение для моделирования требует оборудования с быстрой обработкой, а некоторые функции занимают больше времени обработки и могут вызвать сбой программы;
- границы исследуемых объектов напрямую не измеряются; две поверхности определяются, а затем расширяются для создания угла;
- расстояние между точками увеличивается по мере удаления от сканера, что позволяет тонким вертикальным объектам практически не иметь точек (так, углы здания или края, падающие между двумя последовательными угловыми приращениями лазерного луча, могут не быть полностью измерены лазерным лучом из-за размера его пятна).

Трехмерные лазерные сканеры бывают стационарные и мобильные. Стационарные 3D-лазерные сканеры расположены на определенной опорной конструкции, как правило, на штативе. Мобильные устройства могут сканировать окружающую среду во время движения, поэтому их можно интегрировать в автомобили. Мобильное лазерное сканирование позволяет получить детальную модель, например, существующей автодороги, что помогает сократить затраты на ремонт и реконструкцию за счет разработки оптимального проекта [16, 17]. Технология используется для создания моделей мостов, тоннелей и трасс с целью переноса полученных данных на топографические планы и карты. Готовые макеты позволяют получать объективную информацию о физическом состоянии отдельно взятых транспортных развязок.

Объект исследования

Для выполнения топографической съемки представлен метод наземного лазерного сканирования в сравнении с классическим электронным тахеометром. В качестве объекта исследования был выбран участок работ по проекту «Реконструкция ул. Ангарской в границах ул. им. Римского-Корсакова в Дзержинском районе г. Волгограда».

В качестве опорной геодезической сети были использованы пункты полигонометрии в городской системе координат и высот г. Волгограда.

В общей сложности было установлено 10 сканирующих станций, которые располагались с учетом наилучшей видимости, полностью покрывая исследуемую территорию (рис. 1). В этом 3D-исследовании облака точек были собраны с использованием режима среднего разрешения (0,1 м расстояния между точками, как по горизонтали, так и по вертикали в диапазоне 100 м). Каждое сканирование занимало около 8 мин и дополнительно 9 мин для захвата изображения (режим цвета RGB). Идеальное расстояние между сканером и окружающими объектами не должно превышать 200 м. Все данные настроек были применены и для остальных станций.

Топографическая съемка выполнена на общей площади 6,6 га в масштабе 1:500. Сечение рельефа горизонталями через 0,5 м. При производстве съемки осуществлялся контроль за ориентированием тахеометра на начальное направление, отклонение не превышало 1 мин.

Рис. 1. Работа на станции при тахеометрической съемке

Съемочная геодезическая сеть для съемки масштаба 1:500 создавалась построением теодолитных ходов точностью 1:2000 и ходов тригонометрического нивелирования, опирающихся на пункты городской геодезической сети ст. пп., использован геодезический знак долговременного закрепления RP1.

Все измеренные величины записывались на магнитный накопитель тахеометра, одновременно велся абрис на каждой станции. На каждой станции определялись контрольные пикеты на перекрытиях съемок с соседних точек. Количество и густота пикетов на планах определялись характером рельефа, наличием контуров и масштабом съемки.

Расстояние от инструмента до отражателя при съемке четких контуров ситуации не превышали — 250 м, при съемке рельефа — 375 м и расстояние между пикетами не превышало 20 м. Количество и густота пикетов на планах определялись характером рельефа, наличием контуров и масштабом съемки.

При создании съемочной геодезической сети проложено два теодолитных хода. Плотность точек съемочной геодезической сети обусловлена характером рельефа и наличием контуров, конфигурацией застройки.

Плановая съемочная геодезическая сеть представляет собой 2 теодолитных хода протяженностью 0,98 км, и 2 висячих хода длиной не более 0,1 км.

Точки теодолитных ходов закреплены металлическими штырями и деревянными кольями длиной 15 см. Технические характеристики теодолитных ходов представлены в таблице.

Технические характеристики теодолитных ходов

Наименование показателей	Величина	
	фактическая	допустимая
Наибольшая длина хода между двумя исходными пунктами, линии	3	20
Наибольшая длина хода между исходным пунктом и узловой точкой, км	246	780
Наибольшая длина линии теодолитных ходов, м	190	300

Угловые измерения производились двумя полными приемами электронным тахеометром Sokkia SET510.

На проведение обследования при помощи лазерного сканера было затрачено в общей сложности 16 ч, а электронным тахеометром — 28 ч.

Используя лазерный сканер, удалось с более высокой степенью точности оценить и количественно описать формы некоторых элементов рельефа на исследуемом участке.

3D-лазерный сканер Leica ScanStation P40 обеспечивает оптимальную дальность действия на расстоянии 300 м [18]. Точность одиночного измерения для этого прибора составляет 2 мм на 50 м. Кроме того, встроенная в сканер цифровая камера высокого разрешения обеспечивает возможность записи значения интенсивности облака точек.

Тахеометрический интерфейс и цветной сенсорный дисплей позволяют просматривать данные на месте. Сканер имеет внутреннюю память объемом 256 Гб, что идеально подходит для данной съемки.

Множество облаков точек, полученных на отдельных сканирующих станциях, не соединены вместе, а относятся к произвольной полярной системе координат прибора. После этого нежелательные данные, такие как шум, растительность и здания, были отфильтрованы с помощью программы (рис. 2) перед созданием цифровой модели местности (ЦММ).

Было создано несколько практических моделей, чтобы познакомиться с моделированием. Основной проблемой при моделировании облака точек было управление данными. Изоляция точек на отдельной поверхности была важна, чтобы точки с других поверхностей не были включены в определенный слой. Скрытие больших объемов точек часто приводило к задержкам обработки, как и процесс вычисления роста области.

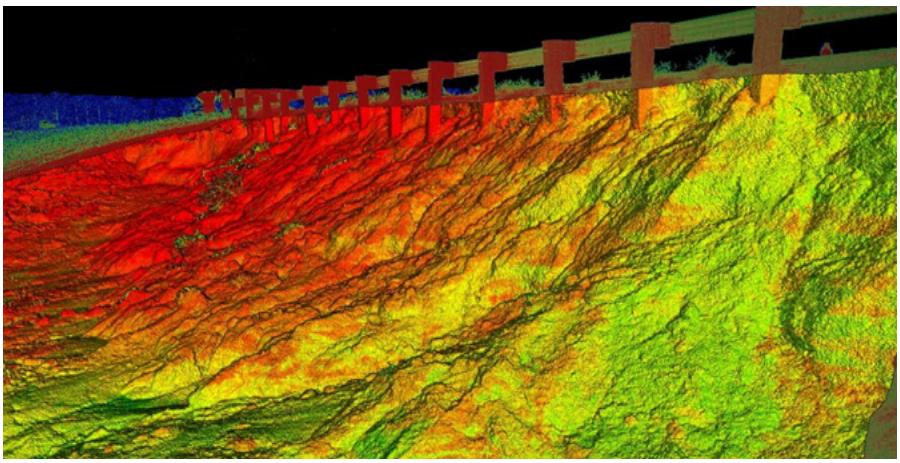


Рис. 2. Фрагмент цифровой модели рельефа местности

Моделирование облака точек 3D началось с импорта данных сканера. Данные были автоматически зарегистрированы, но некоторые контрольные точки были отклонены от высоты на целых 3 см. Скорректированный контрольный файл был импортирован и перерегистрирован. После этого были внесены изменения в модель, чтобы упростить процесс моделирования. Пре-

делы были установлены таким образом, чтобы значения облака точек за пределами области исследуемого объекта не мешали моделированию.

Топографические объекты были оцифрованы в программном обеспечении путем присвоения соответствующего кода для каждого типа объектов. В то же время зарегистрированное облако точек было импортировано в программное обеспечение для того, чтобы отфильтровать нежелательные данные, такие как искусственные объекты и растительность, с помощью полиномиального фильтра. После этого ЦММ и контурная карта были синхронизированы.

Дорога эксплуатируется с 1975 г. Протяженность реконструируемого участка составляет 900 м. В геоморфологических отношениях исследуемая территория находятся в пределах склона Приволжской возвышенности. Отметки рельефа полотна дороги изменяются от 64,03 до 67,30 м. Площадка съемки имеет преимущественно равнинный рельеф с наклоном поверхности до 2°. По характеру рельефа выполненные работы отнесены к 2-й категории сложности.

Рекогносцировочное обследование участка изыскания в период инженерно-геодезических работ показало, что место проведения исследований представляет собой насыпь дорожного полотна, соединяющую два противоположных борта эрозионного оврага, являющегося отвершком оврага Проломный, засыпанного при строительстве автомобильной дороги. Глубина оврага 14…15 м, по тальвегу существует постоянный водоток, питание которого происходит за счет атмосферных осадков. На период изысканий прилегающая водовыпускающая территория заросла камышом и древесной растительностью. На площадке исследования имеется редкая кустарниковая растительность, местами древесная.

Прилегающая к дороге территория частично застроена гаражами и домами частного сектора. Исследуемая территория пересечена трассами подземных и наземных коммуникаций (газопровод, канализация, водопровод, электрические и телефонных кабели и т. д.).

Для построения топографической основы был использован программный комплекс обработки инженерных изысканий и цифрового моделирования местности Credo_Dat 4.

В результате полевых и камеральных работ получены планы участков в масштабе 1:500 (рис. 3).

Основным отличием 3D-топографического плана от обычного является дополнительная информация, которая представляла собой высоту зданий и рельефа.

Полученные в процессе сканирования снимки могут храниться неограниченное количество времени и в последующем быть экспортированы в формате обмерных чертежей без дополнительного исследования объекта[1] [17, 18].

Основываясь на полученных результатах, следует признать, что метод лазерного сканирования является более эффективным в подобных полевых условиях. Измерения с помощью тахеометра требуют значительно большего времени, так как прибор необходимо постоянно переставлять. Помимо этого

[1] Минстрой России [официальный сайт]. URL: https://minstroyrf.gov.ru/

затруднение вызывает активное движение транспорта, которое не позволяет полностью автоматизировать процесс. Но при этом результаты полевого и камерального контроля, а также качество созданного топографического плана показывают, что средние ошибки (расхождения) в положение контуров и рельефа местности обеспечивают требуемую точность масштаба 1:500.

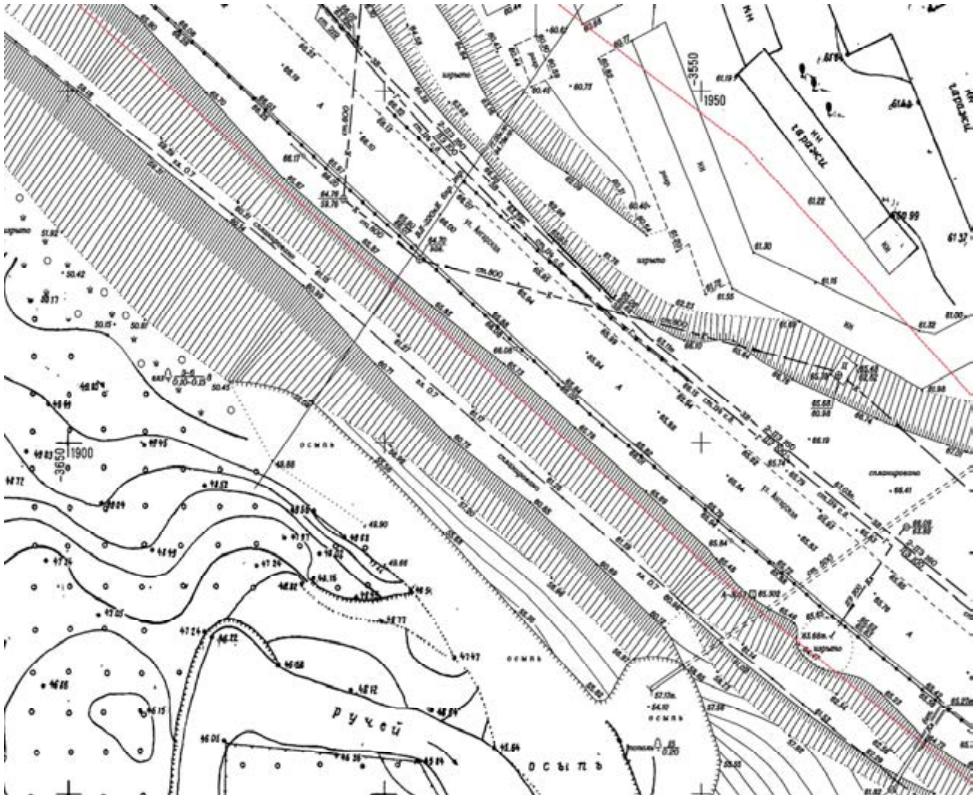


Рис. 3. Фрагмент цифрового топографического плана: реконструкция ул. Ангарской в границах от ул. им. Римского-Корсакова до автозаправочной станции в Дзержинском районе г. Волгограда

Огромное количество точек, набранных за одно сканирование, намного превышает возможности любых тахеометров (354 точки против 6,4 млн). Такой объем данных является недостатком с точки зрения производительности компьютера и процедур моделирования. Преимущество 3D-моделирования заключается в том, что вся необходимая информация (данные сканера) присутствует в файлах необработанных данных. Это уменьшит или устранит возможные ошибки и снизит вероятность возвращения в поле для сбора дополнительных данных.

Современное сканирование может стать мощным инструментом для профессионалов в области геодезии. Однако лазерное сканирование не заменит полностью традиционные геодезические инструменты. Тахеометры попрежнему необходимы для установки контрольных точек. Использование сканера для настройки контроля имеет ограничения, в основном в отношении

точности измерений на малых расстояниях (< 50 м), которые не регистрировались.

Время, затрачиваемое на сбор данных на месте, значительно сокращается при использовании сканера, который поддерживает режим быстрого отображения. Кроме того, макет данных может быть использован многократно в будущем, например, для 3D-моделирования города. В дальнейшем это исследование будет продолжено с картографированием большей площади путем объединения аэрофотоснимков, полученных с помощью беспилотного дрона, с целью охватить область, которая труднодоступна для лазерного сканирования.

Еще одна проблема, связанная с современными сканерами — высокая стоимость необходимого оборудования и программного обеспечения для проведения точного сканирования. Если сравнить это с требованиями к стоимости оборудования и программного обеспечения для съемки тахеометром, то разница значительна.

Каждый метод обследования имеет свои сильные стороны и ограничения, и ни один из них не способен работать без ошибок. Для этого проекта метод лазерного сканирования оказался наиболее эффективным и действенным.

В идеале наиболее эффективным методом сбора данных для геодезических исследований было бы использование одноточечной точности тахеометра, измерения дальнего расстояния до призмы и точной ориентации в сочетании с высоким уровнем детализации и полнотой лазерного луча сканера. Недавние инновации начали объединять несколько технологий, включая GPS. По мере развития технологий возрастает и возможность сбора точных, подробных временных и экономичных пространственных данных.

Выводы

Тема статьи, посвященной применению современного геодезического оборудования на конкретном объекте, актуальна и интересна специалистам. Исходя из опыта применения наземных лазерных сканирующих систем для решения прикладных задач в различных областях, можно смело говорить об уверенном внедрении данной технологии в повседневную практику. Концепция полной автоматизации при сборе пространственных данных об объектах местности средствами лазерной локации позволяет решить две основные проблемы любого производства:

1) увеличение производительности работ;

2) повышение качества и надежности получаемой продукции.

Фактически, точность определения координат точек местности с использованием наземных лазерных сканеров зависит в основном от характеристик прибора, т. е. исключается ряд ошибок при наведении на марку, установке вешки, нумерации пикетов и т. п. Повышение надежности результатов сканирования обусловлено прежде всего снижением влияния человеческого фактора при работе с прибором. При камеральной обработке материалов полевых сканерных съемок по-прежнему большую роль играет опыт оператора в интерпретации большого объема данных лазерного сканирования, проблема автоматизации обработки этих данных становится главной. Однако в этом направлении ведутся активные разработки алгоритмов и программных продуктов, позволяющих упростить и автоматизировать работу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Махов И. Д., Соболева Е. Д.* Картографирование придорожных ландшафтов Волгоградской области по аэрокосмической фотоинформации // Молодежь и научно-технический прогресс в дорожной отрасли юга России: материалы XIV международной научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, посвященной 75-летию Победы в Великой Отечественной войне, 20—22 мая 2020 г., Волгоград / Министерство науки и высшего образования РФ. ВолгГТУ, 2020. С. 106—110.

2. *Бурлаченко О. В., Бурлаченко А. О., Оганесян О. В.* Выбор оптимальных технологических решений в условиях плотной городской застройки на основе BIM-технологий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. № 1(78). С. 329—335.

3. *Бушнева И. А.* Об использовании наземного лазерного сканирования для получения фасадных чертежей исследуемых зданий и строений. Краснодар: КубГТУ, 2016. 89 с.

4. *Миловатская Т. Н., Карпова О. И., Сабитова Т. А.* Основные этапы и тенденции в развитии геодезических приборов и их применение при строительстве автомобильных дорог // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. Вып. 54(73). С. 113—120.

5. *Шевченко А. А.* Принцип работы наземной сканирующей системы. Краснодар: КубГТУ, 2016. 20 с

6. *Ковач Н. С., Клименок И. В.* Уроки лазерного сканирования // Автомобильные дороги. Ноябрь, 2015г. С. 10—11.

7. *Алексеенко Н. Н.* Применение технологии лазерного сканирования в различных отраслях и на различных этапах жизненного цикла объектов // Вестник МГСУ. 2016. № 2. С. 62—73.

8. Наземное лазерное сканирование: монография / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова. Новосибирск: СГГА, 2009. 261 с.

9. *Анопин В. Н., Сабитова Т. А., Карпова О. И.* Планирование геодезических наблюдений за состоянием промышленных зданий и технологического оборудования // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Вып. 48(67). С. 4—14.

10. *Nikiforova M. E., Yashchenko S. O., V. G. Polyakov V. G.* Regional planning of socio-economic development (including the industrial construction and social infrastructure) // SCTCMG 2018: International Scientific Conference "Social and Cultural Transformations in the Context of Modern Globalism". The European Proceedings of Social & Behavioural Sciences EpSBS. [Published by Future Academy], 2019. Pp. 794—797. URL: https://dx.doi.org/10.15405/epsbs. 2019.03.02.90.

11. *Milyutina M. A.* Introduction of Building Information Modeling (BIM) Technologies in Construction // Journal of Physics. 2015. Conf. Series 1015. URL: iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1015/4/042038/pdf.

12. *Chebanova S. A., Polyakov V. G., Azarov A. V.* Designing of organizational and technological solutions for construction in constrained urban environments // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 687: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS—2019) (25—27 September 2019, Chelyabinsk, the Russian Federation). Iss. 4. Construction technology and organization / South Ural State University (Chelyabinsk), Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk and Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg.

13. *Bredella N.* Simulation and Architecture: Mapping Building Information Modeling. NTM. 2019. Vol. 27. Iss. 4. Pp. 419—441.

14. *Ferrandiz J., Banawi A., Peña E.* Evaluating the benefits of introducing "BIM" based on Revit in construction courses, without changing the course schedule Universal Access in the Information Society, 2017. DOI: 10.1007/s10209-017-0558-4.

15. *Sborshikov S. B., Bahus E. E.* Multifactorial parametric model of efficiency of organizational solutions for ensuring the construction quality Industri. 2018.

16. *Anopin V. N., Sabitova T. A., Kalinovsky S. A.* Performance of surveying to assess man-made risks in operation of industrial facilities by example of Volgograd agglomeration // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 687: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS—2019) (25—27 September 2019, Chelyabinsk, the Russian Federation). Iss. 6: Analysis, assessment and technologies of natural and man-made disasters reduction South Ural State University (Chelyabinsk), Irkutsk National Research Technical Universi-

ty, Irkutsk and Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg. [Published by IOP Publishing], 2019. 7 p.

17. *Петров К. С., Швец Ю. С., Корнилов Б. Д., Шелкоплясов А. О.* Применение BIM-технологий при проектировании и реконструкции зданий и сооружений // Инженерный вестник Дона. 2018, № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5255.

18. *Sharmanov V. V., Simankina T. L., Mamaev A. E.* BIM in the assessment of labor protection // Magazine of Civil Engineering. 2017. Vol. Iss. 1. Pp. 77—88. DOI: 10.18720/MCE.69.7.

© *Сабитова Т. А., Ященко С. О., Соболева Е. Д., 2021*

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Сабитова Т. А., Ященко С. О., Соболева Е. Д. Сравнительный анализ традиционных методов построения топографических планов и трехмерного лазерного сканирования // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 79—88.

Об авторах:

Сабитова Татьяна Анатольевна — канд. техн. наук, доц., доц. каф. гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; ta.sabitova@gmail.com

Ященко Сергей Олегович — канд. экон. наук, доц. каф. экологического строительства и городского хозяйства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Соболева Екатерина Дмитриевна — магистрант, каф. экспертизы и эксплуатации объектов недвижимости, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Tat'yana A. Sabitova, Sergei O. Yashchenko, Ekaterina D. Soboleva

Volgograd State Technical University

FEATURES CONSTRUCTION OF DIGITAL TOPOGRAPHIC PLANS USING 3D LASER SCANNING IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

The article discusses the main theoretical concepts. The purpose of this work is to consider the principle of operation and application of a laser scanner for collecting topographic data. The advantages of this method are determined, and conclusions are drawn based on them about the feasibility of using a laser scanner system in topographic surveys.

K e y w o r d s: geodesy, topographic survey, laser scanning.

For citation:

Sabitova T. A., Yashchenko S. O., Soboleva E. D. [Features construction of digital topographic plans using 3d laser scanning in the construction industry]. *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], 2021, iss. 1, pp. 79—88.

About authors:

Tat'yana A. Sabitova — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ta.sabitova@gmail.com

Sergei O. Yashchenko — Candidate of Economics, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Ekaterina D. Soboleva — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 624.15

М. А. Степанов, Е. П. Брагарь, А. А. Нурпеисова

Тюменский индустриальный университет

ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА ПОДТОПЛЕНИЯ ТЕРРИТОРИЙ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

Рассмотрена проблема подтопления территорий как в России, так и за рубежом. Приведены схемы основных источников и причин подтопления, классификации последствий подтопления территорий. Представлены результаты лабораторных исследований изменения физико-механических свойств пылевато-глинистых грунтов. Сделаны выводы об общем негативном влиянии водонасыщения на их механические характеристики. Приведены результаты численного моделирования по прогнозированию развития геотехнической ситуации при строительстве жилого многоэтажного дома с подземной частью в условиях возможного повышения уровня грунтовых вод с учетом результатов лабораторных испытаний. Выполнен прогноз подтопления территории застройки.

К л ю ч е в ы е с л о в а: фундамент, подтопление, грунт основания, лабораторные исследования, численное моделирование, напряженно-деформированное состояние.

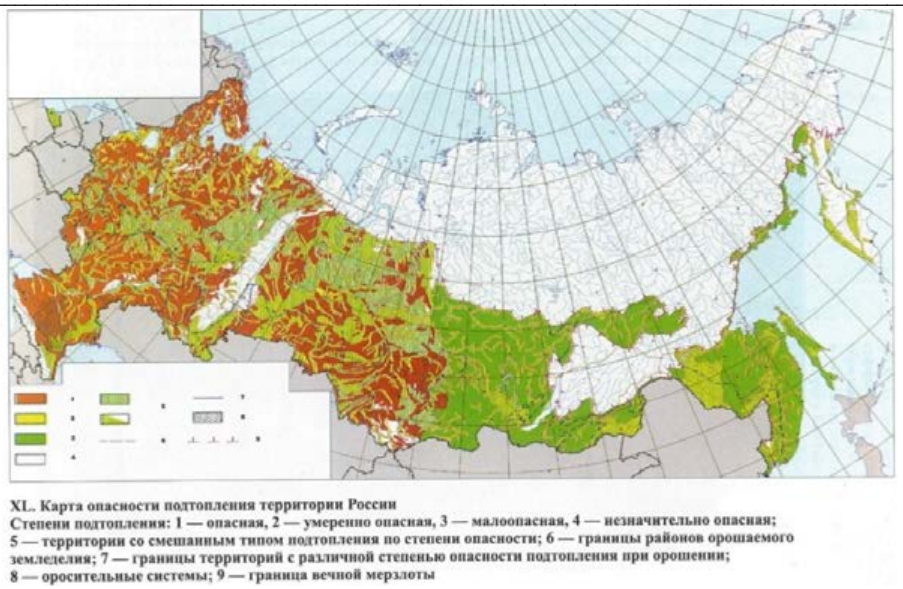
1. Введение

В последние годы проблема взаимодействия оснований сооружений, фундаментов и строительных конструкций с геологической средой приобрела актуальность в пределах городских территорий и крупных промышленных предприятий. В настоящее время в России и за рубежом все больше территорий подвергается влиянию опасных геологических явлений. Одним из них, наиболее неблагоприятным, является процесс подтопления, в результате развития которого нарушаются условия эксплуатации зданий и сооружений, возникают социальные, экономические и экологические проблемы [1].

На сегодняшний день только в России в разной степени подтоплено около 960 городов, значительные территории сельскохозяйственных земель. Подтоплению подвергаются такие города как Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Омск, Ростов-на-Дону, Саратов, Самара, Тюмень и многие другие. Практически процессом подтопления охвачены все природные зоны страны (рис. 1).

В соответствии с разработанной унифицированной легендой [2] (рис. 1) выделяются четыре типа процесса по опасности, каждый из которых характеризуется интенсивностью (в баллах), степенью пораженности территории (в %, опасный — 35 %, умеренно опасный — 20 %, малоопасный — 10 % и незначительно опасный — 5 %), скоростью подъема уровней подземных вод (м/год) и продолжительностью подъема до $H_{кр}$ (условно для такого масштаба $H_{кр}$ принята равной 2…3 м глубины от поверхности). При этом выделяются также территории с трудно расчлененными типами процесса по опасности.

Прогнозной оценкой возможного изменения уровня грунтовых вод на застраиваемых территориях, а также изучением причин и условий подтопления занимались: И. В. Аверин, В. В. Брускова, В. В. Ведерников, Г. М. Великина, З. П. Гавшина, М. Л. Зиновьев, Г. И. Клиорина, А. Н. Койда, И. В. Кокорев, Е. Л. Некрасова, В. А. Осин, Г. А. Разумов, Н. Н. Ракитина, Л. Ретхати, А. В. Симонов, О. В. Слинко, В. И. Сологаев, Н. И. Тихонова, М. Ф. Хасин, М. С. Шумилов и многие другие [3—15].



XL. Карта опасности подтопления территории России
Степени подтопления: 1 — опасная, 2 — умеренно опасная, 3 — малоопасная, 4 — незначительно опасная; 5 — территории со смешанным типом подтопления по степени опасности; 6 — границы районов орошаемого земледелия; 7 — границы территорий с различной степенью опасности подтопления при орошении; 8 — оросительные системы; 9 — граница вечной мерзлоты

Рис. 1. Карта опасности подтопления территории России [2]

1.1. Причины, условия и последствия подтопления территорий

Огромные масштабы и темпы промышленного, гидротехнического, мелиоративного и городского строительства зачастую вызывают высокий подъем уровня грунтовых вод.

Причины подтопления могут проявляться как отдельно, так и комплексно [4, 16]. Схема основных источников и причин подтопления представлена на рис. 2.

Рис. 2. Схема причин и источников подтопления

Механическое воздействие грунтовых вод на грунты оснований выражается главным образом в водонасыщении грунтов и в одновременном изменении их напряженного состояния. Это приводит к изменению свойств грунтов основания, что вызывает дополнительные деформации оснований и, следовательно, самих сооружений [17] (рис. 3).

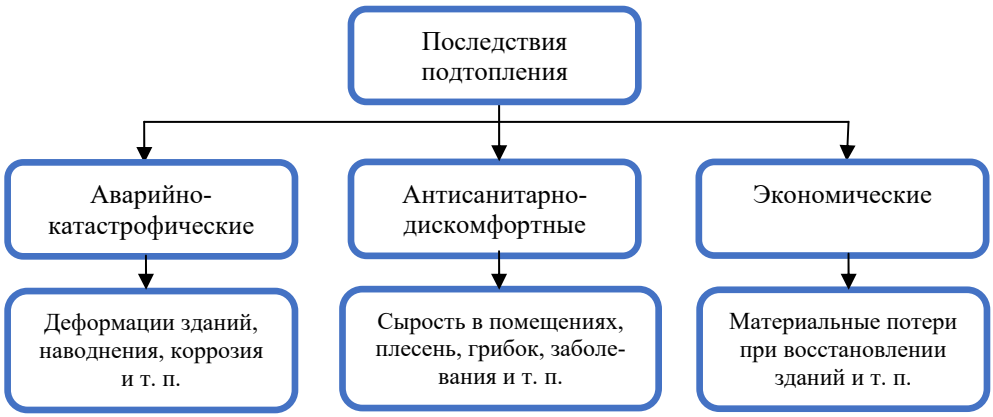


Рис. 3. Классификация последствий подтопления территорий

Согласно данным, опубликованным за последнее время, ущерб от подтопления составляет около 5—6 млрд дол. в год [3, 18—29][1]. Подтопление зачастую вызывает активизацию карстовых процессов, оползней, набухание глинистых и просадку лессовых грунтов, изменение микросейсмической характеристики территорий. Кроме того, на водонасыщенных песчаных, глинистых грунтах интенсивность сейсмического воздействия повышается на 1 балл [19].

Последствия подтопления всегда взаимосвязаны. Сначала возникает само явление подтопления, что вызывает капиллярное увлажнение и водонасыщение грунтов основания, строительных материалов зданий. Под влиянием длительного увлажнения происходит изменение физико-механических характеристик и напряженно-деформируемого состояния грунтов основания, нарушение эксплуатационной пригодности сооружений и зданий, что может привести к их дополнительным осадкам. Кроме того, оказываются затопленными подвальные помещения, ускоряется коррозия бетонных конструкций, сокращается срок службы зданий, не обеспечиваются санитарные нормы их эксплуатации [16, 30].

Цель и задачи исследования

Целью данной работы являлось выявление зависимости изменения характеристик пылевато-глинистых грунтов основания вследствие подтопления застраиваемой территории на основе экспериментально-теоретических исследований и последующий прогноз этого влияния на механическую безопасность зданий и сооружений[2,3].

[1] Environment Agency. Flooding in England: A National Assessment of Flood Risk. 2017. URL: https://www.gov.uk/government/publications/flooding-in-england-national-assessment-of-flood-risk.

[2] Федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» / Справочно-правовая система Консультант-Плюс. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/

При этом необходимо было установить зависимость изменения прочностных и деформационных характеристик пылевато-глинистых грунтов при подтоплении на основе лабораторных исследований. Полученные данные использовались для анализа изменения напряженно-деформированного состояния грунта системы «фундамент — грунтовое основание» при подтоплении территории строящегося жилого дома в г. Тюмени.

2. Лабораторные исследования влияния процесса подтопления на физико-механические характеристики грунта

При обводнении изменение физического состояния грунтов прежде всего выражается в повышении их влажности, и, как следствие, показателя консистенции и удельного веса.

При этом изменение механических свойств грунтов заключается в уменьшении величины модуля общей деформации, параметров сопротивления сдвигу, снижении динамической устойчивости грунтов [23].

Исследования изменения физико-механических свойств грунта при его увлажнении проведены для образцов пылевато-глинистых грунтов, наиболее распространенных на территории юга Тюменской области (табл. 1). Для выявления качественного и количественного влияния водонасыщения были проведены испытания суглинков на срез и на компрессионное сжатие (в количестве до 10 испытаний образцов грунта природной влажности и 10 образцов водонасыщенного грунта) согласно ГОСТ 12248-2010 «Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости».

Таблица 1

Характеристики грунтов по данным лабораторных испытаний

Наименование характеристики	Обозначение	Ед. изм.	Грунт природной влажности	Водонасыщенный грунт
Физические характеристики грунтов				
Влажность	W	%	23,35	25,80
Влажность на границе раскатывания	W_p	%	17,76	
Влажность на границе текучести	W_L	%	34,56	
Число пластичности	I_p	%	16,8	
Показатель текучести	I_L	д. е.	0,33	0,48
Удельный вес грунта	γ	кН/м^3	18,23	20,78
Нормативные значения механических характеристик грунтов				
Модуль деформации	E_n	МПа	13,1	5,4
Удельное сцепление	c_n	кПа	13,2	11,7
Угол внутреннего трения	φ_n	град.	25	10,5

По результатам анализа и статистической обработки результатов серии испытаний грунта в приборах компрессионного сжатия и испытаний на срез можно сделать выводы об общем негативном влиянии водонасыщения грунта на механические характеристики глинистых грунтов:

[3] СП 116.13330.2012 Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003. URL: https://beta.docs.cntd.ru/document/1200095540.

- значения компрессионного модуля деформации снижается до 58,8 %;
- значения угла внутреннего трения грунта снижается до 11,4 %;
- значения удельного сцепления снижается до 58 %.

3. Численное моделирование взаимодействия системы «фундамент — грунтовое основание» при подтоплении

Результаты лабораторных исследований были использованы для прогнозирования развития геотехнической ситуации при строительстве жилого 9-ти этажного жилого дома в г. Тюмени. Здание имеет подземную часть. По техническому заданию рассматривалось два типа фундамента: плитный и ленточный, шириной b = 2,4 м.

На момент исследований площадка строительства находилась в окружении многочисленных водонесущих коммуникаций, утечки из которых способствуют насыщению техногенными водами зоны аэрации и, как следствие, повышению уровня грунтовых вод.

Карты распространения уровневой поверхности грунтовых вод на площадке исследований в различные периоды времени изображены на рис. 4.

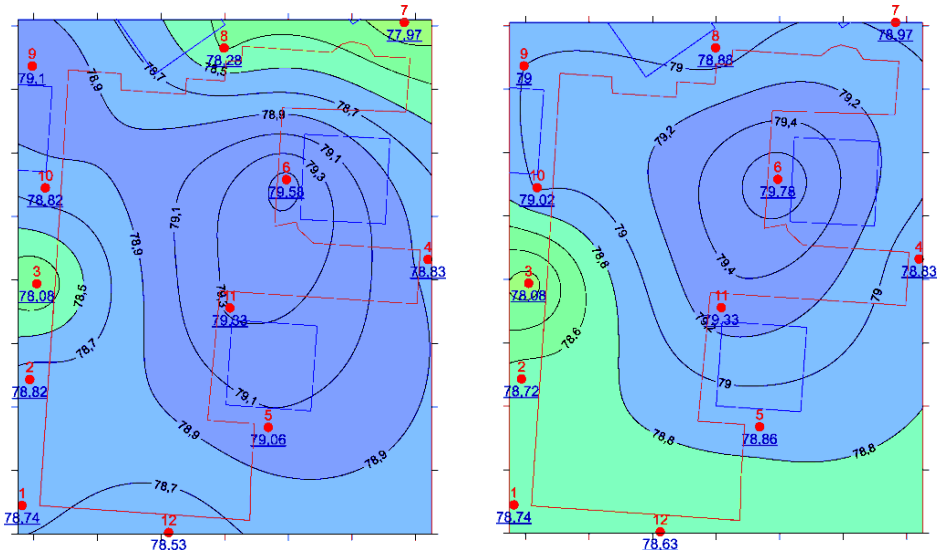


Рис. 4. Карта абсолютных отметок установления уровня грунтовых вод: *а* — на 24.04.2019; *б* — на 25.05.2019

3.1. Прогноз подтопления территории

Прогноз подтопления территории застройки проведен для учета возможного повышения уровня грунтовых вод при стечении неблагоприятных климатических, гидрогеологических и техногенных факторов (рис. 5).

Подъем уровня грунтовых вод для неограниченного водоносного горизонта определяется по формуле[4]:

[4] Пособие к СНиП 2.06.15-85 «Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях». URL: https://ohranatruda.ru/upload/iblock/006/4294854002.pdf.

$$\Delta h = \frac{\omega t}{\pi n}\left[\operatorname{arctg}\frac{\xi_1}{\tau} + \operatorname{arctg}\frac{\xi_2}{\tau} - \frac{\xi_1}{2\tau}\ln\frac{\xi_1^2}{\xi_1^2+\tau^2} - \frac{\xi_2}{2\tau}\ln\frac{\xi_2^2}{\xi_1^2+\tau^2}\right], \quad (1)$$

где ω — дополнительное инфильтрационное питание; t — период с момента начала поступления дополнительной инфильтрации на свободную поверхность, t = 30 сут; n — недостаток насыщения; τ — величина, равная

$$\tau = \frac{kt}{nL}, \quad (2)$$

k — коэффициент фильтрации слоя — k = 0,06 м/сут; L — ширина источника; $\xi_{1,2}$ — величина, равна $\xi_{1,2} = 1 \pm x$.

Повышение уровня Δh составило 2,05 м.

Расчетная схема для определения дополнительного инфильтрационного питания приведена на рис. 5.

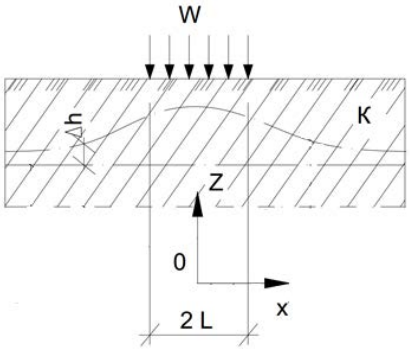


Рис. 5. Расчетная схема для определения дополнительного инфильтрационного питания[5]

3.2. Численное моделирование взаимодействия системы «фундамент — грунтовое основание» при подтоплении

В рассматриваемой ситуации возможному подтоплению подвержен слой пылевато-глинистого грунта (суглинка). Изначально уровень грунтовых вод находился на глубине 5 м, после подтопления территории — на глубине 3 м. Глубина заложения фундамента — 4 м. Параметры грунта при условии водонасыщения грунта в результате подтопления представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные параметры слоя глинистого грунта до и после возможного подтопления территории

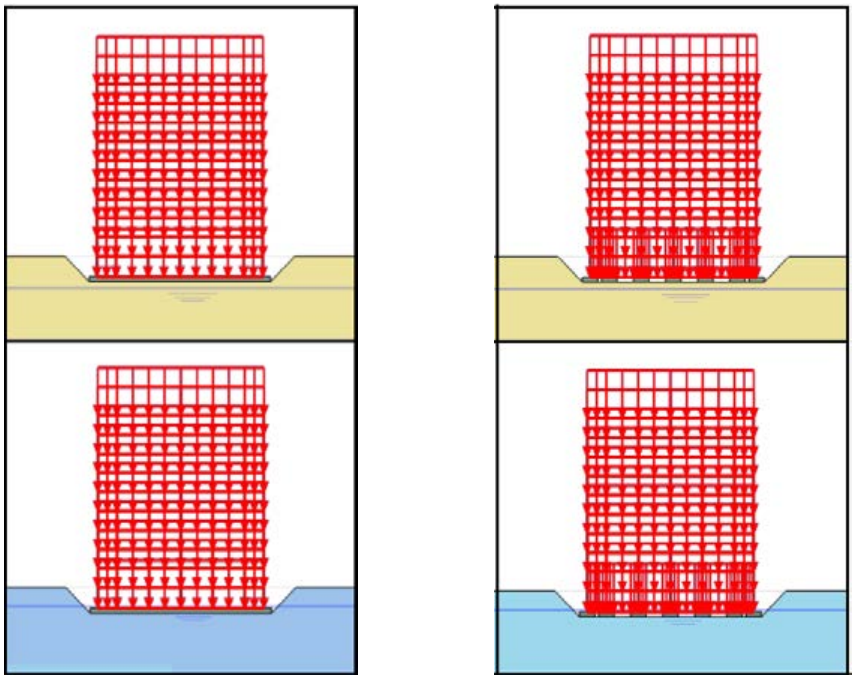
Параметры грунта	Обозначение	Ед. изм.	До повышения УГВ	После повышения УГВ
Удельный вес	γ_{unsat}	кН/м^3	18,23	20,78
Удельный вес грунта, насыщенного водой	γ_{sat}	кН/м^3	20,78	20,78
Модуль упругости	E	кН/м^2	12400	4500
Коэффициент Пуассона	ν	—	0,33	0,33
Сцепление	c	кН/м^2	19,7	9,9
Угол внутреннего трения	φ	град.	13	10

[5] Пособие к СНиП 2.06.15-85 «Прогнозы подтопления и расчет дренажных систем на застраиваемых и застроенных территориях».

Рассматривалось два варианта устройства фундаментов: в виде фундаментных лент и сплошного плитного фундамента. Надземная часть здания задана железобетонным каркасом с перекрытиями в виде единого диска жесткости.

Нагрузки, передаваемые от здания на грунты основания, определены согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия» и заданы равномерно распределенными по перекрытиям.

Расчеты для определения деформаций основания выполнялись как без учета влияния грунтовых вод, так и учетом подтопления территории. В расчете учитывалось стадийное возведение здания. Результаты расчетов приведены на рис. 6—8 и в табл. 3.



а *б*

Рис. 6. Расчетные схемы здания в Plaxis: *а* — для плитного фундамента; *б* — для ленточного фундамента

Характерные точки для рассмотрения деформаций изображены на рис. 7.

Плитный фундамент, обладающий более высокой жесткостью по отношению к ленточному, имеет значение относительной разности осадок до 60 % ниже и находится в пределах допустимых значений, согласно требованиям СП 22.13330.2016 «Основания зданий и сооружений».

Однако в целом в результате подтопления с учетом изменения характеристик грунтов деформации основания значительно увеличиваются, превышая требуемые нормативные значения. Согласно результатам численного моделирования, при рассмотрении системы «здание — фундамент — грунтовое основание» установлено, что в соответствии с негативным сценарием водонасыщение грунтов может привести к увеличению деформации основания в среднем до 77 %.

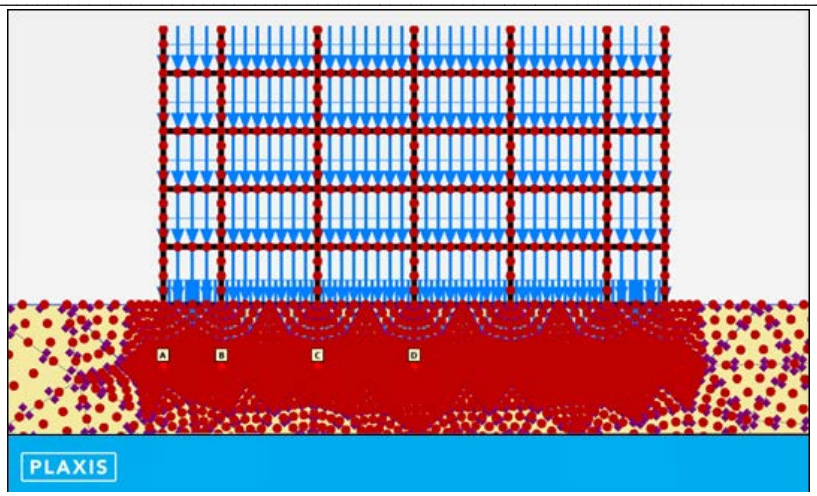
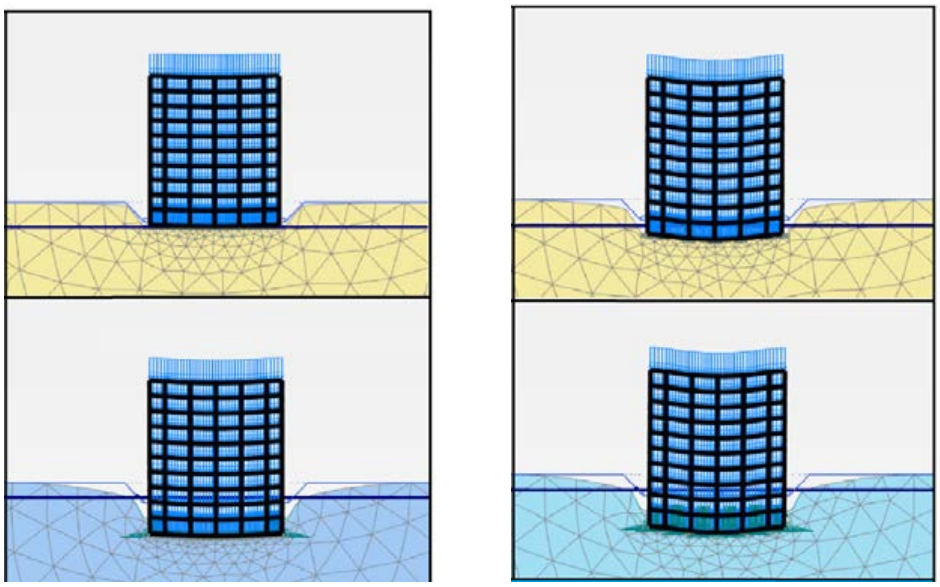


Рис. 7. Расположение рассматриваемых точек



а *б*

Рис. 8. Схемы деформирования до (сверху) и после (снизу) подтопления: *а* — для плитного фундамента; *б* — для ленточного фундамента

Таблица 3

Результаты расчета фундамента в Plaxis

Сравниваемые показатели	Рассматриваемая точка	Осадка основания, полученная по расчету в ПК Plaxis, см	
		Тип фундамента	
		ленточный	плитный
Осадка здания до подтопления	A	10,39	10,46
	B	11,23	10,91
	C	12,30	11,59
	D	12,89	11,93

Сравниваемые показатели	Рассматриваемая точка	Осадка основания, полученная по расчету в ПК Plaxis, см	
		Тип фундамента	
		ленточный	плитный
Осадка здания после подтопления	A	**20,36**	**17,85**
	B	**21,30**	**18,32**
	C	**22,49**	**19,05**
	D	**23,50**	**19,43**
Относительная разница осадок до подтопления	A и B	0,0028	0,0015
	B и C	0,0021	0,0014
	C и D	0,0012	0,0007
Относительная разница осадок после подтопления	A и B	**0,0031**	0,0016
	B и C	0,0024	0,0015
	C и D	0,0020	0,0008

Заключение

1. Таким образом, подтопление территорий носит негативный характер и может приводить к сложнейшим аварийно-катастрофическим, антисанитарно-дискомфортным и экономическим последствиям.

2. По результатам анализа серии испытаний грунта в приборах компрессионного сжатия и испытаний на срез установлена зависимость изменения механических характеристик пылевато-глинистых грунтов при водонасыщении:

- расчетное значение компрессионного модуля деформации при водонасыщении уменьшается до 64 %;
- угол внутреннего трения грунта при водонасыщении уменьшается до 23 %;
- удельное сцепление уменьшается до 50 %.

3. На основе численного моделирования в ПК Plaxis определено изменение напряженно-деформированного состояния грунтового основания, сложенного пылевато-глинистыми грунтами, при рассмотрении системы «фундамент — грунтовое основание» при возможном подтоплении основания жилого дома в г. Тюмени. Для оценки влияния изменения физико-механических характеристик на несущую способность грунтов основания проведен расчет жилого здания с подвалом на плитном и ленточном фундаментах. Установлено, что при водонасыщении грунтов деформации увеличатся в среднем до 77 %, превысив предельно допустимые деформации здания, согласно требованиям нормативных документов.

4. Прогнозирование влияния подтопления территорий на характеристики грунтов оснований может позволить предотвратить негативные последствия, связанные с возможностью возникновения сверхнормативные осадок и их относительной разности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Калошина С. В., Салимгариева Н. И.* Влияние подтопления на получение дополнительных осадок зданий и сооружений // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2013. № 1. С. 104—113.

2. *Осипов В. И., Шойгу С. К.* Природные опасности России: в 6 т. Т. 3. Экзогенные геологические опасности // Министерство РФ по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий. М.: КРУК, 2002. 345 с.

3. *Аверин И. В., Ракитина Н. Н., Букреев Д. С.* Потенциальная подтопляемость и прогноз изменения уровня грунтовых вод застраиваемых площадок строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 1. С. 41—42.

4. *Сологаев В. И.* Защита от подтопления в городском строительстве. Устройство и работа: конспекты лекций. Омск: СибАДИ, 1990. 56 с.

5. *Разумов Г. А., Хасин М. Ф.* Тонущие города. М.: Стройиздат, 1991. 256 с.

6. *Клиорина Г. И, Осин В. А., Шумилов В. С.* Инженерная подготовка городских территорий. М.: Высшая школа, 1984. 271 с.

7. *Гавшина З. П., Дзинцер Е. С.* Условия подтопления грунтовыми водами. М.: Стройиздат, 1982. 116 с.

8. *Аверин И. В., Ракитина Н. Н., Кокорев И. В., Букреев Д. С.* Определение степени потенциальной подтопляемости и прогнозная оценка возможного изменения уровня грунтовых вод застраиваемых территорий // Вестник МГСУ. 2009. С. 235—237.

9. *Ретхати Л.* Грунтовые воды и строительство. М.: Стройиздат, 1989. 432 с.

10. *Симонов А. В.* Осушение и регулирование водно-теплового режима застраиваемых территорий в нефтедобывающих районах Западной Сибири. М.: ВНИОЭНГ, 1976. 59 с.

11. *Слинко О. В.* Задачи гидрогеологических изысканий по стадиям проектирования для прогноза уровенного режима грунтовых вод на городских территориях // Гидрогеологические исследования на застраиваемых территориях: сборник статей АН СССР. 1988. С. 87—93.

12. *Великина Г. М., Брускова В. В., Койда А. Н.* Гидрогеологическое и математическое обоснование воспроизведения на ЭВМ процесса подтопления городских территорий // Вопросы инженерно-гидрогеологических исследований на застраиваемых территориях: сборник научных трудов Производственного и НИИ по инженерным изысканиям в строительстве. 1987. С. 18—21.

13. *Ведерников В. В., Тихонова Н. И.* Количественная оценка техногенных факторов подтопления застроенных территорий // Гидрогеологические исследования на застраиваемых территориях: сборник статей АН СССР. 1988. С. 15—21.

14. *Зиновьев М. Л.* Влияние глубины промерзания грунтов на формирование процесса подтопления. // Гидрогеологические исследования на застраиваемых территориях: сборник статей АН СССР. 1988. С. 25—31.

15. *Некрасова Е. Л.* Методические основы районирования застраиваемых территорий по изменению химического состава грунтовых вод при подтоплении // Гидрогеологические исследования на застраиваемых территориях: сборник статей АН СССР. 1988. С. 43—48.

16. *Нурпеисова А. А.* Процесс подтопления территорий. Причины и последствия подтопления // Новые технологии — нефтегазовому региону: материалы международной научно-практической конференции. 2018. С. 261—263.

17. *Дегтярев Б. М., Дзекцер Е. С., Муфтахов А. Ж.* Защита оснований зданий и сооружений от воздействия подземных вод. М.: Стройиздат, 1985. 264 с.

18. *Арефьева Е. В.* Подтопление объектов и застроенных территорий как потенциальный источник чрезвычайных ситуаций // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 10. С. 33—34.

19. *Арефьева Е. В.* Регулирование режима грунтовых вод при подтоплении объектов и застроенных территорий // Промышленное и гражданское строительство. 2007. № 11. С. 47.

20. *Арефьева Е. В., Самойлов С. В.* Оценка эффективности превентивных мероприятий по предупреждению аварий и чрезвычайных ситуаций, связанных с наводнением и подтоплением застроенных территорий // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 11. С. 7—10.

21. *Арефьева Е. В., Мухин В. И., Шимитило В. Л.* Оценка параметров эмпирических распределений затопления и подтопления застроенных территорий // Промышленное и гражданское строительство. 2010. № 2. С. 35—37.

22. *Козловский С. В., Шешеня Н. Л.* Мониторинг опасных инженерно-геологических процессов // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 11. С. 7—10.

23. Urban and river flooding: Comparison of flood risk management approaches in the UK and China and an assessment of future knowledge needs / M. Rubinato, A. Nichols, Y. Peng, J. Zhang, etc. // Water Science and Engineering Vol. 12. Iss. 4. Pp. 274—283. DOI: 10.1016/j.wse.2019.12.004.

24. *Pregnolato M., Ford A., Wilkinson S. M., Dawson R. J.* The impact of flooding on road transport: A depth-disruption function // Transportation Research Part D: Transport and Environment. 2017. Vol. 55. Pp. 67—81.

25. Flood hazard mapping and assessment in data-scarce Nyaungdon area / Z. M. Khaing, K. Zhang, H. Sawano, B. B. Shrestha, etc. Myanmar, 2019.

26. *Booth D. B.* Urbanization and the natural drainage system: Impacts, solutions and prognosis // Northwest Environ. J. 1991. Vol. 7. Iss. 1. Pp. 93—118.

27. Environment Agency. Flood and Coastal Erosion Risk Management Long-Term Investment Scenarios (LTIS). 2014. URL; https://www.gov.uk/government/publications/flood-and-coastal-risk-management-in-england-long-term-investment.

28. *Hofmann J., Schüttrumpf H.* Risk-Based and Hydrodynamic Pluvial Flood Forecasts in Real Time. 2020. Vol. 12. Iss. 7. URL: https://www.mdpi.com/2073-4441/12/7/1895.

29. Attribution of flood risk in urban areas / R. J. Dawson, L. Speight, J. W. Hall, S. Djordjevic, ets. // J. Hydroinf. 2008. Vol. 10. Iss. 4. Pp. 275—288.

30. *Pronozin Ya. A., Bragar E. P.* Changes in soil properties at unloading of base of deep foundation pit // Geotechnical Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations. 2019. Vol. 2. Pp. 290—295.

© Степанов М. А., Брагарь Е. П., Нурпеисова А. А., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Степанов М. А., Брагарь Е. П., Нурпеисова А. А. Влияние процесса подтопления территорий на характеристики грунтов основания зданий и сооружений // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 89—100.

Об авторах:

Степанов Максим Андреевич — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительного производства, Тюменский индустриальный университет. Российская Федерация, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; maxim_stepanov@inbox.ru

Брагарь Елена Петровна — ассистент-стажер кафедры строительного производства, Тюменский индустриальный университет. Российская Федерация, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; el.bragar@yandex.ru

Нурпеисова Алтынай Аманжоловна — магистрант, каф. геотехники, Тюменский индустриальный университет. Российская Федерация, 625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38; nurpeisovaaa@mail.ru

Maxim A. Stepanov, Elena P. Bragar', Altynai A. Nurpeisova

Industrial University of Tyumen

THE INFLUENCE OF THE AREA FLOODING PROCESS ON THE BUILDINGS SOILBASE CHARACTERISTICS

The article considers the area flooding problem both in Russia and abroad. The authors give the scheme of the main causes of flooding, and the classification of the consequences of area flooding. They present the laboratory test results of physical and mechanical properties changes of the soil, which show the negative effect of soil water saturation on the soils mechanical characteristics. The laboratory tests allowed the authors of the article to share the results of numerical modeling about forecasting the development of the geotechnical situation during the construction of a multi-storied residential building with an underground part. This was done in the conditions of a possible increase of groundwater levels. The article gives the forecast of the development area flooding considering two types of foundation (slab and strip).

K e y w o r d s: foundation, flooding, soilbase, laboratory tests, numerical modeling, stress-strain distribution.

For citation:

Stepanov M. A., Bragar' E. P., Nurpeisova A. A. [The influence of the area flooding process on the buildings soilbase characteristics]. *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], 2021, iss. 1, pp. 89—100.

About authors:

Maxim A. Stepanov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Industrial University of Tyumen. 38, Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; maxim_stepanov@inbox.ru

Elena P. Bragar' — Assistant, Industrial University of Tyumen. 38, Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; el.bragar@yandex.ru

Altynai A. Nurpeisova — Master's Degree student, Industrial University of Tyumen. 38, Volodarskogo st., Tyumen, 625000, Russian Federation; nurpeisovaaa@mail.ru

УДК 624.131

А. Н. Ушаков

Волгоградский государственный технический университет

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНТУРАХ ПОДЗЕМНЫХ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК РАЗЛИЧНЫХ ФОРМ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ

Приведены результаты исследования по определению напряженного состояния на контурах подземных горизонтальных выработок, поперечное сечение которых имеет вид трапеции и свода с вертикальными стенками при заданных значениях равномерного давления и коэффициента бокового распора. Приведены графические изображения эпюр напряжений, действующих на контурах выработок.

К л ю ч е в ы е с л о в а: отображающая функция, напряженное состояние, равномерное давление, подземная горизонтальная выработка, коэффициент бокового распора.

Известно, что одной из важнейших проблем геомеханики является задача о напряженно-деформированном состоянии вокруг выработок различных форм поперечного сечения в горном или грунтовом массиве [1—4]. Особенно важной является задача о распределении напряжений на контуре выработки. Так как один из размеров, как правило — длина, во много раз превышает два других, то задача по вычислению компонент напряжений может быть сведена к плоской. Для решения плоских задач линейной теории упругости [5—9] весьма эффективным является применение методов теории функций комплексного переменного [10—15]. Сечение выработки можно получить при помощи функции комплексного переменного, совершающей конформное отображение внутренности или внешности единичного круга на внешность бесконечной односвязной области с границей, представляющей собой простую замкнутую кривую.

Заметим, что задача построения функции, осуществляющей конформное отображение, довольно трудна. Даже если удается получить для нее аналитическое выражение, то оно обычно является громоздким и приходится отказываться от точных выражений, заменяя их более простыми и хорошо изученными функциями. К числу таких функций можно отнести полиномы. Указанное обстоятельство способствовало созданию приближенных методов построения отображающих функций [16—19].

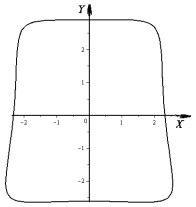
Целью данной статьи является анализ напряженного состояния в точках контуров подземных горизонтальных выработок заданных размеров и конфигураций при условии действия на них равномерного всестороннего давления.

Рассмотрим функцию комплексного переменного, осуществляющую отображение внутренности единичного круга $|\zeta|<1$ на внешность бесконечной односвязной области, границей которой является простая замкнутая кривая:

$$z = x + iy = \omega(\zeta) = i(A\zeta^{-1} + B\zeta + C\zeta^2 + D\zeta^3 + E\zeta^4 + F\zeta^5), \qquad (1)$$

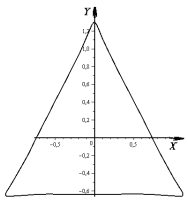
где A, B, C, D, E, F — действительные коэффициенты.

В зависимости от значений коэффициентов отображающей функции (1) возможно построение кривых различных конфигураций, имитирующих формы поперечного сечения подземных горных выработок (отверстий). Некоторые из них приведены на рис. 1 [20].



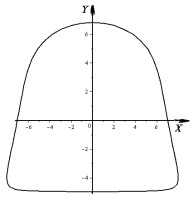
а

$A = -2,96,\ B = -0,21,$
$C = 0,171,\ D = 0,416$
$E = -0,032, F = 0$



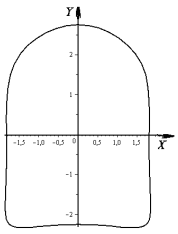
б

$A = -0,95,\ B = 0,\ C = 0,33,$
$D = 0, E = 0,\ F = -0,02$



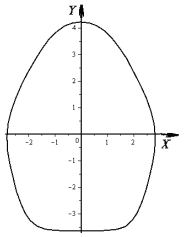
в

$A = -7,2,\ B = 0,8,\ C = 1,$
$D = 0,6,\ E = -0,08,$
$F = -0,1$



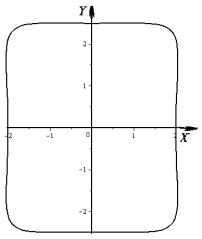
г

$A = -2,4,\ B = -0,339,$
$C = 0,16,\ D = 0,24$
$E = 0,087, F = -0,004$



д

$A = -3,3,\ B = -0,62,$
$C = 0,2,\ D = 0,02,$
$E = 0,082,\ F = 0,06$



е

$A = -2,606,\ B = -0,245,$
$C = 0,\ D = 0,361,$
$E = F = 0$

Рис. 1. Формы поперечного сечения выработок (отверстий): *а* — трапециевидная форма; *б*— треугольная форма; *в* — свод с наклонными стенками; *г*— свод с вертикальными стенками; *д* — подковообразная форма; *е* — прямоугольная форма

Полагая в выражении (1)

$$\zeta = e^{i\theta} = \cos\theta + i\sin\theta$$

и, отделяя вещественную часть от мнимой, получим уравнения контуров отверстий в параметрическом виде:

$$\begin{aligned} x(\theta) &= (A-B)\sin\theta - C\sin 2\theta - D\sin 3\theta - E\sin 4\theta - F\sin 5\theta, \\ y(\theta) &= (A+B)\cos\theta + C\cos 2\theta + D\cos 3\theta + E\cos 4\theta + F\cos 5\theta, \end{aligned} \qquad (2)$$

где $0 < \theta \le 2\pi$.

Рассмотрим подземную горизонтальную выработку неограниченной длины и сечения, конфигурация которого определяется при помощи отображающей функции (1) и задается параметрическими уравнениями (2). Пусть выработка находится на глубине H, а ее контур подвержен равномерному давлению p.

Тогда напряженное состояние в горном массиве, ослабленном выработкой, имеет вид

$$\sigma_0^x = \mu\gamma H + p, \sigma_0^y = \gamma H + p, \tag{3}$$

где μ — коэффициент бокового распора, γ — объемный вес пород, H и p — постоянные величины, причем будем полагать [3], что при $p > 0$ контур выработки испытывает равномерное сжатие постоянной величины p, а при $p < 0$ — равномерное растяжение той же интенсивности.

Используя метод решения задачи о распределении напряжений в плоском изотропном поле, ослабленном каким-либо отверстием [10, 16], получим формулу тангенциального нормального напряжения в виде

$$\sigma_\theta = -\gamma H \frac{\sum_{m=0}^{4} I_m \cos m\theta}{K + L\cos\theta + M\cos 2\theta + N\cos 3\theta + R\cos 4\theta + U\cos 5\theta + V\cos 6\theta} + p\left(1 - 4\frac{\sum_{m=0}^{4} J_m \cos m\theta - 4AE\cos 5\theta - 5AF\cos 6\theta}{K + L\cos\theta + M\cos 2\theta + N\cos 3\theta + R\cos 4\theta + U\cos 5\theta + V\cos 6\theta}\right), \tag{4}$$

где

$$K = A^2 + B^2 + 4C^2 + 9D^2 + 16E^2 + 25F^2,$$

$$L = 4C(B + 3D) + 8E(3D + 5F),$$

$$M = 2B(3D - A) + 16CE + 30DF, \tag{5}$$

$$N = 8BE + 4C(5F - A),$$

$$R = 10BF - 6AD,$$

$$U = -8AE,$$

$$V = -10AF;$$

$$I_k = (1 + \mu)I_{k1} + (1 - \mu)I_{k2}, \text{ где } k = 0,\ldots,4. \tag{6}$$

$$I_{01} = 16E^2 + 25F^2 + 4C^2 + 9D^2 - B^2 - A^2 + \left(2AB + \frac{8ACE}{A - 2F} + 18DF\right)\frac{T_2}{T_1} + \frac{16C^2F}{A - 2F},$$

$$I_{02} = -\frac{2A^2}{T_1}((A - 2F)(AB + 9F) + 4ACE),$$

$$I_{11} = 40EF + 24DE - 4BC + \left(4AC + \frac{4AE(B + 3D)}{A - 2F} + 12F(C + 2E)\right)\frac{T_2}{T_1} + \frac{4AC(B + 3D)}{A - 2F},$$

$$I_{12} = -\frac{4A^2}{T_1}((A - 2F)(AC + 3FC + 6EF) + AE(B + 3D)),$$

$$I_{21} = 2AB + 30DF + \left(2A(3D - A) + \frac{16AE^2}{A - 2F} + 6F(B + 5F)\right)\frac{T_2}{T_1} + \frac{16ACE}{A - 2F},$$

$$I_{22} = -\frac{2A^2}{T_1}(8AE^2 + (A-2F)(A(3D-A)+3F(B+5F)),$$

$$I_{31} = \frac{4A}{A-2F}\left(E(A+F)\frac{T_2}{T_1} + 3FC\right),$$

$$I_{32} = -\frac{4A^3E}{T_1}(A+F).$$

$$I_{41} = 4AF\frac{T_2}{T_1},$$

$$I_{42} = -\frac{4A^3F(A-2F)}{T_1}.$$

$$J_m = \frac{A}{T_1}\tilde{Q}_m + W_m,\ m = 0,\ldots,4. \qquad (7)$$

$$T_1 = A^2(A-D-2F) + 2A(DF-E) + 3F^2(2F-A),$$

$$T_2 = A(AB - 2F + 2EC + 3FD) - 6DF^2;$$

$$\tilde{Q}_0 = BT_2 + 4C\alpha + 9D\beta,$$

$$\tilde{Q}_1 = 2CT_2 + 2(B+3D)\alpha + 6(C+2E)\beta,$$

$$\tilde{Q}_2 = (3D-A)T_2 + 8E\alpha + 3(B+5F)\beta,$$

$$\tilde{Q}_3 = 4ET_2 + 2(5F-A)\alpha,$$

$$\tilde{Q}_4 = 5FT_2 - 3A\beta;$$

$$W_0 = 16E^2 + 25F^2,$$

$$W_1 = 12DE - 40EF,$$

$$W_2 = 8CE + 15DF,$$

$$W_3 = 4BE + 10CF,$$

$$W_4 = 5BF;$$

$$\alpha = \frac{CT_1 + ET_2}{A-2F},$$

$$\beta = \frac{DT_1 + FT_2}{A}.$$

Формула (4) получена в предположении, что глубина заложения выработки H значительна, и будем полагать, что [1]:

$$H \geq 50R_{\max}, \quad (8)$$

где $R_{\max}$ — наибольший линейный размер сечения выработки.

Нахождение нулей тангенциального нормального напряжения сводится к решению уравнения

$$\lambda_6 \cos^6\theta + \lambda_5 \cos^5\theta - 8\lambda_4 \cos^4\theta - 4\lambda_3 \cos^3\theta - 2\lambda_2 \cos^2\theta - \lambda_1 \cos\theta - \lambda_0 = 0, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned}
\lambda_6 &= 320AFp,\\
\lambda_5 &= 128AEp,\\
\lambda_4 &= \gamma HI_4 - p(R - 60AF - 4J_4),\\
\lambda_3 &= \gamma HI_3 - p(N - 40AE - 4J_3),\\
\lambda_2 &= \gamma H(I_2 - 4I_4) - p(M - 4R + 90AF - 4(J_2 - 4J_4)),\\
\lambda_1 &= \gamma H(I_1 - 3I_3) - p(L - 3N + 40AE - 4(J_1 - 3J_3)),\\
\lambda_0 &= \gamma H(I_0 - I_2 + I_4) - p(K - M + R - 10AF - 4(J_0 - J_2 + J_4)).
\end{aligned} \quad (10)$$

Рассматривая выражение (4) как функцию аргумента θ, вычислим производную функции $\sigma'(\theta)$, и, приравнивая ее нулю, получаем уравнения для нахождения критических значений:

$$\sin\theta = 0,$$

$$\begin{aligned}
&512\delta_9\cos^9\theta + 128\delta_8\cos^8\theta + 128\delta_7\cos^7\theta + 32\delta_6\cos^6\theta +\\
&+ 32\delta_5\cos^5\theta + 8\delta_4\cos^4\theta + 8\delta_3\cos^3\theta + 2\delta_2\cos^2\theta + 2\delta_1\cos\theta + \delta_0 = 0,
\end{aligned} \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned}
&\delta_9 = a_1,\ \delta_8 = a_2,\ \delta_7 = a_3 - 8a_1,\ \delta_6 = a_4 - 7a_2,\ \delta_5 = 21a_1 - 6a_3 + a_5,\\
&\delta_4 = 15a_2 - 5a_4 + a_6,\ \delta_3 = 10a_3 + a_7 - 20a_1 - 4a_5,\\
&\delta_2 = a_4 + a_8 - 3a_6 - 10a_2,\\
&\delta_1 = 10a_1 - 8a_3 + 3a_5 - 2a_7 + a_9,\ \delta_0 = 3a_4 + a_8 - a_2 - 2a_6 + a_{10}.
\end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
a_1 &= (10AFI_4)\gamma H - 2p(10AF(R - 2J_4),\\
a_2 &= (8AEI_4 + 30AFI_3)\gamma H - 2p(8AE(R - 2J_4) + 30AF(N - 2J_3)),\\
a_3 &= (8AEI_3 + 20AFI_2)\gamma H - 2p(8AE(N - 2J_3) + 20AF(M - 2J_2)),\\
a_4 &= (24AEI_2 + 50AFI_1 + NI_4 - RI_3)\gamma H - 2p(24AE(M - 2J_2) +\\
&\quad + 50AF(L - 2J_1) + 2(RJ_3 - NJ_4)),\\
a_5 &= (16AEI_1 + 60AFI_0 + MI_4 - RI_2)\gamma H - 2p(16AE(L - 2J_1) +\\
&\quad + 60AF(K - 2J_0) + 2(RJ_2 - MJ_4)),\\
a_6 &= (80AEI_0 + 70AFI_1 + MI_3 - NI_2 + 3(LI_4 - RI_1)\gamma H -\\
&\quad - 2p(80AE(K - 2J_0) + 70AF(L - 2J_1) + 2(NJ_2 - MJ_3) + 6(RJ_1 - LJ_4)),
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
a_7 &= (24AEI_1 + 40AFI_2 + LI_3 - NI_1 + 4(KI_4 - RI_0))\gamma H - \\
&\quad - 2p(24AE(L - 2J_1) + 40AF(M - 2J_2) + 2(NJ_1 - LJ_3) + 8(RJ_0 - KJ_4)), \\
a_8 &= (56AEI_2 + 90AFI_3 + LI_2 - MI_1 + 5(LI_4 - RI_1) + 6(KI_3 - NI_0))\gamma H - \\
&\quad - 2p(56AE(M - 2J_2) + 90AF(N - 2J_3) + 2(MJ_1 - LJ_2) + 10(RJ_1 - LJ_4) + \\
&\quad + 12(NJ_0 - KJ_3)), \\
a_9 &= (64AEI_3 + 80AFI_2 + 2(KI_2 + LI_3 - MI_0 - NI_1) + 3(MI_4 - RI_2))\gamma H - \\
&\quad - 2p(64AE(N - 2J_3) + 80AF(M - 2J_2) + 4(MJ_0 + NJ_1 - KJ_2 - LJ_3) + \\
&\quad + 6(RJ_2 - NJ_4)), \\
a_{10} &= (200AEI_0 - 168AEI_2 + 48AEI_4 - 90AFI_3 + KI_1 - LI_0 + 5(MI_3 - NI_2) + \\
&\quad + 9(NI_0 - KI_3))\gamma H - 2p(200AE(K - 2J_0) - 168AE(M - 2J_2) + 48AE(R - 2J_4) - \\
&\quad - 90AF(N - 2J_3) + 2(LJ_0 - KJ_3) + 10(NJ_2 - MJ_3) + 18(KJ_3 - NJ_0)).
\end{aligned}
\tag{13}
$$

Уравнение $\sin\theta = 0$ дает значения $\theta_1 = 0$ и $\theta_2 = \pi$, а уравнение (11) можно решить на отрезке $0 \le \theta \le \pi$ с достаточной для практических приложений степенью точности.

Формулы (4) и (11) являются обобщениями соответствующих соотношений, используемых в работах [21, 22] для расчета допустимых глубин заложения подземных горизонтальных выработок.

Теперь, используя приведенные выше формулы, рассмотрим задачу о распределении напряжений на контуре трапециевидной формы, изображенной на рис. 1, *а* и имитирующей подземную горизонтальную выработку соответствующей формы поперечного сечения.

Рассмотрим в качестве вмещающей породы гранит с объемным весом $\gamma = 2{,}5$ т/м^3 и пределами прочности при растяжении $R_{\text{рас}} = -17$ МПа и сжатии $R_{\text{сж}} = 200$ МПа. Поскольку наибольший линейный размер трапециевидной выработки — ее высота, равная 5,5 м, то, с учетом (8), положим $H = 275$ м. Тогда $\gamma H = 687500$ кгс/м^2.

При решении задачи используем два значения величины коэффициента бокового распора: $\mu_1 = 0{,}25$ и $\mu_2 = 1$. Первое из них соответствует величине коэффициента Пуассона, которая в среднем для горных пород равна $\nu = 0{,}20$. Второе соответствует величине коэффициента Пуассона $\nu = 0{,}5$ и предполагает гидростатическое распределение напряжений в горном массиве, которое принимается при определении напряжений на достаточно больших глубинах [1].

Выработка трапециевидной формы сечения

Рассмотрим подземную выработку трапециевидной формы сечения с коэффициентами отображающей функции (1):

$$A = -2{,}96,\ B = -0{,}21,\ C = 0{,}171,\ D = 0{,}416,\ E = -0{,}032,\ F = 0.$$

При $\mu_1 = 0{,}25$ на основании формул (6), (7) и приведенных в данной работе соотношений для I_{kl}, $k = 0, \ldots 4$, $l = 1{,}2$; $\tilde{Q}_m$ и W_m, $m = 0, \ldots 4$, получаем:

$$I_0 = -9{,}586,\ I_1 = 1{,}914,\ I_2 = 15{,}821,\ I_3 = -0{,}218,\ I_4 = 0;$$

$$J_0 = 1,727,\ J_1 = 0,397,\ J_2 = -1,105,\ J_3 = 1,024,\ J_4 = 3,694; \quad (14)$$

$$K = 10,455,\ L = 0,568,\ M = 0,325,\ N = 2,012,\ R = 7,388;$$

$$U = -0,757,\ V = 0.$$

Тогда уравнение (9) с учетом соотношений (10) и (14) принимает вид

$$12,124p\cos^5\theta - 59,105p\cos^4\theta + (0,875\gamma H - 23,222p)\cos^3\theta + \\ +(-31,642\gamma H + 64,239p)\cos^2\theta + (-2,570\gamma H + 8,642p)\cos\theta + \quad (15) \\ +25,408\gamma H - 6,367p = 0.$$

Для нахождения нулей необходимо задать значения давления p. Из постановки задачи следует, что необходимо выбирать значения $p < 0$.

В качестве значений напряжений, приложенных к контуру выработки, примем:

$$p_0 = 0\ \text{МПа},\ \ p_1 = -0,1\ \text{МПа},\ \ p_2 = -0,5\ \text{МПа}, \\ p_3 = -1\ \text{МПа},\ \ p_4 = -1,5\ \text{МПа},\ \ p_5 = -2\ \text{МПа}. \quad (16)$$

Прямые вычисления по формуле (15) с учетом (14) дают следующие значения нулей:

при $p_0 = 0$ МПа имеем $\theta_1 = 0,523,\ \theta_2 = 2,754;$

$p_1 = -0,1$ МПа имеем $\theta_1 = 0,563,\ \theta_2 = 2,699;$

$p_2 = -0,5$ МПа имеем $\theta_1 = 0,777,\ \theta_2 = 2,448;$

$p_3 = -1$ МПа имеем $\theta_1 = 0,966,\ \theta_2 = 2,270;$

$p_4 = -1,5$ МПа имеем $\theta_1 = 0,027,\ \theta_2 = 1,055,\ \theta_3 = 2,191;$

$p_5 = -2$ МПа имеем $\theta_1 = 0,150,\ \theta_2 = 1,105,\ \theta_3 = 2,146.$

Перейдем к вычислению экстремальных значений тангенциальных нормальных напряжений.

По формулам (11) с учетом выражений (12—14), получим

при $p_0 = 0$ МПа имеем $\theta_1 = 0,880,\ \theta_2 = 1,668,\ \theta_3 = 2,362$.

Присоединяя к полученным значениям $\theta_4 = 0$ и $\theta_5 = \pi$, по формуле (4) находим:

$$\sigma(\theta_1) = 2917800,381,$$
$$\sigma(\theta_2) = 868218,772,$$
$$\sigma(\theta_3) = 2018721,945,$$
$$\sigma(\theta_4) = -309532,686,$$
$$\sigma(\theta_5) = -215238,465.$$

Тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_4) = -309532,686,\ \sigma_{\max}(\theta_1) = 2917800,381. \quad (17)$$

При $p_1 = -0,1$ МПа имеем $\theta_1 = 0,893,\ \theta_2 = 1,673,\ \theta_3 = 2,340.$

Полагая $\theta_4 = 0$ и $\theta_5 = \pi$, получим

$\sigma(\theta_1) = 2519940,983,$

$\sigma(\theta_2) = 900997,636,$

$\sigma(\theta_3) = 1734288,680,$

$\sigma(\theta_4) = -288734,800,$

$\sigma(\theta_5) = -223773,431.$

Тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_4) = -288734,800,\ \sigma_{\max}(\theta_1) = 2519940,983. \quad (18)$$

Для остальных значений давления (16) аналогичными вычислениями находим:

при $p_2 = -0,5$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,626,\ \theta_2 = 1,035,\ \theta_3 = 1,735,\ \theta_4 = 2,090,\ \theta_5 = 2,617,\ \theta_6 = 0,\ \theta_7 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_5) = -581396,109,\ \ \sigma_{\max}(\theta_2) = 1347728,975. \quad (19)$$

При $p_3 = -1$МПа имеем

$$\theta_1 = 0,738,\ \theta_2 = 1,572,\ \theta_3 = 2,496,\ \theta_4 = 0,\ \theta_5 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -2265709,911,\ \sigma_{\max}(\theta_2) = 1207401,228. \quad (20)$$

При $p_4 = -1,5$МПа имеем

$$\theta_1 = 0,782,\ \theta_2 = 1,593,\ \theta_3 = 2,485,\ \theta_4 = 0,\ \theta_5 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -4468521,146,\ \sigma_{\max}(\theta_2) = 1369562,946. \quad (21)$$

И, наконец, при $p_5 = -2$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,793,\ \theta_2 = 1,609,\quad \theta_3 = 2,474,\ \theta_4 = 0,\ \theta_5 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -6726586,630,\ \sigma_{\max}(\theta_2) = 1534088,793. \quad (22)$$

Проведенные вычисления позволяют выделить участки, на которых при заданных значениях равномерного давления действуют растягивающие напряжения, а именно:

при $p_0 = 0$ МПа имеем $\theta \in (0, 0,523) \cup (2,754, 3,529) \cup (5,76, 2\pi)$;

$p_1 = -0,1$ МПа имеем $\theta \in (0, 0,563) \cup (2,699, 3,584) \cup (5,72, 2\pi)$;

$p_2 = -0,5$ МПа имеем $\theta \in (0, 0,777) \cup (2,448, 3,835) \cup (5,506, 2\pi)$;

$p_3 = -1$МПа имеем $\theta \in (0, 0,966) \cup (2,270, 4,013) \cup (5,317, 2\pi)$;

$p_4 = -1,5$ МПа имеем $\theta \in (0,027, 1,055) \cup (2,191, 4,092) \cup (5,228, 6,256)$;

$p_5 = -2$ МПа имеем $\theta \in (0,150, 1,105) \cup (2,146, 4,137) \cup (5,178, 6,133)$.

На остальных участках интервала $(0, 2\pi)$ действуют сжимающие напряжения.

Эпюры тангенциальных нормальных напряжений для данной выработки трапециевидной формы сечения при заданных значениях равномерного давления p_0—p_5 в случае $\mu_1 = 0,25$ приведены на рис. 2.

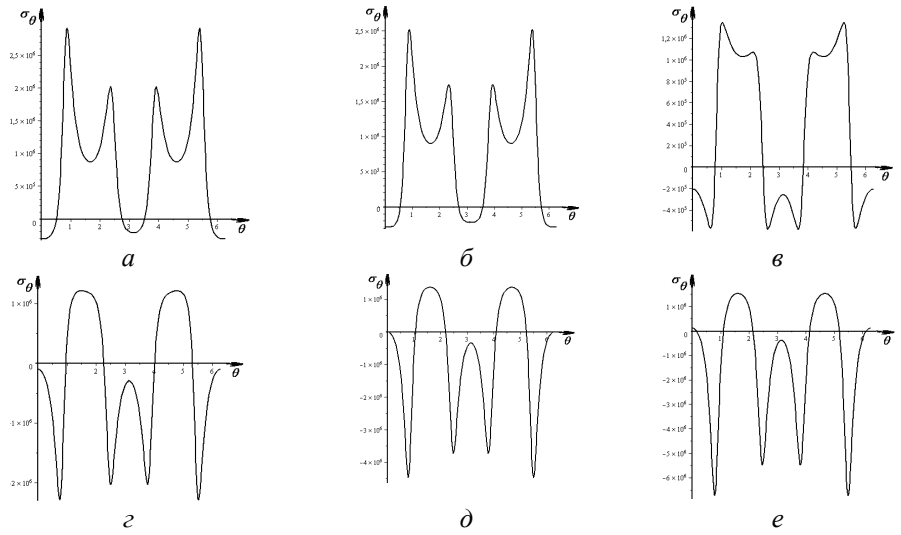


Рис. 2. Эпюры тангенциальных нормальных напряжений на контуре в виде трапеции при: *а* — $p_0 = 0$ МПа ; *б* — $p_1 = -0,1$ МПа ; *в* — $p_2 = -0,5$ МПа ; *г* — $p_3 = -1$ МПа ; *д* — $p_4 = -1,5$ МПа ; *е* — $p_5 = -2$ МПа и $\mu_1 = 0,25$

Случай $\mu_2 = 1$.

На основании формул (6) получаем:

$$I_0 = -14,084,\ I_1 = 0,806,\ I_2 = -0,711,\ I_3 = 0,046,\ I_4 = 0. \tag{23}$$

Тогда уравнение (9) с учетом соотношений (10) принимает вид:

$$\begin{aligned} &-12,124\,p\cos^5\theta + 59,105\,p\cos^4\theta + (-0,184\gamma H + 23,222\,p)\cos^3\theta + \\ &+(1,423\gamma H - 64,239\,p)\cos^2\theta + (-0,668\gamma H - 8,642\,p)\cos\theta + \\ &+13,372\gamma H + 6,367\,p = 0. \end{aligned} \tag{24}$$

В качестве значений давлений, приложенных к контуру выработки, примем (16).

Прямые вычисления по формуле (24) с учетом (14) и (23) дают следующие значения нулей:

при $p_3 = -1$ МПа имеем $\theta_1 = 0,637,\ \theta_2 = 0,982,\ \theta_3 = 2,294, \theta_4 = 2,609$;

$p_4 = -1,5$ МПа имеем $\theta_1 = 0,502,\ \theta_2 = 1,106,\ \theta_3 = 2,163,\ \theta_4 = 2,770$;

$p_5 = -2$ МПа имеем $\theta_1 = 0,445,\ \theta_2 = 1,156,\ \theta_3 = 2,113,\ \theta_4 = 2,843$.

При $p_0 = 0$ МПа , $p_1 = -0{,}1$ МПа , $p_2 = -0{,}5$ МПа нулей нет.

Перейдем к вычислению экстремальных значений тангенциальных нормальных напряжений.

При $p_0 = 0$ МПа имеем:

$$\theta_1 = 0{,}815,\ \theta_2 = 1{,}638,\ \theta_3 = 1{,}735,\ \theta_4 = 2{,}452,\ \theta_5 = 0,\ \theta_6 = \pi.$$

Тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_2) = 458564{,}480,\ \sigma_{\max}(\theta_1) = 3903370{,}286. \tag{25}$$

При $p_1 = -0{,}1$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0{,}815,\ \theta_2 = 1{,}640,\ \theta_3 = 2{,}452,\quad \theta_4 = 0,\ \theta_5 = \pi.$$

Тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_2) = 481662{,}354,\ \sigma_{\max}(\theta_1) = 3442004{,}988. \tag{26}$$

При $p_2 = -0{,}5$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0{,}817,\ \theta_2 = 1{,}656,\ \theta_3 = 2{,}454,\ \theta_4 = 0,\ \theta_5 = \pi$$

и

$$\sigma_{\min}(\theta_2) = 623937{,}211,\ \sigma_{\max}(\theta_1) = 1596599{,}944. \tag{27}$$

При $p_3 = -1$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0{,}813,\ \theta_2 = 1{,}618,\ \theta_3 = 2{,}449,\ \theta_4 = 0,\ \theta_5 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -710446{,}832,\ \sigma_{\max}(\theta_2) = 789861{,}288. \tag{28}$$

При $p_4 = -1{,}5$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0{,}814,\ \theta_2 = 1{,}627,\ \theta_3 = 2{,}450,\ \theta_4 = 0,\ \theta_5 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_3) = -2226710{,}780,\ \sigma_{\max}(\theta_2) = 955317{,}259. \tag{29}$$

И, наконец, при $p_5 = -2$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0{,}814,\ \theta_2 = 1{,}629,\ \theta_3 = 2{,}450,\ \theta_4 = 0,\ \theta_5 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -5324096{,}999,\ \sigma_{\max}(\theta_2) = 1120840{,}644. \tag{30}$$

Как и для предыдущего случая, выделим участки, на которых при заданных значениях равномерного давления действуют растягивающие напряжения. Имеем:

при $p_3 = -1$ МПа, $\theta \in (0{,}637,\ 0{,}982) \cup (2{,}294,\ 2{,}609)$;

$p_4 = -1{,}5$ МПа, $\theta \in (0{,}502,\ 1{,}106) \cup (2{,}163,\ 2{,}770)$;

$p_5 = -2$ МПа, $\theta \in (0.445,\ 1{,}156) \cup (2{,}113,\ 2{,}843)$.

На остальных участках интервала $(0,\ 2\pi)$, а также на всем интервале для значений p_0—p_2 действуют сжимающие напряжения.

Эпюры тангенциальных нормальных напряжений для данной выработки трапециевидной формы сечения при заданных значениях равномерного давления p_0—p_5 в случае $\mu_1 = 1$ приведены на рис. 3.

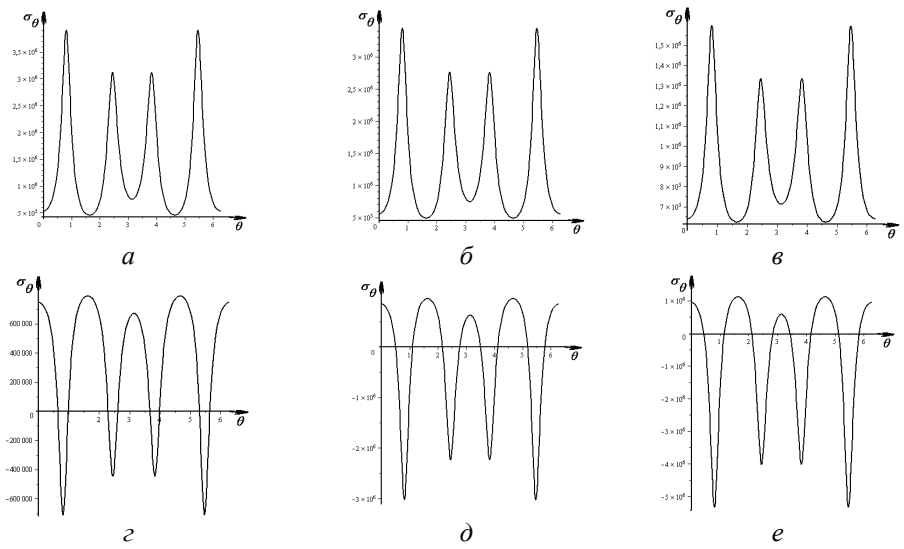


Рис. 3. Эпюры тангенциальных нормальных напряжений на контуре в виде трапеции при: *а* — $p_0 = 0$ МПа; *б* — $p_1 = -0{,}1$ МПа; *в* — $p_2 = -0{,}5$ МПа; *г* — $p_3 = -1$ МПа; *д* — $p_4 = -1{,}5$ МПа; *е* — $p_5 = -2$ МПа и $\mu_2 = 1$

Заметим, что при интенсивности давления, превышающей значение $|p| \approx 0{,}846$ МПа, на контурах возникают участки, на которых действуют растягивающие напряжения.

Свод с вертикальными стенками

Положим

$A = -2{,}4,\ B = -0{,}339,\ C = 0{,}16,\ D = 0{,}24,\ E = 0{,}087,\ F = -0{,}004.$

Выберем, как и выше, в качестве вмещающей породы гранит с объемным весом $\gamma = 2{,}5$ т/м^3 и пределами прочности при растяжении $R_{\text{рас}} = -17$ МПа и сжатии $R_{\text{сж}} = 200$ МПа. Наибольший линейный размер рассматриваемой выработки — ее высота, равная 5 м, поэтому, с учетом (8), положим $H = 250$ м. Тогда $\gamma H = 625\ 000$ кг/м^2.

Приведем результаты решения задачи о распределении напряжений на контуре, изображенном на рис. 1, *г*, при тех же значениях напряжений (16) и двух принятых в данной работе коэффициентах бокового распора.

Случай $\mu_1 = 0{,}25$.

Распределение нулей тангенциального нормального напряжения на контуре при заданных значениях напряжений имеет вид:

при $p_0 = 0$ МПа имеем $\theta_1 = 0,496,\ \theta_2 = 2,947;$

$p_1 = -0,1$ МПа имеем $\theta_1 = 0,546,\ \theta_2 = 2,819;$

$p_2 = -0,5$ МПа имеем $\theta_1 = 0,780,\ \theta_2 = 2,539;$

$p_3 = -1$ МПа имеем $\theta_1 = 0,098,\ \theta_2 = 0,927,\ \theta_3 = 2,307;$

$p_4 = -1,5$ МПа имеем $\theta_1 = 0,187,\ \theta_2 = 0,997,\ \theta_3 = 2,165;$

$p_5 = -2$ МПа имеем $\theta_1 = 0,215,\ \theta_2 = 1,038,\ \theta_3 = 2,083.$

Вычисление экстремальных значений тангенциальных нормальных напряжений дает:

при $p_0 = 0$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,784,\ \theta_2 = 1,432,\ \theta_3 = 2,129,\ \theta_4 = 0,\ \theta_5 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_4) = -256971,25,\ \sigma_{\max}(\theta_1) = 871997,575.$$

При $p_1 = -0,1$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,299,\ \theta_2 = 0,803,\ \theta_3 = 1,423,\ \theta_4 = 2,101,\ \theta_5 = 0,\ \theta_6 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_6) = -271323,979,\ \sigma_{\max}(\theta_2) = 1914932,051.$$

Для остальных значений давлений (16) аналогичными вычислениями получаем:

при $p_2 = -0,5$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,635,\ \theta_2 = 1,134,\ \theta_3 = 1,275,\ \theta_4 = 1,931,\ \theta_5 = 2,617,\ \theta_6 = 0,\ \theta_7 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -1009084,908,\ \sigma_{\max}(\theta_4) = 1117300,360.$$

При $p_3 = -1$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,693,\ \theta_2 = 1,608,\ \theta_3 = 0,\ \theta_4 = \pi,$$

значит,

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -3386575,749,\ \sigma_{\max}(\theta_2) = 1133069,873.$$

При $p_4 = -1,5$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,706,\ \theta_2 = 1,534,\ \theta_3 = 0,\ \theta_4 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -5980831,087,\ \sigma_{\max}(\theta_2) = 1248070,492.$$

И, наконец, при $p_5 = -2$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,712,\ \theta_2 = 1,515,\ \theta_3 = 0,\ \theta_4 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -8610690,252,\ \sigma_{\max}(\theta_2) = 1368553,930.$$

Выделим участки, на которых при заданных значениях равномерного давления действуют растягивающие напряжения. Итак,

при $p_0 = 0$ МПа имеем $\theta \in (0,\ 0,496) \cup (2,947,\ 3,336) \cup (5,787,\ 2\pi)$;

$p_1 = -0,1$ МПа имеем $\theta \in (0,\ 0,546) \cup (2,819,\ 3,464) \cup (5,737,\ 2\pi)$;

$p_2 = -0,5$ МПа имеем $\theta \in (0,\ 0,780) \cup (2,539,\ 3,744) \cup (5,503,\ 2\pi)$;

$p_3 = -1$ МПа имеем $\theta \in (0,098,\ 0,927) \cup (2,304,\ 3,976) \cup (5,356,\ 6,185)$;

$p_4 = -1,5$ МПа имеем $\theta \in (0,187,\ 0,997) \cup (2,165,\ 4,118) \cup (5,286,\ 6,096)$;

$p_5 = -2$ МПа имеем $\theta \in (0,215,\ 1,038) \cup (2,083,\ 4,2) \cup (5,245,\ 6,068)$.

На остальных участках интервала $(0,\ 2\pi)$ действуют сжимающие напряжения.

Эпюры тангенциальных нормальных напряжений для данной выработки в виде свода с вертикальными стенками при заданных значениях равномерного давления p_0—p_5 в случае $\mu_1 = 0,25$ приведены на рис. 4.

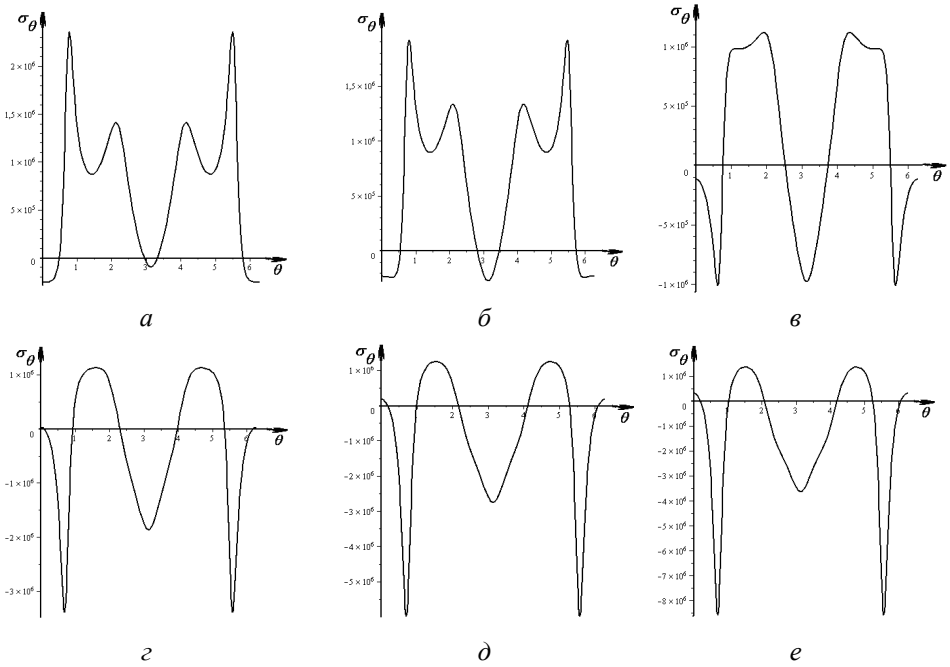


Рис. 4. Эпюры тангенциальных нормальных напряжений на контуре в виде свода с вертикальными стенками при: *а* — $p_0 = 0$ МПа; *б* — $p_1 = -0,1$ МПа; *в* — $p_2 = -0,5$ МПа; *г* — $p_3 = -1$ МПа; *д* — $p_4 = -1,5$ МПа; *е* — $p_5 = -2$ МПа и $\mu_1 = 0,25$

Случай $\mu_2 = 1$.

Прямые вычисления дают следующие значения нулей:

при $p_3 = -1$ МПа имеем $\theta_1 = 0,526,\ \theta_2 = 0,961,\ \theta_3 = 2,785;$

$p_4 = -1,5$ МПа имеем $\theta_1 = 0,439,\ \theta_2 = 1,045,\ \theta_3 = 2,127;$

$p_5 = -2$ МПа имеем $\theta_1 = 0,399,\ \theta_2 = 1,084,\ \theta_3 = 2,021.$

При $p_0 = 0$ МПа, $p_1 = -0,1$ МПа, $p_2 = -0,5$ МПа нулей нет.

Приведем экстремальные значения тангенциальных нормальных напряжений.

При $p_0 = 0$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,720,\ \theta_2 = 1,442,\ \theta_3 = 2,403,\ \theta_4 = 2,689,\ \ \theta_5 = 0,\ \theta_6 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_2) = 456439,158,\ \sigma_{\max}(\theta_1) = 3755751,459.$$

При $p_1 = -0,1$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,720,\ \theta_2 = 1,435,\ \theta_3 = 2,391,\ \theta_4 = 2,717,\ \ \theta_5 = 0,\ \theta_6 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_2) = 480348,839,\ \sigma_{\max}(\theta_1) = 3225054,256.$$

При $p_2 = -0,5$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,699,\ \theta_2 = 1,281,\ \theta_3 = 1,295,\ \theta_4 = 0,\ \theta_5 = \pi.$$

Тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_2) = 567471,590,\ \sigma_{\max}(\theta_1) = 1111591,903.$$

При $p_3 = -1$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,730,\ \theta_2 = 1,563,\ \theta_3 = 0,\ \theta_4 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -1560774,094,\ \sigma_{\max}(\theta_3) = 787046,080.$$

При $p_4 = -1,5$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,727,\ \theta_2 = 1,517,\ \theta_3 = 0,\ \theta_4 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -4214746,740,\ \sigma_{\max}(\theta_3) = 930402,251.$$

И при $p_5 = -2$ МПа имеем

$$\theta_1 = 0,727,\ \theta_2 = 1,506,\ \theta_3 = 0,\ \theta_4 = \pi,$$

тогда

$$\sigma_{\min}(\theta_1) = -6869915,217,\ \sigma_{\max}(\theta_3) = 1073758,425.$$

Выделяя участки, на которых при заданных значениях равномерного давления действуют растягивающие напряжения, получим:

при $p_3 = -1$ МПа $\theta \in (0{,}526,\ 0{,}961) \cup (2{,}785,\ 3{,}498) \cup (5{,}322,\ 5{,}757)$;

$p_4 = -1{,}5$ МПа $\theta \in (0{,}439,\ 1{,}045) \cup (2{,}127,\ 4{,}156) \cup (5{,}238,\ 5{,}844)$;

$p_5 = -2$ МПа $\theta \in (0{,}399,\ 1{,}084) \cup (2{,}021,\ 4{,}262) \cup (5{,}199,\ 5{,}884)$.

На остальных участках интервала $(0,\ 2\pi)$, а также при значениях давления p_0—p_2 при всех значениях аргумента действуют сжимающие напряжения.

Эпюры тангенциальных нормальных напряжений для данной выработки в виде свода с вертикальными стенками при заданных значениях равномерного давления p_0—p_5 в случае $\mu_2 = 1$ приведены на рис. 5.

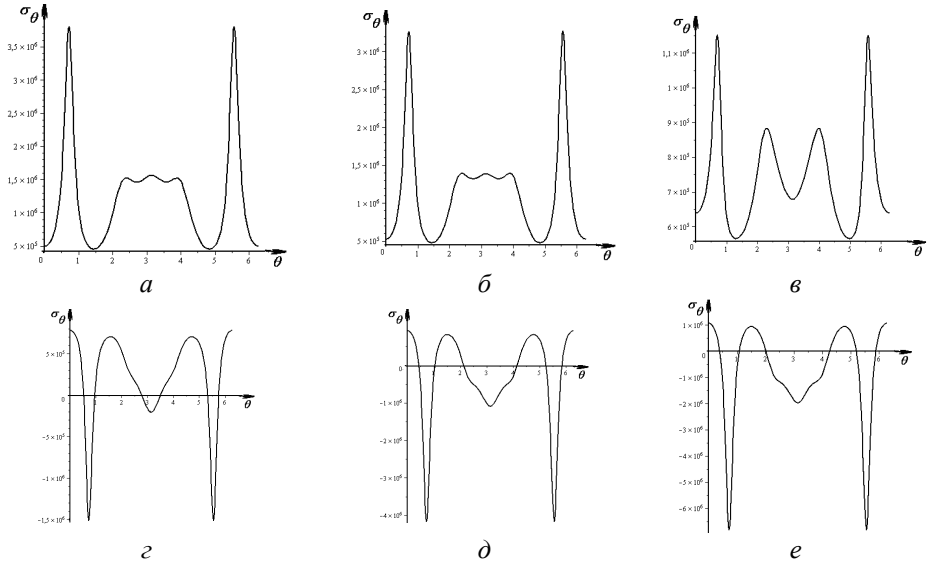


Рис. 5. Эпюры тангенциальных нормальных напряжений на контуре в виде свода с вертикальными стенками при: *а* — $p_0 = 0$ МПа; *б* — $p_1 = -0{,}1$ МПа; *в* — $p_2 = -0{,}5$ МПа; *г* — $p_3 = -1$ МПа; *д* — $p_4 = -1{,}5$ МПа; *е* — $p_5 = -2$ МПа и $\mu_2 = 1$

Заметим, что при интенсивности давления, превышающей значение $|p| \approx 0{,}712$ МПа, на контурах возникают участки, на которых действуют растягивающие напряжения.

Выводы

1. Приведенные в статье формулы для нахождения величины тангенциальных нормальных напряжений, определения их нулей и экстремальных значений на контурах выработок различных форм поперечного сечения позволяют проводить исследование напряженного состояния выработок, испытывающих равномерное внутреннее всестороннее давление и находящихся на заданной глубине при известных значениях коэффициента бокового распора горной породы.

2. На примере выработок трапециевидной формы сечения и свода с вертикальными стенками при заданных значениях коэффициента бокового распора горной породы и значениях равномерного давления, изменяющихся в диапазоне от 0 до 2 МПа, выделены участки, на которых действуют растягивающие и сжимающие напряжения.

3. Для выработки трапециевидной формы сечения при $\mu = 1$ и значениях давления, превышающих 0,846 МПа, возникают участки, на которых действует растягивающее напряжение.

4. Для свода с вертикальными стенками при том же значении коэффициента бокового распора аналогичная ситуация наблюдается при значении давления, превышающем 0,712 МПа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Цимбаревич П. М.* Механика горных пород. М.: Углетехиздат, 1948. 184 с.
2. *Глушко В. Т., Гавеля С. П.* Оценка напряженно-деформированного состояния массивов горных пород. М.: Недра, 1986. 221 с.
3. *Булычев Н. С.* Механика подземных сооружений. М.: Недра, 1989. 270 с.
4. *Турчанинов И. А., Иофис М. А., Каспарьян Э. В.* Основы механики горных пород. Л.: Недра. 1989. 488 с.
5. *Партон В. З., Перлин П. И.* Методы математической теории упругости. М.: Наука, 1981. 688 с.
6. *Green A. E., Zerna W.* Theoretical elasticity. Oxford: Clareden Press, 1968. 457 p.
7. *Chau K. T.* Analytical Methods in Geomechanics. New York: CRC Press, 2012. 424 p.
8. *Murnaghan F. D.* Finite deformation of elastic solid. New York: Wiley, 1951. 140 p.
9. *Poulos H. G., Davis E. H.* Elastic solutions for soil and rock mechanics. New York: Wiley, 1974. 411 p.
10. *Мусхелишвили Н. И.* Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 708 с.
11. *Jian-ke Lu.* Complex variable methods in plane elasticity. World Scientific, 1995. 237 p.
12. *Каландия А. И.* Математические методы двумерной упругости. М.: Наука, 1973. 304 с.
13. *Akinola A.* On complex variable method in finite elasticity // Applied Mathematics. 2009. Vol. 1. Pp. 1—16.
14. *Stevenson A. C.* Complex potential in two-dimensional elasticity. // Proceeding of the Royal Society. Ser.A. 1945. Vol. 184, Iss. 997. Pp. 129—179, 218—229.
15. *Schinzinger R., Laura P.* Conformal mappings. Methods and applications. Elsevier, 1991. 581 p.
16. *Богомолов А. Н., Ушаков А. Н.* Методы теории функций комплексного переменного в задачах геомеханики: монография // ВолГАСУ. Волгоград: Изд-во ВГСПУ «Перемена», 2014. 227 с.
17. *Савин Г. Н.* Распределение напряжений около отверстий. Киев: Наукова думка, 1968. 888 с.
18. *Фильчаков П. Ф.* Приближенные методы конформных отображений. Киев: Наукова думка, 1964. 536 с.
19. *Фильчакова В. П.* Конформные отображения областей специального типа. Киев: Наукова думка, 1972. 252 с.
20. *Ушаков А. Н.* О построении контуров подземных горизонтальных выработок различных форм поперечного сечения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 4 (81). С. 50—64.
21. *Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А.* О формуле для тангенциального нормального напряжения в точках границы бесконечной односвязной области // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2014. Вып. 36(55). С. 24—29.
22. *Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Ушаков А. Н.* Расчет экстремальных глубин заложения горизонтальных выработок различной формы на основе анализа напряженного состояния однородного вмещающего массива // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. Вып. 52(71). С. 5—18.

© *Ушаков А. Н., 2021*

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Ушаков А. Н. О распределении напряжений на контурах подземных горизонтальных выработок различных форм поперечного сечения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 101—117.

Об авторе:

Ушаков Андрей Николаевич — канд. техн. наук, доц., зав. каф. математики и информатики, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; ushakov.andrej2012@yandex.ru

Andrei N. Ushakov

Volgograd State Technical University

ABOUT STRESS DISTRIBUTION ON THE CONTOURS OF UNDERGROUND HORIZONTAL WORKINGS OF VARIOUS FORM OF CROSS-SECTIONS

The paper presents the results of a study to determine the stress state on the contours of underground horizontal workings, the cross-section of which has the form of a trapezoid and a vault with vertical walls at given values of uniform pressure and lateral distribution coefficient. The graphic representations of stress diagrams acting on the contours of workings are given.

K e y w o r d s: mapping function, stress state, uniform pressure, underground horizontal production, lateral distribution coefficient.

For citation:

Ushakov A. N. [About stress distribution on the contours of underground horizontal workings of various form of cross-sections]. *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], 2021, iss. 1, pp. 101—117.

About author:

Andrei N. Ushakov — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ushakov.andrej2012@yandex.ru

УДК 625.72, 681.5

С. В. Алексиков, М. И. Альшанова, А. И. Лескин, Д. И. Гофман

Волгоградский государственный технический университет

ОБЕСПЕЧЕНИЕ РОВНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПОКРЫТИЙ РЕГИОНАЛЬНЫХ ДОРОГ ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Приведены материалы диагностики дорожной сети Волгоградской области, технологии и периодичность дорожных работ по восстановлению нормативной ровности и шероховатости проезжей части региональных дорог. Разработаны рекомендации по выбору вида поверхностной обработки дорожных покрытий региональной дорожной сети Волгоградской области с учетом интенсивности и условий движения на дороге, дефектов и характеристик обрабатываемой проезжей части.

К л ю ч е в ы е с л о в а : автомобильные дороги, дорожные покрытия, ровность, шероховатость, ремонт, содержание, слой износа, поверхностная обработка.

Недостаточная ровность и сцепные качества покрытий являются главной причиной 70—85 % ДТП по вине дорожных условий. Поэтому обеспечению ровности и сцепных качеств покрытия в процессе эксплуатации дороги необходимо уделять особое внимание. Мероприятия, выполняемые с этой целью, можно разделить на периодически повторяемые и повседневные. К первым относятся:

- ремонтные работы — устранение выбоин и ям, удаление волн, наплывов, возобновление слоев износа с выравниванием поперечного профиля;
- поверхностные обработки, укрепление обочин, устройство твердых покрытий на съездах, въездах и пересечениях.

К повседневным мероприятиям относятся:

- регулярная очистка от пыли и грязи;
- россыпь каменной мелочи в жаркое время по выступающему битуму;
- борьба с гололедом и снежными заносами.

Все перечисленные мероприятия целесообразно выполнять поочередно и периодически, начиная с наиболее опасных участков, выявленных на дорогах. Как показывает многолетний опыт эксплуатации региональной дорожной сети Волгоградской области, в условиях дефицита финансирования отрасли своевременные и тщательно проведенные ремонтные работы помогают поддерживать требуемую ровность и шероховатость проезжей части на определенный период времени с минимальными финансовыми затратами, позволяют содержать региональную дорожную сеть в удовлетворительном состоянии [1—4].

Существуют различные методы назначения ремонтных работ с целью повышения ровности и шероховатости дорожных покрытий[1]. Наряду с традиционной технологией для устройства поверхностных обработок, слоев износа и защитных слоев может быть применена одна из современных технологий, к которым относят микросюрфейсинг, «Чип Сил», «Фиб Сил», «Мак Сил», «Фоб Сил», «Сларри Сил», «Кейп Сил» и др. [5—12].

[1] ОДМ 218.3.082–2016. Методические рекомендации по назначению технологий и периодичности проведения работ по устройству слоев износа и защитных слоев дорожных покрытий // РОСАВТОДОР. М., 2019. 14 с.

Каждая технология обработки проезжей части имеет свои преимущества и недостатки.

Возможно устройство двух видов макрошероховатых дорожных покрытий, отличающихся по назначению:

- слоев износа для обеспечения сцепных качеств и требуемой степени их стабильности в период межремонтного срока службы — эти слои имеют минимально допускаемую плотность;
- защитных слоев, обладающих высокой плотностью и водостойкостью, для предотвращения попадания в обрабатываемые покрытия избыточной влаги (для обеспечения требуемой степени водонепроницаемости) — эти слои имеют существенно меньший срок службы сцепных свойств, чем слои износа.

Главными критериями выбора технологии восстановления дорожного покрытия по назначению являются следующие[2]:

- свойства наносимого слоя должны ликвидировать или снизить недостатки обрабатываемого покрытия и возобновить, сохранить или улучшить сцепные качества и ровность поверхности, обеспечивая требуемую степень их стабильности на период межремонтного срока службы;
- если дефекты покрытия (степень разрушения) или имеющиеся материалы и оборудование не позволяют обеспечить требуемый срок службы, то его следует снизить, не допуская эксплуатации в некачественном состоянии.

Исходя из фактического состояния нижележащего обрабатываемого слоя существуют два способа распределения материала:

- распределение и разравнивание (разглаживание) материала по поверхности, при котором материал заполняет и выравнивает неровности нижележащего слоя, образуя неравномерный по толщине слой с ровной верхней поверхностью;
- поливка и посыпка поверхности, при которой материал распределяется на предварительно обработанную (пролитую) вяжущим поверхность одинаковой толщиной равномерно по всей площади, образуя слой, копирующий неровности нижележащего слоя.

Преимущества и недостатки современных технологий обработки проезжей части дорог приведены в табл. 1.

Анализ рынка дорожных работ РФ показывает, что наиболее распространена технология одиночной поверхностной обработки проезжей части (рис. 1). До 10% приходится на технологию «Сларри Сил». Устройство слоев износа ЩМА и другими смесями занимает до 6 %. Выбор рационального инженерного мероприятия по восстановлению нормативных характеристик дорожных покрытий рекомендуется выполнять на основе прогноза выравнивания дорожных покрытий в результате выполнения ремонтных мероприятий с учетом условий эксплуатации дороги, материально-технического и финансового обеспечения [5]:

$$S_p = a + bS_0, \tag{1}$$

где S_p, S_0 — ровность дорожного покрытия после и до проведения ремонта, м/км; a и b — параметры уравнения, значения которых зависят от вида дорожно-ремонтных работ.

[2] ОДМ 218.2.079—2016. Рекомендации по проектированию макрошероховатых дорожных покрытий // РОСАВТОДОР. М., 2016. 96 с.

Таблица 1

Преимущества и недостатки современных технологий обработки проезжей части дорог

Технология	Преимущества	Недостатки
Шероховатые поверхностные обработки		
Одиночная поверхностная обработка с раздельным нанесением вяжущего и каменного материала	Не требует дефицитного оборудования, нет ограничений интенсивности движения	Применяется на дорожной одежде с достаточной прочностью
Двойная поверхностная обработка	На покрытиях с недостаточной прочностью, при наличии сетки трещин, ямочности, колей, применяется при высокой интенсивности движения	Повышенные расход материалов по сравнению с одиночной обработкой
Защитные слои		
«Сларри Сил» — устройство защитных слоев 5…10 мм с применением литых эмульсионно-минеральных смесей	Герметизации небольших трещин в поверхности существующего покрытия	Дефицитное оборудование, жесткие технологические требования
Микросюрфейсинг — разновидность эмульсионно-минеральной смеси типа «сларри», позволяющая производить укладку смеси толстым слоем 10…40 мм	Возможно заполнение колей, незначительных исправлений профиля	Дефицитное оборудование, жесткие технологические требования
«Чип Сил» — обработка поверхности, при которой происходит синхронное распределение битумной эмульсии и фракционированного каменного материала	Высокая производительность, продлевает долговечность дорог	Дефицитное оборудование, жесткие технологические требования
«Новочип» — защитный слой толщиной 1,0…2,5 см с повышенными фрикционными и гидроизоляционными свойствами из специально подобранной асфальтобетонной смеси, уложенной по мембранной технологии	Обеспечивает выравнивание деформированного покрытия без ямочного ремонта и санации трещин. Возможна укладка на влажное покрытие	Дефицитное оборудование, жесткие технологические требования
«Кейп Сил» — одновременное применение слоев поверхностной обработки типа «Чип Сил» и «Сларри Сил»» на основе модифицированного битума эмульсии	Ремонт трещин и выбоин на существующем покрытии	Дефицитное оборудование, жесткие технологические требования, длительный срок работ
Слои износа из асфальтобетона		
Шероховатые слои из битумо-минеральных открытых смесей (БМО) — тонкие слои до 3 см, предназначенные для обеспечения требуемых сцепных качеств поверхностей	Традиционная технология работ, повышенная шероховатость и долговечность покрытия	Повышенный расход кубовидного прочного щебня до 85 %
Щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА)	Традиционная технология работ, повышенная прочность и шероховатость слоя	Применение кубовидного прочного щебня и добавок
Многощебенистые смеси тип А, Б и др.	Традиционная технология производства работ	Устраивают летом в сухую погоду, весной при температуре воздуха > +5 °С, осенью — > +10 °С на сухое покрытие

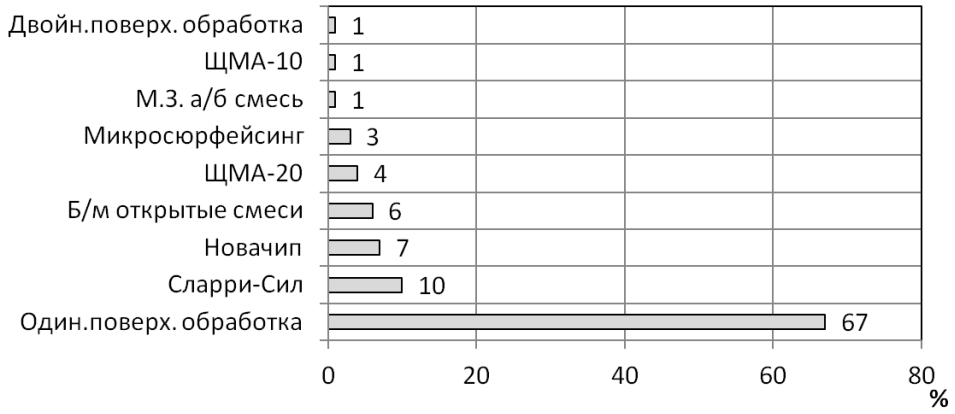


Рис. 1. Использование технологий обработки проезжей части автомобильных дорог

Износостойкость поверхностной обработки или слоя износа зависит от ряда факторов: материала поверхностного слоя, структуры макрошероховатой поверхности, климатических условий и нагрузки (интенсивности и состава движения).

Верхний макрошероховатый слой дорожного покрытия может устраиваться как самостоятельный слой из материалов, отличных от материалов покрытия. Во всех случаях толщина верхнего макрошероховатого слоя должна определяться из условия износостойкости и планируемого срока службы[3]. Годовой износ дорожного покрытия определяется по формулам:

одиночная поверхностная обработка, мм/год,

$$\Delta h = (1{,}4 + 0{,}004N)K_{\text{техн}}; \quad (2)$$

двойная поверхностная обработка, мм/год,

$$\Delta h = (1{,}3 + 0{,}0035N)K_{\text{техн}}; \quad (3)$$

слой износа из асфальтобетона, мм/год,

$$\Delta h = (0{,}4 + 0{,}00025N)K_{\text{техн}}; \quad (4)$$

где Δh — износ покрытия, мм/год; N — среднегодовая приведенная к нагрузке A интенсивность движения, авт./сут.; $K_{\text{тех}}$ — коэффициент, зависящий от качества содержания поверхности покрытия, применяемых технологических машин и материалов (1…1,3).

В процессе эксплуатации суммарный износ макрошероховатого слоя за срок службы T не должен превышать допустимое значение $h_{\text{д}}$:

$$\sum_{t=1}^{T} \Delta h \le h_{\text{д}}; \quad (5)$$

[3] ОДМ 218.3.082–2016. Методические рекомендации по назначению технологий и периодичности проведения работ по устройству слоев износа и защитных слоев дорожных покрытий.

где $h_д$ составляет для асфальтобетона (ЩМА) — 10 мм, одиночной поверхностной обработки — 12 мм, двойной поверхностной обработки — 25 мм.

Анализ интенсивности износа различных способов обработки проезжей части показывает (рис. 2), что устройство слоя износа их горячих асфальтобетонов (в том числе ЩМА) является наиболее долговечным. Кроме того, перед укладкой асфальтобетонной смеси толщиной 4…5 см, выполняется ямочный ремонт или фрезерование старого деформированного покрытия. Это способствует повышению ровности покрытия и прочности дорожной конструкции в целом. Износ одиночной и двойной поверхностной обработки за год отличается незначительно, составляет 1 мм. Однако повышенный расход каменного материала при двойной поверхностной обработки позволяет увеличить периодичность обработки проезжей части в 2 раза.

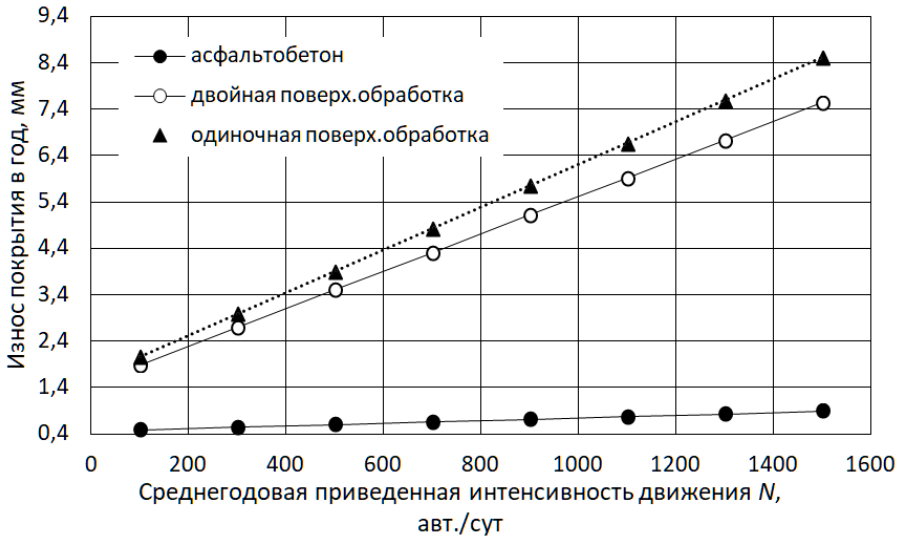


Рис. 2. Износ макрошероховатого слоя покрытия в зависимости от приведенной интенсивности движения

Работы по шероховатой поверхностной обработке рекомендуется выполнять на дорогах III—V категорий при интенсивности движения транспортного потока по наиболее загруженной полосе не более 5000 авт./сут.[4] Периодичность проведения таких работ приведена на рис. 3.

Устройство защитных слоев из горячей асфальтобетонной смеси толщиной до 4 см рекомендуется выполнять периодически, в зависимости от среднегодовой интенсивности движения, согласно рис. 4.

Периодичность проведения работ по устройству слоев износа из ЩМА-10 приведена на рис. 5. Применение щебеночно-мастичных асфальтобетонов более крупных фракций (ЩМА-15 и ЩМА-20) позволяет увеличить межремонтный срок на 0,5 года.

[4] ОДМ 218.3.082–2016. Методические рекомендации по назначению технологий и периодичности проведения работ по устройству слоев износа и защитных слоев дорожных покрытий.

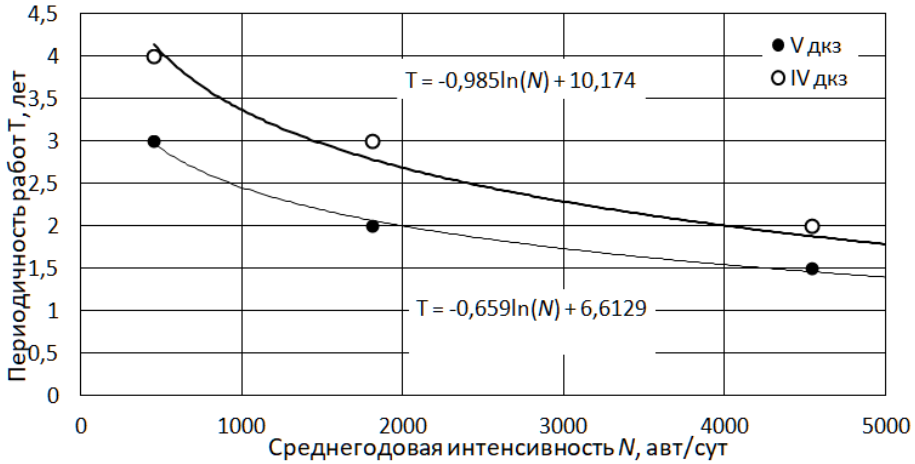


Рис. 3. Периодичность поверхностной обработки покрытия

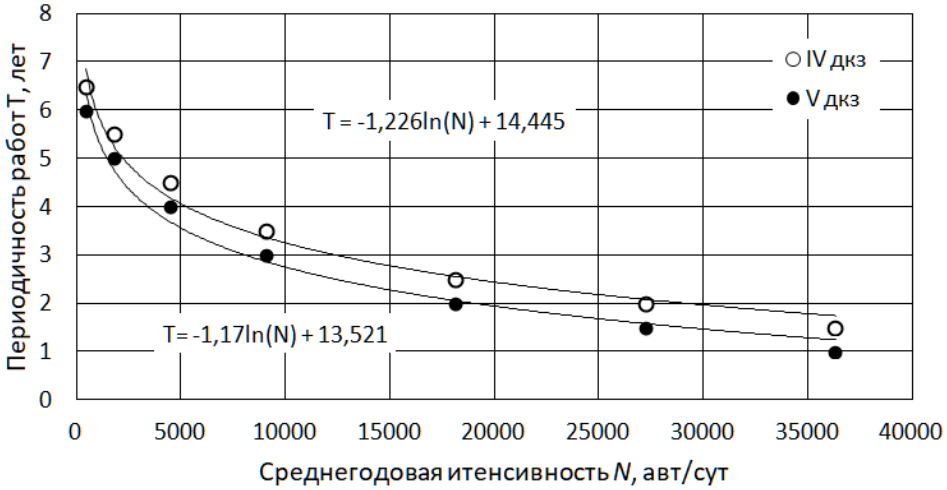


Рис. 4. Периодичность работ по устройству слоя износа из асфальтобетона

Слои износа применяют на плотных покрытиях для обеспечения максимальных сцепных качеств поверхности и увеличения срока их службы, защитные слои — на пористых покрытиях для обеспечения водонепроницаемости. При выборе способа устройства поверхностной обработки покрытий необходимо учитывать ее назначение, условия движения на дороге, климатические условия района строительства, прочностные характеристики существующего дорожного покрытия, наличие материалов и средств механизации[5].

[5] ОДМ 218.3.082–2016. Методические рекомендации по назначению технологий и периодичности проведения работ по устройству слоев износа и защитных слоев дорожных покрытий.

ОДМ 218.2.079—2016. Рекомендации по проектированию макрошероховатых дорожных покрытий.

ОДМ 218.3.054—2015 Устройство поверхностной обработки и тонких слоев износа с применением различных видов фиброволокон / РОСАВТОДОР. М., 2016. 96 с.

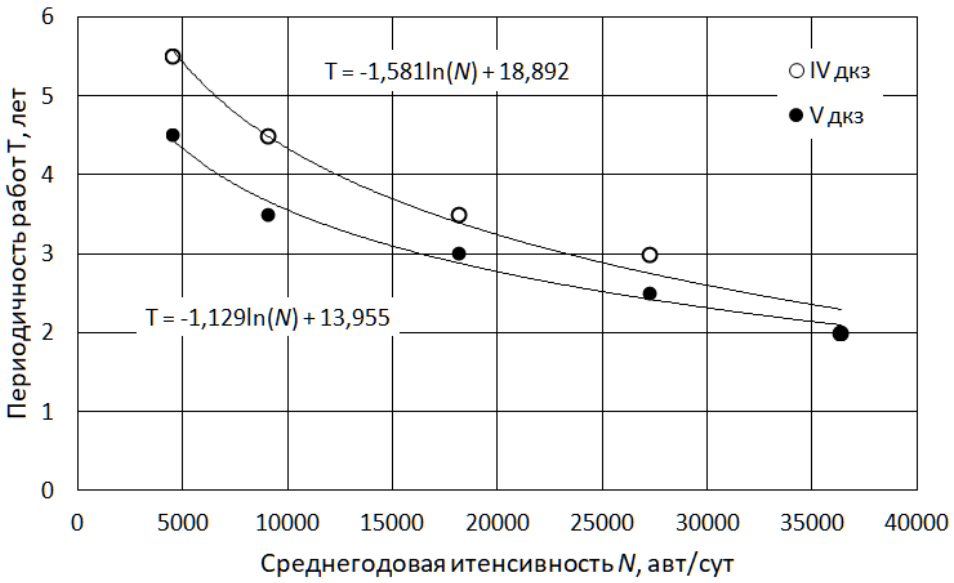


Рис. 5. Периодичность работ по устройству слоя износа из ЩМА-10

Выбор поверхностной обработки в зависимости от интенсивности движения рекомендуется выполнять по табл. 2:

1. При интенсивности движения свыше 6000 авт./сут. целесообразно устраивать:

- защитные слои с использованием асфальтобетоннных смесей;
- поверхностную обработку покрытия с применением литых эмульсионно-минеральных смесей (микросюрфейсинг, «Кейп Сил»).

2. При интенсивности движения 3000—6000 авт./сут. целесообразно устройство поверхностной обработки покрытия с использованием:

- технологии синхронного распределения вяжущего и щебня («Чип Сил»);
- литых эмульсионно-минеральных смесей («Сларри Сил», микросюрфейсинг, «Кейп Сил»);
- защитных слоев износа на основе битумов и полимерных вяжущих;
- защитных слоев с использованием асфальтобетоннных смесей;
- двухслойной поверхностной обработки, устраиваемой традиционным способом.

3. При интенсивности движения до 3000 авт./сут. целесообразно применять:

- поверхностные обработки покрытия, устраиваемые традиционным способом (однослойная поверхностная обработка с однократным распределением вяжущего и щебня, однослойная поверхностная обработка с двойным распределением щебня, двухслойная поверхностная обработка);
- поверхностные обработки с синхронным распределением вяжущего и щебня («Чип Сил»),
- поверхностные обработки с применением литых эмульсионно-минеральных смесей;
- защитные слои на основе битумов и полимерных вяжущих;
- защитные слои с использованием асфальтобетонных смесей.

4. При фактической интенсивности движения до 1000 авт./сут. возможно устройство всех видов поверхностных обработок кроме защитных слоев с использованием асфальтобетонных смесей (БМО, ЩМА).

Рекомендации по выбору вида поверхностной обработки в зависимости от дефектов существующего покрытия приведены в табл. 3.

1. При трещинах на покрытии целесообразно устраивать:

- двухслойную поверхностную обработку;
- поверхностные обработки с применением литых эмульсионно-минеральных смесей;
- защитный слой на основе битумов и полимерных вяжущих «Фог Сил», «Фиб Сил» и пропитывающие составы.

2. При колейности целесообразно устраивать:

- двухслойную поверхностную обработку;
- поверхностные обработки с применением литых эмульсионно-минеральных смесей (микросюрфейсинг, «Кейп Сил»);

3. При истирании асфальтобетонного покрытия возможно устройство всех видов поверхностных обработок.

4. При потере шероховатости возможно устройство всех видов поверхностных обработок кроме защитного слоя на основе битумов и полимерных вяжущих «Фог Сил», «Фиб Сил» и пропитывающие составы.

5. При выбоинах на проезжей части целесообразно устраивать поверхностные обработки с применением литых эмульсионно-минеральных смесей.

6. Защитные слои с использованием высокоплотных асфальтобетонных смесей типов А и Б, щебеночно-мастичных асфальтобетонов (ЩМА-10, ЩМА-15, ЩМА-20), битумо-минеральных открытых смесей (БМО) можно устраивать при всех видах дефектов покрытия.

Рекомендации по применению поверхностной обработки в зависимости от характеристики обрабатываемого покрытия представлены в табл. 4. Из традиционных технологий, двухслойная поверхностная обработка и технология микросюрфейсинг одинаково эффективны при различных характеристиках существующего покрытия и требуемом коэффициенте сцепления.

Защитные слои на основе битумов и полимерных вяжущих эффективны только на покрытиях с закрытой поверхностью или с открытой поверхностью и замкнутыми порами. Устройство защитных слоев на основе асфальтобетонов рекомендуется на покрытиях независимо от структуры ее поверхности.

Рекомендации по применения поверхностной обработки в зависимости от условия движения представлены в табл. 5.

Вывод

Выполненная работа позволила систематизировать исследования эффективных технологий поверхностной обработки проезжей части автомобильных дорог юга РФ (IV —V дорожно-климатические зоны) и разработать рекомендации по выбору вида поверхностной обработки дорожных покрытий региональной дорожной сети Волгоградской области с учетом интенсивности и условия движения на дороге, дефектов и характеристик обрабатываемой проезжей части.

Таблица 2

Применение поверхностной обработки в зависимости от интенсивности движения

Виды поверхностной обработки (ПО)		Интенсивность движения, авт/сут			
		> 6000	3000—6000	1000—3000	< 1000
ПО, устраиваемые традиционным способом	Однослойная поверхностная обработка с однократным распределением вяжущего и щебня				
	Однослойная поверхностная обработка с двойным распределением щебня				
	Двухслойная поверхностная обработка				
ПО с синхронным распределением вяжущего и щебня	«Чип Сил»				
ПО на основе ЛЭМС	«Сларри Сил»				
	Микросюрфейсинг				
Защитные слои с использованием асфальтобетонных смесей	БМО				
	ЩМА				
	Высокоплотные и плотные типов А и Б				

Таблица 3

Применение поверхностной обработки в зависимости от имеющихся дефектов покрытия

Виды поверхностной обработки (ПО)		Виды деформаций и разрушений			
		трещины	колейность	потеря шероховатости	выбоины
ПО, устраиваемые традиционным способом	Однослойная поверхностная обработка с однократным распределением вяжущего и щебня				
	Однослойная поверхностная обработка с двойным распределением щебня				
	Двухслойная поверхностная обработка				
ПО с синхронным распределением вяжущего и щебня	«Чип Сил»				
ПО на основе ЛЭМС	«Сларри Сил»				
	Микросюрфейсинг				
Защитные слои с использованием асфальтобетонных смесей	БМО				
	ЩМА				
	Высокоплотные и плотные типов А и Б				

Таблица 4

Применение поверхностной обработки в зависимости от характеристики обрабатываемого покрытия

Виды поверхностной обработки (ПО)	Характеристики существующего покрытия	Покрытия с плотной поверхностью (изношено более чем на 8 мм)			Покрытия с открытой поверхностью и замкнутыми порами (износ более 8 мм)		
	Условия движения	легкие	затрудненные	опасные	легкие	затрудненные	опасные
	Требуемый коэффициент сцепления	0,45	0,5	0,6	0,45	0,5	0,6
ПО, устраиваемые традиционным способом	Однослойная поверхностная обработка с однократным распределением вяжущего и щебня						
	Однослойная поверхностная обработка с двойным распределением щебня						
	Двухслойная поверхностная обработка						
ПО с синхронным распределением вяжущего и щебня	«Чип Сил»						
ПО на основе ЛЭМС	«Сларри Сил»						
	Микросюрфейсинг						
Защитные слои с использованием а/б смесей	БМО						
	ЩМА						
	Высокоплотные и плотные типов А и Б						

Таблица 5

Применение поверхностной обработки в зависимости от условия движения на дорогах III—IV категорий

Виды поверхностной обработки (ПО)		Условия движения					
		Легкие условия движения	Затрудненные условия движения	Опасные условия движения	Участки в населенных пунктах и на подходах к ним	Дополнительные полосы на подъеме и 100 м за вершиной	Перекрестки и подходы к ним
ПО, устраиваемые традиционным способом	Однослойная поверхностная обработка с однократным распределением вяжущего и щебня						
	Однослойная поверхностная обработка с двойным распределением щебня						
	Двухслойная поверхностная обработка						
ПО с синхронным распределением вяжущего и щебня	«Чип Сил»						
ПО на основе ЛЭМС	«Сларри Сил»						
	Микросюрфейсинг						
Защитные слои с использованием а/б смесей	БМО						
	ЩМА						
	Высокоплотные и плотные типов А и Б						

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние ровности дорожного покрытия на себестоимость перевозок и безопасность движения / С. В. Алексиков, А. И. Лескин, Д. И. Гофман, М. И. Альшанова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 2(79). С. 24—31.

2. *Алексиков С. В., Альшанова М. И.* Оценка надежности дорожной сети по состоянию покрытия // Жилищное хозяйство и коммунальная инфраструктура. 2019. № 4(11). С. 92—97.

3. *Сиденко В. М., Михович С. И.* Эксплуатация автомобильных дорог. Учебник для студентов вузов по специальности «Автомобильные дороги». М.: Транспорт, 1976. 288 с.

4. *Бабков В. Ф.* Дорожные условия и безопасность движения. М.: Транспорт, 1993. 271 с.

5. *Красиков О. А.* Обоснование стратегий ремонта нежестких дорожных одежд: автореф. дис. … докт. техн. наук: 16.03.00. Московский автомобильно-дорожный институтт. М., 2000. 44 с.

6. *Демишкан В. Ф.* Усовершенствования управления состоянием автомобильных дорог при условиях ограниченных ресурсов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.11. Харьковский государственный автомобильно-дорожный технический университет. Харьков, 2000. 17 с.

7. *Каленова Е. В.* Совершенствование методики расчета при проектировании нежестких дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием: автореф. дис. … канд. техн. наук: 19.03.09. М., 2009. 22 с.

8. *Лугов С. В., Каленова Е. В.* О связи допустимой ровности асфальтобетонных покрытий с требуемой прочностью нежестких дорожных // Новости в дорожном деле: научн.-техн. информ.: сб. Вып. 2. М.: ФГУП «Информавтодор», 2007. С. 31–35.

9. *Белов Д. Я., Добрынин А. О., Минзуренко А. А.* Анализ эффективных способов устройства тонкослойных покрытий и поверхностной обработки дорожных одежд // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2018. № 1. С. 21—31.

10. *Носов В. П., Фролкина С. С.* Поверхностная обработка как средство консервации процесса развития повреждений дорожных покрытий // Наука и техника в дорожной отрасли. 2015. № 4(74). С. 17—20.

11. *Янковский Л. В., Кочетков А. В., Трофименко Ю. А.* Методика выбора материала для устройства шероховатых слоев дорожного покрытия // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2015. № 1(35). С. 99—111.

12. *Чупров Е. Е., Чудинов С. А.* Защитные слои износа автомобильных дорог // Ползуновский альманах. 2020. № 1. С. 114—117.

© Алексиков С. В., Альшанова М. И., Лескин А. И., Гофман Д. И., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Обеспечение ровности и шероховатости покрытий региональных дорог Волгоградской области / С. В. Алексиков, М. И. Альшанова, А. И. Лескин, Д. И. Гофман // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 118—131.

Об авторах:

Алексиков Сергей Васильевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; AL34rus@mail.ru

Альшанова Марина Игоревна — магистрант, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Лескин Андрей Иванович — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; leskien@inbox.ru

Гофман Дмитрий Иванович — старший преподаватель каф. строительства и эксплуатации транспортных сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; dima.0103@mail.ru

Sergei V. Aleksikov, Marina I. Alishanova, Andrei I. Leskin, Dmitrii I. Gofman

Volgograd State Technical University

ENSURING SMOOTHNESS AND ROUGHNESS OF REGIONAL ROAD SURFACES IN THE VOLGOGRAD REGION

Materials of diagnostics of the road network of the Volgograd Region, technologies and frequency of road works on restoration of standard evenness and roughness of the carriageway of regional roads are given. Recommendations for selection of type of surface treatment road pavement regional road network in Volgograd Region given the intensity and traffic conditions on the road, defects and characteristics of the treated roadway.

K e y w o r d s: highways, road surfaces, evenness, roughness, repair, maintenance, wear layer, surface treatment.

For citation:

Aleksikov S. V., Alishanova M. I., Leskin A. I., Gofman D. I. [Ensuring smoothness and roughness of regional road surfaces in the Volgograd Region]. *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], 2021, iss. 1, pp. 118—131.

About authors:

Sergei V. Aleksikov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; AL34rus@mail.ru

Marina I. Alishanova — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Andrei I. Leskin — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; leskien@inbox.ru

Dmitrii I. Gofman — Senior Lecturer, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; dima.0103@mail.ru

УДК 539.41, 69.07

С. Ю. Калашников, Е. В. Гурова, С. А. Калиновский

Волгоградский государственный технический университет

ПРАКТИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНКРЕМЕНТАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ПЛАСТИЧНОСТИ В ЗАДАЧАХ ВНЕЦЕНТРЕННОГО СЖАТИЯ СТЕРЖНЕЙ

Работа выполнена по заказу ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» по теме 7.41.21 «Плана фундаментальных научных исследований РААСН и Министерства строительства и ЖКХ РФ» на 2020 г.

Рассмотрено упрощение инкрементальных условий пластичности в двупараметрических задачах внецентренного сжатия при неоднородном распределении напряжений. Повышенные градиентные напряжения определяются по номограммам в зависимости от высоты сечения и эксцентриситета приложения сжимающей силы. Проведена сравнительная оценка различных функциональных аппроксимаций градиентного эффекта.

Ключевые слова: условие пластичности, эксцентриситет силы, градиент напряжений, градиентный коэффициент.

Практическое решение задач теории прочности для строительных конструкций имеет главной целью снижение материалоемкости при одновременном обеспечении безопасной эксплуатации, соответствующей требованиям нормативных документов. В этом смысле крайне важной является оценка допускаемого предельного состояния. Например, для металлических конструкций таким состоянием является наступление пластических деформаций в опасном сечении, оцениваемое критерием прочности, косвенно заложенным в нормы проектирования через расчетное сопротивление материала.

Предельный этап деформирования нормируется достижением максимальным напряжением величины, меньшей расчетного сопротивления материала, что является, по сути, практической реализацией условия пластичности. Расчетные модели, заложенные в нормативную документацию, основаны на диаграммах деформирования, полученных путем испытания образцов на одноосное растяжение. Однако анализ экспериментальных данных [1—5] показывает, что предел текучести материала, определенный из подобных опытов на однородное напряженное состояние не позволяет достоверно решать задачи прочности при неоднородном распределении напряжений, когда имеет место стеснение деформаций сдвига по площадкам скольжения в областях с градиентами напряжений, что приводит к эффекту повышения предельных упругих напряжений. Для учета этого эффекта были предложены инкрементальные условия пластичности для однородного изотропного материала, обладающего площадкой текучести, устанавливающие момент начала текучести при неоднородном напряженном состоянии [6—9]. В условиях используется форма критериев Треска или Мизеса, но начало текучести определяется этапом, когда максимальное напряжение в опасной точке достигнет некоторого повышенного значения σ_{gr}, большего предела текучести материала σ_0.

Это увеличение будет иметь тем большую степень, чем более неоднородным является распределение напряжений в окрестностях рассматриваемой точки и для его аппроксимации предлагается асимптотическая зависимость:

$$T_{gr} = T_0 + (T_m - T_0)\frac{g}{\lambda_{T,g} + g}. \quad (1)$$

Она записана в интенсивностях касательных напряжений для условия Мизеса. В (1) $g = \mathrm{grad}\dfrac{T}{T}$ представляет собой меру неоднородности напряженного состояния; T_m — наибольшее из напряжений, возможных при неоднородном напряженном состоянии, которое принимается равным $1{,}5T_0$; $\lambda_{T,g}$ — упругая характеристика материала с размерностью, обратной длине. В [9, 10] из экспериментальных данных [2] для строительной стали получено $\lambda_{T,g} = 20{,}1587$ м$^{-1}$.

Предложенный градиентный подход реализован в решении задач прочности стержневых элементов при изгибе [9—12] и внецентренном сжатии [11]. Отличительной особенностью применения этого условия является получение в качестве решения либо разрешающего уравнения, либо алгебраического выражения, имеющих однозначную трактовку: в зависимости от геометрических параметров и расчетной схемы наступлению пластических деформаций в опасных сечениях соответствует единственно возможное значение повышенного градиентного напряжения $T_{\mathrm{gr}} > T_0$.

Для задачи чистого изгиба стержня прямоугольного поперечного сечения в [13] предложены способы упрощения реализации инкрементальных условий пластичности для применения на уровне обычного инженерного расчета. Для распространения этого подхода рассмотрим задачу о внецентренном сжатии бруса прямоугольного поперечного сечения [11], имеющего достаточно короткую длину, исключающую потерю устойчивости (рис. 1). Эпюра изгибающих моментов при внецентренном сжатии по длине стержня аналогична случаю чистого изгиба, а распределение напряжений по высоте поперечного сечения определяется зависимостью

$$\sigma = \frac{F}{A} \pm \frac{M}{J} y. \quad (2)$$

Считаем материал одинаково работающим на растяжение и сжатие, тогда текучесть наступает в сжатой зоне (сжимающие напряжения здесь считаем положительными), поэтому сохраним только знак плюс в выражении (2). Подставляя в него значение момента инерции в виде

$J = Ah^2/12$, учитывая, что $M = F \cdot e$, получим

$$\sigma = \frac{F}{A}\left(1 + \frac{12e}{h^2} y\right). \quad (3)$$

Таким образом, по сравнению с чистым изгибом задача представляется более сложной, так как является двупараметрической: распределение напряжений зависит не только от координаты, но и от существенного внешнего параметра — эксцентриситета.

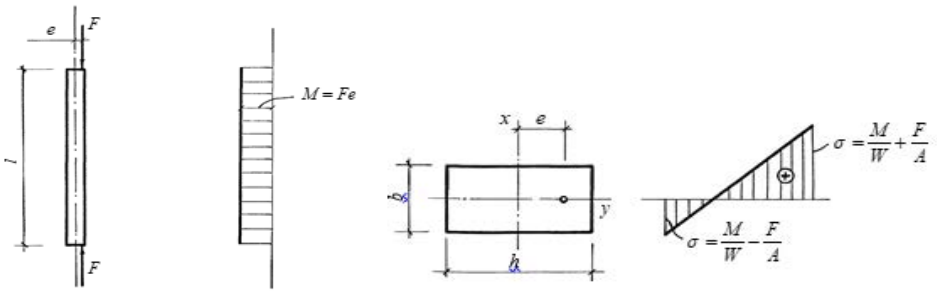
Так как

$$T = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma,$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \frac{F}{\sqrt{3}A}\frac{12e}{h^2},$$

функция неоднородности поля напряжений приобретает вид:

$$g = \frac{2}{h}\frac{6e}{h+6e}. \tag{4}$$



а *б* *в*

Рис. 1. Внецентренное сжатие: *а* — расчетная схема; *б* — эпюра изгибающих моментов; *в* — схема приложения силы в поперечном сечении и эпюра напряжений

Отметим, что, как и при чистом изгибе бруса, мера неоднородности обратно пропорциональна высоте сечения. Второй сомножитель в выражении (4) отражает двупараметричность задачи.

При использовании дробно-линейной зависимости (1) вместе с (3) и (4), перейдя к нормальным напряжениям, получим расчетную формулу для искомого градиентного напряжения в фибровом волокне:

$$\sigma_{gr} = \sigma_0\left[\frac{\lambda_{T,g}h + 3ex}{\lambda_{T,g}h + 2ex}\right], \tag{5}$$

в которой обозначено:

$$ex = \frac{6\tilde{e}}{1+6\tilde{e}},$$

$\tilde{e} = \dfrac{e}{h}$ — представляет собой приведенный эксцентриситет.

Выражение (5) можно истолковать следующим образом: в стержне с заданной высотой поперечного сечения каждому значению эксцентриситета e будет соответствовать определенное значение предельного градиентного напряжения σ_{gr}; при этом всегда будет иметь место единственное значение сжимающей силы, которое его вызывает. Величина этой силы определяется по формуле, следующей из (3):

$$F_{gr} = \frac{bh^2}{h+6e}\sigma_{gr}. \tag{6}$$

Таким образом, даже в одном стержне при разных эксцентриситетах будут иметь место разные градиентные напряжения, определяющие различную «упругую» несущую способность. Оценим градиентный эффект для трех характерных случаев внецентренного приложения нагрузки:

- в области случайных эксцентриситетов, когда принимается

$e = \frac{1}{30}h,$ т. е. $\tilde{e} = 0{,}033;$

- при расположении нагрузки на грани сечения

при $e = \frac{1}{2}h,$ т. е. $\tilde{e} = 0{,}5;$

- при расположении нагрузки за пределами сечения, например,

при $e = h,$ т. е. $\tilde{e} = 1{,}0.$

Для этих эксцентриситетов и принимаемых нами ранее размеров сечений подсчитаны градиентные напряжения. Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значения увеличения σ_{gr}/σ_0 *при внецентренном сжатии по (5)*

Относительный эксцентриситет	Высота сечения *h*, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,033	1,178	1,124	1,108	1,071	1,05	1,038	1,026	1,02	1,016	1,013
0,5	1,356	1,299	1,276	1,213	1,166	1,135	1,099	1,078	1,065	1,055
1,0	1,369	1,314	1,293	1,229	1,181	1,149	1,11	1,088	1,073	1,062

Очевидно, что наиболее заметно эффект стеснения проявляется в стержнях с малой высотой поперечного сечения и при больших эксцентриситетах. Сопоставление полученных результатов с чистым изгибом (см. первая строка табл. 1) [13] обнаруживает, что при внецентренном сжатии увеличение фибрового напряжения проявляется на 1…2 % меньше даже при достаточно большом эксцентриситете и даже в тонких стержнях. С другой стороны, при случайных эксцентриситетах в стержнях с развитым сечением увеличение составляет 1,5…2,5 %, что в силу трактовки (5) будет приводить к такому же «случайному» увеличению «упругой» несущей способности.

Используем, как и ранее при чистом изгибе, альтернативные зависимости, аппроксимирующие эффект стеснения для принятых эксцентриситетов [13—15].

Тогда для иррациональной функции:

$$\sigma_{gr} = \sigma_0\left(1 + \frac{0{,}1551}{\sqrt[4]{h}} \cdot \sqrt[4]{ex}\right); \tag{7}$$

для логарифмических функций:

$$\sigma_{gr} = \sigma_0\left(1 + 0{,}2\lg\frac{0{,}9297h + 2ex}{0{,}9297h}\right); \tag{8}$$

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 \left(1 + 0{,}1 \ln \frac{1{,}1591h + 2ex}{1{,}1591h} \right); \tag{9}$$

для тригонометрической функции

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 \left(1{,}5 + 0{,}5 \operatorname{tg} \frac{27{,}8565h}{27{,}8565h + 2ex} \cdot \frac{\pi}{4} \right). \tag{10}$$

Результаты вычислений по (7)—(10) представлены в табл. 2—5.

Таблица 2

Значения увеличения σ_{gr}/σ_0 *при внецентренном сжатии по (7)*

Относительный эксцентриситет	Высота сечения *h*, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,033	1,238	1,210	1,20	1,175	1,159	1,148	1,133	1,125	1,118	1,112
0,5	1,347	1,305	1,291	1,256	1,232	1,216	1,195	1,181	1,171	1,164
1,0	1,359	1,316	1,301	1,265	1,240	1,223	1,201	1,188	1,177	1,170

Таблица 3

Значения увеличения σ_{gr}/σ_0 *при внецентренном сжатии по (8)*

Относительный эксцентриситет	Высота сечения *h*, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,033	1,223	1,183	1,169	1,132	1,106	1,089	1,068	1,056	1,047	1,041
0,5	1,348	1,304	1,289	1,247	1,214	1,191	1,161	1,140	1,125	1,113
1,0	1,359	1,316	1,300	1,258	1,225	1,202	1,171	1,150	1,134	1,122

Таблица 4

Значения увеличения σ_{gr}/σ_0 *при внецентренном сжатии по (9)*

Относительный эксцентриситет	Высота сечения *h*, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,033	1,212	1,167	1,154	1,116	1,09	1,074	1,055	1,044	1,036	1,031
0,5	1,352	1,301	1,286	1,239	1,203	1,178	1,146	1,124	1,109	1,097
1,0	1,365	1,314	1,299	1,251	1,214	1,189	1,156	1,134	1,116	1,106

Таблица 5

Значения увеличения σ_{gr}/σ_0 *при внецентренном сжатии по (10)*

Относительный эксцентриситет	Высота сечения *h*, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,033	1,219	1,132	1,116	1,078	1,055	1,043	1,029	1,022	1,018	1,00
0,5	1,356	1,301	1,280	1,220	1,174	1,144	1,107	1,085	1,071	1,061
1,0	1,368	1,316	1,296	1,236	1,189	1,157	1,119	1,095	1,079	1,068

В [13] было предложено для упрощения задачи представлять получаемые значения предельного градиентного напряжения в виде некоторой обобщенной формулы

$$\sigma_{gr} = \sigma_0 (1 + Kh). \tag{11}$$

В рассматриваемом случае для различных зависимостей (5)—(10) формуле (11) будет отвечать соответствующий набор значений коэффициента K, отражающего степень стеснения деформаций. Например, из логарифмической зависимости (9) при $h = 0{,}03$ м для эксцентриситетов 0,033; 0,5 и 1,0 соответственно имеем $\sigma_{gr} = 1{,}212\sigma_0$; $1{,}352\sigma_0$ и $1{,}365\sigma_0$, что дает набор $K_{0,03}^{(7)} = 7{,}067; 11{,}79$ и $12{,}17$. Для высоты сечения $h = 0{,}06$ м в том же порядке имеем $\sigma_{gr} = 1{,}154\sigma_0$; $1{,}286\sigma_0$ и $1{,}299\sigma_0$ и, соответственно, $K_{0,06}^{(7)} = 2{,}567;$ $4{,}767; 4{,}98$. Графически эти номограммы приведены на рис. 2. Они пригодны для приблизительной оценки коэффициента стеснения K и градиентного напряжения.

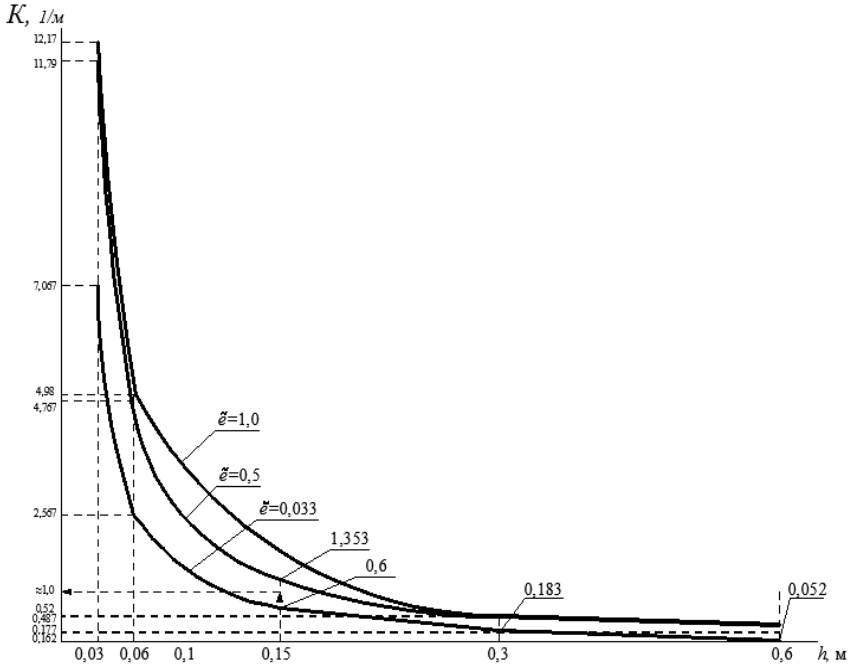


Рис. 2. График изменения коэффициента стеснения в зависимости (11) для логарифмической аппроксимации (9)

Например, в брусе с $h = 0{,}15$ м при эксцентриситете приложения нагрузки $\tilde{e} = 0{,}25$ коэффициент K находится в интервале от 0,6 до 1,353, т. е., среднее значение $K \approx 1$, что дает

$$\sigma_{gr} \cong \sigma_0(1 + 1 \cdot 0{,}15) \approx 1{,}15\sigma_0.$$

Точное значение по (9) $\sigma_{gr} = 1{,}207\sigma_0$ больше приближенно оцененного на 4,7 %, что лежит в пределах инженерной точности вычислений.

Использование других асимптотических зависимостей (5), (7)—(9) будет приводить к сходным номограммам при несколько отличающихся численных значениях коэффициентов стеснения. Эти значения сведены в табл. 6—8 для принятых значений относительных эксцентриситетов. В последней строке

этих таблиц приведено истинное значение усредненного обобщенного принимаемого коэффициента после математической обработки[1] по [13, 16], лежащего в доверительном интервале с вероятностью, составляющей 95 %. Исходя из этих данных на рис. 3 представлены линеаризованные обобщенные номограммы, учитывающие вариации всех вышеприведенных асимптотических аппроксимаций.

Таблица 6

Значения коэффициента стеснения для (11) из различных асимптотических зависимостей (5), (7)—(9) для относительного эксцентриситета $\tilde{e} = 1,0$

Функция	Высота сечения *h*, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Дробно-линейная (5)	12,3	6,28	4,88	2,29	1,207	0,745	0,367	0,22	0,140	0,103
Иррациональная (7)	11,97	6,32	5,02	2,65	1,6	1,05	0,67	0,47	0,354	0,283
Логарифмическая (8)	11,97	6,32	5,0	2,58	1,50	1,01	0,57	0,375	0,268	0,203
Логарифмическая (9)	12,17	6,28	4,98	2,51	1,92	0,945	0,52	0,335	0,232	0,177
Тригонометрическая (10)	12,77	6,32	4,933	2,36	1,26	0,785	0,397	0,238	0,158	0,11
Среднее значение	12,236	6,304	4,9363	2,478	1,397	0,92	0,505	0,328	0,232	0,175
Абсолютная случайная погрешность	0,413	0,027	0,071	0,188	0,205	0,194	0,156	0,129	0,107	0,093
Окончательный результат	12,2 ±0,4	6,3 ±0,02	4,9 ±0,07	2,5 ±0,19	1,4 ±0,12	0,92 ±0,2	0,5 ±0,16	0,33 ±0,13	0,23 ±0,11	0,2 ±0,09

Таблица 7

Значения коэффициента стеснения для (11) из различных асимптотических зависимостей (5), (7)—(9) для относительного эксцентриситета $\tilde{e} = 0,5$

Функция	Высота сечения *h*, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Дробно-линейная (5)	11,87	5,98	4,6	2,13	1,107	0,675	0,33	0,163	0,13	0,09
Иррациональная (7)	11,57	6,1	4,85	2,56	1,547	1,08	0,65	0,453	0,342	0,273
Логарифмическая (8)	11,6	6,08	4,817	2,47	1,427	0,955	0,537	0,35	0,25	0,188
Логарифмическая (9)	11,79	6,02	4,767	2,39	1,353	0,89	0,487	0,31	0,218	0,162
Тригонометрическая (10)	11,87	6,02	4,667	2,2	1,16	0,72	0,357	0,213	0,141	0,10
Среднее значение	11,728	6,04	4,74	2,35	1,32	0,864	0,472	0,298	0,216	0,163
Абсолютная случайная погрешность	0,179	0,061	0,131	0,227	0,23	0,209	0,165	0,143	0,109	0,093
Окончательный результат	11,7 ±0,18	6,0 ±0,1	4,7 ±0,13	2,3 ±0,23	1,3 ±0,23	0,9 ±0,21	0,47 ±0,2	0,3 ±0,14	0,22 ±0,11	0,1 ±0,1

Таблица 8

Значения коэффициента стеснения для (11) из различных асимптотических зависимостей (5), (7)—(9) для относительного эксцентриситета $\tilde{e} = 0,033$

Функция	Высота сечения *h*, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Дробно-линейная (5)	5,93	2,48	1,8	0,71	0,33	0,19	0,087	0,04	0,03	0,02
Иррациональная (7)	7,93	4,2	3,13	1,75	1,06	0,74	0,443	0,313	0,236	0,187

[1] ГОСТ Р 8.736—2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2019.

Функция	Высота сечения h, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
Логарифмическая (8)	7,43	3,66	2,817	1,32	0,707	0,445	0,227	0,14	0,094	0,067
Логарифмическая (9)	7,067	3,34	2,567	1,16	0,6	0,37	0,183	0,11	0,072	0,052
Тригонометрическая (10)	7,3	2,64	1,933	0,78	0,367	0,215	0,097	0,055	0,036	0
Среднее значение	7,132	3,264	2,489	1,144	0,613	0,392	0,207	0,132	0,094	0,065
Абсолютная случайная погрешность	1,608	0,895	0,792	0,531	0,37	0,276	0,181	0,137	0,105	0,091
Окончательный результат	7,1 ±1,6	3,3 ±0,9	2,5 ±0,8	1,1 ±0,53	0,6 ±0,37	0,4 ±0,28	0,21 ±0,18	0,13 ±0,13	0,1 ±0,1	0,07 ±0,09

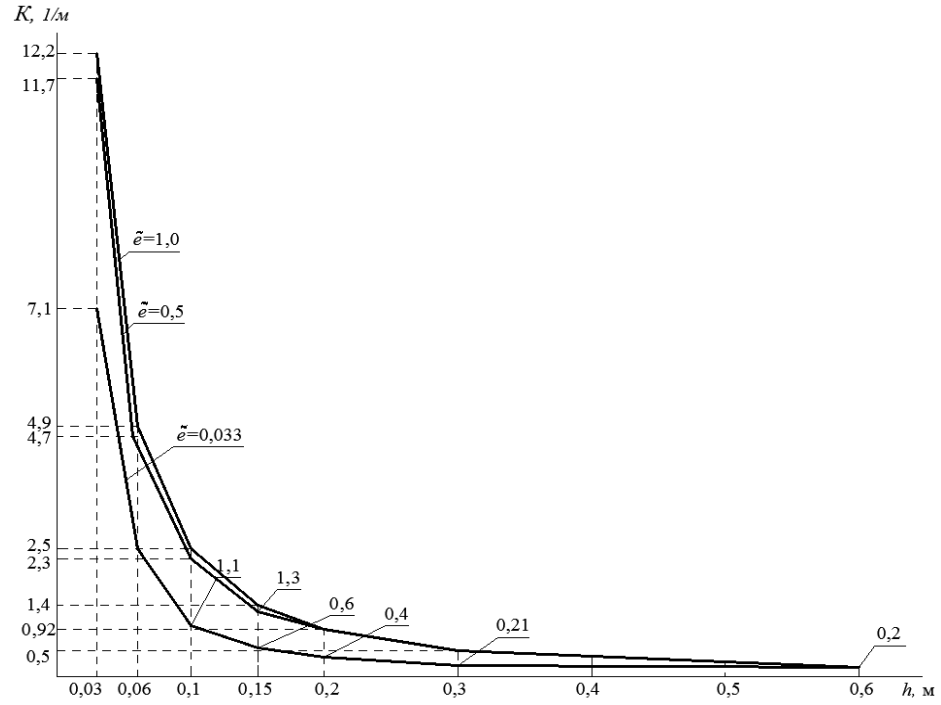


Рис. 3. Линеаризованные номограммы коэффициента стеснения для различных эксцентриситетов приложения сжимающей силы

Практическую реализацию инкрементального условия пластичности удобнее производить сравнительным путем через расчетное сопротивление материала в виде неравенства $\sigma_{\max} \le k_{gr} R$, где градиентный коэффициент записывается, как и ранее, в виде $k_{gr} = 1 + Kh$ и вычисляется по окончательным значениям коэффициента стеснения K из табл. 6—8. Его численные значения для различных высот поперечного сечения и рассмотренных эксцентриситетов при внецентренном сжатии приведены в табл. 9.

Анализ результатов показывает практическое совпадение значений при больших эксцентриситетах (см. последняя строка табл. 9) со значениями этих коэффициентов при чистом изгибе [13]. Ожидаемый эффект увеличения градиентных напряжений (и, соответственно, «упругой» несущей способности) составляет от 4 до 37 % в зависимости от параметров задачи. Для наглядности ожидаемые проценты увеличения сведены в табл. 10.

Таблица 9

Значения градиентного коэффициента k_{gr}

для различных высот поперечного сечения внецентренно сжатого стержня при некоторых относительных эксцентриситетах

Относительный эксцентриситет $\tilde{e}$	Высота поперечного сечения h, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,033	1,21	1,17	1,15	1,11	1,09	1,08	1,06	1,05	1,05	1,04
0,5	1,35	1,3	1,28	1,23	1,2	1,18	1,14	1,12	1,11	1,1
1,0	1,37	1,32	1,3	1,25	1,2	1,18	1,15	1,13	1,12	1,12

Таблица 10

Прогнозируемый процент увеличения фибровых упругих напряжений при внецентренном сжатии

Относительный эксцентриситет $\tilde{e}$	Высота поперечного сечения h, м									
	0,03	0,05	0,06	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
0,033	20	17	10		8		5			
0,5	30		20			14		10		
1,0	30			20		15		12		

Выводы

1. Приведенные в статье практические способы реализации инкрементальных условий пластичности для определения области упругой работы внецентренно-сжатых стержней могут быть применены на уровне инженерного расчета с обеспечением удовлетворительной технической точности результата.

2. Для внецентренно-сжатых стержней с практически встречающимися размерами сечений увеличение составляет от 12 до 25 %. Представляется перспективным использование этого эффекта при оценке предельного состояния элементов и конструкций.

3. Случайный эксцентриситет как проявление технологического несовершенства монтажных работ при градиентном подходе не усугубляет работу конструкции, а приводит к увеличению области упругой работы для реальных сечений от 4 до 10 %.

4. Для случаев приложения нагрузки за пределами сечения прогнозируемая степень увеличения фибровых напряжений фактически не отличается от пограничного случая.

5. Эффекты стеснения деформаций при внецентренном сжатии из-за многокомпонентности напряженного состояния с доминирующей составляющей сжимающих напряжений проявляются в меньшей степени, чем при чистом изгибе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Балдин В. А.* Об учете пластических деформаций при неравномерном распределении напряжений по сечению // Строительная механика и расчет сооружений. 1977. № 1. С. 29—31.

2. *Балдин В. А., Потапов В. Н., Фадеев А. А.* О сопротивлении тали деформированию при неравномерном распределении напряжений // Строительная механика и расчет сооружений. 1977. № 1. С. 29—31.

3. *Фадеев А. А.* О переходе малоуглеродистой стали в упруго-пластическое состояние при неравномерном распределении напряжений (при чистом изгибе) // Исследование прочности

элементов строительных металлических конструкций: Труды института / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М., 1982. С. 85—91.

4. *Campus F.* Plastification de l`acierdouxen flection plane simple // Bull. de la classe des Sciences de l`Academie R. de Belgique. 1963. Serie 5. Vol. 49. Iss. 4. Pp. 303—314.

5. *Dehousse N. M.* Note relative a unphenomene de superelastisiteen flection constatelorsd`essais d`un barreauenacierdoux // Bull. de la classe des Sciences de l`Academie R. de Belgique. 1962. Serie 5. Vol. 48. Pp. 329—334.

6. *Гениев Г. А., Калашников С. Ю.* Влияние градиентов напряжений, геометрии и масштабов сечений на переход изгибаемых элементов в пластическое состояние // Исследования по строительной механике: Труды института / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М., 1985. С. 5—12.

7. *Гениев Г. А., Калашников С. Ю.* Об учете влияния неоднородности напряженного состояния на переход материала в пластическое состояние // Строительная механика и расчет сооружений. 1988. № 6. С. 12—15.

8. *Гениев Г. А., Калашников С. Ю.* О построении инкрементальных условий пластичности / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М., 1984. 14 с. Деп. во ВНИИИС 16.02.84. № 4817.

9. *Калашников С. Ю.* Критерии пластичности, учитывающие влияние неоднородности напряженного состояния // Труды НГАСУ. Новосибирск, 2003. № 6(27). С. 142—148.

10. *Калашников С. Ю., Левин А. В.* О решении задач плоского поперечного изгиба с использованием инкрементального условия пластичности / Волгоградский инженерно-строительный институт. Волгоград, 1988. 10 с. Деп. во ВНИИИС 13.06.88. № 8382.

11. *Калашников С. Ю.* О решении некоторых двумерных задач с использованием инкрементального условия пластичности / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. М., 1984. 16 с. Деп. во ВНИИИС 10.05.84. № 5015.

12. *Гениев Г. А., Калашников С. Ю.* Инкрементальная теория нелинейного деформирования тел в условиях неоднородного напряженного состояния // Саратовский государственный технический университет. Саратов, 2004. 172 с.

13. *Калашников С. Ю., Гурова Е. В., Калиновский С. А.* Практические способы реализации инкрементальных условий пластичности в стержневых элементах строительных конструкций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 4(81). С. 6—15.

14. *Калашников С. Ю.* Экспериментальная проверка модели деформирования материала в условиях неоднородного напряженного состояния / Волгоградский государственный технический университет. Волгоград, 2017. 81 с.

15. *Калашников С. Ю., Ватанский В. П.* Альтернативные аппроксимирующие функции инкрементальной теории нелинейного деформирования тел: материалы ежегодной научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава и студентов ВолгГАСУ: в 3 ч. Волгоград, 2008. С. 270—272.

16. *Братухин Ю. К., Путин Г. Ф.* Обработка экспериментальных данных: учебное пособие по лабораторному практикуму «Механика». Пермь, 2003. 80 с.

© Калашников С. Ю., Гурова Е. В., Калиновский С. А., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Калашников С. Ю., Гурова Е. В., Калиновский С. А. Практические способы применения инкрементальных условий пластичности в задачах внецентренного сжатия стержней // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 132—142.

Об авторах:

Калашников Сергей Юрьевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. экспертизы и эксплуатации объектов недвижимости, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; kalashnikov@vstu.ru

Гурова Елена Владимировна — канд техн. наук, доц. каф. экспертизы и эксплуатации объектов недвижимости, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; eun.cafedra@yandex.ru

Калиновский Сергей Андреевич — канд. техн. наук, доц. каф. гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; sk0522@yandex.com

Sergei Yu. Kalashnikov, Elena V. Gurova, Sergei A. Kalinovskii

Volgograd State Technical University

PRACTICAL METHODS OF APPLICATION OF INCREMENTAL PLASTIC CONDITIONS IN PROBLEMS OF OFF-CENTER COMPRESSION OF RODS

A simplification of the incremental plasticity conditions in two-parameter problems of eccentric compression with a non-uniform stress distribution is considered. Increased gradient stresses are determined from nomograms depending on the section height and the eccentricity of the application of the compressive force. A comparative assessment of various functional approximations of the gradient effect is carried out.

K e y w o r d s: plasticity condition, force eccentricity, stress gradient, gradient coefficient.

For citation:

Kalashnikov S. Yu., Gurova E. V., Kalinovskii S. A. [Practical methods of application of incremental plastic conditions in problems of off-center compression of rods]. *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], 2021, iss. 1, pp. 132—142.

About authors:

Sergei Yu. Kalashnikov — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; kalashnikov@vstu.ru

Elena V. Gurova — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; eun.cafedra@ yandex.ru

Sergei A. Kalinovskii — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; sk0522@yandex.com

УДК 620.191.33:666.974.2

Р. А. Бурханова, Н. Ю. Евстафьева, Т. К. Акчурин

Волгоградский государственный технический университет

ОЦЕНКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ НАПОЛНЕННОЙ ДВУХКОМПОНЕНТНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ СИСТЕМЫ ХОЛОДНОГО ОТВЕРЖДЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ ЗАЩИТЫ БЕТОННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ

Рассмотрена наполненная двухкомпонентная полимерная система холодного отверждения. Для оценки ее коррозионной стойкости и долговечности в соответствие с сорбционным методом определялись коэффициенты химической стойкости. Что является оптимальным, поскольку эта величина зависит от параметров массопереноса, интенсивности реакции, размеров изделия, длительности воздействия агрессивных сред и других факторов. В качестве агрессивных сред были взяты: вода, 5%-й раствор соляной кислоты, 25%-й водный раствор аммиака, 10%-й раствор едкого натрия, насыщенный раствор хлорида натрия. Продолжительность экспонирования составила 360 сут. Оценка химической стойкости разработанных составов НДПС проводилась на основании методических рекомендаций по определению антикоррозионных свойств защитных покрытий бетона и методик проведения лабораторных испытаний. Оценивались изменения массы образцов и их химическая стойкость в результате воздействия на них химических реактивов, имитирующих агрессивную среду при эксплуатации. Изменение коэффициента химической стойкости в лабораторных условиях не выходило за рамки значения 0,80, что позволяет обеспечить надежную защиту и эксплуатацию изделий с полимерным покрытием в условиях воздействия данных агрессивных сред.

К л ю ч е в ы е с л о в а: наполненная двухкомпонентная полимерная система, модифицированный бетон, коррозионная стойкость, химическая стойкость, агрессивная среда.

При выборе материалов и конструкций для зданий и сооружений, работающих в агрессивных условиях, определяющими критериями пригодности к эффективной эксплуатации становятся химическое сопротивление и долговечность строительных композитов. К основным качественным характеристикам полимерных гидроизоляционных композиций относятся их экономичность, устойчивость к агрессивному химическому воздействию, влагоустойчивость. Воздействие агрессивных сред на материалы, и в частности на полимерные композиции проявляется в изменении их структуры и свойств без нарушения целостности материалов или с их разрушением [1, 2]. При этом действие среды разделяется на физическое и химическое.

Физическое действие сред на полимерный композит заключается в проникновении их между макромолекулами. Это воздействие носит обратимый поверхностный и объемный характер. Поверхностное действие среды заключается в уменьшении поверхностной энергии на границе «тело — среда» в результате адсорбции, облегчающей процесс образования и развития трещин. Объемное действие среды приводит к значительному ухудшению основных прочностных показателей, и, с другой стороны, к увеличению гибкости полимерных цепей и пластификации композиции. Проникновение физически активных сред в тело осуществляется через микропоры и мелкие капилляры материалов.

Химическое действие агрессивных сред сильно изменяет химическую структуру полимерных материалов, в которых происходят необратимые из-

менения с ухудшением основных физико-механических свойств композиций. Изменение химической структуры полимерной композиции характеризуется наличием активных групп в цепях молекул (карбоксильных, гидроксильных, аминных, кетонных), как имеющихся, так и вновь образующихся в макромолекуле композита при взаимодействии с агрессивной средой, а также наличием двойных связей [3, 4]. Рассматривая физическое и химическое действие сред на полимерный композит надо понимать, что оно носит несколько условный характер и зависит от реакционной способности полимерного связующего.

Коррозия полимерных материалов является результатом преодоления сил взаимодействия между атомами или молекулами, происходящего под влиянием различных окислительных агентов, термического, радиационного, механического воздействия и других энергетических факторов. Результатом указанных воздействий являются различные деструктивные процессы. Окислительная деструкция полимеров происходит при действии на материал кислорода или озона, термическая деструкция происходит под действием теплоты. Эти виды деструкции могут протекать одновременно. Радиационная деструкция полимеров происходит под влиянием излучений (рентгеновских, протонных, нейтронных и др.). Механическая деструкция протекает под действием статических и динамических нагрузок. Биологическая деструкция, как правило, вызывается плесневыми грибами. Химическая деструкция происходит под действием агрессивной (чаще окислительной) среды. Окислительная реакция активизируется под влиянием света (фотохимическая деструкция).

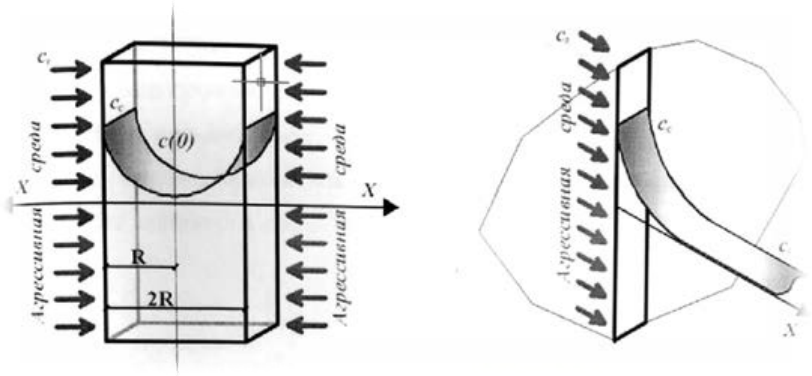
Анализ традиционных способов повышения коррозионной стойкости полимерной композиции и опыта применения защитных полимерных покрытий показал, что вопросы сохранности строительных изделий (конструкций) в различных случаях решаются по-разному и в каждом конкретном случае отдельно. Количественная оценка возможна только при использовании специальных функций, учитывающих эффект разнообразного влияния таких факторов как проницаемости материалов, температуры и концентрации среды, размеров и формы изделий, длительности агрессивного воздействия и т. д. В настоящее время существует несколько методов количественной оценки химического сопротивления и долговечности полимерных композиций [1, 5—7]. Физико-статистический (вероятностный) подход к описанию деградации полимерной композиции при одновременном воздействии механических нагрузок и агрессивных сред получил наиболее интенсивное развитие.

Полимерные композиции нередко называют непроницаемыми для жидкостей, однако непроницаемость их далеко не абсолютна. Скорость движения жидкостей в бетонах с полимерным покрытием во много раз ниже, чем в обычных бетонах, но она достаточна, чтобы определяющим образом влиять на физико-технические свойства композиций и экранирующую способность конструкций из этих материалов.

Существует ряд методов по определению проницаемости полимерных материалов: метод меченых изотопов, амперометрический, мембранный [l, 8, 9] и др. Но ввиду их трудоемкости и технической сложности, большого применения эти методы при определении диффузионных характеристик не нашли. Наиболее широкое распространение получил сорбционный метод определения коэффициента диффузии. Сущность этого метода заключается в регистрации

скорости поглощения жидкости образцами с полимерным покрытием или полимерными образцами, погруженными в агрессивную среду. Скорость изменения массы зависит от коэффициента диффузии, который можно найти, зная изменение массы образца в различные промежутки [10—16].

Для описания диффузии растворов в полимерном композите, и, в частности в наполненной двухкомпонентной полимерной системе (НДПС), важное значение имеет задача двусторонней диффузии агрессивной жидкости в неограниченную пластину (рис. 1, *а*). При бесконечно длительном выравнивании массосодержания, которое применительно к плотным полимербетонам или временам, когда фронт диффундирующего вещества не достигает границ тела, массоперенос полимера рассматривается как перемещение вещества в полуограниченном теле (рис. 1*б*) [15—18]. При сорбционном методе коэффициент диффузии можно определить, описав экспериментальную кривую массопоглощения [19].



а *б*

Рис. 1. Диффузия жидкости: *а* — в пластину; *б* — в полубесконечное тело

Известен также метод определения коэффициента диффузии электролитов по скорости продвижения фронта постоянной концентрации. Этот метод называют оптическим или микроскопическим. Сущность его заключается в определении глубины проникновения агрессивной среды в полимерный композит.

Для НДПС, работающей в условиях воздействия агрессивной среды, экономически целесообразный знать срок ее службы [20, 21]. Под действием агрессивной среды в течение этого срока допустимое снижение химической стойкости бетона в конструкции должно соответствовать величине C: для 10 лет эксплуатации снижение прочности происходит при значении $C = 0{,}5$.

Для принятого периода эксплуатации химическая стойкость полимерного композита обеспечивается при условии:

$$K_{\text{х. с}} \geq 1 - C, \tag{1}$$

где $K_{\text{х. с}}$ — коэффициент химической стойкости, рассчитанный по формуле:

$$K_{\text{х. с}} = \frac{R_t}{R_0}, \tag{2}$$

где R_0 — предел прочности контрольной серии образцов; R_t — предел прочности серии образцов после выдержки в среде в течение времени t, сут.

Для прогнозирования величины коэффициента химической стойкости $K_{\text{х. с}}$ в течение принятого срока эксплуатации используют зависимость (при $\tau > 30$ сут.):

$$\lg K_{\text{х. с}} = a + b \lg \tau, \tag{3}$$

где $\lg K_{\text{х. с}}$ и $\lg\tau$ — логарифмы коэффициента химической стойкости и принятого срока эксплуатации соответственно; a и b — постоянные коэффициенты для данного вида композиции и данной среды.

Коэффициенты a и b рассчитывают по результатам испытаний по формулам:

$$a = \lg \overline{K}_{\text{х. с}} - b \lg \tau, \tag{4}$$

$$b = \frac{\sum_{i=1}^{n} (\lg \overline{K}_{\text{х. с}} - \lg K_{\text{х. с}_i})(\lg \overline{\tau} - \lg \tau_i)}{\sum_{i=1}^{n} (\lg \overline{\tau} - \lg \tau_i)^2}, \tag{5}$$

где $\lg \overline{K}_{\text{х. с}} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lg K_{\text{х. с}_{\text{ш}}}}{n}$ — среднее значение логарифма коэффициента химической стойкости; $\lg \overline{\tau} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \lg \tau}{n}$ — среднее значение логарифма времени испытаний; $\lg K_{\text{х. с}}$ и $\lg \tau_i$ — соответственно логарифмы коэффициентов химической стойкости и времени испытаний в i-ой серии образцов (промежуточных сроков); n — число серии образцов, испытанных в промежуточные сроки.

Феноменологический подход в описании процесса разрушения основан на установлении из экспериментальных данных закономерностей изменения свойств материала и конструкций в зависимости от продолжительности действия на них агрессивных факторов. Эти закономерности получили название деградационных функций, которые отражают влияние на процесс разрушения длительности разрушающего фактора, физических, геометрических параметров материала, распределение по объему тела необратимых микроразрушений и т. д. Термин «деградация» обозначает процесс изменения физических и геометрических характеристик полимерных композиций в результате действия напряжений, агрессивной среды, излучений и других факторов.

Для оценки коррозионной стойкости и долговечности полимерных композиций использование коэффициентов химической стойкости можно считать оптимальным, поскольку эта величина зависит от параметров массопереноса, интенсивности реакции, размеров изделии, длительности воздействия агрессивных сред и других факторов.

Особенности структурного строения эпоксидных полимеров обуславливают их широкое использование при производстве строительных материалов и изделий. Пленкообразующая способность вторичного порошка эпоксидной

смолы определила его пригодность при формировании НДПС холодного отверждения для защиты изделий от воздействия воды и агрессивной среды. Модификация эпоксидной смолы фенольным порошкообразным связующим придает композиции дополнительную эластичность за счет образования гомогенной самоотверждающейся системы, содержащей продукт сополигомеризации (эпоксидно-новолачный блоксополимер) с топологически сложной пространственной сеткой. Это приводит к формированию композиции с широким спектром физических особенностей. Разработка нового состава НДПС на основе отходов промышленных предприятий региона снижает себестоимость гидроизоляционной системы, делает ее экономически целесообразной.

Малонаполненные полимерные составы позволяют получать материалы с совершенно новыми технологическими или эксплуатационными характеристиками. Введение дисперсных абразивных частиц и дискретных углеродных волокон в сочетании с химическими добавками приводит к росту прочностных характеристик композиции, что дает возможность рассматривать разработанный состав НДПС не только как гидроизоляционный, но и упрочняющий материал, тем самым расширяя область его использования.

Оценка химической стойкости разработанных составов НДПС проводилась на основании методических рекомендаций по определению свойств антикоррозионных свойств защитных покрытий бетона и методик проведения лабораторных испытаний [22—24]. Оценивались изменения массы образцов и их химическая стойкость в результате воздействия на них химических реактивов, имитирующих агрессивную среду при эксплуатации.

В результате этой совокупности обстоятельств в качестве агрессивных сред были взяты: вода, 5%-й раствор соляной кислоты, 25%-й водный раствор аммиака, 10%-й раствор едкого натрия, насыщенный раствор хлорида натрия. Продолжительность экспонирования 360 сут. Результаты испытаний представлены в табл. В графическом виде тенденции изменения показателей образцов с покрытием НДПС представлены на рис. 2, 3. Снижение коэффициента химической стойкости в растворе соляной кислоты составило 13 %, в растворе аммиака — 17 %, в растворе едкого натрия — 5 %.

Изменение показателей химической стойкости полимерной композиции в различных агрессивных средах

Показатели	Время экспонирования, сут.						
	0	30	60	90	180	270	360
Вода							
Δm, %	0	0,015	0,018	0,018	0,028	0,032	0,028
$K_{х.с}$	1	0,995	0,998	0,995	0,998	0,990	0,990
Насыщенный раствор NaCl							
Δm, %	0	0,030	0,028	0,058	0,098	0,100	0,098
$K_{х.с}$	1	0,987	0,988	0,895	0,898	0,890	0,890
5%-й раствор HCl							
Δm, %	0	0,050	0,068	0,078	0,119	0,136	0,138
$K_{х.с}$	1	0,921	0,921	0,865	0,828	0,810	0,811
25%-й водный раствор NH_3							
Δm, %	0	0,075	0,119	0,149	0,232	0,279	0,290
$K_{х.с}$	1	0,974	0,942	0,922	0,871	0,855	0,835
10%-й раствор NaOH							
Δm, %	0	0,059	0,125	0,142	0,182	0,258	0,236
$K_{х.с}$	1	0,972	0,951	0,945	0,928	0,905	0,885

По результатам первичных испытаний можно сделать вывод о стойкости образцов с покрытием НДПС в условиях воздействия агрессивных сред. С одной стороны, объемное действие среды приводит к значительному ухудшению химической стойкости, которая зависит от изменения прочностных показателей образцов, а с другой — к увеличению гибкости полимерных цепей и пластификации композиции. Проникновение физически активных сред в тело осуществляется через микропоры и мелкие капилляры материалов, что влияет на изменение химической структуры полимерных материалов за счет необратимых процессов, ухудшающих основные физико-механические свойств композиции.

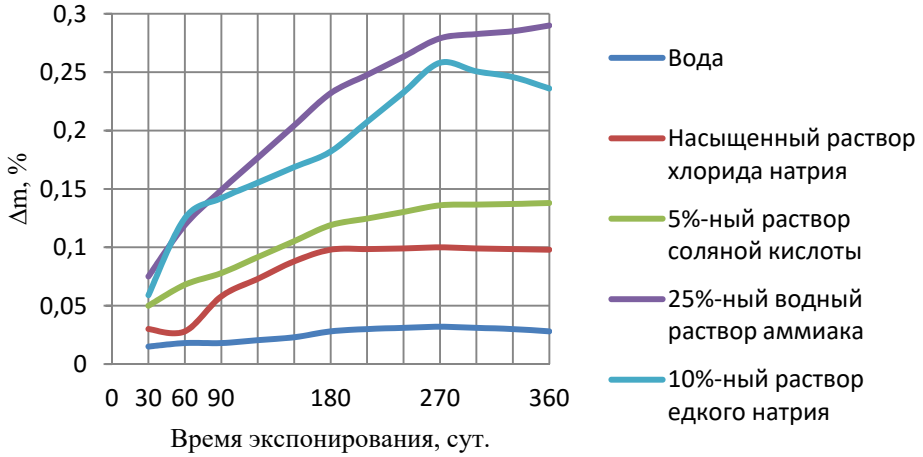


Рис. 2. Изменение массопоглощения образцов с покрытием НДПС в зависимости от времени экспонирования

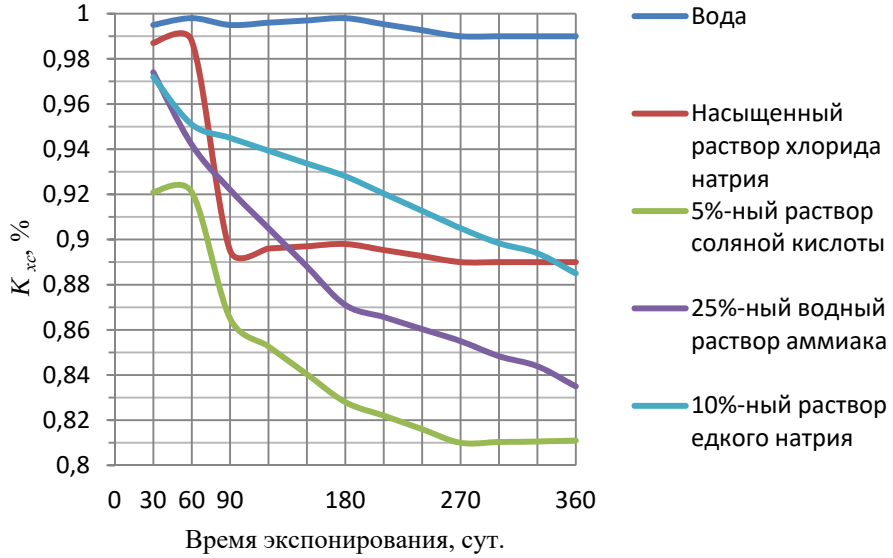


Рис. 3. Изменение химической стойкости образцов с покрытием НДПС в зависимости от времени экспонирования

Химическая структура композиции характеризуется наличием активных групп в цепях молекул (карбоксильных, гидроксильных, аминных, кетонных), предполагает образование новых соединений в макромолекуле полимера при взаимодействии с агрессивной средой, обусловленных наличием двойных связей [25—27]. При всем многообразии химических процессов, вызывающих повреждение композитов в агрессивных средах, их можно разделить на следующие основные типы, охватывающие практически все виды деструкции:

- процессы вымывания, при которых из композита десорбируют компоненты, растворимые в воде;
- процессы химического взаимодействия реакционноспособных компонентов композита и электролита с образованием растворимых солей и других продуктов, растворимых в воде;
- образование в композите нерастворимых соединений, кристаллизующихся в порах и уплотняющих структуру на начальной стадии и разрушающих ее с увеличением объема сверхкритического предела.

Очевидно, что при действии на разработанную полимерную композицию агрессивных сред в ее структуре будут происходить химические процессы, аналогичные тем, что имеют место и для других полимеров. Но при повышенной химической стойкости покрытие НДПС предотвращает разрушение бетонной поверхности.

Представленные результаты испытаний позволяют дать оценку эффективности разработанных составов НДПС в условиях воздействия агрессивных сред. Изменение коэффициента химической стойкости не вышло за рамки значения 0,80, что может обеспечить надежную защиту и эксплуатацию изделий с полимерным покрытием в условиях воздействия данных агрессивных сред.

Выводы

По результатам испытаний можно говорить о стойкости образцов с покрытием НДПС в условиях воздействия агрессивных сред. Объемное действие среды приводит к ухудшению химической стойкости, которая зависит от изменения прочностных показателей образцов, и к увеличению гибкости полимерных цепей и пластификации композиции. Проникновение физически активных сред в тело осуществляется через микропоры и мелкие капилляры материалов, что влияет на изменение химической структуры полимерных материалов за счет необратимых процессов, ухудшающих основные физико-механические свойств композиции. Тем не менее в исследованных материалах изменение коэффициента химической стойкости не превысило 0,80. Что делает возможным обеспечение надежной защиты и эксплуатации изделий с полимерным покрытием в условиях воздействия данных агрессивных сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Соломатов В. И., Селяев В. П.* Химическое сопротивление композиционных строительных материалов. М.: Стройиздат, 2002. 312 с.

2. Рекомендации по применению защитно-конструкционных полимеррастворов при реконструкции и строительстве гражданских зданий / НИЛЭП ОСИ. М. : Стройиздат, 1981. 112 с.

3. *Оудиан Дж.* Основы химии полимеров / под ред. З. Г. Роговина. М.: Химия, 2006. 326 с.

4. *Зубов П. И., Сухорева Л. А.* Структура и свойства полимерных покрытий. М.: Химия, 2009. 25 с.

5. *Ngog Thanh Tran*. Fracture energy of ultra-high-performance fiber-reinforced concrete at high strain rates // Cement and Concrete Research. 2015. Vol. 101. Iss. 1. Pp. 80—90.

6. *Соломатов В. И., Бобрышев А. Н., Химмлер К. Г.* Полимерные композиционные материалы в строительстве. М.: Стройиздат, 2001. 312 с.

7. *Черня К. И.* Эпоксидные компаунды и их применение. Л.: Судостроение, 1985. 400 с.

8. *Mohammeda M. K., Al-Hadithi A. I., Mohammed M. H.* Production and optimization of eco-efficient self-compacting concrete SCC with limestone and PET // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 197. Pp. 734—746.

9. *Лосев И. П., Тростянская Е. Б.* Химия синтетических полимеров. М.: Химия, 2008. 615 с.

10. *Foreman M. R., Vollmer F.* Optical Tracking of Anomalous Diffusion Kinetics in Polymer Microspheres // Physical Review Letters. 2015. Vol. 114. Iss. 11. Pp. 257—266.

11. *Gadzhiev A. M., Kurbanov R. M., Khadzhishalapov G. N.* The influence of the filler grain composition on the properties of the heat-resistant basaltic // Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2017. Vol. 44. Iss. 3. Pp. 146—155.

12. *Burkhanova R. A., Akchurin T. K., Stefanenko I. V.* Modified heat-resistant concrete using slag aggregates // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962. 9 p. URL : https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757—899X/962/2/022015/pdf.

13. *Бурханова Р. А, Евстафьева Н. Ю., Акчурин Т. К.* Наполнение эпоксидных полимеров как фактор получения многокомпонентной композиции с улучшенными прочностными свойствами // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 4(81). С. 151—161.

14. *Sun Hongfang, Zishanshan Li, Shazim Ali Memon*. Influence of ultrafine 2-CaO center dot SiO_2 powder on hydration properties of reactive powder concrete // Materials. 2015. Vol. 8. Iss. 9. Pp. 6195—6207.

15. *Skazlic M., Skazlic Z., Majer J.* Application of high performance fibre reinforced shotcrete for tunnel primary support // Proceedings of the 10 International Conference. Shotcrete for Underground Support. 2012. Pp. 206—214.

16. *Shi X. S., Collins E. G., Zhao X. L.* Mechanical properties and microstructure analysis of fly ash geopolymeric recycled concrete // Journal of Hazardous Materials. 2012. Vol. 237. Pp. 20—29.

17. *Бурханова Р. А., Акчурин Т. К., Вовко В. В.* Модифицированные жаростойкие бетоны с использованием шлаковых заполнителей // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 3(80). С. 54—63.

18. *Sudarsana Rao H., Somashekaraiah H. M., Ghorpade Vaishali G.* Strength and workability characteristics of fly ash based glass fibre reinforced high-performance concrete // International Journal of Engineering Science and Technology. 2011. Vol. 3. Iss. 8. Pp. 6266—6277.

19. *Евстафьева Н. Ю., Акчурин Т. К., Стефаненко И. В.* Полимерные системы гидроизоляционной и антикоррозионной защиты строительных материалов и конструкций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. Вып. 53(72). С. 43—52.

20. *Evstafyeva N. Yu., Stefanenko I. V., Akchurin T. K.* Modification of concrete with polymer additives based on secondary resources // Material Science Forum. 2020. Vol. 974. Pp. 277—282.

21. *Евстафьева Н. Ю., Стефаненко И. В., Акчурин Т. К.* Полимерная система для защиты строительных изделий от коррозионных разрушений // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе: сборник научных трудов по материалам VII Международной научно-практической конференции Саратовского государственного технического университета им. Ю. А. Гагарина. 2019. С. 194—199.

22. *Spiratos N.* Superplasticizers for concrete. Quebec : Fundaments, technology and practice, 2015. 323 p.

23. *Рейбман А. И.* Защитные лакокрасочные покрытия. М.: Химия, 2002. 615 с.

24. *Balakrishna M. N., Mohamad F., Evans R.* Durability of concrete with differential concrete mix design // International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). 2020. Vol. 7. ISS. 4. Pp. 696—701.

25. *Al-Hadithi A. I., Hilal N. N.* The possibility of enhancing some properties of self-compacting concrete by adding waste plastic fibers // Journal of Building Engineering. 2016. Vol. 8. Pp. 20—28.

26. *Журков С. Н., Куксенко В. С., Слуцкер А. И.* Микромеханика разрушения полимеров // Проблемы прочности. 1971. № 2. С. 45—50.

27. *Заиков Г. Е., Моисеев Ю. В.* Химическая стойкость полимеров в агрессивных жидких средах // Пластические массы. 1972. № 11. С. 24—27.

© Бурханова Р. А., Евстафьева Н. Ю., Акчурин Т. К., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Бурханова Р. А., Евстафьева Н. Ю., Акчурин Т. К. Оценка работоспособности наполненной двухкомпонентной полимерной системы холодного отверждения в качестве покрытия для защиты бетонных поверхностей от воздействия агрессивной среды // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 143—152.

Об авторах:

Бурханова Рената Анверовна — канд. техн. наук, доц. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; renata_vlg@mail.ru

Евстафьева Наталья Юрьевна — инженер лаборатории № 1 каф. энергоснабжения, теплотехники, теплогазоснабжения и вентиляции, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; n16121976@yandex.ru

Акчурин Талгать Кадимович — канд. техн. наук, проф., зав. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; Scopus ID: 57190967539, info@vgasu.ru

Renata A. Burkhanova, Natal'ya Yu. Evstaf'eva, Talgat K. Akchurin

Volgograd State Technical University

ESTIMATION OF THE PERFORMANCE OF A FILLED TWO-COMPONENT COLD CURING POLYMER SYSTEM AS A COATING FOR PROTECTING CONCRETE SURFACES FROM EXPOSURE TO AN AGGRESSIVE ENVIRONMENT

The article deals with a cold curing filled two-component polymer system (NDPS). To assess its corrosion resistance and durability in accordance with the sorption method, the coefficients of chemical resistance were determined. What is optimal, since this value depends on the parameters of mass transfer, the intensity of the reaction, the size of the product, the duration of exposure to aggressive media and other factors. As aggressive media were taken: water, 5 % hydrochloric acid solution, 25 % aqueous ammonia solution, 10 % sodium hydroxide solution, saturated sodium chloride solution. The exposure time was 360 days. The assessment of the chemical resistance of the developed NDPS compositions was carried out on the basis of guidelines for determining the anticorrosive properties of protective concrete coatings and laboratory test methods. Changes in the mass of samples and their chemical resistance as a result of exposure to chemical reagents imitating an aggressive environment during operation were evaluated. The change in the coefficient of chemical resistance in laboratory conditions did not go beyond the value of 0.80, which makes it possible to ensure reliable protection and operation of polymer-coated products under the influence of these aggressive environments.

K e y w o r d s: two-component polymer system (NDPS), modified concrete, corrosion resistance, chemical resistance, aggressive environment.

For citation:

Burkhanova R. A., Evstaf'eva N. Yu., Akchurin T. K. [Estimation of the performance of a filled two-component cold curing polymer system as a coating for protecting concrete surfaces from exposure to an aggressive environment]. *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], 2021, iss. 1, pp. 143—152.

About authors:

Renata A. Burkhanova — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; renata_vlg@mail.ru

Natal'ya Yu. Evstaf'eva — Engineer, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; n16121976@yandex.ru

Talgat K. Akchurin — Candidate of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; Scopus ID: 57190967539, info@vgasu.ru

УДК 666.96:669-027.33

Е. Е. Гнедаш, И. В. Стефаненко, Т. К. Акчурин

Волгоградский государственный технический университет

СТРУКТУРООБРАЗУЮЩИЕ ФАКТОРЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЖАРОСТОЙКИХ КОМПОЗИЦИЙ НА ОСНОВЕ ВТОРИЧНЫХ РЕСУРСОВ РЕГИОНА

Снижение энергетических и тепловых потерь в современных высокотемпературных технологиях переработки материалов, снижение материалоемкости строительных конструкций, эффективное использование всех видов энергетических ресурсов в различных отраслях промышленности за счет комплексной теплоизоляции конструкций и агрегатов является первостепенной научно-технической задачей энерго- и ресурсосбережения. Актуально расширение ассортимента жаростойких бетонов посредством разработок новых перспективных жаростойких многокомпонентных композиций с использованием побочных и сопутствующих продуктов производства карбида кремния (SiC) и отходов производства абразивного инструмента на керамической связке, которые придадут жаростойкие свойства цементному камню. Методы оптической микроскопии являются источником информации о внутреннем строении бетона, могут использоваться для анализа эксплуатационных повреждений в структуре строительных композиций. Наличие в жаростойкой композиции разрушения в зоне контакта цементной матрицы и кварцевого заполнителя в процессе высокотемпературного воздействия говорит о необходимости проработки вопроса выбора пластифицирующей добавки к бетону и оптимизации соотношения компонентов заполнителя прерывистой гранулометрии.

К л ю ч е в ы е с л о в а : строительные материалы, жаростойкий бетон, минеральные наполнители, модификация бетона, промышленные отходы.

Модернизация строительной отрасли является одним из важнейших направлений развития Российской Федерации, как в экономическом плане, так и в социальном. Приоритетной считается тенденция разработки и внедрения новых строительных материалов и технологий, совершенствования существующих методов и подходов производства строительных изделий и конструкций. Целесообразность использования местного минерального сырья регионов и техногенных отходов промышленных предприятий в технологиях эффективных строительных материалов и конструкций неоспорима в условиях научно-технического прогресса в строительной индустрии.

Развитие экономики в современных условиях базируется на решении научно-технических задач энерго- и ресурсосбережения, среди которых первостепенными являются:

- снижение энергетических и тепловых потерь в современных высокотемпературных технологиях переработки материалов;
- снижение материалоемкости строительных конструкций;
- эффективное использование всех видов энергетических ресурсов в различных отраслях промышленности за счет комплексной теплоизоляции конструкций и агрегатов.

Такая тенденция имеет международный характер, обозначивший широкое распространение жаростойких материалов при футеровке тепловых агрегатов и их реконструкции, замене штучных огнеупорных изделий эффективными огнеупорными многокомпонентными композициями (жаростойкими

бетонами), позволяющими изготавливать более крупные конструкции со сложной конфигурацией, исключить технологические процессы обжига изделий. Жаростойкие бетоны в футеровках тепловых агрегатов должны сохранять достаточную прочность при периодическом воздействии нагрева и остывания, обладать высокой огнеупорностью, быть стойкими к воздействию агрессивных сред. Сырьевые материалы для технологий жаростойких бетонов в основном завозятся из различных регионов и областей, и в этой связи экономия природных ресурсов, снижение антропогенной нагрузки на окружающую среду за счет использования вторичных сырьевых материалов местной промышленности остаются особенно актуальными [1—4].

В жилищном, промышленном, транспортном, гидротехническом, энергетическом и других видах строительства применяются тысячи различных видов бетона, и процесс создания новых интенсивно продолжается. Жаростойкие бетоны отечественного производства имеют недостаточно широкий ассортимент, расширение которого может быть реализовано путем исследований в области разработок новых перспективных жаростойких композиций. Замещение обычных традиционных бетонов многокомпонентными композиционными составами дает теоретические предпосылки разработки составов жаростойких бетонов с оптимальной микроструктурой цементного камня, повышенной трещиностойкостью, упрочненной зоной контакта цементного камня и наполнителя, повышенной прочностью и долговечностью. Сохранить и приумножить вышеперечисленные свойства в жаростойких бетонных композициях позволяет жесткий фиксированный каркас из огнеупорного заполнителя, обуславливающий работу сил сцепления между частицами непрерывной гранулометрией, минимизацией допустимого количества вяжущего вещества, достаточного для обволакивания частиц огнеупорного заполнителя и заполнения пустот между ними [4—9].

Разработка составов жаростойких композиций с использованием в качестве высокотемпературного заполнителя побочных и сопутствующих продуктов производства карбида кремния (SiC) и отходов производства абразивного инструмента на керамической связке Волгоградского региона представляет научно-практический интерес. В качестве связующего вещества предлагается использовать портландцемент, модифицированный двойным суперфосфатом в присутствии пластифицирующих добавок [2, 10, 11].

Побочные и сопутствующие продукты производства карбида кремния: (SiC) в виде аморфа (SiC более 70 %), сростков (SiC 40…70 %), силоксикона (SiC 20…40 %), технологических хвостов дробильно-рассевального передела, фракции карбида кремния 1,0…0,8 мм (SiC 96…95 %), циклонной пыли (SiC 92…90 %) установок аспирации воздуха производственных помещений — являются огнеупорным материалом, не потерявшим своих технологических свойств. Постоянство состава материалов карбида кремния, его высокая термостойкость, устойчивость к воздействию большинства кислот и щелочей и т. д. присущи всем перечисленным отходам и побочным продуктам производства.

Отходы производства абразивного инструмента на керамической связке представляют собой композиционный материал (SiC 10 %, Al_2O_3 80 %, керамическая связка 10 %), получаемый механическим измельчением брака готовой продукции. Порошкообразный материал отходов с размером частиц менее 0,04 мм образуется за счет механической доводки абразивного инстру-

мента до нормативных геометрических размеров, заточке и пр. Насыпной вес материала находится в диапазоне 1,86…2,68 г/см^3 [2, 10, 12].

Жаростойкий бетон мелкозернистой структуры привлекает особое внимание производителей огнеупорной продукции за счет улучшенной удобоукладываемости и формуемости изделий, что немаловажно при изготовлении тонкостенных и густоармированных конструкций за счет высокой сопротивляемости растягивающим напряжениям. Подбор прерывистой гранулометрии заполнителей бетонной композиции и модификация цементной матрицы минеральными и органическими добавками позволяет устранить недостатки мелкозернистой структуры бетона, такие как повышенная водопотребность, значительный расход цемента, приводящий к увеличению усадки бетона, снижение трещиностойкости [8, 13—15].

Для системы жаростойкого бетона на портландцементном связующем предлагается использовать зерновые составы прерывистой гранулометрии на основе побочных и сопутствующих продуктов производства карбида кремния (SiC) и отходов производства абразивного инструмента на керамической связке, которая придаст жаростойкие свойства цементному камню [2, 10, 16, 17]. Методики расчета зернистых смесей заполнителя бетона заключаются в подборе оптимального гранулометрического состава сырьевой смеси заполнителей, в нахождении наилучшего соотношения между компонентами, обеспечивающего минимальную пустотность смесей. Такой подход приемлем и для составов бетона мелкозернистой структуры, где обязательным условием является наличие достаточного количества мелкой фракции заполнителя с размером зерен 10...5 мм. Предлагаемая крупность заполнителя обеспечит создание каменного каркаса из его зерен в бетоне и возможность введения фракции наполнителя с размером зерен, равным или больше размера пустот, образуемых между зернами более крупного заполнителя. При этом всегда присутствует возможность выбора и использования помимо модифицированного уравнения Функа/Дингера нескольких других «идеальных» кривых просеивания [18—20].

Для состава мелкозернистого жаростойкого бетона использовано несколько размеров фракций карбида кремния и отходов абразивного инструмента, а также кварцевый песок. Воспользовавшись для расчета гранулометрического состава жаростойкой композиции формулой Фуллера [4—6, 9], получили процентное содержание каждой фракции заполнителя в смеси: фракция SiC 0,0…0,05 мм — 2 %; фракция 0,05…0,1 мм — 12 %; фракция отходов абразивного инструмента 0,315…0,63 мм — 21 %; фракция кварцевого песка 0,63…5,0 мм — 65 %.

Прерывистая гранулометрия заполнителя жаростойкой бетонной композиции способствует равномерному распределению частиц в смеси, что позволяет получить плотный контакт между зернами и обуславливает плотную, хорошо «упакованную» структуру бетона. Предполагаемая экономия цементного вяжущего составит 5…10 %.

Для футеровки различных тепловых агрегатов с температурой службы 1100…1200 ºС широко применяются жаростойкие бетоны на основе портландцемента, которые имеют огнеупорность до 1320 ºС, температуру начала деформации под нагрузкой 0,2 МПа — 1190 ºС. Но при нагревании процессы

фазовых превращений в цементном камне снижают прочность бетона, вяжущая составляющая композиции в период разогрева до рабочей температуры перерождается в керамический черепок [3, 8, 9, 21].

Отношение цементного камня к воздействию повышенных температур характеризует один из важнейших показателей жаростойкости цементных композиций. И в этом плане такой эффект достижим при наиболее полном использовании энергии вяжущих веществ (портландцемента), введением в составы композиций химических модификаторов направленного действия, высокодисперсных добавок техногенной природы, интенсификации технологии производства строительных композиций [21].

Бетонные композиции на фосфатных связующих имеют высокие значения пределов прочности на сжатие и изгиб, химическую стойкость и сопротивление на истирание. Их температура эксплуатации составляет до 1900 °С. Дисперсная система фосфатного вяжущего состоит из огнеупорных наполнителей и раствора ортофосфорной кислоты или кислых фосфатов. В качестве фосфатных связующих используются: ортофосфорная кислота в чистом виде H_3PO_4, однозамещенный или двузамещенный фосфорнокислый алюминий $A1(H_2PO_4)_3$, $A1_2(HP0_4)_3$, алюмохромофосфатное связующее (АХФС) $Cr_nA1_{4-n}(H_2PO_4)_2$, однозамещенные фосфорнокислые хром $Cr(H_2PO_4)_3$ и магний $Mg(H_2PO_4)_2$, полифосфат натрия $(NaPO_3)_n$ [12, 16, 17]. В присутствии высокоглиноземистых порошков в качестве наполнителей в бетонных композициях ортофосфорная кислота или ортофосфаты различной степени замещения при нагревании вступают в реакцию с оксидом алюминия высокоглиноземистых порошков. При этом образуется высокоогнеупорные алюмофосфатные связки с температурой применения бетонных композиций 1600…1800 °С. Их прочность на сжатие достигает 70 МПа. После нагревания до 800 °С снижения прочности не наблюдается. Термическая стойкость фосфатных композиций варьируется от 39 до 60 водных теплосмен при начальной температуре 800 °С.

Направление исследования по получению высокотемпературной матрицы на основе портландцемента путем введения в состав композиции однозамещенного ортофосфата кальция и дисперсной добавки в виде циклонной пыли карбида кремния актуально с технологической, экономической и экологической точки зрения [16, 17, 20, 22].

Повышение жаростойких свойств портландцементного вяжущего вещества предлагается решить введением в состав цементной композиции однозамещенного ортофосфата кальция (двойной суперфосфат) для образования на поверхности частиц CaO плотного и прочного слоя водонерастворимого гидроксидапатита состава: $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2 \cdot nH_2O$ и (или) $Ca_8(PO_4)_5(OH) \cdot mH_2O$ [23]. Выбор в качестве добавки к портландцементу однозамещенного ортофосфата кальция (двойной суперфосфат) обоснован вопросами техники безопасности и экологии. В качестве промежуточного или побочного продукта реакций может образовываться и трикальцийфосфат $Ca_3(PO_4) \cdot nH_2O$, который также практически нерастворим в воде. Химические реакции образования продолжаются до тех пор, пока на поверхности частиц CaO не образуется плотный слой гидроксидапатитов или трикальцийфосфата. В качестве пластифицирующей добавки используется поливиниловый спирт (4%-й водный раствор) [23]. Исследовалась структура образцов жаростойкого бетона (70×70×70) на портландцемен-

те марки ЦЕМ I 42,5Н (производитель ОАО «Себряковцемент»), В/Ц = 0,55, заполнителей прерывистой гранулометрии, дисперсного модификатора до и после воздействия повышенных температур.

Исследования структуры жаростойкой композиции проводились методами оптической микроскопии, которая является источником информации о внутреннем строении бетона, используемой для анализа эксплуатационных повреждений в структуре строительных композиций. Следует отметить, что формирование структуры цементных бетонов (жаростойких бетонов) — процесс сложный, который является результатом совместного протекания и последовательного перехода от коагуляционной структуры композиции к образованию пространственного каркаса (кристаллического). Формирование оптимальной структуры бетона с предельной упаковкой и уплотнением системы достигается наполнением цементных бетонов дисперсными частицами, обуславливающими повышенную прочность бетона. Прочность наполненной цементной системы является результатом процессов химического, физико-химического, физико-механического взаимодействия, где наполнитель (в исследовании это циклонная пыль карбида кремния) принимает достаточно активное участие [19, 20, 22—26].

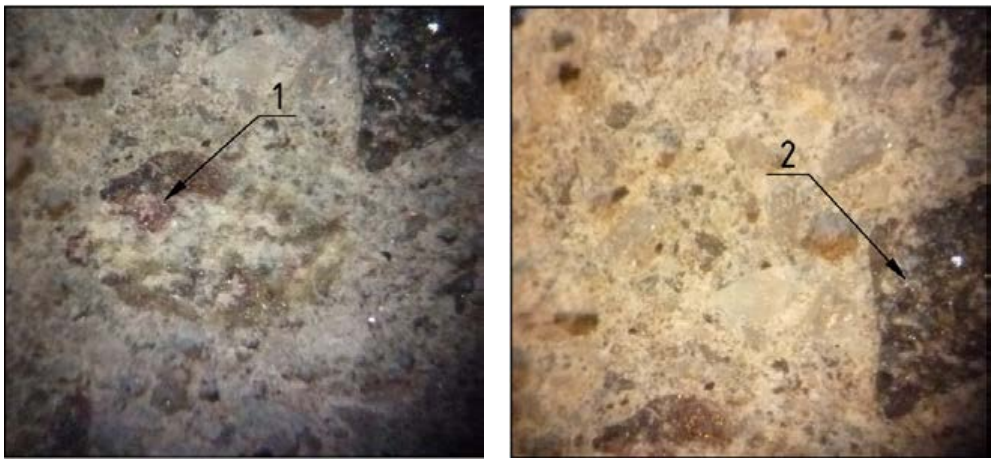
В процессе изготовления и эксплуатации жаростойкой бетонной композиции могут сформироваться разнообразные дефекты структуры: макро- и микропористость, включая различные трещины, сдвиг, скол на отдельных участках композиций, изменение фазового состава. Эти дефекты являются результатом конструкторского или технологического брака на этапе изготовления композиционных материалов или появляются благодаря воздействию механических нагрузок, температуры и среды в процессе эксплуатации. Эти дефекты могут появиться не только в матрице и заполнителях, но, прежде всего, на границе этих разнородных по химическим и физико-механическим свойствам материалов. На рисунке 1 *а*, *б* представлено изображение структуры состава жаростойкого бетона до термического испытания.

Структура образцов представлена дисперсно-упрочненной формой. Отчетливо наблюдается распределение смеси заполнителей карбида кремния, отходов абразивного инструмента и кварцевого песка прерывистой гранулометрии. Размеры и форма порового пространства, равномерный характер распределения заполнителя, плотные структуры цементного камня говорят о наличии реакционных связей между компонентами дисперсной системы жаростойкого бетона и цементной матрицей, модифицированной однозамещенным ортофосфатом кальция (двойной суперфосфат).

Анализ внутреннего строения образца жаростойкой композиции до термического испытания (см. рис. 1, *а*, *б*) позволяет выявить предполагаемые структурные поверхности разрушения между цементной матрицей и заполнителями мелкозернистого бетона. Предполагаемая плоскость разрушения меняется в своей ориентации от зерна к зерну кварцевого песка, образуя так называемые фасетки.

По основным деталям рельефа таким, как взаимное расположение, направление ступенек ручьистого узора, можно выявить очаг предполагаемой главной трещины в бетонной композиции при термическом разрушении. Очаг располагается на границе цементной матрицы и кварцевого наполнителя, в узлах пространственно-ориентированной структуры, а также вблизи из-

быточных фаз на границе зерен кварцевого песка (см. рис. 1, *а*, *б*). Прочность при сжатии образцов с заполнителем прерывистой гранулометрии и модификации цементной матрицы двойным суперфосфатом составила 52,6 МПа, термическая стойкость составила 25 теплосмен (вода, 800 °С).



а *б*

Рис. 1. Изображение структуры мелкозернистого жаростойкого бетона (свет отраженный, микроскоп Motic SMZ-168-TL, 200×): *а* — срез середины образца (1 — кварцевый песок); *б* — срез боковой части образца (2 — кварцевый песок), поверхность не шлифованная

Разрушение образца жаростойкой композиции после определения ее термостойкости обусловлено образованием трещин (рис. 2, *а*), что видно по механизму их распространения и деталям образовавшегося рельефа. Распространение трещины при термическом разрушении образца возможно за счет слияния микропор, гребней отрыва, сколов, бороздок. Слияние микропор приводит к возникновению ямок на поверхности разрушения.

Микропоры обычно зарождаются в процессе пластического течения при нагревании на включениях, границах зерен, полосах деформации и в любых других местах, где наличие некоторой несплошности приводит к концентрации напряжения. По мере увеличения пластической деформации, имеющиеся микропоры растут, зарождаются новые микропоры; в результате расстояние между крупными микропорами оказывается достаточно малым и разделяющее их тонкие мембраны, разрываются, результатом чего является разрушение. Образованные при этом поверхности излома содержат многочисленные углубления, или «ямки». Перемычки разрушаются путем пластического течения или шейкообразования; такой вид разрушения сопровождается образованием гребней отрыва (см. рис. 2, *а*).

Структура образца мелкозернистого бетона после термического воздействия остается дисперсно-упрочненной (см. рис. 2, *б*). Распределение заполнителей по объему образца равномерное. Сцепление в зоне межфазного контакта «цементная матрица — кварцевый песок» образует очаг трещины и ее локальное распространение (см. рис. 2, *б*). Адгезия частиц заполнителей к цементной матрицей проявляется в постоянстве их внешнего вида (см. рис. 2, *б*). Измене-

ние физико-механических характеристик образцов мелкозернистого бетона объясняется механизмом образования и распространения трещин за счет возникновения разрушений на границе раздела «цементная матрица — кварцевый песок» (см. рис. 2, *б*). Внутреннее напряжение бетона в процессе термического воздействия влияет на различные уровни структуры композиции, нарушая при этом однородность системы. Такая структура строительных композиций, где возникает развитие микротрещин на границе межфазного взаимодействия матрицы и заполнителя способствует снижению эксплуатационных свойств строительных изделий и их долговечности. Проводимые исследования еще раз подтверждают актуальность разработки составов жаростойких композиций на основе вторичных материальных ресурсов и оценки их эксплуатационных характеристик с позиции анализа процессов структурообразования в цементных системах.

а *б*

Рис. 2. Изображение образца мелкозернистого жаростойкого бетона после испытаний на термическую стойкость (свет отраженный, микроскоп Motic SMZ-168-TL, 200×): *а* — часть образца после разрушения; *б* — структура образца, срез середины образца (1 — кварцевый песок, 2 — зона межфазного контакта), поверхность не шлифованная

Результаты проведенных испытаний привлекают внимание к отработке рецептуры многокомпонентной системы жаростойкой композиции, дозированию материалов и технике смешивания дисперсных компонентов заполнителя. В частности наличие в композиции эффекта разрушения в зоне контакта цементной матрицы и кварцевого заполнителя (см. рис. 2, *б*) в процессе высокотемпературного воздействия говорит о необходимости проработки вопроса выбора пластифицирующей добавки к бетону и оптимизации соотношения компонентов заполнителя прерывистой гранулометрии.

Разработка составов жаростойкого бетона на сегодняшний день проводится опытным путем на основании теоретических предположений и на математизации существующих знаний и положений строительного материаловедения, установления количественных взаимосвязей между основными характеристиками сырьевых материалов, составов смеси и макроструктурой полученного материала, показателями его физико-механических свойств.

Анализ физических явлений уплотнения структуры бетонной композиции при нормальных условиях эксплуатации и высокотемпературных воздействиях свидетельствует о существовании фундаментальной научной базы для разработки новых, более совершенных методов проектирования состава жаростойких бетонов, обеспечивающих возможность получения систем оптимальной макроструктуры и их экстремально выраженных показателей физико-механических свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Некрасов К. Д.* Состояние и перспективы развития научных исследований и применения жаростойких бетонов // Исследования в области жаростойкого бетона. М: Стройиздат, 1981. С. 14—31.

2. *Акчурин Т. К., Пушкарская О. Ю.* Использование местных нетрадиционных вторичных ресурсов в технологиях строительных композитов: монография. Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2018. 216 с.

3. *Тарасов Р. В., Макарова Л. В., Калинина В. А.* Анализ состояния производства жаростойких композиционных материалов // Современные научные исследования и инновации. 2015. № 2. Ч. 1. URL: http://web.snauka.ru/issues/2015/02/46518.

4. Experimental analysis of SiC-based refractory concrete in hybrid rocket nozzles / R. D'Elia, J. Hijlkema, T. Cutard, G. Bernhart // Acta astronautica. 2016. Vol. 126. Special issue: SI. Pp. 168—177. http://dx.doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.04.034.

5. *Prud'homme E., Joussein E., Rossignol S.* Use of silicon carbide sludge to form porous alkali—activated materials for insulating // European physical journal-special topics. 2015. Vol. 224. Iss. 9. Pp. 1725—1735. DOI: 10.1140/epjst/e2015-02494-7.

6. *Shamsad A., Sallam Y. S., Al-Hawas M. A.* Effects of key factors on compressive and tensile strengths of concrete exposed to elevated temperatures // Arabian journal for science and engineering. 2014. Vol. 39. Iss. 6. P. 4507—4513. DOI:10.1007/s13369-014-1166-8.

7. *Hlystov A. I., Shirokov V. A., Vlasov A. V.* Efficiency improvement of heat-resistant concrete through the use of sludge technogenic raw material // Procedia Engineering. 2015. Vol. 111. Pp. 290—296. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.07.091.

8. Новый жаростойкий материал для футеровки промышленных печей / В. И. Калашников, В. Л. Хвастунов, Р. В. Тарасов, Д. В. Калашников // Строительные материалы. 2003. № 11. С. 40—42.

9. *Баженов Ю. М.* Технология бетона : учебник. М.: АСВ, 2011. 528 с.

10. *Гнедаш Е. Е., Стефаненко И. В., Акчурин Т. К.* Ресурсосбережение в технологиях жаростойкого бетона // Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе : сборник научных трудов по материалам VII Международной научно-практической конференции. СГТУ им. Ю. А. Гагарина. Саратов, 2019. С. 179—194.

11. *Курбанов Р. М., Хаджишалапов Г. Н., Хежев Т. А.* Исследование жаростойкого бетона на основе базальтового заполнителя для обетонирования металлических конструкций // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2013. Т. 31. № 4. С. 61—66.

12. *Tukhareli V. D., Gnedash E. E., Tukhareli A. V.* Heat-Resistant Composite Materials Based on Secondary Material Resources // Materials Engineering and Technologies for Production and Processing. 5th International Conference on Industrial Engineering (5th ICIE 2019) (25—29 March 2019, Sochi, Russian Federation). Trans Tech Publications. Scientific. Net, 2020. Pp. 287—292. URL: https://www.scientific.net/SSP.299/book.

13. *Hardy D. K.* Development and characterization of self-sensing CNF HPFRCC // Materials and structures. 2016. Vol. 49. Iss. 12. Pp. 5327—5342. DOI: 10.1617/s11527-016-0863-z.

14. *Русина В. В.* Жаростойкие бетоны с использованием техногенного сырья // Строительные материалы. 2013. № 1. С. 12—14.

15. *Войлоков И. А.* Перспективы развития новых видов бетона в РФ // СтройПРОФиль. 2010. № 2(80). С. 13—15.

16. *Stefanenko I. V., Gnedash E. E., Akchurin T. K.* Methodological approaches to optimization of grain composition of heat-resistant concrete // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 687: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS—2019) (25—27 September 2019, Chelyabinsk, The Russian Federation). Iss. 2. Building

materials and products. [Published by IOP Publishing]. 2019. 7 p. DOI: 10.1088/1757-899X/687/2/022004.

17. *Гнедаш Е. Е.* Жаростойкие композиционные материалы на основе вторичных материальных ресурсов // 18-я научно-практическая конференция профессорско-преподавательского состава ВПИ (филиал) ВолгГТУ (г. Волжский, 21—25 января 2019 г.): сборник статей. Волжский, 2019. С. 499—504. URL: http://lib.volpi.ru.

18. Влияние зернового состава заполнителя на свойства жаростойкого базальтового бетона / А. М. Гаджиев, Р. М. Курбанов, Г. Н. Хаджишалапов, Т. А. Хежев // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2017. № 44(3). С. 146—155. DOI:10.21822/2073-6185-2017-44-3-146-155.

19. *Tukhareli V. D., Pushrarskaya O. Y., Tukhareli A. V.* Methodological Approaches in Assessing the Possibility of Using Waste Electrocorundum Materials in Concrete Compositions, Solid State Phenomena Submitted: 2018.07.02. ISSN: 1662.9779. Vol. 284. Pp. 1030—1035. DOI: 10.4028/www.scientific.net/SSP.284.1030.

20. *Стефаненко И. В., Гнедаш Е. Е.*, *Акчурин Т. К.* Оптимизация гранулометрического состава заполнителей жаростойкого бетона мелкозернистой структуры // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 4(81).С. 205—213.

21. *Батрашов В. М., Пак Ч. Г.* Разработка и исследование высокотемпературной матрицы для жаростойкого поризованного материала // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 4(24). С. 112—119.

22. *Абызов В. А., Пак Ч. Г., Батрашов В. М.* Ячеистые жаростойкие бетоны на фосфатном вяжущем и заполнителях из кремнеграфитовых и алюмохромсодержащих промышленных отходов // Огнеупоры и техническая керамика. 2011 № 11/12. С. 27—29.

23. *Хозин В. Г., Морозов Н. М., Мугинов Х. Г.* Особенности формирования структуры модифицированных песчаных бетонов // Строительные материалы. 2010. № 9. С. 72—73.

24. Опыт внедрения мелкозернистых бетонов при производстве дорожных плит / Н. М. Красиникова, Н. М. Морозов, И. В. Боровских, В. Г. Хозин // Инженерно-строительный журнал. 2014. № 7(51). С. 46—54.

25. *Гнедаш Е. Е., Акчурин Т. К., Стефаненко И. В.* Состояние и перспективы развития технологий жаростойких композиционных материалов // Известия ВолгГТУ. 2018 № 9(219). С. 56—61.

26. *Abyzov V. A.* Lightweight refractory concrete based on aluminum-magnesium-phosphate binder // Procedia engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1440—1445. DOI: 10/1016/j.proeng.2016.07.077

© Гнедаш Е. Е., Стефаненко И. В., Акчурин Т. К., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Гнедаш Е. Е., Стефаненко И. В., Акчурин Т. К. Структурообразующие факторы формирования жаростойких композиций на основе вторичных ресурсов региона // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 153—162.

Об авторах:

Гнедаш Евгений Евгеньевич — доц. каф. урбанистики и теории архитектуры, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1

Стефаненко Игорь Владимирович — д-р техн. наук, проф., Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; info@vgasu.ru

Акчурин Талгать Кадимович — канд. техн. наук, проф., зав. каф. строительных материалов и специальных технологий, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; Scopus ID: 57190967539, info@vgasu.ru

Evgenii E. Gnedash, Igor' V. Stefanenko, Talgat K. Akchurin

Volgograd State Technical University

STRUCTURE-FORMING FACTORS OF FORMATION OF HEAT-RESISTANT COMPOSITIONS BASED ON SECONDARY RESOURCES OF THE REGION

Reduction of energy and heat losses in modern high-temperature technologies of materials processing, reduction of material capacity of building structures, efficient use of all types of energy resources in various industries due to complex thermal insulation of structures and assemblies is the primary scientific and technical task of energy and resource saving. The expansion of the range of heat-resistant concretes through the development of new promising heat-resistant multicomponent compositions using by-products and related products for the production of silicon carbide (SiC) and wastes for the production of abrasive tools on a ceramic sheaf, which will give heat-resistant properties to cement stone, is relevant. Optical microscopy methods are a source of information on the internal structure of concrete, a material for analyzing operational damage in the structure of building compositions. The presence in the heat-resistant composition of the effect of destruction in the contact zone of the cement matrix and quartz aggregate in the process of high-temperature exposure indicates the need to study the issue of choosing a plasticizing additive to concrete and optimizing the ratio of aggregate components of discontinuous granulometry.

K e y w o r d s: construction materials, heat resistant concrete, mineral fillers, concrete modification, industrial waste.

For citation:

Gnedash E. E., Stefanenko I. V., Akchurin T. K. [Structure-forming factors of formation of heat-resistant compositions based on secondary resources of the region]. *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], 2021, iss. 1, pp. 153—162.

About authors:

Evgenii E. Gnedash — Docent of Urban Development and Theory of Architecture Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

Igor' V. Stefanenko — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; info@vgasu.ru

Talgat K. Akchurin — Candidate of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; Scopus ID: 57190967539, info@vgasu.ru

УДК 691

Б. Р. Исакулов[а], М. В. Акулова[б], Б. Б. Кульшаров[б], А. Б. Исакулов[в], А. М. Сартова[а]

[а] Баишев Университет (Казахстан)
[б] Ивановский государственный политехнический университет
[в] Университет Жубанова (Казахстан)

ДЕТОКСИКАЦИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ СЕРОСОДЕРЖАЩИХ ВЯЖУЩИХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рассматириваются вопросы уменьшения отрицательного влияния многотоннажных отходов на окружающую среду путем детоксикации и использования их в качестве сырья для производства строительных материалов и конструкций. В исследованиях использовались стандартные средства измерений и методы анализа физико-механических характеристик камня серосодержащего вяжущего: рентгенофазовый, дифферациально-термический, микроскопический анализ, испытательное оборудование. В процессе совмещенной механохимической активации и детоксикации промышленных отходов в присутствии воды при получении сырьевых смесей для производства строительных материалов использован принцип взаимной нейтрализации химически вредных веществ, находящихся в промышленных отходах. Это позволяет сократить расход цемента за счет замены части его отходами промышленности. Для проведения экспериментального исследования в качестве окислителей выступали железо в степени окисления III (в виде Fe_2O_3), а восстановительными свойствами обладали элементарная сера, отсев бурых углей и железо в степени окисления II (FeO). Свойства образцов серосодержащего вяжущего изучали в 7, 14, и 28-суточном возрасте после тепловой и тепловлажностной обработки, при естественных условиях твердения. Результаты свидетельствуют о том, что эти вяжущие к 14-суточному возрасту имеют предел прочности при сжатии 63,0 МПа, в 28-суточном возрасте достигается прочность 65,3 МПа. Этот же состав, прошедший тепловлажностную обработку, после 28-суточного возраста имеет прочность при сжатии 73,5 МПа, т. е. тепловлажностная обработка благоприятно влияет на набор прочности вяжущего. Полученные результаты можно использовать в производстве эффективного вяжущего при изготовлении растворов и бетонов для строительной отрасли.

Ключевые слова: детоксикация, механохимическая активация, взаимная нейтрализация, термодинамические расчеты, серосодержащие вяжущие, трехвалентное железо, окисление и восстановление, промышленные отходы, прочность, пиритный огарок, техническая сера.

Введение

В связи с расширением промышленного и гражданского строительства в регионах Республики Казахстан возрастает потребность в качественных строительных материалах и конструкциях, поэтому создание конструкционно-теплоизоляционных материалов на основе вторичных ресурсов является актуальным для народного хозяйства страны. К таким вторичным ресурсам для создания дешевых строительных материалов относятся различные токсичные отходы нефтегазовой и металлургической промышленности Казахстана в виде шлаков, шламов и твердых веществ.

В западных регионах Казахстана, особенно в Актюбинской, Атырауской и Мангистауской областях накоплены огромные сырьевые ресурсы в виде многотоннажных отходов промышленности. Утилизация их в составе строительных материалов является первоочередной задачей народного хозяйства страны [1].

Известно, что добавка технической серы в виде порошка влияет на прочность бетона. Однако при этом не выявлен механизм влияния добавки на

структуру и свойства цементных композитов, не определены рациональные составы, способы подготовки и производства серосодержащих бетонов. Это свидетельствует о необходимости исследования возможности получения высокоэффективных строительных материалов на основе отходов нефтегазовой промышленности, разработки технологий их производства.

Целью данного исследования является разработка высокоэффективных композиционных серосодержащих вяжущих для бетонов, разработка научных основ исследования формирования их структуры, состава и свойств при использовании в качестве строительного материала.

Для достижения цели исследовано влияние добавок серосодержащих отходов нефтехимической промышленности на структурообразование и физико-химические свойства композиционных серосодержащих вяжущих. Процессы детоксикации и активации вяжущего приводят к улучшению эксплуатационных и качественных характеристик получаемых строительных материалов [2—5].

В процессе совмещенной механохимической активации и детоксикации промышленных отходов в присутствии воды с получением сырьевых смесей для производства строительных материалов использован принцип взаимной нейтрализации химически вредных веществ, находящихся в промышленных отходах. В работах [6—8] показана возможность получения бетонных изделий с улучшенными физико-техническими свойствами при различных способах дополнительной активации вяжущего. Эти методы позволяют сократить расход цемента за счет замены части его отходами промышленности.

Материалы

Объектом исследования являются промышленные отходы предприятий в регионе Казахстана в виде шламов и твердых веществ.

1. Портландцемент марки 400 Чимкентского цементного завода. Химический состав цемента приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав цемента Чимкентского цементного завода

Содержание, %									
основные оксиды						основные минералы			
CaO	$Si0_2$	$A1_2O_3$	Fe_20_3	R_2O	SO_3	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
61,48	23,38	6,38	6,09	0,38	0,60	57,60	17,40	7,90	13,10

2. В качестве дополнительной добавки использованы пиритные огарки бывшего АО «Фосфорхим», состоящие главным образом из смеси оксидов железа (II, III) Fe_3O_4, (Fe_2O_3)**,** с пересчетом на содержание железа 40—63 %, и примесей серы 1…2 %. Остальное — оксиды цветных металлов. Химический состав пиритного огарка, масс. %, приведен в табл. 2.

Таблица 2

Химический состав пиритного огарка, мас. %

CaO	SiO_2	Fe_2O_3	AI_2O_3	MgO	SO_3	R_2O	П.п.п
10,5	19,7	66,1	2,3	1,2	—	—	0,2

3. В качестве модифицирующей добавки использовалась техническая сера — вторичный продукт переработки высокосернистой нефти месторождений Республики Казахстан. Сера представляет собой гранулированный продукт, удовлетворяющий требованиям ГОСТ 127.1-93. Химический состав серы приведен в табл. 3.

Таблица 3

Химический состав серы (мас. доля, %)

Сорт	ГОСТ	Сера	Зола	Органические вещества	Вода
9998	127.1-93	99,060	0,400	0,053	0,010

Для приготовления вяжущего использовалась водопроводная питьевая вода, соответствующая требованиям ГОСТ 23732 «Вода для бетонов и растворов».

Методы

Характеристики исходного и активированного вяжущего определяли в соответствии с ГОСТ 30515-97, ГОСТ 31108-2003 и ГОСТ 7473-2010. Предел прочности при сжатии (изгибе) определяли на образцах-кубах с ребрами 100 мм в соответствии с ГОСТ 31108-2003 и ГОСТ 7473-2010. Определение подвижности растворной смеси производили на вискозиметре Суттарда. Нормальную густоту, сроки схватывания цементного теста определяли согласно ГОСТ 30515-97, ГОСТ 31108-2003.

Теплопроводность серосодержащих образцов изучалась на приборе ИТП-МГ-4 согласно ГОСТ 7076-99.

Определение предела прочности серосодержащих вяжущих при растяжении и изгибе производилось на образцах-балочках размерами 40×40×160 мм на приборе ИП-2710.

С помощью рентгенофазового анализа определяли фазовый состав активированного серосодержащего цементного вяжущего. Рентгенографическая съемка выполнялась на дифрактометре «ДРОН-3». Условия съемки: анодный ток рентгеновской трубки — 20 мА, напряжение на трубке — 36 кВ, скорость углового движения счетчика 2 град/мин, постоянные времени записи — 1 с, диапазон записей интенсивности 3×10^3 имп/сек. Исследуемые образцы в виде тонких порошков оптимальной массы наносились тонким слоем на поверхность матового стекла. При проведении съемки был выбран интервал углов дифракции от 2 до 32º. Расшифровка рентгенограмм осуществлялась на основании эталонных рентгенограмм составляющих минералов.

Дифференциально-термический анализ (ДТА) гидратированных серосодержащих цементных порошков (проходящих через сито с 10 000 отв./см² — 100 %) проводили на фоторегистрирующем дериватографе фирмы МОМ (Венгрия) по стандартной методике. Предварительно была проведена термодинамическая оценка вероятности прохождения химических реакций между указанными компонентами промышленных отходов (пиритного огарка и технической серы) в шламах с помощью стандартных термодинамических величин и электрохимических потенциалов.

Для получения серосодержащих вяжущих использован принцип взаимной нейтрализации и детоксикации токсичных компонентов промышленных отходов путем их механохимической обработки при невысокой температуре.

При проведений эксперимента количество отходов на основе пиритного огарка и технической серы брали в весовых соотношениях, пропорциональных стехиометрическим коэффициентам реакций, а сырьевую смесь слегка увлажняли до консистенции «влажного песка».

При планировании исследований была реализована научная гипотеза, что для осуществления эффекта дополнительной активации каждой частицы добавок необходимо их совместное измельчение, в результате чего происходит взаимная детоксикация твердых отходов, имеющих особые противоположные характеристики по химическим свойствам. При проведении опытных работ по предварительному определению состава и по активации серосодержащих добавок влажное измельчение происходило на шаровой мельнице за счет истирающих и ударных воздействий.

Как было рассмотрено выше, добавка технической серы и ее производных в цементную смесь улучшает характеристики бетонного камня. В работе также проводилось исследование влияния добавки серы на прочностные свойства серосодержащих вяжущих. Были приняты следующие соотношения компонентов растворной смеси (цемент:пиритный огарок:сера, мас. %) — 74:18:8, 70:18:12, 67:20:13. Водотвердое отношение серосодержащих вяжущих принималось из условия обеспечения заливки в формы растворных смесей с диаметром их расплыва конуса, при котором обеспечивается оптимальное формирование поровой структуры и наибольшая прочность раствора [6—10].

Для проведения исследования по определению влияния добавки технической серы на прочностные характеристики серосодержащего цементного камня были изготовлены образцы размером 100×100×10 000 мм при водотвердом отношении 0,385, при котором обеспечивалось растекание серосодержащей растворной смеси 200 мм на встряхивающем столике. Для сравнения были изготовлены образцы из цементных растворов, имеющие равную подвижность с бездобавочным составом при водотвердом отношений 0,385. Техническая сера вводилась в количестве 8…13 % в комбинациях с пиритным огарком (18 % пиритный огарок + 8 % сера), (18 % пиритный огарок + 12 % сера), (20 % пиритный огарок + 13 % сера) от массы сухих компонентов.

Результаты

Результаты расчетов по реакциям связывания соединений серы (IV) и железа (III) с помощью ЭДС (*E*) электрохимических пар приведены в табл. 4.

Таблица 4

Оценка реакционной способности с помощью э.д.с. электрохимических пар

Системы и реакции	ЭДС электрохимических пар, В
$Fe(III) + S^o \rightarrow Fe(II) + S(VI)$	$E = 0{,}771 - (-0{,}13) = + 0{,}784 > 0$

Анализ вычисленных значений ЭДС электрохимических систем по нормальным электродным потенциалам показывает, что реакции возможны, так как величина ЭДС > 0, причем восстановление пиритного огарка технической серой энергетически выгоднее, чем восстановление углем. Трехвалентное железо способно окислять серу, переходя в двухвалентное железо. Следует отметить, что железосодержащие шламы имеют pH > 3

(щелочная реакция водной вытяжки) [4], прошли термическую обработку подобно цементному клинкеру и имеют вяжущие свойства.

Величины стандартных энтальпий ΔH^o и энтропий ΔS^o при температуре 298 К, взятые из литературных источников [9, 10], приведены в табл. 5.

Таблица 5

Значения стандартных энтальпий и энтропий для веществ, участвующих в реакциях

Вещество	$\Delta H^o(298)$, ккал/моль	$\Delta S^o(298)$, ккал/град·моль
SO_2	–71,0	59,2
Fe_3O_4	–266,5	35,0
FeS	–22,8	16,1
Fe_2O_3	–145,2	21,5
FeS_2	–38,8	12,7
FeO	–64,5	13,4

Расчеты изменения термодинамических величин в химических реакциях вели по известной формуле:

$$\Delta H^o 298_р = \Delta H^o 298_{(кон.)} - \sum \Delta H^o 298_{(перех.)}. \quad (1)$$

При механическом истирании и перемешивании серы и железа в присутствии воды в щелочной среде рассчитаны энтальпии реакций окисления-восстановления (расчеты по величинам изменения стандартных термодинамических потенциалов проводили при нормальной температуре $T = 298$ К). Полученные значения ΔH — энтальпий или тепловых эффектов реакций окисления-восстановления приведены в табл. 6 (буквенные обозначения реакций продолжены по порядку алфавита).

Таблица 6

Тепловые эффекты реакций окисления-восстановления

Обозначения реакций	Системы и реакции	Тепловой эффект реакции, ΔH^o ккал
А	$3Fe_3O_4 + S \rightarrow FeS + 4Fe_2O_3$	195,9
Б	$FeS + S \rightarrow FeS_2$	–16,0
В	$4Fe_2O_3 + S^o \rightarrow SO_2 + 4FeO$	–38,6
Г	$2FeO + 3S^o \rightarrow 2FeS + SO_2$	12,4
Д	$FeO + S \rightarrow FeOS$	20,8

Сравнивая вычисленные значения ΔH^o, можно сделать вывод, что реакции А, Г, Д в принципе термодинамически невозможны, т. к. $\Delta H > 0$, а Б и В с высокой вероятностью могут энергично протекать при обычной температуре, т. к. они имеют наименьшие значения $\Delta H < 0$. Следует отметить, что целесообразно проводить реакцию в присутствии достаточного количества воды, тогда ионы водорода в реакции В будут связываться в нейтральные молекулы воды в щелочной среде, а диоксид серы в молекулы соли $CaSO_3$. Для проведения опыта количество отходов на основе пиритного огарка и технической серы брали в весовых соотношениях, пропорциональных стехиометрическим коэффициентам реакций, а сырьевую смесь слегка увлажняли до консистенции «влажного песка».

Продукты реакции визуально отличались по цвету от исходной сырьевой смеси. В процессе механохимической обработки отмечалось заметное повышение температуры реакционной среды (~ 40 ºС). Скорее всего сырьевая масса нагревалась за счет химических экзотермических реакций и за счет перехода механической энергии в тепловую [2, 5—10]. Вероятно при механохимическом измельчении заметную роль играет температурный фактор мгновенного местного нагрева реагентов в момент механического удара. Заметную роль в твердофазных реакциях играют дефекты примесного и нестехиометрического происхождения в кристаллических решетках оксида железа [2—8, 10].

Например, скорость спекания обычно увеличивается с ростом отклонения от стехиометрии, а энергия активации ползучести кристаллической решетки нестехиометрического оксида уменьшается, по сравнению с нормальным оксидом на 20…25 ккал/моль.

К этому следует добавить, что термодинамически невозможная реакция по схеме В в присутствии металлического железа (Fe^o) становится возможной ($\Delta H < 0$):

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

Вышеприведенные результаты свидетельствуют о связывании серы с оксидами железа при механическом воздействии при температурах, близких к нормальной.

При проведении опытных работ по детоксикации и активации серосодержащих отходов замечено, что трехвалентное железо способно окислять серу, переходя затем в двухвалентное железо, т. к. цвет обрабатываемой смеси изменялся от желтоватого до серо-зеленого. Совместное измельчение серосодержащих компонентов с цементом положительно влияет на механическое свойства изучаемых образцов. Прочность серосодержащих образцов при 28-ми суточном возрасте повышалось до 37,7 МПа. При этом пиритный огарок, по-видимому, выполнял роль инициатора физико-химического процесса коагуляции вяжущей смеси. В процессе коагуляции происходит поляризация дисперсных частиц вяжущего и взаимное притяжение их между собой, что усиливает процессе структурообразования. Интересным вариантом совместной утилизации отходов может быть добавление железных опилок и наночастиц железа для улучшения связывание серы [5]. Однако соединения железа имеют большую плотность, что ведет к увеличению веса изделий. Следует особо отметить важность реакций Г и Д. Дело в том, что они показывают принципиальную возможность и высокую эколого-экономическую привлекательность рациональной утилизации токсичного серосодержащего шлама. Экологически опасный оксид серы в составе шлама при обработке пиритным огарком переходит в малотоксичный оксид серы, т. е. может полностью утилизироваться в составе арболитобетона. Такие сырьевые смеси рационально утилизировать, добавляя растительные отходы в виде стеблей хлопчатника или других органических компонентов для получения легких арболитобетонов. В ходе исследований также определялись физико-механические свойства серосодержащих образцов. Результаты приведены в табл. 7.

Таблица 7

Характеристики серосодержащих вяжущих с добавкой серы

№	Состав вяжущего,%				Плотность в сухом состоянии, кг/м^3	Предел прочности, МПа	
	сера	пиритный огарок	цемент	вода (влажность)		при сжатии	при изгибе
1	8	18	64	9,89	1590	64,7	8,53
2	12	18	70	9,12	1570	65,9	9,14
3	13	20	67	9,27	1590	73,5	10,9

Установлено, что введение добавок технической серы в количестве 8…13 % увеличивает предел прочности при сжатии образцов, приготовленных из растворов при водотвердом отношений равном 0,385 во влажном и сухом состоянии. Дальнейшее увеличение добавок технической серы приводит к снижению прочностных характеристик раствора, при этом закономерности изменения прочности для всех образцов имеют сходный характер. При добавке технической серы в количестве 8 и 13 % прочность серосодержащих образцов при сжатии повышается на 9,2 и 8 % в сухом и на 10,8 и 8,8 % во влажном состоянии соответственно. Из полученных прочностных показателей серосодержащих образцов, изготовленных на основе равноподвижных растворных смесей, видно, что для них наблюдается та же закономерность, что и для образцов, приготовленных при одинаковом водотвердом отношении. Это обусловлено, вероятно, уменьшением капиллярной пористости и повышением плотности образцов в результате снижения водотвердого отношения при введении технической серы. Так установлено, что при введении технической серы в количестве 8 и 13 % плотность серосодержащих образцов увеличивается в среднем на 9…10 %, при этом предел прочности при сжатии возрастает в среднем на 17 %. Результаты эксперимента показали, что рациональной добавкой серы при принятом способе ее введения в состав является 10…13 % от массы сухих компонентов смеси, что обеспечивает наибольшее повышение прочностных показателей серосодержащего цементного камня.

Обсуждения

Известно [2—8], что повышение реакционной способности компонентов вяжущего при мокром помоле достигается не только повышением дисперсности в жидкой фазе, но и изменением кристаллической структуры, формы частиц, что является предпосылкой интенсификации процесса коагуляции серосодержащей смеси. При этом химический и минералогический состав исходного вяжущего остаются неизменными. Механизм активации заключается во взаимодействии вновь обнажающихся поверхностей частиц вяжущего при мокром помоле, т. е. в придании механического и химико-энергетического импульса каждой частице. Можно отметить, что механизм активации заключается в повышении сил межионных взаимных притяжений и возникновении поверхностных валентных сил при сближении наночастиц коллоидной системы. Полученные результаты исследования дают основания утверждать, что путем активации и детоксикации промышленных отходов можно получить серосодержащие вяжущие с высокими физико-техническими характеристиками.

Заключение

Установлено, что техническая сера — отход (побочный продукт) нефтехимической промышленности, является эффективной добавкой в серосодержащих композициях, обеспечивающей повышение прочности, снижение сорбционной влажности и водопоглощения легким арболитобетонам.

Показано, что наиболее эффективным способом введения добавок технической серы является ее совместный помол с железосодержащими сырьевыми материалами в виде пиритного огарка. Полученные результаты термодинамического расчета свидетельствуют о возможности связывания серы с оксидами железа при механическом воздействии при температурах, близких к нормальной.

Установлено, что механизм активации серосодержащих композиций заключается во взаимодействии вновь обнажающихся поверхностей частиц вяжущего при мокром домоле. При этом интенсифицируется процесс коагуляции вяжущей смеси и происходит интенсивное образование каркаса кристаллической решетки за счет образования кристаллогидратов.

В ходе экспериментальных работ выявлено, что добавки на основе технической серы повышают физико-механические показатели серосодержащего цементного камня. Так введение серосодержащей добавки в количестве 8…13 % обеспечивает повышение прочности до 73,5 МПа при содержании вяжущих компонентов в смеси (по массе): цемент 67 % + пиритный огарок 20 % + сера 13 %.

Предложенные вяжущие композиции с течением времени увеличивают прочность в 1,15...2,5 раза по сравнению с первоначальной прочностью, что обусловлено их составом и условиями твердения. Разработанные вяжущие композиты можно использовать для изготовления стеновых материалов и конструкций для гражданского строительства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Агаджанов В. И.* Экономическая эффективность применения серы для модификации бетонов // Бетон и железобетон. 1984. № 10. С. 20—21.

2. *Аяпов У. А., Архабаев С. А., Шорманова З. Б.* Вяжущие и бетоны из минеральных отходов промышленности Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1982. 234 с.

3. *Акулова М. В., Исакулов Б. Р.* Механохимическая активация и детоксикация промышленных отходов для получения вяжущих легких бетонов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 31(50). С. 75—80.

4. Разработка и исследование свойств вяжущих на основе отходов промышленности / М. В. Акулова, Б. Р. Исакулов, М. Д. Джумабаев [и др.] // Вестник РААСН. Курск; Воронеж, 2013. С. 256—260.

5. *Федосов С. В.* Нейтрализация токсичных отходов для получения вяжущих при производстве строительных материалов // Информационная среда вуза: материалы XX международной научно-технической конференции. Иваново: ИГАСУ, 2013. С. 233—235.

6. Properties of slag-alkali binders based on industrial waste / B. R. Isakulov, M. D. Jumabayev, H. T. Abdullaev, U. K. Akishev, M. N. Aymaganbetov // Periodico Tche Quimica. 2019. Vol. 16. Iss. 32. Pp. 375—387.

7. *Zhiv A. S., Isakulov B. R.* Resource-saving technologies for the production and research of the properties of wood concrete based on a sulfur-containing binder // Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture. 2014. Vol. 23. Pp. 61—74.

8. *Гончаров Ю. И., Клименко В. Г., Иванов А. С.* Композиты на основе низкоосновных доменных шлаков // Современные проблемы строительного материаловедения: материалы V академических чтений РААСН, Воронеж: ВГАСА, 1999. С. 94—104.

9. *Баженов Ю. М.* Технология сухих строительных смесей: учебное пособие для вузов. М.: АСВ, 2003. 95 с.

10. *Баженов Ю. М., Демьянова С. В., Калашников И. В.* Модифицированные высококачественные бетоны: учебное для вузов. М.: АСВ, 2006. 368 с.

© *Исакулов Б. Р., Акулова М. В., Кульшаров Б. Б., Исакулов А. Б., Сартова А. М., 2021*

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Детоксикация промышленных отходов для получения серосодержащих вяжущих строительных материалов / Б. Р. Исакулов, М. В. Акулова, Б. Б. Кульшаров, А. Б. Исакулов, А. М. Сартова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 163—172.

Об авторах:

Исакулов Баизак Разакович — д-р техн. наук, доц., зав. каф. дизайна и строительства, Баишев Университет (Казахстан). Республика Казахстан, г. Актобе, ул. Бр. Жубановых, 302а; mr.Baizak@mail.ru

Акулова Марина Владимировна — д-р техн., наук, проф., зав. каф. строительного материаловедения и технологии, Ивановский государственный политехнический университет. Российская Федерация, 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, 21; m_Akulova@mail.ru

Кульшаров Берикбай Балтабаевич — аспирант, каф. строительного материаловедения и технологий, Ивановский государственный политехнический университет. Российская Федерация, 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, 21; berikbai_79@mail.ru

Исакулов Абилхаир Баизакович — старший преподаватель каф. строительства, Университет Жубанова. Республика Казахстан, 030000, г. Актобе, пр. А. Молдагуловой, 34; issakulov.abilkhair@gmail.com

Сартова Асима Мусаевна — Баишев Университет (Казахстан). Республика Казахстан, г. Актобе, ул. Бр. Жубановых, 302а; akkete@mail.ru

Baizak R. Isakulov[a], Marina V. Akulova[b], Berikbai B. Kulsharov[b], Abilkhair B. Isakulov[c], Asima M. Sartova[a]

[a] ***Baishev University institution (Kazakhstan)***

[b] ***Ivanovo State Polytechnic University***

[c] ***Zhubanov University (Kazakhstan)***

DETOXIFICATION OF INDUSTRIAL WASTES FOR PRODUCTION OF SULFUR-CONTAINING BINDING BUILDING MATERIALS

Our research examines how to reduce the negative impact of multi-tonnage waste on the surrounding raw food by detoxifying it and using it as cheese for pore materials and construction. During scientific research, standard measuring tools and methods for analyzing the physical and mechanical characteristics of the sulfur-containing binder stone were used, obtained using modern methods of X-ray phase, differential thermal, microscopic analysis and testing equipment. In the process of combined mechanochemical activation and detoxification of industrial wastes, in the presence of water, with the production of raw mixtures for the production of building materials, the principle of mutual neutralization of chemically harmful substances in industrial wastes is used. These methods reduce the p consumption of cement by replacing part of it with industrial waste. For the experimental study, iron in the oxidation state of tp (in the form of Fe_2O_3) acted as oxidizing agents, and elemental sulfur, boron sifting of coal and iron in the oxidation state of two (FeO) possessed reducing properties. The properties of the sulfur-containing binder samples were studied at 7, 14, and 28 days of age after heat and heat treatment and under natural hardening conditions. It has been found that the sulfur-containing binders of the naturally hardened compositions show that these binders have a compression strength of 63.0 MPa at 14 days of age and a strength of 65.3 MPa at 28 days of age. The same composition, which has undergone heat-moisture treatment, after 28 days of age has a compression

strength of 73.5 MPa, which indicates that the heat-moisture treatment favorably affects the strength gain of the binder. The results obtained can be used as an effective binder in the manufacture of mortars and concretes for the construction industry.

K e y w o r d s: detoxification, mechanochemical activation, mutual neutralization, thermodynamic calculations, sulfur-containing binders, trivalent iron, oxidation and reduction, industrial waste, strength, pyrite coke, technical sulfur.

For citation:

Isakulov B. R., Akulova M. V., Kulsharov B. B., Isakulov A. B., Sartova A. M. [Detoxification of industrial wastes for production of sulfur-containing binding building materials]. *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], 2021, iss. 1, pp. 163—172.

About authors:

Baizak R. Isakulov — Doctor of Engineering Sciences, Docent, Baishev University (Kazakhstan). 302a, Zhubanov Brothers st., Aktobe, Kazakhstan; mr. Baizak@mail.ru

Marina V. Akulova — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Ivanovo State Politechnical University. 21, Sheremetesskii Ave., Ivanovo, Russian Federation; m_Akulova@mail.ru

Berikbai B. Kulsharov — Postgraduate student, Ivanovo State Polytechnic University. 21, Sheremetevskii Ave., Ivanovo, 153000, Russian Federation; berikbai_79@mail.ru

Abilkhair B. Isakulov — Senior Lecturer, Zhubanov Uiversity, 34, A. Moldagulova Ave., Aktobe, 030000, Kazakhstan; issakulov.abilkhair@gmail.com

Assima M. Sartova — Baishev University (Kazakhstan). 302a, Zhubanov Brothers st., Aktobe, Kazakhstan; akkete@mail.ru

УДК 628.3:502.5

В. Н. Анопин, С. В. Кузнецова, С. И. Махова, И. Д. Махов

Волгоградский государственный технический университет

ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ СБРОСА ЗАГРЯЗНЕННЫХ ВОД ПРОМЫШЛЕННЫМИ ПРЕДПРИЯТИЯМИ ВОЛГОГРАДСКОЙ АГЛОМЕРАЦИИ И МЕТОДЫ ИХ СНИЖЕНИЯ

Изложены материалы, характеризующие особенности токсичного загрязнения грунтов Волгоградской агломерации стоками химических предприятий. Дана оценка экологической опасности сброса сточных вод в пруды-накопители. Рассмотрены вопросы возможности утилизации промышленных стоков городскими зелеными насаждениями.

К л ю ч е в ы е с л о в а: промышленные стоки, соляно-купольные структуры, захоронение загрязненных токсичных вод, орошение токсичными водами зеленых насаждений, озеленение крутосклонов.

Производственные процессы многих промышленных предприятий химии, нефтепереработки и металлургии, расположенных в Волгоградской агломерации, сопровождаются выделением сильно загрязненных токсичных отходов (жидких, твердых и шламов), оказывающих отрицательное воздействие на атмосферный воздух, грунты, поверхностные и грунтовые воды [1—3].

Токсичные отходы завода «Волжский Оргсинтез» и сточные воды других предприятий г. Волжского на протяжении ряда лет сбрасывались в пруд-накопитель «Большой лиман».

«Большой лиман» — это естественная замкнутая котловина в левобережной части Прикаспийской низменности с плоским рельефом и неглубоким залеганием грунтовых вод. Общая площадь лимана составляет 60 км^2, площадь загрязнения поверхностной и подземной гидросферы достигает 252 км^2 [1, 4]. Абсолютные отметки дна — 14…15 м. Дно и склоны котлована сложены хвалынскими шоколадными глинами мощностью от 12…14 м в центре лимана до 3…4 м в верхних частях его склонов.

Специфические загрязнения в концентрациях значительно выше ПДК (толуол, формальдегид, сероуглерод, анилин и др.), характерные для «Большого лимана», были обнаружены в ательском водоносном, нижележащем хазарском горизонтах и в поверхностных водах. Загрязнение обусловлено также содержанием нефтепродуктов, формальдегида, железа и др. Все это привело к тому, что в окрестностях пруда-испарителя «Большой лиман» сложилась недопустимая экологическая ситуация.

Для снижения отрицательного воздействия стоков предприятий фирмой «ГРИН ФРОГ» была проведена оценка эффективности методов обеззараживания токсичных отходов завода «Волжский Оргсинтез» — биологическая очистка; сжигание; подземное захоронение. Оптимальным было признано подземное захоронение. Однако следует учитывать, что полигоны подземного захоронения являются объектами повышенного экологического риска, в особенности при их размещении в солянокупольных областях [1, 5].

Главная особенность солянокупольных структур, оказывающая решающее влияние на условия подземного захоронения, состоит в их непрекращающемся движении очень сложного характера.

Движения соляных структур, с одной стороны, способны нарушать герметичность коллекторов, с другой — приводить к авариям скважин. В конечном итоге это может вызвать загрязнение водоносных горизонтов и окружающей среды в целом.

Сфера закачки территории полигона захоронения жидких отходов «Волжский Оргсинтез» включает три структурных элемента: сводовую часть Паромненской структуры, часть Восточно-Паромненской мульды и склон между ними [6].

Тектонические движения в этих зонах имеют различную скорость и даже знак, что является главным фактором при оценке возможности нарушения герметичности скважин и их разрушения. Кроме того, участки куполов часто характеризуются повышенной набухаемостью грунтов, просадочностью и развитием подтопления, что приводит к деформациям и авариям сооружений. Создаваемые соляными структурами аномалии геофизических и геохимических полей являются предпосылкой формирования геопатогенных зон [4].

Для предотвращения возможного загрязнения экосистем рр. Ахтуба и Волга и территории г. Волжского были выполнены крупные геологоразведочные и научно-исследовательские работы по изучению целесообразности глубинного захоронении токсичных жидких отходов предприятий. Для этого на восточном склоне Паромненского соляного купола, ограниченного Восточно-Паромненской мульдой, был создан полигон захоронения в нижнебайосский пласт-коллектор мощностью 41…46 м, который находится на глубине 830…1350 м в нижней части надсолевого комплекса, осложненного рядом разломов, образующих над вершиной купола грабен [7]. Пласт-коллектор, сложенный кварцевыми песками, перекрыт и подстилается глинами мощностью 67…104 м. Выше, в зоне замедленного водообмена, залегают три горизонта, содержащие непригодные для хозяйственного использования воды. Они отделяются от зоны активного водообмена региональным водоупором верхнего мела мощностью 450…750 м.

Для обоснования возможности промышленного захоронения токсичных стоков была выполнена длительная опытно-промышленная закачка чистой воды, модельных растворов и реальных промстоков. Направляемые на закачку стоки от основных производств, образующиеся в процессе производства резиновых ускорителей (каптакса, альтакса, тиурама, стабилизатора С-789, сульфенамида), анилина, ксатогенатов, 2-нафтола, морфолина, сероуглерода являлись сильно загрязненными и трудно очищаемыми. Параллельно был создан комплексный мониторинг, в структуру которого входили геодинамические, гидрогеохимические, геофизические, гидравлические исследования режима грунтовых вод и геологических процессов. В итоге был реализован проект опытно-промышленной закачки жидких отходов ОАО «Волжский Оргсинтез» в глубоко изолированные подземные горизонты. Результаты закачки оказались в целом обнадеживающими для продолжения работ на уровне промышленной эксплуатации полигона.

Другим важнейшим объектом загрязнения природной среды Волгоградской агломерации длительное время являлось находящееся в Кировском рай-

оне г. Волгограда одно из старейших химических предприятий города — ВОАО «Химпром».

Сооружения ВОАО «Химпром» расположены в пределах примыкающей к пойме р. Волги с запада морской хвалынской равнины, которая возвышается над урезом Волги на 20…25 м и к пойме обрывается крутым уступом, местами осложненным небольшими оползнями.

Наиболее крупный из объектов сбора сточных вод ВОАО «Химпром» — *шламонакопитель «Белое море»* площадью 25 га и емкостью 1,5 млн м^3, расположен на пойменной террасе р. Волги. Ширина правобережной пойменной террасы на участке отстойника составляет 200…700 м. Для рельефа характерны достаточно резкие перепады отметок поверхности от 9,24 до 23 м, что обусловлено созданием дамб и различных насыпей.

Участок поймы, огражденный железнодорожной дамбой, использовался в качестве шламонакопителя (отстойника) для промышленных стоков, которые периодически сбрасывались на рельеф, загрязняя окружающую среду и воду р. Волги фосфорорганическими соединениями (в том числе ингибирующие ХЭ), сульфонатом, хлором и фенолом.

Шламонакопитель был разделен на 3 секции дамбами. По северной дамбе проходила автодорога, южная представляла собой невысокую эстакаду с ливневым коллектором. Со стороны р. Волги и Сарептского затона накопитель был отгорожен дамбой высотой 2,5…3,5 м из песчаных и глинистых грунтов.

Южная и средняя секции накопителя почти вплотную подходили к уступу хвалынской равнины. Северная секция ее уступа отделялась полосой шириной порядка 50 м [8].

В 1958 г. были выполнены работы по усилению ограждающей дамбы, но не был сделан дренаж в основании откоса. После заполнения отстойника до отметок 8,7…8,8 м (по проекту 7,5 м) началась фильтрация воды в основании откоса. В 1965 г. в результате прорыва дамбы произошел сброс вод шламонакопителя в Волгу, вызвавший массовую гибель ихтиофауны. Одной из главных причин аварии явилось превышение проектного уровня воды в отстойнике на 1,3 м. После аварии был поставлен вопрос о ликвидации накопителя, но это было выполнено лишь в 1988 г. [1].

За годы эксплуатации накопителя на нем образовалось огромное количество отходов и опасных веществ, представляющих экологическую угрозу для всего региона.

В настоящее время большая часть цехов завода практически не работает, здания и сооружения заброшены и даже частично разрушены.

С целью уменьшения вредного воздействия на окружающую среду содержимого шламонакопителя было выполнено укрытие его поверхности известковой пушонкой, известково-карбонатным шламом, отсевом извести и другими известьсодержащими отходами. Это была срочно необходимая, но временная мера. Обязательными были работы по рекультивации объекта.

Для этого изыскательской организацией ООО «Радиан» при участии сотрудников кафедры ГЗС ИАиС ВолгГТУ были выполнены инженерно-геологические и геоэкологические изыскания, в результате которых на территории ликвидации химически опасных объектов от прошлой деятельности на ВОАО «Химпром» изучены их инженерно-геологические условия. В процес-

се изысканий выполнен большой объем буровых работ глубиной до 20…40 м, опытно-фильтрационных и геофизических (определение УЭС) работ.

Выявлено, что в геологическом строении поймы до глубины 25…40 м принимают участие отложения четвертичной и палеогеновой систем, представленные техногенными современными образованиями и насыпными грунтами (tQIV), аллювиальными современными песками пылеватыми и мелкими с включением гравия и гальки, ракуши (aQIV) и глинами майкопской серии палеогена (P3mk). Мощность слоя глин, вскрытых на площадке установки термического обезвреживания шлама БОС—1, на глубине 20,2…22,3 м составляет 17,7…19,8 м.

Слой техногенных образований шлама (tQIV) пруда накопителя — неоднородный по плотности и сложению, мощностью 12…15 и более метров. В основном они представляет собой сравнительно однородную массу пылеватого песчаноизвестковистого материала серого цвета, рыхлого или среднеплотного сложения, включающего строительные отходы. Лишь в основании накопителя в составе шлама появляются иловатые глины черного, темно-серого и зеленоватого цвета с резким запахом токсичных химических продуктов или метровый загрязненный слой черных песков, переходящий в относительно чистые пойменные пески. Общий объем отходов, подлежащих ликвидации, составляет более 3,2 млн м^3.

Химические анализы шлама в северной части накопителя свидетельствуют о высоком содержании хлоридов (до 40000 мг/кг), кальция (до 17000 мг/кг), незначительном количестве фенолов (до 0,8 мг/кг), ртути (до 0,9 мг/кг), следах хлороформа, хлористого метила, метиленхлорида, превышающих норматив ПДК.

В центральной части пруда-накопителя содержание хлоридов увеличивается до 48000 мг/кг и резко возрастает содержание ртути (до 600…800 мг/кг), особенно на глубине 10…12 м. При этом концентрация ртути в поперечном разрезе шламонакопителя уменьшается с 250 мг/кг до 1,7 мг/кг по направлению к р. Волге. Но на участке между шламонакопителем и р. Волгой анализы химического состава подземных вод в водоносном горизонте, гидравлически связанном с водами реки, показали отсутствие ртути.

В продольном разрезе шламонакопителя содержание ртути также заметно снижается по направлению к Сарептскому затону, концентрации хлора и кальция уменьшается с 7000…13 000 до 500…600 мг/кг, а содержание специфических ингредиентов — хлороформа, толуола, трихлорэтилена остается в пределах 0,001…0,033 мг/кг. В южной оконечности шламонакопителя, хотя ртуть и специфические загрязнители исчезают, но отмечаются следы хлороформа.

Изложенное обуславливает необходимость обезвреживания всего объема содержащегося в накопителе шлама [8].

Учитывая сложившуюся экологическую ситуацию, министерство промышленности и торговли России включило предприятие ВОАО «Химпром» в программу ФЦП «Национальная система химической и биологической безопасности РФ (2009—2014 гг.)» для ликвидации загрязнения территорий химически опасных объектов. Были выполнены проектно-изыскательские работы по обезвреживанию загрязненных объектов на ВОАО «Химпром». По проекту восстановление экологической безопасности химически опасных объектов планировалось с использованием технологии термического обез-

вреживания загрязненных грунтов в барабанных вращающихся печах, расположенных в пределах поймы. После завершения ликвидации и обезвреживания химически опасных объектов предполагается рекультивация земель и создание на них зеленых зон.

Наиболее эффективным методом озеленения территорий с химически загрязненными грунтами является выращивание древесных насаждений с использованием промышленных и хозяйственно-бытовых сточных вод.

Первые наиболее глубокие и обширные исследования в этом направлении на территории Волгоградской агломерации были выполнены сотрудниками Волгоградского сельскохозяйственного института под руководством В. И. Марымова, доказавшего, что промышленные, хозяйственно-бытовые, условно-чистые воды и смешанный сток могут использоваться при выращивании лесных культур. По их мнению, земледельческие поля орошения сточными водами должны стать обязательным элементом пригородных ландшафтов [9].

Было установлено, что при прохождении сточных вод через 60-ти сантиметровый слой светло-каштановой тяжелосуглинистой почвы происходит полная их дегельминтизация. На 80…90 % задерживаются органические вещества, в том числе диметилдиоксан, капролактам, альдегиды — на 89 %, метанол — на 78 %, нефтепродукты и анилин — практически на 100 %, что исключает возможность загрязнения ими грунтовых вод. Способность поглощения светло-каштановой почвой содержащихся в сточных водах катионов калия составляет 37…74 %, аммония — 76…96 %, кобальта — 45 %, йода — 44 %, марганца — 13 %. При концентрации формальдегида, ацетальдегида, метанола, капролактама и диметилдиоксана 100 мг/л первые три вещества разлагаются на 5-е, капролактам — на 4-е, диметилдиоксан — на 14-е сутки.

Еще более быстрому обезвреживанию органические вещества подвергаются при поглощении растениями. За 5 сут. полностью разлагаются анилин, ацетон, бензоальдегид, кротоновый альдегид, фурфурол, диметилдиоксан, за 5—10 сут. — ацетальдегид, бензол, метанол, бутанол, этанол, толуол, за 10—16 сут. — капролактам, дихлорэтан, четыреххлористый углерод [9].

В окрестностях Волгограда в результате шестилетнего срока орошения сточными водами в почвах увеличилось содержание доступных форм калия, хотя при этом снизилось количество гумуса и гидролизируемого азота, а также фосфора. Однако в целом этот метод является приемлемым, так как большая часть применяемых в озеленении городов сухостепной зоны древесных пород отличается относительно невысокой требовательностью к плодородию почв. Содержание токсичных для древесных растений солей в верхнем 1,5-метровом слое почвогрунта при поливе условно чистой водой снизилось на 2,16 %, смешанным стоком — на 2,94 %. Одновременно увеличилась емкость поглощения почв, являющаяся предпосылкой их рассолонцевания [10].

В последующие годы изучение методов утилизации загрязняемых сточных вод при выращивании древесных насаждений было продолжено профессором А. А. Вакулиным и его ассистентами В. И. Коробовым, Б. С. Семеновым, И. Ф. Белозеровым и др. [11—13].

Б. С. Семенов выполнял исследования в окрестностях г. Волжского на участке со светло-каштановыми тяжелосуглинистыми почвами в комплексе со средне- и глубокостолбчатыми солонцами, подстилаемыми шоколадными глинами. Состав сточных вод был хлоридно-сульфатный, минерализация

1…2 г/л, pH = 7,8. Общее содержание в них органических веществ было высокое (ХПК = 631), в т. ч. альдегидов — 266 мг/л, метанола — 122 мг/л, нефтепродуктов — 18,5 мг/л, диметилдиоксана — 3,5 мг/л, капролактама — 13,8 мг/л, анилина — 1,4 мг/л. Количество азота аммонийного составляло 1…5,1 мг/л, окисленных форм азота — около 1 мг/л.

После смешения с хозяйственно-бытовыми водами сумма катионов снижалась до 14,9 мг-экв/л, в т. ч. Na — 10,6 мг-экв/л, ХПК — 285 мг-экв/л, т. е. воды достигали необходимых для орошения требований. Контролем являлся полив водопроводной водой [13].

В результате 16-летнего орошения смешанными сточными водами из слоя почвогрунта в 4 м было вымыто 460 т/га токсичных солей, в то время как условно-чистыми сточными водами и водопроводной водой — на 110 т/га меньше. Более высокое по сравнению с водопроводной водой рассоляющее действие сточных вод происходит за счет увеличения их коагулирующей способности, обусловливающей повышение скорости фильтрации и увеличение промывного эффекта.

Определенные Б. С. Семеновым основные показатели роста зеленых насаждений на участках орошаемых различными типами сточных вод приведены в таблице.

Таксационные показатели древесных пород на поливных участках в возрасте 10 лет

Древесная порода	Химически загрязненная сточная вода		Загрязненная вода, разбавленная водопроводной		Водопроводная вода (контроль)	
	высота, м	таксационный диаметр, см	высота, м	таксационный диаметр, см	высота, м	таксационный диаметр, см
Тополь черный	11,0	12,2	11,4	12,3	10,9	11,8
Вяз приземистый	9,9	12,8	10,4	12,8	9,6	12,1
Робиния лжеакация	9,0	9,2	9,8	8,3	8,4	7,0
Ясень ланцетный	7,4	7,2	7,5	7,7	7,2	6,9
Клен татарский	7,7	8,1	7,9	8,6	7,6	8,1

Данные таблицы свидетельствуют о возможности и целесообразности использования сточных вод для мелиорации загрязненных почвогрунтов и достижения эффективности зеленого строительства.

Аналогичные исследования проводились В. И. Коробовым в южных окрестностях г. Волгограда на участке со светло-каштановыми тяжелосуглинистыми почвами в комплексе с солонцами, имеющими хлоридно-сульфатно-натриевый тип засоления, переходящий с углублением в сульфатно-хлоридный [12]. Орошение осуществлялось сточной водой предприятий южной промзоны г. Волгограда, имевшей бикарбонатно-сульфатно-хлоридный анионный состав. В результате через 7 лет содержание гумуса увеличилось с 0,87 до 1,14 %, легкодоступных форм азота — с 0,7 до 1,9…2,5 мг/100 г почвы.

При орошении сточными водами ясень ланцетный и тополь черный в первые два года испытывали угнетение, но по мере промывки корнеобитае-

мого слоя происходило увеличение их приростов. На рост вяза приземистого содержание в поливных водах солей заметного влияния не оказывало.

В возрасте 5—7 лет насаждения вяза приземистого и ясеня ланцетного имели Iа бонитет, тополя черного — I бонитет. Глубина проникновения в шоколадную глину корней вяза составила 153 см, тополя — 185 см.

Рассматриваемые исследования проводились на участках с небольшими уклонами, характеризующимися очень малыми скоростями течения по поверхности их территорий промышленных и хозяйственно-бытовых стоков, практически безопасными в плане развития эрозионных процессов. При большей крутизне склонов неизбежен смыв и размыв почв.

Для снижения интенсивности эрозионных процессов обработку почв на склонах рекомендуется проводить перпендикулярно линии стока. Однако при наличии ложбин вспашка поперек склона концентрирует сток и усиливает смыв и размыв почв [14]. Более эффективным способом подготовки крутосклонов к облесению является террасирование [15, 16].

На затеррасированных склонах образуется ступенчатый микрорельеф, обусловливающий изменение микроклиматических условий, некоторое снижение в жаркий период температуры воздуха, уменьшение скорости ветра, увеличение влажности воздуха. Происходит изменение характера распределения снежного покрова, возрастают запасы снеговой воды [17], уменьшается промерзание почв [18].

На террасированных склонах ослабляются процессы смыва [17—19], в десятки раз ускоряются процессы рассолонцевания [17].

По наличию элементов питания наиболее благоприятные условия создаются в насыпной части террасы. На облесенных террасах водопроницаемость выше по сравнению с целиной на поверхности почв в среднем в 3,8 раза, на глубине 40 см — в 1,3, на глубине 60 см — в 1,1 раза [18].

Для выявления оптимальных параметров террас в условиях Волгоградской агломерации нами было проведено исследование состояния лесонасаждений на террасированных склонах в окрестностях г. Волгограда, на берегах р. Царицы и ее притоков и склонах Мамаева кургана.

На берегах р. Царицы и балки Дубовая плодовые и древесные насаждения создавались посадкой сеянцев на выемочно-насыпных террасах шириной 4…5 и 10 м с валиком по краю насыпной части высотой 30…40 см. Расстояние между рядами — 3…4 м, в рядах — 0,7…1,0 м. В самые первые годы их создания насаждения поливались, затем орошение культур прекратили.

Результаты обследования свидетельствовали о зависимости состояния и роста насаждений от положения на склоне и параметров террас. Так, на террасах шириной 10 м в нижней части склона южной экспозиции средняя высота абрикоса обыкновенного в возрасте 25 лет составляла 5,1 м, в верхней — 4,6 м, т. е. была меньше на 10 %. В верхней части склона на террасе шириной 4 м, абрикосовое насаждение имело среднюю высоту 6,4 м, при ширине полотна террасы 10 м — высоту 4,6 м, т. е. меньше на 28 %. На террасе шириной 10 м внизу склона культуры ясеня ланцетного в возрасте 15 лет имели высоту 5,0 м, таксационный диаметр 5,5 см, т. е. росли по II бонитету, в верхней части склона — лишь по III бонитету. На такой же террасе 30-летнее насаждение вяза приземистого имело среднюю высоту 7,6 м, диаметр 11,1 см. При ширине террасы, равной 4 м, 30-летнее насаждение робинии лжеакации

достигло средней высоты 9,2 м, диаметра 10,6 см. Исходя из того, что в этом возрасте в аналогичных условиях вязовые и робиниевые насаждения обычно имеют близкие таксационные показатели, следует, что на террасах шириной 4 м складываются более благоприятные лесорастительные условия.

В целом же насаждения абрикоса обыкновенного, вяза приземистого, робинии лжеакации и ясеня ланцетного имели вполне удовлетворительное состояние, усыхания не наблюдалось, суховершинность не превышала 10 %.

На склоне северной экспозиции показатели лесонасаждений были еще лучше. На террасах шириной 5 м древесные породы имели хорошее состояние, выпады и суховершинность, за исключением березы повислой, отсутствовали.

Подготовку к облесению более крутых склонов Мамаева кургана проводили в основном нарезкой выемочно-насыпных террас шириной 5…6 м с валиком по бровке насыпной части высотой 40…50 см.

Весной 1962—1964 гг. на каждой террасе было посажено по два ряда деревьев или кустарников.

Несмотря на значительное выравнивание в результате террасирования лесорастительных условий значительно лучшее состояние насаждений было в нижних частях прямых склонов и на имеющих наименьшую крутизну вогнутых участках склонов сложного профиля. Так на супесчаных почвогрунтах в самой нижней части склона юго-западной экспозиции чистые насаждения робинии лжеакации имели IV бонитет (высоту 9,2 м, диаметр 12,2 см), в средней — только V бонитет (соответственно 6,2 м и 7,3 см). Аналогично менялись таксационные показатели и у сосны обыкновенной (внизу — III, вверху — IV бонитет).

На суглинистых почвах лиственные насаждения имели более высокие показатели, чем на супесчаных, но соотношение их таксационных показателей в зависимости от положения на склоне сохранилось. Так, если в нижней части склона робиния лжеакация и дуб черешчатый, имея отличное состояние, росли по II,5 бонитету (средняя высота робинии в возрасте 40 лет составляла 12,0 м, диаметр 24,5 см, дуба — 11,7 м и 23,4 см), то в верхней — высота робинии была равна 9,0 м (IV бонитет), диаметр — 12,1 см, 35 % деревьев суховершинили.

Насаждения вяза приземистого отставали в росте от робиниевых (средняя высота в верхней части склона была равна 8,3 м, диаметр — 11,8 см) и имели значительную суховершинность.

В результате исследования многопородных насаждений было установлено, что на склоне восточной экспозиции при отсутствии рубок ухода лучшие условия для роста культур создаются при посадке на полотне террасы или только одних деревьев, или только кустарников. Так, при порядовом смешении вяза приземистого и робинии лжеакации вяз имел среднюю высоту 7,9 м, средний диаметр 9,8 см, суховершинность 50 %, робиния — соответственно 7,6 м и 10,3 см и 20 %. При смешении с шиповником обыкновенным, а также тамариксом ветвистым, кленом татарским и жимолостью татарской средняя высота вяза снижалась до 6,0 м, диаметр — до 7,2 см, суховершинность возрастала до 70…80 %. Робиния лжеакация в смеси с боярышником однопестичным имела среднюю высоту 6,1 м, средний диаметр 7,0 см, т. е. показатели были меньше соответственно на 20 и 30 %.

Изложенные закономерности состояния и роста насаждений имели место и на террасированном склоне теневой северо-западной экспозиции, но здесь вследствие более благоприятных микроклиматических условий все насаждения, характеризовались лучшими показателями состояния и роста. При этом в дубово-робиниевом насаждении в нижней части склона таксационные показатели дуба черешчатого было выше, чем робинии лжеакации. При хорошем состоянии деревья дуба имели среднюю высоту 10,2 м (III бонитет), диаметр 16,9 см. Большая часть растений робинии, не выдержав конкуренции с дубом, выпала, отдельные сохранившиеся экземпляры имели среднюю высоту 9,3 м (IV бонитет), диаметр 15,8 см.

Насаждение ясеня ланцетного семенного происхождения имело IV бонитет (высоту 8,4 м, диаметр 14,1 см), его 20-летнее порослевое возобновление — также IV бонитет (высоту 6,5 м, диаметр 5,1 см).

В средней части склона робиния лжеакация имела наиболее высокие показатели в насаждении с 10%-й примесью гледичии трехколючковой (средняя высота робинии 6,9 м, диаметр 9,1 см, гледичии — соответственно 7,2 м и 6,3 см). В робиниево-вязовом насаждении средняя высота робинии лжеакации была меньше на 0,5 м, диаметр — на 0,4 см, в смеси с аморфой кустарниковой — ниже соответственно на 1,7 м и 1,8 см.

Древостой вяза приземистого имел показатели роста, близкие к робиниевому.

При изучении состояния почвогрунтов на террасированных склонах было установлено, что устройство валиков высотой до 50 см по бровкам насыпных частей террас не гарантирует предотвращения их размыва. В местах пересечения террас с ложбинами образовались промоины глубиной 0,8…1,3 м и шириной по верху валиков 1,5…3,0 м [20].

Из изложенного следует, что при выращивании на террасированных склонах зеленых насаждений с поливом промышленными и хозяйственно-бытовыми сточными водами водозадерживающие валы должны быть более основательными. Необходимы дополнительные исследования по выявлению их оптимальных параметров и числа разделительных шпор.

Выводы

1. Следствием сброса химическими предприятиями Волгоградской агломерации загрязненных вод в пруды-накопители является комплексное ухудшение экологической обстановки на значительной части территории.

2. При подземном захоронении токсичных сточных вод необходимо учитывать непрекращающееся движение соляных структур очень сложного характера.

3. Перспективным методом утилизации загрязненных сточных вод является полив древесно-кустарниковых насаждений. Систематическое орошение зеленых насаждений на территориях с крайне неблагоприятными лесорастительными условиями обеспечивает промывку почвогрунтов и улучшения их свойств.

4. Существенные отличия в состоянии и росте зеленых насаждений, орошаемых промышленными стоками и водопроводной водой отсутствуют.

5. Для обеспечения возможности орошения сточными водами зеленых насаждений на склонах необходимо их предварительное террасирование с созданием основательных водозадерживающих валов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Геоэкологические проблемы подземных и наземных накопителей жидких отходов в солянокупольных областях / В. Н. Синяков, М. К. Старовойтов, Л. Я. Полянинов, С. В. Кузнецова, Ю. Л. Беляева. М.: НИА-Природа, 2001. 153 с.

2. Влияние накопителей жидких отходов на атмосферу и здоровье человека / В. Н. Синяков, С. В. Кузнецова, Ю. Л. Беляева, С. И. Махова // Качество внутреннего воздуха и окружающей среды. Волгоград, 2002. С. 54—59.

3. *Махова С. И., Викторова А. О., Афанасьев А. С.* Проблема накопления жидких отходов и их негативное влияние на окружающую среду (на примере пруда-накопителя «Большой Лиман» и Сарпинских озер) // Антропогенная трансформация геопространства: история и современность: Материалы III Международной научно-практической конференции. Волгоград: ВолГУ, 2016. С. 260—267.

4. *Кузнецова С. В.* Аномалии геологической среды солянокупольных бассейнов и их влияние на природно-технические системы и среду обитания человека: автореф. дис. … д-ра геол.-минерал. наук. Волгоград, 2000. 48 с.

5. *Гольдберг В. М.* Гидрогеологическое обоснование размещения полигонов промышленных отходов // Геоэкология. 1995. № 3. С. 43—49.

6. *Синяков В. Н., Кузнецова С. В., Омельченко Н. С.* Закономерности распределения зон тектонической напряженности в пределах Паромненского соляного купола // Поволжский экологический вестник. Вып. 6. 1999. С. 20—23.

7. *Синяков В. Н., Кузнецова С. В., Новикова С. В.* Инженерная геология и геоэкология Волгоградской области. Волгоград, 2003. 177 с.

8. *Синяков В. Н., Каехтина М. А.* Результаты инженерно-геологического мониторинга на полигоне закачки жидких высокотоксичных отходов «Волжский Оргсинтез» // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2008. Вып. 12(31). С. 38—42.

9. *Марымов В. И.* Обезвреживание и утилизация сточных вод промышленных предприятий на земледельческих полях орошения в зоне Нижнего Поволжья : автореф. дис. … д-ра. с.-х. наук. Волгоград, 1975. 47 с.

10. Обезвреживание органических веществ сточных вод в растениях // Всесоюзный НИИ по с/х использованию сточных вод. Купавна, 1975. 7 с.

11. *Вакулин А. А.* Опыт орошения лесонасаждений сточными водами // Агролесоландшафты: проблемы, свойства, управление и оценка. 1995. Вып. 1(106). С. 35—40.

12. *Коробов В. И.* Рост древесных пород и особенности лесорастительных условий светло-каштановых почв при орошении сточными водами в правобережье Волгоградского Поволжья : автореф. дис … канд. с.-х. наук. Волгоград, 1982. 21 с.

13. *Семенов Б. С.* Рост древесных пород и солевой режим почвы при орошении сточными водами Волжского химического комплекса в зоне светло-каштановых почв Волгоградского Заволжья : автореф. дис. … канд. с.-х. наук. Волгоград, 1983. 26 с.

14. *Каштанов А. Н., Заславский М. Н.* Почвоводоохранное земледелие. М.: Россельхозиздат, 1984. 462 с.

15. *Рожков А. Г.* Борьба с оврагами. М.: Колос, 1981. 199 с.

16. *Рожков А. Г.* Напашное террасирование склонов. Кишинев, 1963. 42 с.

17. *Зайченко К. И.* Почвоулучшающая роль террасирования на склоновых землях правобережья Среднего Дона // Бюллетень ВНИАЛМИ. Волгоград, 1984. Вып. 2(43). С. 23—29.

18. *Марков С. А., Ревяко И. В., Мартиросова И. С.* Влияние террасирования склонов на лесорастительные и противоэрозионные свойства почв // Защитное лесоразведение и озеленение на Северном Кавказе : сборник научных трудов. Новочеркасск, 1983. С. 3—9.

19. *Zachar D.* Erozia Pody. Berlin, 1970. 528 p.

20. *Анопин В. Н.*, *Рулев А. С.* Картографирование деградированных ландшафтов Нижнего Поволжья. Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2007. 168 с.

© Анопин В. Н., Кузнецова С. В., Махова С. И., Махов И. Д., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Экологические последствия сброса загрязненных вод промышленными предприятиями Волгоградской агломерации и методы их снижения / В. Н. Анопин, С. В. Кузнецова, С. И. Махова, И. Д. Махов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 173—183.

Об авторах:

Анопин Владимир Николаевич — д-р географ. наук, проф., проф. каф. гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; AnopinVl.Nik.48@yandex.ru

Кузнецова Светлана Васильевна — д-р геол.-минерал. наук, проф., проф. каф. гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; info@vgasu.ru

Махова Светлана Ивановна — канд. геол.-минерал. наук, доц., доц. каф. гидротехнических и земляных сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая; 1, info@vgasu.ru

Махов Иван Дмитриевич — аспирант, каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая; 1, sv_kgmn@mail.ru

Vladimir N. Anopin, Svetlana V. Kuznetsova, Svetlana I. Makhova, Ivan D. Makhov

Volgograd State Technical University

ENVIRONMENTAL CONSEQUENCES OF THE DISCHARGE OF POLLUTED WATER BY INDUSTRIAL ENTERPRISES OF THE VOLGOGRAD AGGLOMERATION AND METHODS OF THEIR REDUCTION

The materials characterizing the features of the toxic pollution of the soils of the Volgograd agglomeration by the effluents of chemical enterprises are presented. An assessment of the environmental hazard of wastewater discharge into storage ponds is given. The issues of the possibility of utilization of industrial wastewater by urban green spaces are considered.

K e y w o r d s: industrial effluents, salt-dome structures, disposal of polluted toxic waters, irrigation with toxic waters of green spaces, landscaping of steep slopes.

For citation:

Anopin V. N., Kuznetsova S. V., Makhova S. I., Makhov I. D. [Environmental consequences of the discharge of polluted water by industrial enterprises of the Volgograd agglomeration and methods of their reduction]. *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], 2021, iss. 1, pp. 173—183.

About authors:

Vladimir N. Anopin — Doctor of Geographical Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; AnopinVl.Nik.48@yandex.ru

Svetlana V. Kuznetsova — Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; info@vgasu.ru

Svetlana I. Makhova — Candidate of Geological and Mineralogical Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; info@vgasu.ru

Ivan D. Makhov — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; sv_kgmn@mail.ru

УДК 504.73

И. Ю. Глинянова, В. Т. Фомичев, Н. В. Асанова

Волгоградский государственный технический университет

ОЦЕНКА ТОКСИЧНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ОБЕСПЕЧЕНИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НАСЕЛЕННЫХ ПУНКТОВ

Исследование посвящено оценке токсичности атмосферного воздуха с апреля по сентябрь 2018 г. в р. п. Средней Ахтубе Среднеахтубинского района Волгоградской области по реакции прорастания семян высших растений. В качестве тест-объектов применялись семена кресс-салата (Lepidium sativum). Питательной средой для развития семян явились водные пылевидные суспензии (смыв пыли дистилированной водой с листьев абрикосовых деревьев Prúnus armeníaca), которые могли содержать загрязняющие вещества-токсиканты из воздушной среды р. п. Средней Ахтубы. Через 72 ч производилось измерение длины корней (*Lr*, см) проросших семян как реакции тест-объектов на загрязняющие вещества, в результате чего оценивался уровень загрязнения воздуха или индекс фитотоксичности ($T_ф$, %). Был выявлен 1-й уровень фитотоксичности ($T_ф$ = 18,7 %) водных пылевидных суспензий, который соответствует очень слабому загрязнению атмосферы и токсичности воздуха. Из чего можно сделать вывод о том, что пылевидные частицы, находящиеся в водных пылевидных суспензиях из р. п. Средней Ахтубы не обладают ингибирующим действием и не содержат веществ-токсикантов, которые могут представлять опасность для окружающей среды и проживающего там населения. Полученные результаты обеспечивают точность экологической оценки окружающей среды. Реализация нового способа оценки токсичности атмосферного воздуха в населенных пунктах в течение нескольких сезонов наглядно демонстрирует экологическую ситуацию на исследуемой территории и может успешно применяться при мониторинге атмосферного воздуха городских и сельских поселений муниципальными экологическими службами.

Ключевые слова: токсичность, показатель фитотоксичности, тест-объекты, токсиканты, мониторинг, загрязняющие вещества, экологическая ситуация, атмосферный воздух, семена кресс-салата (Lepidium sativum).

Введение

Много работ посвящено загрязнению атмосферного воздуха в населенных пунктах, в т. ч. [1, 2] и др. Исследование же токсичности атмосферного воздуха по реакции прорастания семян в водных пылевидных суспензиях (смыв пыли с листьев растений) является новым способом оценки экологической ситуации в населенных пунктах. При этом широко известны тесты на токсичность окружающей среды, которые используются учеными из разных стран мира в соответствии с EPA Ecological Effects Test Guidelines OPPTS 850.4200: Seed Germination/Root Elongation Toxicity Test. В России используют также ГОСТ 33061-2014 «Методы испытаний химической продукции, представляющей опасность для окружающей среды. Наземные растения: тест на всхожесть семян и развитие проростков» и др.

Проверка на токсичность разнообразных сред: воздушной, водной, почвенной осуществлялась различными авторами с позиции исследования растительных тест-объектов, которые оперативно предоставляли информацию о загрязнении и токсичности, например, по всхожести семян, энергии прорастания, длины корня и др.

Так, Л. В. Кубрина в своей работе исследовала генотоксическое действие снеговых проб на живые системы. В частности, автор изучала энергию прорас-

тания семян кресс-салата (Lepidium Sativum) на субстрате — снежном покрове, отобранном на улицах г. Омска: проезжей части, в жилой зоне, вблизи промышленных объектов и др. «При сравнении токсического эффекта водных проб с контрольным вариантом (94,0 %) было установлено, что наименьшая энергия прорастания зарегистрированы в варианте «ДК «Шинник», Будеркина, 2 (77,0 %). Отличия от контроля достоверны и находятся на 99,9 % уровне значимости. Снеговые пробы «Буферные пруды нефтезавода», полигон (81,0 и 84,0 % соответственно) также показывают высокий уровень токсичности $p < 0{,}001$. Снеговые пробы «Площадь Ленина», «Жилой комплекс „Кристалл“», «Архитекторов/Комарова» (89,0 и 91,5 % соответственно) достоверно отличаются от контроля и показывают уровень токсичности $p < 0{,}05$. На том же уровне находятся пробы «Остановка „Ул. Фрунзе“», «Дом творчества» (лиственница), «Дом творчества» (сосна), «Дом творчества» (береза) (91,0; 90,0; 90,0 и 90,0 % соответственно)» [3]. Анализ полученных данных Л. В. Кубриной подтверждает токсическое действие снеговых проб на живые системы.

Н. В. Русинова исследовала качества снежного покрова по его индексу токсичности с помощью водоросли Chlorella vulgaris, а вычисление индекса токсичности основывалось на сравнении суточного прироста численности клеток водорослей Chlorella vulgaris в контрольном и опытном вариантах. Авторами предложена методика определения индекса загрязнения снежного покрова по его индексу токсичности, позволяющая установить качественное состояние снежного покрова без применения химического анализа [4].

D. D. Alves с соавторами работал с мелкодисперсной пылью, которая является одним из основных загрязнителей окружающей среды, обладая возможностью накапливать на своей поверхности различные вещества, в том числе тяжелые металлы, которые и способствуют ее токсичности. В своих работах D. D. Alves исследовал металлические элементы Al, Ba, Cd, Pb, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni и Zn в PM2,5—10, оценивая токсичность водорастворимых фракций PM2,5 и PM2,5—10 по прорастанию семян Lactuca sativa в качестве биоиндикатора. Сбор PM2,5 и PM2,5—10 проводился с использованием пробоотборника с дихотомическим пакетным фильтром (SFU). Авторами было обнаружено, что Cd и Cu были идентифицированы как основные металлические элементы, которые могут оказывать негативное влияние на прорастание семян и удлинение корней, соответственно. Присутствие кадмия и меди в атмосферных твердых частицах является одной из основных причин фитотоксичности, влияющей на прорастание семян Lactuca sativa и длины корней [5].

И. Н. Семенова с коллегами установили связь между содержанием тяжелых металлов в донных осадках, превышающим геохимический фон, и проявлением индикаторных свойств. Повышение концентрации меди и никеля ингибирует всхожесть семян, увеличение длины корня и сухой массы проростков всех модельных растений. При этом авторы считают, что изученные тест-системы по степени чувствительности можно расположить в следующий убывающий ряд: кресс-салат > редис > пшеница [6].

Е. Н. Еськова и Н. Н. Кириенко выявили, что на расстоянии до 40 м от дорожного полотна автотрассы М—53 наблюдается достоверное угнетение жизненных функций тест-растений, таких как энергия прорастания и длина проростков, и на расстояние до 50 м — всхожесть семян и длина корней. К автотранспортному загрязнению почвы большей чувствительностью обла-

дают семена Lepidium sativum L. по сравнению с семенами Triticum vulgare L., а среди изучаемых тест-функций — длина корней. На основании экотоксикологической оценки образцов почвы, полученных по обоим видам тест-растений, к группе «опасно токсичная» относится почва на расстоянии 10 м от края автотрассы, «умеренно токсичная» — 20 м, «малотоксичная» — 30 и 40 м, «не токсичная» — 50 и 100 м [7].

Имеются работы, в которых авторы исследуют с помощью показателя фитотоксичности водные среды, например, качество сточных вод промышленного сектора. Так J. Charles с сотрудниками провели стандартизированные биоанализы с использованием семян салата Lactuca sativa. Авторы измерили скорость прорастания, длину и массу ростка салата. Результаты были использованы для сравнения общей токсичности различных сточных вод. Стоки, содержащие медь и никель, оказали гораздо более сильное воздействие, чем содержащие цинк или алюминий. Смеси металлов имеют более высокую токсичность, чем сумма их отдельных компонентов. J. Charles считают, что указанные биологические тесты дешевы, просты в реализации, воспроизводимы и подчеркивают эффекты, вызываемые сточными водами. Их можно регулярно использовать для проверки воздействия промышленных выбросов, даже если они соответствуют нормативным требованиям для отдельных металлов [8].

T. S. Chandra с соавторами исследовали токсичность сточных вод также с позиции прорастания семян. Предварительная обработка сточных вод биометанизированных спиртовых заводов окислением влажным воздухом (WAO) привела к значительному повышению индекса биоразлагаемости BI (до 0,8). При этом предварительно обработанные сточные воды с повышенной способностью к биоразложению показали положительное влияние на прорастание семян (до 100 %), подразумевая снижение токсичности сточных вод после предварительной обработки WAO [9].

Анализ приведенных работ выявляет малоизученное направление, связанное с исследованием токсичности атмосферного воздуха на примере водных пылевидных суспензий или смыва пыли с листьев древесных форм растений, которые они аккумулировали на своей листовой поверхности в течение нескольких сезонов. Это дает возможность произвести оценку токсичности атмосферного воздуха в населенном пункте за несколько сезонов или за год в зависимости от вида растений (листопадное или вечнозеленое).

Целью данного исследования явилась оценка токсичности атмосферного воздуха в р. п. Средняя Ахтуба Среднеахтубинского района Волгоградской области по реакции прорастания семян высших растений на примере семян кресс-салата (Lepidium sativum).

Задачи исследования заключались в следующем:

- выбор территории и материала исследования;
- отбор листьев древесных растений; приготовление водных пылевидных суспензий;
- проращивание семян кресс-салата (Lepidium sativum) в термостате на субстрате водных пылевидных суспензий;
- измерение длины корней проросших семян и исследование показателя фитотоксичности ($T_ф$, %);
- оценка токсичности атмосферного воздуха в р. п. Средняя Ахтуба.

Материалы и методы

В работе использовался новый способ оценки токсичности атмосферного воздуха по реакции прорастания семян высших растений (заявка на патент № 2020128981 от 02.09.2020). Методика включает в себя несколько стадий.

1. В сухую погоду на исследуемой экспериментальной территории и в условно чистой зоне, выбранной в качестве контрольной, производят сбор листьев с одинакового вида древесных растений с предполагаемыми на них пылевидными частицами с содержанием органических и неорганических веществ. С одного дерева отбирается 10 листьев, процедура повторяется с не менее 10 деревьями. Каждая выборка включает по 100 листьев, как с экспериментальной территории, так и из условно чистой зоны.

2. Из отобранных листьев древесных растений одного вида готовят водные суспензии — смыв пыли с листьев растений. Для приготовления раствора собранные листья в количестве 100 шт. с экспериментальной территории и 100 шт. из условно чистой зоны помещают в химические стаканы с дистиллированной водой, объемом по 1000 мл, перемешивают их в течение 2…3 мин и получают две водные суспензии с содержанием пылевидных частиц. Затем листья растений пинцетом отбирают из химических стаканов.

3. Для исследований берут чашки Петри диаметром 10 см, которые стерилизуют в сушильном шкафу при температуре 130 °С в течение 1 ч или кипячением в воде в течение 40 мин. После этого укладывают на дно чашек Петри фильтровальную бумагу, в одну из чашек Петри наливают водную пылевидную суспензию из экспериментальной зоны объемом 5 мл, а в другую — 5 мл водной пылевидной суспензии из условно чистой зоны. В каждую чашку Петри аккуратно и равномерно пинцетом укладывают на фильтровальную бумагу по 50 шт. семян растительных тестовых биокультур, причем уровень жидкости в чашках Петри должен быть ниже поверхности семян. Чашки Петри закрывают покровными стеклами и помещают в термостат при температуре 20 °С для проращивания семян. Время проращивания семян в термостате обусловлено выбором растительных тестовых культур высших растений[1].

4. Определяют степень прорастания семян тестовых культур, измеряя длину корней проросших семян тестовых растительных биокультур, как в контрольной так и в экспериментальной группах, затем рассчитывают индекс фитоксичности на субстрате водных пылевидных суспензий с экспериментальной территории по формуле: $T_ф = (L_{кср} – L_{эср} \ / \ L_{кср}) \cdot 100$ %, где $L_{кср}$ — среднее значение длины корней семян, мм, которые выросли на субстрате водных пылевидных суспензий из условно чистой зоны, а $L_{эср}$ — среднее значение длины корней семян, мм, которые выросли на субстрате водных пылевидных суспензий из экспериментальной зоны. По индексу фитотоксичности пылевидных суспензий оценивается экологическое состояние воздушной среды территории:

индекс фитотоксичности $T_ф = 0…100$ % соответствует 5-му уровню фитотоксичности (очень сильное загрязнение воздуха);

[1] ГОСТ 120 38-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». Приложение 1. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200023365.

при $T_ф$ = 75…90 % — 4-й уровень фитотоксичности (сильное загрязнение воздуха);

$T_ф$ = 50…75 % — 3-й уровень фитотоксичности (среднее загрязнение воздуха);

$T_ф$ = 25…50 % — 2-й уровень фитотоксичности (слабое загрязнение воздуха);

$T_ф$ < 25 % — 1-й уровень фитотоксичности (очень слабое загрязнение атмосферы или отсутствие загрязняющих веществ в воздухе).

При этом для улавливания из воздушной среды органических и неорганических веществ-токсикантов используют листовые пластинки древесных форм растений, а в качестве тестовой биокультуры применяют семена высших растений.

Результаты исследования

В качестве экспериментальной территории (рис. 1) были выбраны жилые и общественно-деловые зоны р. п. Средняя Ахтуба: по ул. Омской (точка № 1), ул. Нечаева (точка № 2), ул. Кавказской (1) (точка № 3), ул. Воровского (точка № 4), ул. Больничной (точка № 5), ул. Кавказской (2) (точка № 6).

Выбор указанной экспериментальной территории был не случаен. Данная жилая и общественно-деловые зоны характеризовались крайне неблагоприятной экологической обстановкой, причиной которой, по мнению жителей, является функционирование там предприятия стройиндустрии и др. с периодическими выбросами различных загрязняющих веществ в окружающую среду в виде пылевидных частиц и пр. Со стороны местного населения подавались и подаются многочисленные жалобы в органы власти, в природоохранные структуры на работающие предприятия. Экологические проблемы жителей неоднократно упоминались в региональных СМИ, поэтому выбор 6 точек исследования в 2018 г. был обусловлен именно создавшейся ситуацией и мнением жителей, характеризующих территорию в р. п. Средней Ахтубе как с крайне неблагоприятной экологической ситуацией.

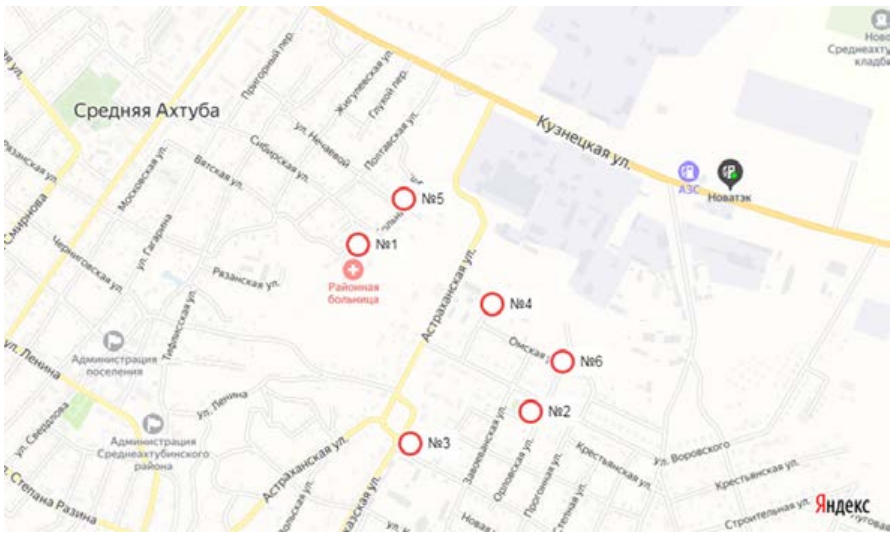


Рис. 1. Точки отбора проб в р. п. Средняя Ахтуба Среднеахтубинского района Волгоградской области

В качестве условно чистой зоны была выбрана территория СНТ «Орошенец», «Шельф» (Советский район, г. Волгоград, Волгоградская область) также с 6 точками исследования, аналогичной площади с отбором проб в одинаковое время года, как и на экспериментальной территории.

На рисунке 2 показана территория условно чистой зоны в СНТ «Орошенец» и СНТ «Шельф» Советского района г. Волгограда.

Отбор пылевидных частиц осуществлялся с листьев абрикосовых деревьев (Prúnus armeníaca). Это массовой вид растений, который встречается в Волгоградской области повсеместно. Сбор листовых пластинок приходился на конец периода вегетации — на начало октября 2018 г. Листья с абрикосовых деревьев отбирались в каждой точке с 10 абрикосовых деревьев (10 повторов). Отбор образцов листьев производился в населенном пункте р. п. Средняя Ахтуба в Среднеахтубинском районе Волгоградской области осенью 2018 г. (экспериментальная территория, см. рис. 1).

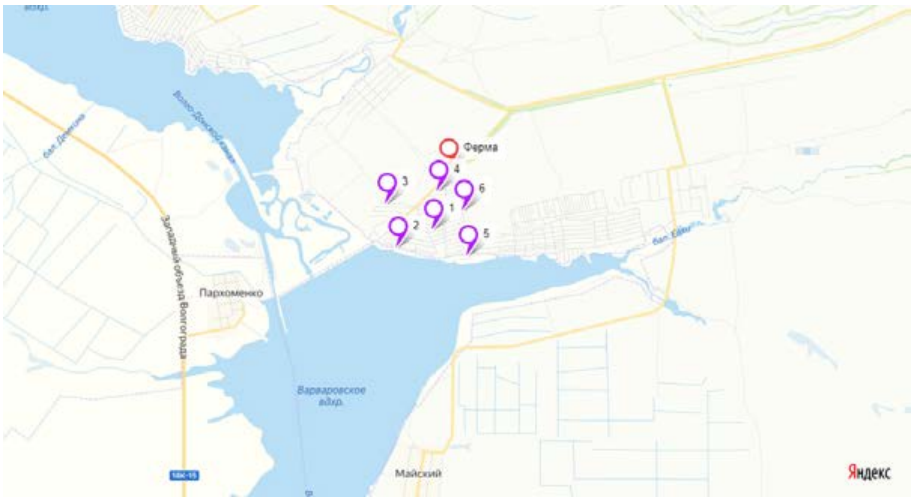


Рис. 2. Точки отбора проб в СНТ «Орошенец», «Шельф» Советского района г. Волгограда

Способ определения токсичности воздуха и оценки экологического состояния атмосферы территории, осуществлялись в несколько стадий.

1. В сухую погоду на исследуемых территориях производили сбор листьев абрикосовых деревьев (Prúnus armeníaca) с предполагаемыми пылевидными частицами на поверхности листовых пластинок. Из каждой точки исследования отбиралось по 100 шт. листьев. Всего было отобрано 600 шт. листьев Prúnus armeníaca.

2. Из собранных листьев, как с экспериментальной территории, так и из условно чистой зоны приготовлялись водные пылевидные суспензии (смыв пыли с листьев). Для этого листья деревьев Prúnus armeníaca в количестве 100 шт. с экспериментальной территории и 100 шт. из условно чистой зоны помещали в стеклянные емкости с дистиллированной водой объемом по 1500 мл, перемешивали их там в течение 2…3 мин, затем аккуратно пинцетом листья отбирали из стеклянных емкостей и получали водные суспензии с содержанием пылевидных частиц. Всего было приготовлено по 6 л водных

пылевидных суспензий для каждой точки исследования, как с экспериментальной территории, так и по 6 л водных пылевидных суспензий для точек из условно чистой зоны.

3. Чашки Петри диаметром 10 см для каждой точки исследования стерилизовали кипячением в воде по 40 мин. Укладывали на дно чашек Петри фильтровальную бумагу. В каждую чашку Петри наливали приготовленные водные пылевидные суспензии объемом по 5 мл из емкости в 1,5 л из каждой точки исследования, как с экспериментальной так и из условно чистой зоны. Серия для каждой точки исследования состояла из трех опытов. Одновременно было приготовлено 36 шт. чашек Петри (1 точка исследования = 3 чашки Петри). В каждую чашку Петри аккуратно и равномерно пинцетом укладывали на фильтровальную бумагу по 50 штук семян кресс-салата Lepidium sativum. При этом соблюдалось условие, чтобы уровень жидкости в чашках Петри был ниже поверхности семян. Пример укладки семян кресс-салата в чашке Петри изображен на рис. 3.

Рис. 3. Пример укладки 50 семян кресс-салата (Lepidium sativum) в чашке Петри

На рисунке 4, *а, б* показано состояние проросших семян в одной из чашек Петри из условно чистой зоны через 24 ч и 72 ч соответственно.

а

б

Рис. 4. Рост семян кресс-салата (Lepidium sativum) в чашке Петри из условно чистой зоны: *а* — через 24 ч; *б* — 72 ч

При измерении длины корней проросших семян кресс-салата наибольшее значение составило 6 см и более. Пример измерения длины корня проросшего семени кресс-салата (Lepidium sativum) приведен на рис. 5.

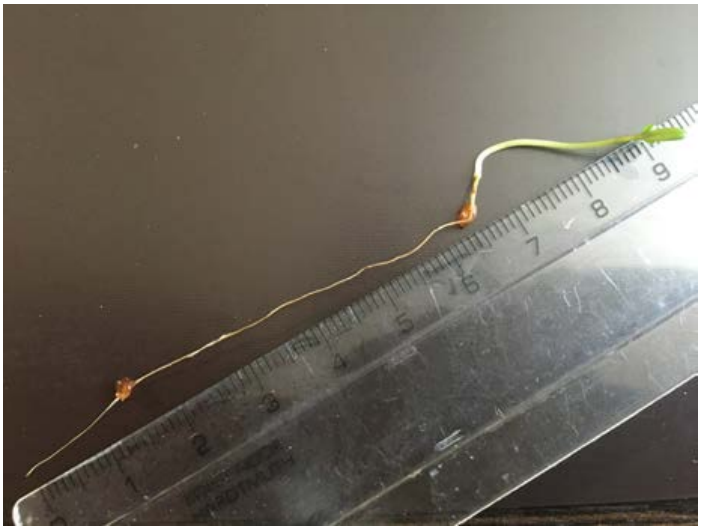


Рис. 5. Измерение длины корней проросших семян кресс-салата Lepidium sativum

В таблице 1 приведены описательные статистики средней длины корней проросших и не проросших 50 семян кресс-салата (Lepidium sativum) через 72 ч в каждой из 18 чашек Петри, обработанные в программе Statistica13.3.

Проверка воспроизводимости полученных результатов из условно чистой зоны проводилась с помощью теста Крускалл — Уоллиса в пакете программ R 4.0.3 для Windows (табл. 2):

Таблица 1

Описательные статистики средней длины корней проросших и не проросших 50 семян Lepidium sativum из 18 чашек Петри через 72 ч проращивания (условно чистая зона)

	Описательные статистики											
Переменна	N набл	Средне	Медиан	Мода	Частот моды	Миниму	Максим	Дисперси	Ст.откл	Коэф.Ва	Станд. ошибки	Эксцес
Lr1	5(	4,7020	5,0500	4,8000	4	0,0000	7,5000	2,9638	1,7215	36,614	0,2434	1,140
Lr2	5(	5,7160	6,0500	6,8000	4	0,0000	8,3000	3,8291	1,9568	34,234	0,2767	2,492
Lr3	5(	4,9500	5,1000	5,2000	6	1,0000	6,8000	1,0437	1,0216	20,639	0,1444	4,131
Lr4	5(	5,7440	6,0000	7,0000	4	0,5000	8,2000	2,8421	1,6858	29,349	0,2384	1,267
Lr5	5(	4,3160	4,4000	5,0000	5	0,0000	7,5000	2,0760	1,4408	33,384	0,2037	3,265
Lr6	5(	4,4420	5,0000	5,0000	5	0,0000	7,1000	2,9167	1,7078	38,447	0,2415	0,259
Lr7	5(	4,8120	4,9000	5,5000	4	0,0000	8,0000	3,1447	1,7733	36,852	0,2507	1,655
Lr8	5(	4,4420	5,0000	Множе	4	0,0000	8,0000	4,1261	2,0312	45,729	0,2872	0,087
Lr9	5(	4,5260	5,1500	0,0000	6	0,0000	7,3000	4,1027	2,0255	44,753	0,2864	0,659
Lr10	5(	3,7400	4,4500	Множе	4	0,0000	6,6000	4,7787	2,1860	58,450	0,3091	-1,125
Lr11	5(	4,1980	5,0500	0,0000	7	0,0000	6,8000	4,2875	2,0706	49,324	0,2928	0,014
Lr12	5(	4,6780	5,0000	Множе	4	0,0000	7,2000	2,4005	1,5493	33,120	0,2191	2,380
Lr13	5(	4,1660	5,0000	Множе	4	0,0000	6,8000	3,7035	1,9244	46,194	0,2721	0,188
Lr14	5(	4,8700	5,1500	Множе	4	0,0000	8,2000	4,1572	2,0389	41,867	0,2883	0,721
Lr15	5(	4,9220	5,0500	Множе	4	0,0000	8,3000	2,9217	1,7093	34,728	0,2417	1,153
Lr16	5(	4,7800	5,0500	4,4000	4	0,0000	8,0000	3,0657	1,7509	36,630	0,2476	0,650
Lr17	5(	3,9840	4,3500	Множе	4	0,0000	8,2000	6,2948	2,5089	62,975	0,3548	-1,072
Lr18	5(	4,7420	4,8000	Множе	4	0,0000	7,6000	2,3155	1,5216	32,089	0,2152	1,192

Таблица 2

Проверка воспроизводимости полученных результатов из условно чистой зоны

χ^2	Число степеней свободы	*P*-value
19,564	d*f* = 15	0,1893

Таким образом, при уровне значимости α = 0,05 гипотеза об однородности выборок признается значимой. Следовательно, все выборки взяты из одной генеральной совокупности, могут быть объединены в одну и оцениваться по показателю фитотоксичности ($T_ф$, %).

В таблице 3 приведены описательные статистики средней длины корней семян кресс-салата (Lepidium sativum) из объединенной выборки проросших и не проросших семян из 18 чашек Петри через 72 ч проращивания (условно чистая зона).

Таблица 3

Описательные статистики средней длины корней семян Lepidium sativum из объединенной выборки проросших и не проросших 900 семян из 18 чашек Петри через 72 ч проращивания (условно чистая зона)

Параметр	Значение
Среднее	4,516875
Стандартная ошибка	0,065663817
Медиана	5
Мода	5,1
Стандартное отклонение	1,857253206
Дисперсия выборки	3,449389471
Эксцесс	0,545409152
Асимметричность	–0,919193211
Интервал	8,3
Минимум	0
Максимум	8,3

На рисунке 6 отображена гистограмма распределения длин корней корней семян кресс-салата (Lepidium sativum) (условно чистая зона)

Рис. 6. Гистограмма распределения длин корней корней семян Lepidium sativum (условно чистая зона)

Проверка значений на нормальность тестом Колмогорова — Смирнова в модификации Лиллиефорса, показала, что данные не имеют нормального распределения (табл. 4).

Таблица 4

Проверка на нормальность тестом Колмогорова — Смирнова в модификации Лиллиефорса (условно чистая зона)

D	*P*-value
0,14602	$2{,}2 \cdot 10^{-16}$

Описательные статистики средней длины корней проросших и не проросших 50 семян кресс-салата из 18 чашек Петри через 72 ч проращивания (экспериментальная территория) отображены в табл. 5.

Таблица 5

Описательные статистики средней длины корней проросших и не проросших 50 семян Lepidium sativum из 18 чашек Петри через 72 ч проращивания (экспериментальная территория)

	Описательные статистики											
Переменна	N набл	Средне	Медиан	Мода	Частот моды	Миниму	Максим	Дисперси	Ст.откл	Коэф.Ва	Станд. ошибк	Эксцес
Lr1	5(	3,9820	4,6500	5,2000	5	0,0	6,6000	3,4276	1,8513	46,493	0,2618	0,131
Lr2	5(	3,5620	4,5500	0,0000	7	0,0	8,0000	5,2983	2,3018	64,621	0,3255	-1,208
Lr3	5(	3,6260	4,4500	Множе	5	0,0	6,6000	4,4272	2,1041	58,028	0,2975	-1,009
Lr4	5(	3,3120	4,1500	0,0000	8	0,0	6,6000	4,8782	2,2086	66,686	0,3123	-1,364
Lr5	5(	3,7740	4,3000	0,0000	7	0,0	8,0000	4,7219	2,1730	57,578	0,3073	-0,647
Lr6	5(	4,0280	4,4000	Множе	4	0,0	7,5000	2,9530	1,7184	42,662	0,2430	0,533
Lr7	5(	3,5920	4,0000	0,0000	6	0,0	6,6000	4,0787	2,0195	56,224	0,2856	-0,944
Lr8	5(	4,6000	5,0000	5,2000	5	0,0	6,7000	1,8138	1,3468	29,278	0,1904	3,996
Lr9	5(	3,6600	4,4000	0,0000	9	0,0	8,0000	4,7563	2,1809	59,587	0,3084	-0,811
Lr10	5(	3,7160	4,4000	4,8000	7	0,0	6,6000	3,6115	1,9004	51,141	0,2687	-0,497
Lr11	5(	3,5700	4,7000	0,0000	11	0,0	6,8000	5,6796	2,3832	66,756	0,3370	-1,314
Lr12	5(	4,3220	5,0500	0,0000	6	0,0	6,6000	3,8425	1,9602	45,355	0,2772	0,495
Lr13	5(	4,2960	5,1500	0,0000	8	0,0	7,3000	5,1493	2,2692	52,821	0,3209	-0,391
Lr14	5(	3,8600	4,8000	0,0000	7	0,0	7,0000	4,9710	2,2295	57,761	0,3153	-0,889
Lr15	5(	3,5680	4,3000	0,0000	7	0,0	6,8000	4,4687	2,1139	59,247	0,2989	-0,905
Lr16	5(	3,9240	4,6000	0,0000	7	0,0	7,5000	3,5969	1,8965	48,332	0,2682	0,330
Lr17	5(	3,2040	3,9000	0,0000	13	0,0	6,0000	4,4505	2,1096	65,844	0,2983	-1,169
Lr18	5(	3,5320	4,4000	Множе	5	0,0	7,1000	5,2458	2,2903	64,846	0,3239	-1,341

Проверка воспроизводимости полученных результатов из экспериментальной территории была осуществлена с помощью теста Крускалл — Уоллиса и отражена в табл. 6.

Таблица 6

Проверка воспроизводимости полученных результатов из экспериментальной территории с помощью теста Крускалл — Уоллиса

χ^2	Число степеней свободы	*P*-value
16,1	$df = 15$	0,3755

Таким образом, при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ гипотеза об однородности выборок признается значимой. Следовательно, все выборки взяты из одной генеральной совокупности и могут быть объединены в одну.

В таблице 7 представлены описательные статистики средней длины корней семян кресс-салата из объединенной выборки проросших и не проросших 900 семян из 18 чашек Петри через 72 ч проращивания (экспериментальная территория).

Таблица 7

Описательные статистики средней длины корней семян Lepidium sativum из объединенной выборки проросших и не проросших семян из 18 чашек Петри через 72 ч. проращивания (экспериментальная территория)

Параметр	Значение
Среднее	3,719375
Стандартная ошибка	0,073244
Медиана	4,5
Мода	0
Стандартное отклонение	2,071648
Дисперсия выборки	4,291727
Эксцесс	–0,77469
Асимметричность	–0,67883
Интервал	8
Минимум	0
Максимум	8

На рисунке 7 отображена гистограмма распределения длин корней корней семян кресс-салата (Lepidium sativum) (экспериментальная зона).

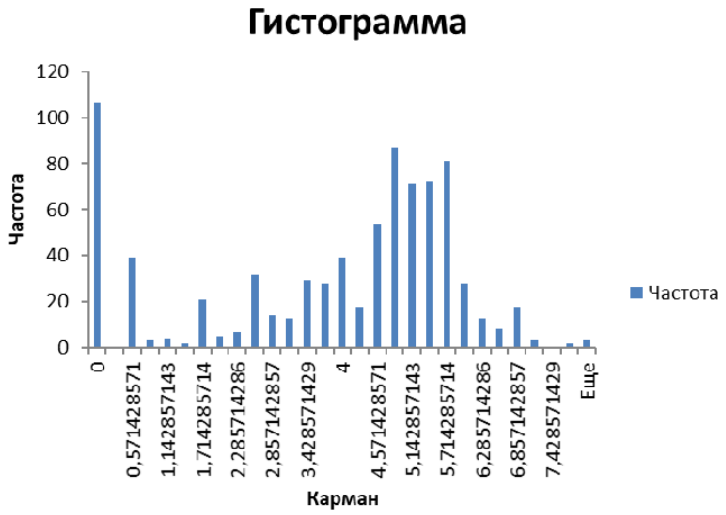


Рис. 7. Гистограмма распределения длин корней корней семян Lepidium sativum (экспериментальная зона)

Проверка на нормальность тестом Колмогорова — Смирнова в модификации Лиллиефорса, показала, что данные с экспериментальной территории не имеют нормального распределения (табл. 8).

Таблица 8

Проверка на нормальность тестом Колмогорова — Смирнова в модификации Лиллиефорса (экспериментальная территория)

D	P-value
0,16048	$2{,}2 \cdot 10^{-16}$

Сравнение выборок с экспериментальной территории и из условно чистой зоны

Согласно заявки на патент, нам необходимо найти разницу средних значений двух выборок (условно чистая зона и экспериментальная территория). Поскольку выборка имеет большой объем ($N = 800$), то, согласно закону больших чисел П. Л. Чебышева, ее среднее значение имеет нормальное распределение. Следовательно, к оценке разности средних выборочных применим t-критерий Стьюдента. Кроме того, в статистике еще одной существенной мерой средних является медиана. Она, как правило, применяется в непараметрических тестах для сравнения двух выборок с неизвестным распределением. Поэтому оценка разности медиан двух выборок будет более точно характеризовать разницу между двумя выборками для несимметричных распределений. Оценка разницы средних значений двух выборок (условно чистая зона и экспериментальная территория) с помощью критерия Стьюдента приведена в табл. 9.

Таблица 9

Оценка разницы средних значений двух выборок (условно чистая зона и экспериментальная территория) с помощью критерия Стьюдента

Среднее значение (условно чистая зона)	Среднее значение (экспериментальная зона)	$t_{расч}$	$t_{крит}$	Нижняя граница 95 % интервала	Значение разности	Верхняя граница 95 % интервала
4,516875	3,719375	8,1	2,36	0,5649	0,7975	1,0301

Исходя из значений табл. 9, расчетное значение критерия Стьюдента больше чем критическое, соответственно разница средних значений признается значимой.

Тогда значение индекса фитотоксичности:

$$T_ф = 0{,}7975/(4{,}516875) \cdot 100\ \% = 17{,}65\ \%$$

с доверительным интервалом (12,5 %; 22,8 %).

Поскольку распределения не являются нормальными и имеют некоторую асимметрию, сравним разности медиан по критерию Манна — Уитни (табл. 10).

Так как значение P-value < 0,05, то длины корней из рассматриваемых выборок статистически значимо различаются. Истинная разница длин корней с вероятностью 95 % находится в интервале от 0,6499 до 1,05 см.

Тогда значение индекса фитотоксичности, рассчитанное для значений, полученных по критерию Манна — Уитни,

$T_ф = 0{,}8499/(4{,}516875) \cdot 100\% = 18{,}81$ %

с доверительным интервалом (14,3 %; 23,24 %).

Значения индексов $T_ф$, расчитанные для средних и для медиан имеют небольшую разницу и лежат в одном уровне фитотоксичности, что говорит о равнозначности подходов к оценке разностей выборок длин корней высших растений.

Таблица 10

Оценка разницы медиан двух выборок (условно чистая зона и экспериментальная территория) с помощью критерия Манна — Уитни

Расчетное значение критерия	*P*-value	Нижняя граница 95 % интервала	Псевдо-медиана индивидуальных разниц	Верхняя граница 95 % интервала
198176	$9{,}27 \cdot 10^{-15}$	0,6499	0,8499	1,05

Обсуждение полученных результатов

Исследование токсичности атмосферного воздуха по реакции прорастания семян высших растений на примере семян кресс-салата Lepidium sativum позволило прийти к выводу, что атмосферный воздух р. п. Средняя Ахтуба Среднеахтубинского района Волгоградской области за период с апреля по сентябрь 2018 г. по индексу фитотоксичности ($T_ф$, %) возможно соответствует 1-му уровню или слабому загрязнению атмосферы территории и токсичности воздуха. Ранее в данном населенном пункте в водных пылевидных суспензиях (смыв пыли с листьев абрикосовых деревьев Prunus Armeniaca) в тот же период (начало октября 2018 г.) авторами была выявлена кислая среда (pH = 4,6…5,5) с высокой удельной электропроводностью (47,1…80,72 мкСм/см) по сравнению с контрольной условно чистой зоной (pH = 6,3; EC = 38,1 мкСм/см), что говорит о наличии в пылевидных частицах тяжелых металлов и/или кислотных оксидов, и/или сероводорода и других веществ, которые могли попасть из атмосферного воздуха. Это свидетельствует об определенных экологических рисках для окружающей среды и здоровья человека [10].

При этом, по мнению некоторых авторов, определенные загрязняющие вещества, могут обладать не ингибирующим действием по отношению к росту и развитию семян тест-объектов, а наоборот стимулирующим, что может сформировать ложное представление о слабом загрязнении атмосферы и токсичности воздуха на исследуемой территории. Такой факт был подмечен Е. Н. Елизарьевой и др., например, для марганца и железа на примере роста и развития семян редиса. В этой связи авторы увидели, что некоторый стимулирующий эффект оказывает раствор Mn и Fe в области концентраций от 80 Mn/48 Fe до 300 Mn/180 Fe мг/л, при увеличении концентраций выше 500 Mn/250 Fe мг/л наблюдается угнетение проростков [11]. Подобный факт был отмечен и другими учеными, которые исследовали влияние концентрации и природы металлов на длину корневых проростков пшеницы. Так, А. В. Рязанов и др. доказали, что такие элементы, как кобальт, цинк, висмут также в зависимости от концентрации могут оказывать стимулирующее действие на длину корней проростков пшеницы [12]. M. Iqbal и соавторы в своем исследовании указали на то, что дым оказывает стимулирующее действие на

прорастание непропитанных семян, в то время как он может оказывать ингибирующее действие на пропитанные семена пшеницы [13].

Также не менее интересный факт был выявлен исследователями А. Л. Штробля, Л. С. Фира в отношении уникальных свойств листьев абрикосовых деревьев, которые, по их мнению, проявляют антиоксидантные свойства, а проведенные ими исследования позволяют утверждать, что сухой экстракт из листьев абрикоса нормализует окислительные процессы в организме пораженных тетрахлорметаном животных, оказывает стабилизирующее влияние на плазматические мембраны гепатоцитов, положительное действие на антиоксидантную систему. Все это указывает на то, что экстракту присущи гепатопротекторные свойства [14]. Таким образом, не исключено, что пылевидные частицы с включенными в них различными токсическими веществами из атмосферного воздуха р. п. Средняя Ахтуба, попав на листовые пластинки абрикосовых деревьев в силу их особых свойств антиоксидантного действия могли быть ими нейтрализованы.

В этой связи полученные авторами результаты требуют дальнейших исследований и уточнений.

Вывод

Индекс фитотоксичности составил: 17,65 % (для средних) и 18,81 % (для медиан), что что соответствовало 1-му уровню фитотоксичности или слабому загрязнению атмосферы территории и токсичности воздуха. Из чего можно сделать вывод о том, что водные пылевидные суспензии из р. п. Средняя Ахтуба (смыв пыли с листьев абрикосовых деревьев, экспериментальная территория) не обладают ингибирующим действием и не содержат веществ-токсикантов, которые могут представлять опасность для окружающей среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Глинянова И. Ю.* Экологическая безопасность городской агломерации с позиции фитомониторинга // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. № 2(75). С. 171—181.

2. Об оценке концентрации мелокдисперсной пыли (PM10 и PM2,5) в воздушной среде / В. Н. Азаров, И. В. Тертишников, Е. А. Калюжина, Н. А. Маринин.// Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2011. Вып. 25(44). С. 402—406.

3. *Кубрина Л. В.* Анализ токсической активности снеговых проб в серии первичного скрининга на растительной клетке (кресс-салата (Lepidium Sativum) // Омский научный Вестник. 2011. № 1(104). С. 183—185.

4. *Русинова Н. В.* Определение качества снежного покрова по его индексу токсичности // Естественные и математические науки в современном мире. 2013. № 8. С. 102—106.

5. *Alves D. D.* Source apportionment of metallic elements in urban atmospheric particulate matter and assessment of its water-soluble fraction toxicity // Environmental Science and Pollution Research. 2020. Vol. 27. Iss. 11. Pp. 12202—12214. DOI: 10.1007/s11356-020-07791-8.

6. *Семенова И. Н.* Использование растительных тест-систем для оценки токсичности донных отложений // Вестник Оренбургского государственного университета. 2015. № 10(185). С. 232—235.

7. *Еськова Е. Н., Кириенко Н. Н.* Оценка экотоксичности почвенного покрова окрестностей г. Красноярска методом фитотестирования // Вестник КрасГАУ. 2017. № 5. С. 105—111.

8. *Charles J.* Evaluation of the phytotoxicity of polycontaminated industrial effluents using the lettuce plant (Lactuca sativa) as a bioindicator // Ecotoxicology and Environmental Safety. 2011. Vol. 74. Iss. 7. Pp. 2057—2064. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2011.07.025.

9. *Chandra T. S.* Wet air oxidation pretreatment of biomethanated distillery effluent: Mapping pretreatment efficiency in terms color, toxicity reduction and biogas generation // Bioresource Technology. 2014. Vol. 158. Pp. 135—140. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.01.106.

10. *Глинянова И. Ю.* Оценка загрязнения окружающей среды примесями кислых или щелочных веществ с одновременной оценкой их удельной электрической проводимости // Инженерный Вестник Дона. 2019. № 6.

11. *Елизарьева Е. Н.* Влияние соединений некоторых тяжелых металлов на процесс формирования проростков редиса // Современные проблемы науки и образования. 2017. № 6. С. 252.

12. *Рязанов А. В.* Влияние соединений некоторых тяжелых металлов на процесс формирования проростков пшеницы // Вестник ТГУ. 2009. Т. 14. Вып. 1. С. 196—197.

13. *Iqbal M.* Effect of Plant Derived Smoke on Germination and Post Germination Expression of Wheat (Triticum aestivum L.) // American Journal of Plant Sciences. 2016. Vol. 7. Iss. 6. Pp. 806—813. DOI: 10,4236 / ajps.2016.76075.

14. *Штробля А. Л., Фира Л. С.* Изучение гепатозащитных свойств сухого экстракта из листьев абрикоса обыкновенного на модели поражения печени тетрахлорметаном // Вестник РАМН. 2013. № 3. С. 68—72.

© Глинянова И. Ю., Фомичев В. Т., Асанова Н. В., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Глинянова И. Ю., Фомичев В. Т., Асанова Н. В. Оценка токсичности атмосферного воздуха в обеспечении экологической безопасности населенных пунктов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 184—199.

Об авторах:

Глинянова Ирина Юрьевна — канд. пед. наук, доц. каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; ecoris@yandex.ru

Фомичев Валерий Тарасович — д-р техн. наук, проф., проф. каф. общей и неорганической химии, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; cand@vstu.ru

Асанова Наталия Васильевна — канд. техн. наук, доц. каф. прикладной математики, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; natali_as@mail.ru

Irina Yu. Glinyanova, Valerii T. Fomichev, Nataliya V. Asanova

Volgograd State Technical University

ASSESSMENT OF THE TOXICITY OF ATMOSPHERIC AIR IN ENSURING THE ENVIRONMENTAL SAFETY OF SETTLEMENTS

The study was devoted to the assessment of the toxicity of atmospheric air from April to September 2018 in the settlement Srednyaya Akhtuba of the Sredneakhtubinsky district of the Volgograd region by the reaction of germination of seeds of higher plants. The seeds of watercress (Lepidium sativum) were used as test objects. The nutrient medium for the development of seeds of watercress (Lepidium sativum) was water powder-like suspensions (washing off of dust with distilled water from the leaves of apricot trees (Prúnus armeníaca)), which could contain pollutants-toxicants from the air of Srednyaya Akhtuba. After 72 hours, the length of roots (Lr, cm) of germinated seeds was measured as a reaction of test objects to pollutants, as a result of which the level of air pollution or phytotoxicity index (Tf, %) was estimated. As a result of the studies carried out, the 1st level of phytotoxicity (Tf = 18.7 %) of aqueous dust-like suspensions was revealed, which corresponds to very low atmospheric pollution and air toxicity. From which it can be concluded that the dust particles in the aqueous dust suspensions from the Srednyaya Akhtuba river do not have an inhibitory effect and do not con-

tain toxic substances that can pose a danger to the environment and the population living there. The results obtained ensure the accuracy of the ecological assessment of the environment. The implementation of a new method for assessing the toxicity of atmospheric air in settlements over a period of several seasons clearly demonstrates the ecological situation in the study area and can be successfully used in monitoring the atmospheric air of urban and rural settlements by municipal environmental services.

K e y w o r d s: toxicity, phytotoxicity index, test objects, toxicants, monitoring, pollutants, environmental situation, atmospheric air, seeds of watercress (Lepidium sativum).

For citation:

Glinyanova I. Yu., Fomichev V. T., Asanova N. V. [Assessment of the toxicity of atmospheric air in ensuring the environmental safety of settlements]. *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], 2021, iss. 1, pp. 184—199.

About authors:

Irina Yu. Glinyanova — Candidate of Pedagogics, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ecoris@yandex.ru

Valerii T. Fomichev — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd**,** 400074, Russian Federation; cand@vstu.ru

Nataliya V. Asanova — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University. (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd**,** 400074, Russian Federation; natali_as@mail.ru

УДК 504.3(470.45)

И. Ю. Глинянова, В. Т. Фомичев, Н. В. Асанова

Волгоградский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОКСИЧНОСТИ АТМОСФЕРНОГО ВОЗДУХА В ПОСЕЛКЕ КИЛЯКОВКА СРЕДНЕАХТУБИНСКОГО РАЙОНА ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Исследование посвящено оценке токсичности атмосферного воздуха с помощью индекса фитотоксичности водных пылевидных суспензий — смывов пыли с листьев ивы белой (Salixalba L.), отобранных в п. Киляковке Среднеахтубинского района Волгоградской области, рассчитанного на основе реакции прорастания семян высших растений (заявка на патент № 2020128981 от 02.09.2020). В результате был выявлен 3-й уровень загрязнения атмосферного воздуха и его токсичности (сильное загрязнение), где $T_ф = 74{,}75$ %.

Полученные результаты позволяют спрогнозировать наличие веществ-токсикантов в пылевидных частицах атмосферного воздуха, которые способствуют ингибированию развития проростков семян (длины корней L_x, см) кресс-салата (Lepidium sativum). В этой связи требуется уточнение полученных данных, дальнейшее наблюдение и осуществление ежегодного мониторинга атмосферного воздуха в п. Киляковке, в т. ч. исследование загрязняющих веществ в пылевидных частицах с использованием оборудования микроструктурного анализа.

К л ю ч е в ы е с л о в а: мониторинг, атмосферный воздух, пылевидные частицы, пылевидные суспензии, токсиканты, фитотоксичность, загрязняющие вещества, природное загрязнение, семяна кресс-салата (Lepidium sativum).

Введение

Благосостояние населения, проживающего на городских и сельских территориях, во многом определяется качеством атмосферного воздуха, химический состав которого может негативно отражаться на здоровье человека и вызвать у него развитие многочисленных заболеваний.

Как известно, атмосферный воздух населенных пунктов загрязнен различными веществами, наибольшую опасность из которых представляют вещества-токсиканты, которые легко адсорбируются на поверхности мелкодисперсной пыли из окружающей среды. Мониторинг токсичности атмосферного воздуха является актуальным для оценки экологической ситуации на исследуемых территориях и прогнозирования уровня жизни и здоровья проживающего там населения вследствие негативного действия токсичных веществ из атмосферы на организм человека.

В. С. Петросян, А. А. Аверочкина отразили в своей работе [1]:

- продукты неполного сгорания древесины, угля и нефтепродуктов в виде полиядерных ароматических углеводородов (ПАУ), которые вызывают в живом организме «химические стрессы», например, канцерогенез;
- пластификаторы, репелленты, растворители выделяющие фталаты, которые могут вызывать заболевания эндокринной системы;
- хлорорганические и другие пестицидные препараты способствующие появлению следующих токсичных загрязняющих веществ в окружающей среде: альдрина, атразина, гептахлора, ДДТ, дильдрина, линдана, мирекса, токсафена, хлордана, хлордекона, эндосульфана, эндрина, вызывающих биоаккумуляцию в жировых тканях организмов и в трофических цепях, поражение нервной и эндокринной систем, канцерогенез и др.

N. Islam с соавторами в своей работе [2] оценивали токсичность потенциально опасных элементов, связанных с мелкодисперсной пылью, в различных линиях клеток человека, их взаимосвязи с климатическими факторами. Они исследовали токсичность мелкодисперсной пыли, ее способность вызывать цитотоксичность и генотоксичность в организме человека, проводя анализ с помощью клеточных культур и гель-электрофореза. N. Islam с соавторами указывали [3] на роль мелкодисперсной пыли (PM10 и PM2,5) в инициировании преждевременной смерти во всем мире из-за потенциально опасных элементов (ПОЭ) и полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), которые содержатся в пыли и были обнаружены авторами при изучении твердых частиц в 25 различных местах, включая жилые и придорожные районы городских районов на северо-востоке Индии. Оценка риска для здоровья ПАУ и ПОЭ, по их мнению, оказалась выше по сравнению с другими исследованиями, проведенными по выбросам от дорожного движения в аналогичных городских районах.

С. Левшина исследовала 16 приоритетных ПАУ, которые были качественно и количественно оценены в пробах снега, отобранных на 9 станциях в г. Хабаровске и на 3 станциях Большехехцирского государственного природного заповедника. Маркеры идентифицировали пирогенные, петрогенные и смешанные источники выбросов. Количество токсичного эквивалента варьировалось в городских и заповедных зонах от 0,89 до 40,62 нг/л и от 1,01 до 2,92 нг/л соответственно [4].

A. Trusz с коллегами изучали в г. Вроцлаве (Польша) [5] мутагенность химических загрязнителей, адсорбированных на взвешенных твердых частицах с аэродинамическим диаметром < 2,5 мкм (PM2,5) в четырех сезонах года. Полученные ими значения указывали на наличие химических соединений, являющихся как промутагенами, так и прямыми мутагенами, что несет определенные риски для здоровья человека.

Li W. H. исследовал сложные фосфорорганические эфиры (OPE) в окружающей среде, источниками которых являются авиационные смазочные масла и гидравлические жидкости. Авторы обнаружили повышенные концентрации Sigma OPE в наружном воздухе, почве, хвое сосны, уличной пыли и речной воде в диапазоне 1320…20700 нг/м (3) (медиана: 3880); 1,16…73,1 (14,3) нг/г сухого веса (*dw*); 23,2…534 (102) нг/г (*dw*); 153…2140 (824) нг/г (*dw*) и 174…24,600 (1250) нг/л, соответственно. В общих концентрациях OPE в образцах воздуха, почвы, воды и уличной пыли в исследуемой области преобладали Cl-OPE, тогда как в хвое сосны преобладали арил-OPE. Пространственное распределение OPE в воздухе, почве и хвое сосны имеет тенденцию к постепенному уменьшению с увеличением расстояния от аэропорта [6].

M. Casazza с коллегами акцентировали свое внимание на новые риски для здоровья человека, связанные с нейротоксичностью металлов, находящихся в мелкодисперсной пыли и витающих в атмосферном воздухе городской среды г. Турина (Италия). Ими были рассчитаны данные о массовом распределении металлов, связанных с PM10, процентном перераспределении, связанном с респираторным аппаратом, относительных пиках концентрации, а также о предпочтительных местах осаждения и суточной вдыхаемой дозе. Их измерения свидетельствуют о преимущественной ассоциации каждого металла с различными областями респираторного аппарата [7].

Использование вольфрама в транспортных средствах, плавке, горнодобывающей промышленности и других промышленных целях позволяет ему накапливаться в экологических системах — упоминалось в исследованиях Dawood Mona F. A. Представлены убедительные доказательства токсичности вольфрамата и необходимости управления экологическими рисками накопления вольфрамата в городских средах [8].

Е. А. Бондаревич осуществляла мониторинг городских осадков и анализировала загрязнение снежного покрова г. Читы (Забайкалье) тяжелыми металлами (Zn, Cd, Pb, Cu), сопоставляла данное загрязнение с аналогичными показателями в городах соседних регионов. Ею было установлено, что общий индекс загрязнения Z(C) = 72,5, с учетом токсичности химических элементов Z(CT) = 98,8, показывает, что геохимические условия в Чите находятся на среднем уровне, а по индексу суммарной нагрузки Z(P) = 493,5 фракция пыли характеризует урбанизированную территорию Читы как сильно загрязненную, и в данном случае кадмий (Cd = 255,47) является основным загрязнителем [9].

А. Ялалтдинова определяла токсиканты в элементном составе индикаторных растений на примере листьев тополя, произрастающих в г. Усть-Каменогорске (Казахстан). По ее мнению, наибольшее токсическое воздействие на человека и экосистемы наблюдается в зоне воздействия свинцово-цинкового завода «Казцинк», и Ульбинского металлургического комбината. При этом выбросы цинка вносят наибольший вклад в индекс токсичности (около 99 %) городской среды[10].

Из проанализированных работ можно сделать вывод о том, что исследование токсичности атмосферного воздуха в населенных пунктах происходило на основании определения химических элементов в пылевидных частицах окружающей среды, в снежном покрове, в элементном составе индикаторных растений и др.

Целью данного исследования явилась оценка токсичности водных пылевидных суспензий (смыв пыли с листьев растений), отобранных в п. Киляковка Среднеахтубинского района Волгоградской области по реакции прорастания семян высших растений на примере семян кресс-салата (Lepidium sativum).

Задачи исследования заключались:

- в выборе территории и материала исследования;
- отборе листьев древесных форм растений;
- приготовлении водных пылевидных суспензий;
- проращивании семян Lepidium sativum в термостате на субстрате водных пылевидных суспензий;
- измерении длины корней проросших семян и исследовании показателя фитотоксичности ($T_ф$, %);
- оценке токсичности атмосферного воздуха в п. Киляковка Среднеахтубинского района Волгоградской области.

Материалы и методы

Материалом исследования послужили водные пылевидные суспензии (смыв) пыли с листьев ивы белой Salixalba L. Биотестами выступали семена кресс-салата Lepidium sativum сорта «Дукат» (производитель ООО «Центр-

Огородник»). Оценка фитотоксичности водных пылевидных суспензий основывалась на разработанном новом способе оценки загрязнения окружающей среды (заявка на патент № 2020128981 от 02.09.2020) по реакции прорастания семян высших растений с выявлением уровней загрязнения атмосферного воздуха, его токсичности.

В качестве экспериментальной территории для оценки токсичности атмосферного воздуха выбран п. Киляковка Среднеахтубинского района Волгоградской области и его окрестностей (рис. 1), в котором ранее было выявлено природное загрязнение [11, 12], исходящее, предположительно, из зон двойных тектонических разломов и брахиантиклинали, расположенных в основании геологического фундамента населенного пункта.

Рис. 1. Ситуационная карта населенного пункта Киляковка и его окрестностей

В качестве сравнения была выбрана территория в коттеджном поселке «Прибрежный» Советского района, г. Волгограда и его окрестностях (условно чистая зона), располагающаяся на берегу р. Волги (рис. 2).

Определение токсичности атмосферного воздуха в п. Киляковке осуществлялся в несколько стадий.

1. В сухую погоду на экспериментальной территории и в условно чистой зоне производили сбор листьев с Salixalba L. с предполагаемыми пылевидными частицами на поверхности листовых пластинок. В этой связи с одного древесного растения отбирали по 10 листьев. Каждая выборка включала по 100 листьев с 10 древесных растений (1 точка исследования), произрастающих на экспериментальной территории и 100 листьев с 10 древесных растений того же вида, произрастающих в условно чистой зоне (1 точка исследования).

2. Из листьев ивы белой (Salixalba L.) с экспериментальной территории (Э) и из условно чистой зоны (К) готовили пылевидные водные суспензии (смыв пыли с листьев). Для этого листья в количестве 100 шт. с экспериментальной территории и листья в количестве 100 шт. из условно чистой зоны

размещали в стеклянных сосудах объемом 1,5 л вместе с 1000 мл дистиллированной воды, перемешивали их стеклянной палочкой в течение 2—3 мин, затем из сосудов аккуратно отбирали пинцетом листья и получали две водные суспензии с содержанием пылевидных частиц из атмосферной среды п. Киляковки. Суспензии оставляли в тех же сосудах, в которых их готовили.

Рис. 2. Ситуационная карта коттеджного поселка «Прибрежный»

3. Чашки Петри (8 шт.) диаметром 10 см стерилизовали кипячением в воде 40 мин. Укладывали на дно чашек Петри 2 фильтровальные бумаги. В 4 чашки Петри наливали по 5 мл приготовленных водных пылевидных суспензий с экспериментальной территории, а в другие 4 чашки Петри наливали по 5 мл водной пылевидной суспензии из условно чистой зоны. В каждую чашку Петри аккуратно и равномерно пинцетом укладывали на фильтровальную бумагу по 50 шт. семян кресс-салата (Lepidium sativum) «Дукат», соблюдая условие, чтобы уровень жидкости в чашках Петри был ниже поверхности семян.

На рисунке 3 представлены образцы группы чашек Петри с субстратом водных пылевидных суспензий из условно чистой зоны, с семенами кресс-салата «Дукат». Все чашки Петри закрывались покровными стеклами и помещали в термостат при температуре 20 °С на 72 ч[1].

4. Через 72 ч измеряли длину корней (L_x,см) проростков, выращенных на субстрате из условно чистой зоны и на субстрате с экспериментальной территории, и затем рассчитывали уровень фитотоксичности водных пылевидных суспензий по формуле: $Т_ф = (L_к – L_э/L_к) \times 100$, чтобы определить уровень загрязнения атмосферного воздуха и его токсичности.

Образцы пророщенных семян кресс-салата «Дукат» через 72 ч на субстратах из условно чистой зоны и с экспериментальной территории представлены на рис. 4, 5 соответственно.

[1] ГОСТ 120 38-84 «Семена сельскохозяйственных культур. Методы определения всхожести». С. 10. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200023365.

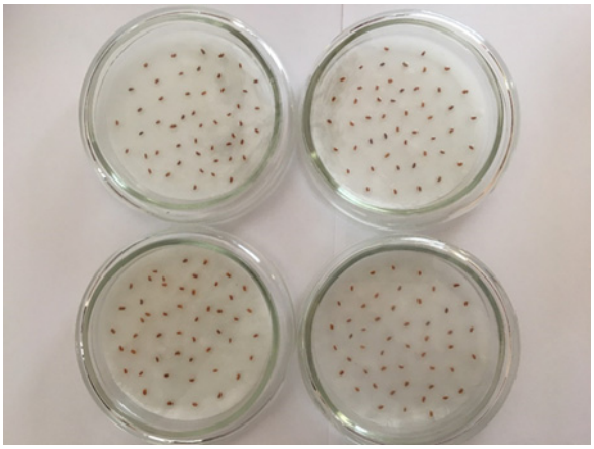


Рис. 3. Образцы группы чашек Петри с субстратом водных пылевидных суспензий из условно чистой зоны с семенами кресс-салата «Дукат»

Рис. 4. Проростки семян кресс-салата на субстрате из условно чистой зоны через 72 ч

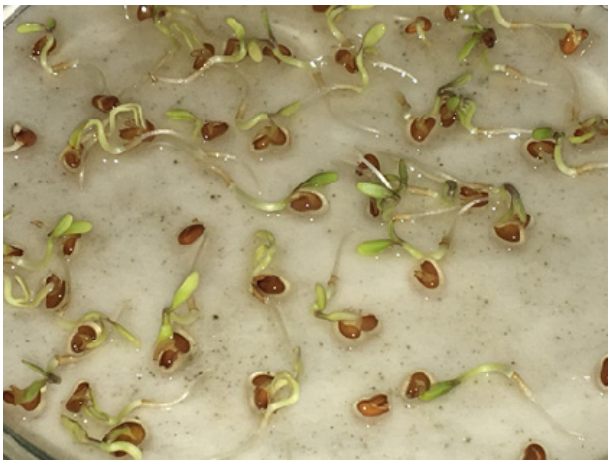


Рис. 5. Проростки семян кресс-салата на субстрате с экспериментальной территории через 72 ч

Как видно из рис. 5, проростки семян кресс-салата (Lepidium sativum) «Дукат», выращенные на субстрате с экспериментальной территории, и длины их корней через 72 ч позволяют говорить об их недостаточном развитии, заторможенности в росте по сравнению с условно чистой зоной (см. рис. 4).

Длины проростков из семян кресс-салата из условно чистой зоны получились в 4 раза больше по сравнению с проростками, выращенными на субстрате с экспериментальной территории. Иллюстрация проростков таких семян в сравнении отражена на рис. 6, где продемонстрированы в качестве примера длины корней проросших семян кресс-салата «Дукат», выросшие на субстрате из условно чистой зоны (корень хорошо развит и достигает более 4 см) и на субстрате с экспериментальной территории (корень не более 1 см).

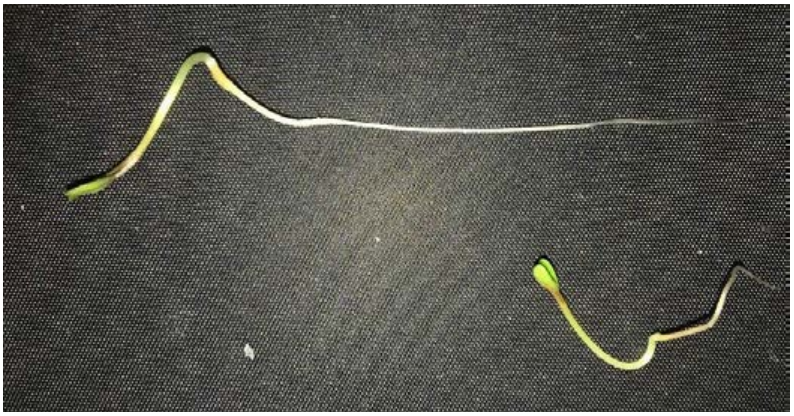


Рис. 6. Корни проростков семян кресс-салата через 72 ч на субстратах с экспериментальной территории (не более 2 см) в сравнении с условно чистой зоной (> 3…4 см)

Результаты исследования и обсуждение

1. Результаты измерений длины корней ($L_к$) проросших семян кресс-салата (Lepidium sativum) «Дукат» на субстрате водных пылевидных суспензий (смыв пыли с листьев ивы белой Salixalba L.) из условно чистой зоны проверялись на воспроизводимость с помощью теста Краскела — Уоллиса (*H*-критерий, табл. 1).

Таблица 1

Результаты проверки измеренных длин корней ($L_к$) проросших семян кресс-салата на субстрате водных пылевидных суспензий в чашках Петри из условно чистой зоны с помощью теста Краскела — Уоллиса (H-критерий)

χ^2	Число степеней свободы	*P*-value
1,67	$df = 5$	0,892

Таким образом, при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ гипотеза об однородности выборок признается значимой. Следовательно, все выборки взяты из одной генеральной совокупности, могут быть объединены в одну и оцениваться по показателю фитотоксичности ($T_ф$, %).

В таблице 2 приведены описательные статистики средней длины корней ($L_к$) семян кресс-салата из объединенной выборки проросших и не проросших семян из чашек Петри через 72 ч проращивания (условно чистая зона).

Таблица 2

Описательные статистики средней длины корней ($L_к$) из объединенной выборки проросших и не проросших семян Lepidium sativum

Параметр	Значение
Среднее	3,991
Стандартная ошибка	0,045
Медиана	4
Мода	3,9
Стандартное отклонение	0,784
Дисперсия выборки	0,616
Эксцесс	1,323
Асимметричность	0,021
Интервал	4,8
Минимум	1,5
Максимум	6,3

Проверка полученных значений средней длины корней ($L_к$) семян кресс-салата, проросших на субстрате из условно чистой зоны, на нормальность тестом Колмогорова — Смирнова в модификации Лиллиефорса показала, что данные не имеют нормального распределения (табл. 3).

Таблица 3

Проверка значений средней длины корней (Lк) семян кресс-салата (Lepidium sativum) на нормальность тестом Колмогорова — Смирнова в модификации Лиллиефорса

D	*P*-value
0,105	$1{,}26 \cdot 10^{-8}$

2. Результаты измерений длины корней ($L_э$) проросших семян кресс-салата на субстрате водных пылевидных суспензий (смыва) пыли с листьев ивы белой (Salixalba L.) с экспериментальной территории проверялись также с помощью теста Краскела — Уоллиса (*H*-критерий, табл. 4).

Таблица 4

Результаты проверки измеренных длин корней ($L_к$) проросших семян кресс-салата на субстрате водных пылевидных суспензий с экспериментальной территории с помощью теста Краскела — Уоллиса (H-критерий)

χ^2	Число степеней свободы	*P*-value
4,289	$df = 5$	0,509

Таким образом, при уровне значимости $\alpha = 0{,}05$ гипотеза об однородности выборок признается значимой. Следовательно, все выборки взяты из одной генеральной совокупности, могут быть объединены в одну и оцениваться

по показателю фитотоксичности ($Т_ф$, %) также как и выборки из условно чистой зоны.

В таблице 5 приведены описательные статистики средней длины корней ($L_э$) семян кресс-салата из объединенной выборки проросших и не проросших семян из чашек Петри через 72 ч проращивания (экспериментальная территория).

Таблица 5

Описательные статистики средней длины корней ($L_э$) из объединенной выборки проросших и не проросших семян Lepidium sativum

Параметр	Значение
Среднее	0,999
Стандартная ошибка	0,011
Медиана	1
Мода	1
Стандартное отклонение	0,194
Дисперсия выборки	0,038
Эксцесс	–0,725
Асимметричность	0,109
Интервал	0,8
Минимум	0,6
Максимум	1,4

Проверка полученных значений средней длины корней ($L_к$) семян кресс-салата, проросших на субстрате с экспериментальной территории, на нормальность тестом Колмогорова — Смирнова в модификации Лиллиефорса, показала, что данные не имеют нормального распределения (табл. 6).

Таблица 6

Проверка значений средней длины корней (Lк) семян кресс-салата (Lepidium sativum) на нормальность тестом Колмогорова — Смирнова в модификации Лиллиефорса

D	*P*-value
0,148	$2{,}2 \cdot 10^{-16}$

Исходя из разработанного способа оценки токсичности атмосферного воздуха по реакции прорастания семян высших растений (заявка на патент № 2020128981 от 02.09.2020), необходимо найти разницу средних значений двух выборок (условно чистая зона и экспериментальная территория). Поскольку выборка имеет большой объем (N = 150), то согласно закона больших чисел П. Л. Чебышева, ее среднее значение имеет нормальное распределение. Следовательно, к оценке разности средних выборочных применим *t*-критерий Стьюдента (табл. 7). Кроме того, в статистике еще одной существенной мерой средних является медиана. Она обычно применяется в непараметрических тестах для сравнения двух выборок с неизвестным распределением. Поэтому оценка разности медиан двух выборок будет точнее характеризовать разницу между двумя выборками для несимметричных распределений.

Таблица 7

Оценка разницы средних значений двух выборок (условно чистая зона и экспериментальная территория) с помощью критерия Стьюдента

Среднее значение длины корней ($L_к$, см)	Среднее значение длины корней ($L_э$, см)	$t_{расч}$	$t_{крит}$	Нижняя граница 95 % интервала	Значение разности	Верхняя граница 95 % интервала
3,991	0,999	64,09	1,967	2,9	2,992	3,08

Исходя из значений табл. 5, расчетное значение критерия Стьюдента больше чем критическое, соответственно разницу средних значений, признается значимой.

Тогда значение уровня фитотоксичности ($T_ф$, %):

$T_ф = 2{,}992/(3{,}991) \cdot 100\ \% = 74{,}97\ \%$ с доверительным интервалом (72,67 %; 77,27 %), что соответствует 3 уровню загрязнения и токсичности атмосферного воздуха (сильное загрязнение) в п. Киляковке Среднеахтубинского района Волгоградской области.

Поскольку распределения не являются нормальными и имеют некоторую асимметрию, сравнивали разности медиан по критерию Манна — Уитни (табл. 8).

Таблица 8

Оценка разницы медиан двух выборок (условно чистая зона и экспериментальная территория) с помощью критерия Манна — Уитни

Расчетное значение критерия	*P*-value	Нижняя граница 95 % интервала	Псевдомедиана индивидуальных разниц	Верхняя граница 95%-го интервала
45150	$2{,}2 \cdot 10^{-16}$	2,94	2,99	3,04

Так как значение *P*-value < 0,05, то длины корней из рассматриваемых выборок статистически значимо различаются. Истинная разница длин корней с вероятностью 95 % находится в интервале от 2,249 до 2,35 см.

Тогда значение $T_ф$, % рассчитанное для разности медиан, полученной по критерию Манна — Уитни, $T_ф = 2{,}99/(4) \cdot 100\ \% = 74{,}75\ \%$ с доверительным интервалом (73,5 %; 76 %).

Полученный индекс фитотоксичности ($T_ф$, %) соответствует 3-му уровню загрязнению и токсичности атмосферного воздуха территории, т. е. вероятно в пылевидных частицах на листьях ивы белой содержатся вещества, обладающие ингибирующим действием на прорастание семян кресс-салата, или токсиканты, которые могут представлять опасность для окружающей среды.

Исследованный населенный пункт Киляковка не испытывает каких-либо значительных техногенных нагрузок (рис. 7, 8) со стороны локальных индустриальных предприятий, так как на его территории и вблизи него они отсутствуют. При этом ближайший промышленный сектор находится в г. Волжском, в 10 км от п. Киляковки и при северных и северо-восточных ветрах атмосферные загрязнения могут достигать поселка. С другой стороны в 7 км на восток от п. Киляковки находятся предприятия стройиндустрии в

р. п. Средней Ахтубе, при восточных ветрах пылевидные частицы с адсорбированными загрязняющими веществами могут также попадать в атмосферный воздух п. Киляковки и его окрестностей.

Расположенная рядом с п. Киляковкой автомагистраль, в юго-восточной его части, как следует из анализа данных [11] не может способствовать антропогенному загрязнению.

Рис. 7. Ситуационная карта антропогенной нагрузки на п. Киляковка Среднахтубинского района Волгоградской области: *1* — п. Киляковка; *2* — предприятия стройиндустрии р. П. Средняя Ахтуба; *3* — промышленный сектор г. Волжского

Рис. 8. Ситуационная карта п. Киляковка и автомагистрали (желтым цветом выделены автомагистрали)

Выявленное загрязнение по всей видимости спровоцировано природным загрязнением, источником которого является скрытое рудное тело.

В пользу природного источника загрязнения уже высказывалось предположение о возможном попадании загрязняющих веществах на территорию населенного пункта Киляковки от определенных геологических структур, расположенных в основании его фундамента: Красноармейско-Паромненского грабена, Южно-Паромненской брахиантиклинали и Ахтубинского сброса [12]. Наличие этих структур способствует возможной флюидной активности Земли на исследуемом участке с выносом из недр токсичных загрязняющих веществ, которые проявили ингибирующие свойства по отношению к развитию семян кресс-салата Lepidium sativum.

При этом стоит отметить, что ранее в растительном материале в окрестностях п. Киляковки в оз. Аленушка были обнаружены тяжелые металлы. Из них металлические яды были представлены бериллием (Be) и мышьяком (As), но с небольшим превышением фона, а именно в 2…3 раза. Из 2-й группы наиболее высокие превышения отмечены у хрома (Cr) — в 20 раз, у кобальта (Co) — в 6 раз и небольшие значения превышений фона у никеля (Ni) — в 4 раза. В 3-й группе высокие превышения отмечены у ванадия (V) — в 15 раз, у стронция (Sr) — в 9 раз и у бария (Ba) — в 3 раза, а среди обнаруженных химических элементов есть все представители тяжелых металлов редкоземельной группы, содержание которых в десятки раз превышает фоновые значения. Это тулий (Tm) — в 10 раз; гольмий (Ho), лютеций (Lu) — в 12 раз, эрбий (Er) — в 14 раз; иттрий (Y), тербий (Tb) — в 15 раз; европий (Eu) — в 20 раз; неодим (Nd) — в 20 раз, гадолиний (Gd) — в 22 раза; иттербий (Yb) — в 25 раз [13].

Возможно впитанные водными растениями из оз. Аленушка природные загрязняющие вещества могут быть:

- продуктами ореола рассеивания залегающего в основании п. Килякови рудного тела, которые при выветривании поднимаются в виде пылевидных частиц в воздух;
- загрязняющими веществами эманирующих газов, флюидной активности имеющихся в поселке геологических структур.

Выводы

Исследование токсичности атмосферного воздуха в п. Киляковка Среднеахтубинского района Волгоградской области с использованием индекса фитотоксичности ($T_ф$, %) позволило выявить 3-й уровень загрязнения атмосферного воздуха и его токсичности (сильное загрязнение), $T_ф$ составляет 74,75 %.

Полученные результаты требуют уточнения, дальнейшего наблюдения и осуществления ежегодного мониторинга атмосферного воздуха в п. Киляковке, в т. ч. исследования загрязняющих веществ в пылевидных частицах с использованием оборудования микроструктурного анализа. Для точного прогнозирования наличия веществ-токсикантов в пылевидных частицах атмосферного воздуха представляется необходимым получить представление о динамике выявленных процессов загрязнения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Петросян В. С., Аверочкина А. А.* Загрязнение биогеосферы приоритетными токсикантами и его влияние на здоровье населения // Вестник РАЕН. 2013. № 5. С. 113—120.

2. *Islam N.* Atmospheric particulate matters in an Indian urban area: Health implications from potentially hazardous elements, cytotoxicity, and genotoxicity studies // Journal of Hazardous Materials. 2020. Vol. 384. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.121472.

3. *Islam N.* Atmospheric particulate matter and potentially hazardous compounds around residential/road side soil in an urban area // Chemosphere. 2020. Vol. 259. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127453.

4. *Levshina S.* Distribution and Characteristic of PAHs in snow of the Urban and Reserve Areas of Southern Far East Russia // Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology. 2019. Vol. 102. Iss. 2. Pp. 160—167. DOI: 10.1007/s00128-018-02533-6.

5. *Trusz A.* Seasonal variability of chemical composition and mutagenic effect of organic PM2.5 pollutants collected in the urban area of Wroclaw (Poland) // Science of The Total Environment. 2020. Vol. 733. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.138911.

6. *Li W. H.* Occurrence, distribution and human exposure to 20 organophosphate esters in air, soil, pine needles, river water, and dust samples collected around an airport in New York state, United States // Environment International. Vol. 131. DOI: 10.1016/j.envint.2019.105054.

7. *Casazza M.* Adult Chronic Exposure to Neurotoxic Metals Associated with Atmospheric Aerosols: A Case Study in The Urban Area of Turin (NW Italy) // Journal of Environmental Accounting and Management. Vol. 4. Iss. 1. Pp. 87—9. DOI: 10.5890/JEAM.2016.03.008.

8. *Dawood Mona F. A.* Insights into the oxidative status and antioxidative responses of germinating broccoli (Brassica oleracea var. italica L.) seeds in tungstate contaminated water // Chemosphere. 2020. Vol. 261. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2020.127585.

9. *Bondarevich E. A.* Assessment of technogenic pollution of the urban environment in Chita by the snow cover state// Led I Sneg — Ice and Snow. 2019. Vol. 59. Iss. 3. Pp. 389—400. DOI: 10.15356/2076-6734-2019-3-393.

10. *Yalaltdinova A.* Populus nigra L. as a bioindicator of atmospheric trace element pollution and potential toxic impacts on human and ecosystem // Ecological Indicators. 2019. Vol. 95. Pp. 974—983. DOI: 10.1016/j.ecolind.2017.06.021.

11. *Глинянова И. Ю., Фомичев В. Т.* Об экологической безопасности населенных пунктов со стороны скрытых источников природного загрязнения // Социология города. 2020. № 2. С. 43—57.

12. *Самусь Н. А.* Тектоника территории Волгоградской агломерации // Известия ВГПУ. 2006. № 4(13). С. 111—118.

13. *Глинянова И. Ю., Фомичев В. Т.* Мониторинг радиоактивных химических элементов (Th, U) в объектах окружающей среды как предмет инженерно-экологических изысканий на стадии предпроектных работ // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2020. № 3(31). С. 54—68.

© Глинянова И. Ю., Фомичев В. Т., Асанова Н. В., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Глинянова И. Ю., Фомичев В. Т., Асанова Н. В. Исследование токсичности атмосферного воздуха в поселке Киляковка Среднеахтубинского района Волгоградской области // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 200—213.

Об авторах:

Глинянова Ирина Юрьевна — канд. пед. наук, доц. каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; ecoris@yandex.ru

Фомичев Валерий Тарасович — д-р техн. наук, проф., проф. каф. общей и неорганической химии, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; cand@vstu.ru

Асанова Наталия Васильевна — канд. техн. наук, доц. каф. прикладной математики, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; natali_as@mail.ru

Irina Yu. Glinyanova, Valerii T. Fomichev, Nataliya V. Asanova

Volgograd State Technical University

STUDY OF THE TOXICITY OF ATMOSPHERIC AIR IN THE VILLAGE KILYAKOVKA OF THE SREDNEAKHTUBINSKY DISTRICT OF THE VOLGOGRAD REGION

The study was devoted to the assessment of the toxicity of atmospheric air in the village of Kilyakovka using the phytotoxicity index of aqueous dust-like suspensions (washing off of dust from leaves of white willow (Salixalba L.) sampled in the village of Kilyakovka, Sredneakhtubinsky district, Volgograd Region) plants (patent application no. 2020128981 from 02.09.2020). As a result of the study, the third level of atmospheric air pollution and its toxicity (heavy pollution) was revealed, where Tf = 74.75 %. The obtained results of the study make it possible to predict the presence of toxic substances in dust-like particles of atmospheric air, which contributed to the inhibition of the development of seedlings of root length (Lx, cm) of watercress (Lepidium sativum). In this regard, clarification of the data obtained and further observation and implementation of annual monitoring of atmospheric air in the village. Kilyakovka, including the study of pollutants in dust particles using microstructural analysis equipment.

K e y w o r d s: monitoring, atmospheric air, dust particles, dust suspensions, toxicants, phytotoxicity, pollutants, natural pollution, seeds of watercress (Lepidium sativum).

For citation:

Glinyanova I. Yu., Fomichev V. T., Asanova N. V. [Study of the toxicity of atmospheric air in the village Kilyakovka of the Sredneakhtubinsky district of the Volgograd Region]. *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], 2021, iss. 1, pp. 200—213.

About authors:

Irina Yu. Glinyanova — Candidate of Pedagogics, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ecoris@yandex.ru

Valerii T. Fomichev — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd**,** 400074, Russian Federation; cand@vstu.ru

Nataliya V. Asanova — Candidate of Engineering Sciences, Volgograd State Technical University. (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd**,** 400074, Russian Federation; natali_as@mail.ru

УДК 502.3

Ю. П. Иванова, А. А. Сахарова, О. О. Иванова, М. Д. Азарова

Волгоградский государственный технический университет

ИССЛЕДОВАНИЕ КЛИМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАК ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ЗАГРЯЗНЕНИЕ ГОРОДСКОЙ ВОЗДУШНОЙ СРЕДЫ ЛИНЕЙНОГО ГОРОДА

Рассмотрены основные источники загрязнения воздушной среды линейного города Волгограда, закономерности их распределения в атмосфере, факторы, влияющие на образование поллютантов в приземных слоях атмосферы. Проанализированы наиболее часто встречающиеся направления ветров в годовом цикле.

К л ю ч е в ы е с л о в а: климат, линейный город, скорость ветра, роза ветров, времена года, загрязняющие вещества, направление ветра, время суток, перенос примесей.

Волгоград относится к ряду городов, имеющих линейно-вытянутую структуру, протяженность его от Красноармейского до Тракторозаводского районов почти 100 км. Город является одним из крупнейших индустриальных центров России. К основным источникам загрязнения атмосферного воздуха относятся промышленность и автомобильный транспорт, движение которого осуществляется по четырем продольным магистралям. Необходимо отметить тот факт, что промышленные предприятия Волгограда расположены по отношению к городской черте без учета розы ветров. Также следует обратить особое внимание, что для линейных городов огромное влияние на загрязнение приземных слоев атмосферы оказывает автомобильный транспорт, численность которого растет с каждым годом. Особенно это проявляется в условиях плотной жилой застройки, когда рассеивание выбросов автотранспорта затруднено [1—3]. Ввиду протяженности города наблюдается различная транспортная ситуация на дорогах — частая смена скоростного режима (резкое торможение и разгон), пробки на отдельных частях магистралей, — которая напрямую влияет на количество выбросов вредных веществ в атмосферу. Транспорт загрязняет воздух отработанными и картерными газами и веществами, образующимися в результате испарения топлива.

Основная масса вредных выбросов приходится на отработанные газы, в состав которых входит более 200 компонентов. Среди них как нетоксичные химические вещества — азот, кислород, водяной пар, диоксид углерода, так и токсичные — оксид углерода, углеводороды, альдегиды, диоксид серы, сажа, бензапирен. Кроме того, загрязняющие вещества, поступающие в атмосферный воздух, могут переходить в более токсичные формы с более жесткими нормативами ПДК. Чрезвычайно опасными для здоровья человека и его деятельности могут оказаться сернистый ангидрид, различные соединения свинца, сажа.

Особому риску подвергаются дети, ввиду того, что основная часть выхлопных газов, выделяемых из топливных автомобилей располагается в приземном слое вблизи их дыхательной системы. В современных реалиях множество дорог находятся неподалеку от жилых застроек, детских площадок, что естественно влияет на ухудшение общего состояния здоровья людей. По-

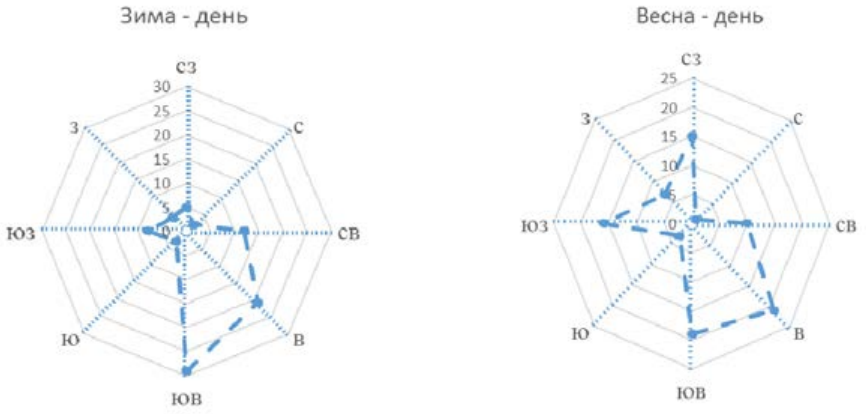
мимо газообразной части присутствуют и твердые частицы, которые точно так же оседают на дорогах и являются частью присутствующей на них и на примагистральных территориях пыли.

Размер частиц дорожной пыли не превышает 2,5…10 мкм, и именно фракционный состав, измеряемый микронами и десятыми долями микрона, является наиболее токсичным и опасным. На процесс рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере существенное влияние оказывает скорость оседания частиц загрязняющих веществ в воздухе под действием сил гравитации. Она учитывается параметром F, значение которого зависит как от дисперсного состава пыли, так и от скорости оседания. Кроме того в состав дорожной пыли входят частицы с изношенных покрышек. Материал, из которого изготавливаются покрышки, является не природной резиной, а синтетическим полимером, в состав которого входит множество химических соединений [4].

Расчеты процесса рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере производятся с использованием данных:

- о повторяемости направлений ветра по 8-ми румбовой розе ветров;
- фоновой концентрации для загрязняющих веществ, по которым ведутся регулярные наблюдения за их содержанием в приземном слое атмосферы; используется унифицированная программа расчета загрязнения атмосферы (УПРЗА), реализующая положения методики, утвержденной в установленном порядке [5, 6].

Анализ изменения розы ветров по Волгограду (рис. 1, 2) показал, что в зимний, весенний и осенний периоды для дневного времени суток наиболее часто встречающимися направлениями ветра являются восточные и юго-восточные. Для летнего периода наиболее часто встречающимися направлениями являются ветра юго-восточных, восточных и северо-восточных направления[12].



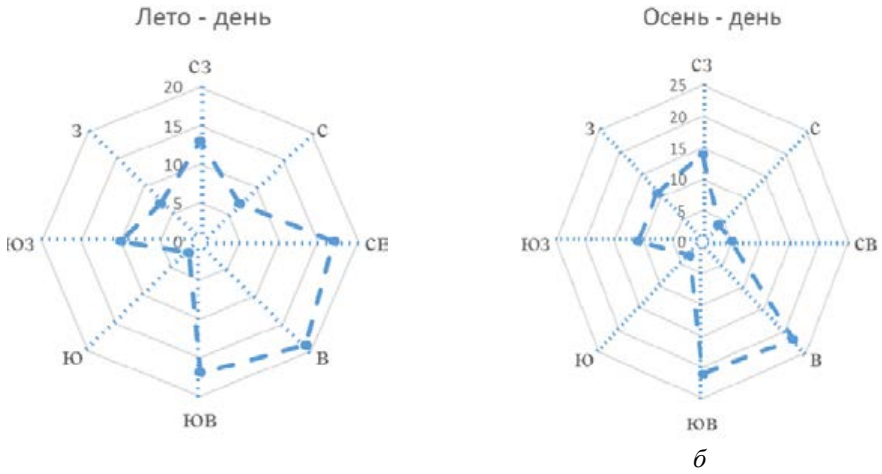
а *б*

Рис. 1. Роза ветров, характерная для г. Волгограда: *а* — зимний период; *б* — весенний период

[1] Прогноз погоды. URL: http://www.gismeteo.ru.
[2] Прогноз погоды. URL: https://rp5.ru.

В годовом цикле наиболее часто встречающимися скоростями ветра по юго-восточному направлению являются 3…4 м/с и 7…8 м/с, реже всего наблюдается повторяемость скоростей ветра от 15…16 м/с. По восточному направлению чаще преобладают скорости ветра 5…6 м/с, реже всего наблюдается повторяемость скоростей от 15…16 м/с. По северо-восточному направлению являются 5…6 м/с и 11…12 м/с, реже всего наблюдается повторяемость скоростей ветра от 13…14 м/с (рис. 3).

Была проведена проверка распределения скоростей воздушного потока для наиболее часто встречающихся направлений ветра. Анализ показал, что скорости воздушного потока по всем вышеуказанным направлениям описывается законом Вейбулла.



б

Рис. 2. Роза ветров, характерная для г. Волгограда: *а* — летний период; *б* — осенний период

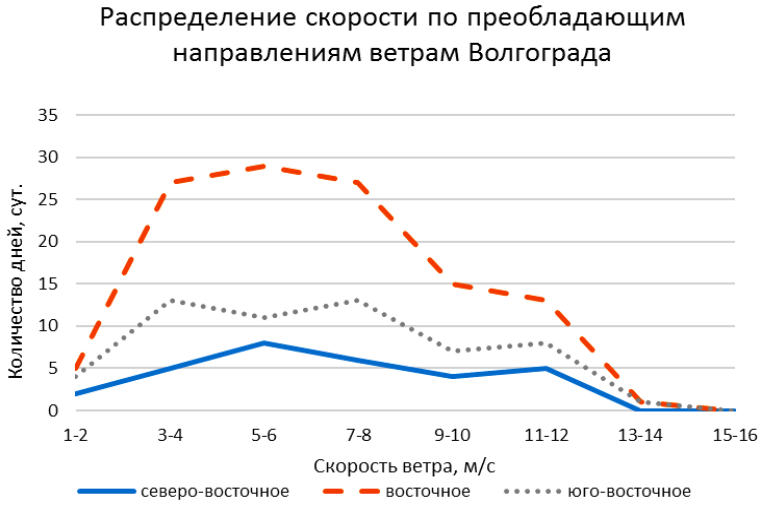


Рис. 3. Распределение скоростей ветра по преобладающим направлениям ветра в г. Волгограде за 2019 г.

Интегральная функция в этом случае имеет вид [7]:

$$F(V,k,\beta)=1-e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k}, \quad (1)$$

где k — параметр формы распределения, β — параметр масштаба распределения, V, м/с — скорости воздушного потока, а плотность распределения задается формулой

$$f(V,k,\beta)=\frac{k}{\beta}\left(\frac{V}{\beta}\right)^{k-1}e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k}=\frac{k}{\beta^k}V^{k-1}e^{-\left(\frac{V}{\beta}\right)^k}. \quad (2)$$

Проверка закона Вейбулла проводилась с помощью программы Statistika 10 и была использована подгонка распределений Вейбулла (масштаб, форма), а также использовались программы Excel и Mathcad.

На рисунке 4 для примера представлена гистограмма распределения скоростей ветра для восточного направления, при этом функция плотности и интегральная функция данного распределения будут иметь вид:

$$F(V,k,\beta)=0,011V^{1,9}e^{-\frac{V^{2,9}}{262,92}},$$

$$F(V,k,\beta)=1-e^{-\frac{V^{2,9}}{262,92}}, \quad (3)$$

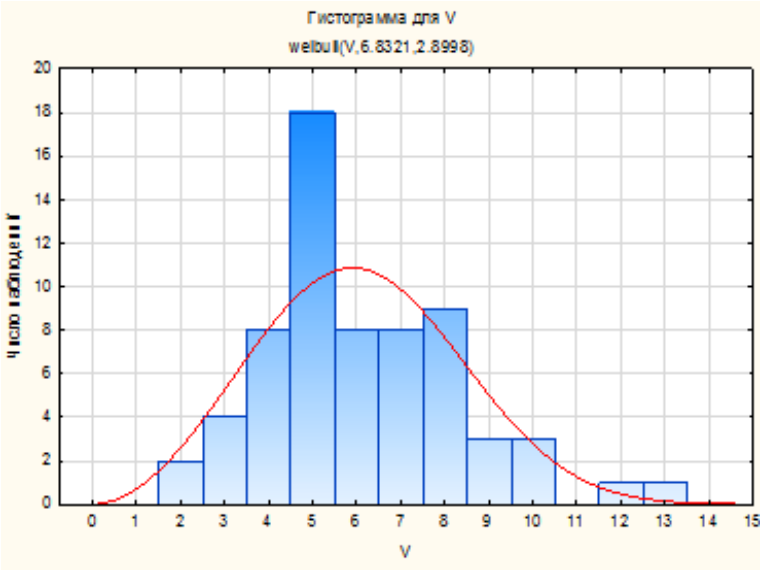


Рис. 4. Гистограмма скоростей воздушного потока

Проведенный анализ результатов показал, что в приземном слое атмосферы направление и скорости ветра претерпевают изменения с высотой, что в совокупности с имеющейся пульсацией скорости приводит к рассеянию облака загрязняющего вещества.

Влияние метеорологических параметров существенно влияет на накопление поллютантов внутри области высокого давления, при этом загрязняющие вещества могут значительное время находиться в атмосфере. Особое влияние оказывают области с температурными инверсиями, расположенные на расстоянии от земной поверхности, препятствующие поступлению загрязняющих веществ непосредственно в приземные слои атмосферы. Области высокого давления также характеризуются низкими скоростями ветра, что в свою очередь приводит к скоплению поллютантов [8—10].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Мензелинцева Н. В.* Основы управления качеством воздушной среды : учебное пособие. Волгоград : Изд-во ВолгГАСА, 1995. 53 с.

2. *Иванова Ю. П., Азаров В. Н.* О влиянии автотранспорта на экологическую обстановку г. Волгограда// Актуальные вопросы современной науки: сборник статей по материалам XX международной научно-практической конференции (11 апреля 2019 г., г. Томск). В 3 ч. Ч. 3. Уфа: Дендра, 2019. С. 194—198.

3. *Иванова Ю. П., Иванова О. О., Шаповалова Ю. А.* Влияние метеорологических условий линейного города на формирование городской среды // Инновационный потенциал развития науки в современном мире: технологии, инновации, достижения: сборник по материалам II международной научно-практической конференции. Уфа: НИЦ «Вестник науки», 2020. С. 172—178.

4. *Власов Д. В., Касимов Н. С., Кошелева Н. Е.* Геохимия дорожной пыли. URL: https://docviewer.yandex.ru/?url=http%3A%2F%2Fistina.msu.ru%2Fmedia%2Fpublications%2Farticle%2Fc59%2F005%2F11675684%2F2015_Geohimiya_dorozhnoj_pyili.pdf&name=2015_Geohimiya_dorozhnoj_pyili.pdf&ang=ru&c=58773.

5. *Кирсанов Ю. Г.* Оценка воздействия выбросов вредных веществ на атмосферный воздух : учеб. пособие / науч. ред. М. Г. Шишов; Министерство образования и науки Российской Федерации. Екатеринбург: Изд-во УРФУ, 2018. 110 с.

6. *Ложкин В. Н.* Загрязнение атмосферы автомобильным транспортом : справочно-методическое пособие. СПб., 2001. С. 49—52.

7. Проверка выполнения закона Вейбулла для различных направлений ветра, характерных для линейного города Волгограда / Ю. П. Иванова, Е. В. Соколова, А. А. Сахарова, В. Н. Азаров [и др.] // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 3(80). С. 134—141.

8. Влияние метеорологических условий на рассеивание вредных выбросов в городской среде / Ю. П. Иванова, Б. Ю. Надер, В. А. Мишаков, Ю. А. Шаповалова [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2020. № 1. 11 с.

9. *Иванова Ю. П., Сахарова А. А., Иванова О. О.* Влияние метеоусловий, характерных для линейного города Волгограда на распространение поллютантов в атмосферном воздухе городской среды // Потенциал интеллектуально одаренной молодежи — развитию науки и образования: материалы IX международного научного форума молодых ученых, инноваторов, студентов и школьников. Астрахань, 28—29 апреля 2020 г. С. 73—76.

10. On atmosphere pollution of cities with linear configuration / Yu. P. Ivanova, N. S. Barikaeva, V. S. Markin, A. V. Derichenko // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 698: The International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development”. (CATPID—2019. [IOP Publishing], 2019. 8 p. DOI: 10.1088/1757-899X/698/6/066041.

© Иванова Ю. П., Сахарова А. А., Иванова О. О., Азарова М. Д., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Исследование климатических параметров как факторов, влияющих на загрязнение городской воздушной среды линейного города / Ю. П. Иванова, А. А. Сахарова, О. О. Иванова, М. Д. Азарова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 214—219.

Об авторах:

Иванова Юлия Павловна — аспирантка, каф. безопасности жизнедеятельности в строительстве и городском хозяйстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; ypi26@mail.ru

Сахарова Анастасия Андреевна — старший преподаватель каф. водоснабжения и водоотведения, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; viv_vgasu@mail.ru

Иванова Олеся Олеговна — студентка, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; cokuch@mail.ru

Азарова Мария Денисовна — студентка, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; azarovamaria2001@yandex.ru

Yuliya P. Ivanova, Anastasiya A. Sakharova, Olesya O. Ivanova, Maria D. Azarova

Volgograd State Technical University

RESEARCH OF CLIMATIC PARAMETERS AS FACTORS AFFECTING URBAN AIR POLLUTION OF A LINEAR CITY

The article discusses the main sources of air pollution in the linear city of Volgograd, the patterns of their distribution in the atmosphere. And also the factors influencing the formation of pollutants in the surface layers of the atmosphere. The most frequent wind directions in the annual cycle are considered.

K e y w o r d s: climate, linear city, wind speed, wind rose, seasons, pollutants, wind direction, time of day, transport of impurities.

For citation:

Ivanova Yu. P., Sakharova A. A., Ivanova O. O., Azarova M. D. [Research of climatic parameters as factors affecting urban air pollution of a linear 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], 2021, iss. 1, pp. 214—219.

About authors:

Yuliya P. Ivanova — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ypi26@mail.ru

Anastasiya A. Sakharova — Senior Lecturer of Water Supply and Disposal Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; viv_vgasu@mail.ru

Olesya O. Ivanova — Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; cokuch@mail.ru

Maria D. Azarova — Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; azarovamaria2001@yandex.ru

УДК 504.06: 004.94

***А. В. Игнатьев*[а], *В. Ф. Сидоренко*[а], *А. А. Аброськин*[б]**

[а] ***Волгоградский государственный технический университет***
[б] ***САО «ВСК»***

РАНЖИРОВАНИЕ ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ, ОТНОСЯЩИХСЯ К МНОЖЕСТВУ ЭДЖВОРТА — ПАРЕТО

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области. Проект № 19-47-340001.

Рассматривается задача ранжирования городских территорий, относящихся к множеству Эджворта — Парето, возникающая при выборе участка городской территории для экологически безопасного размещения различных строительных объектов. Для решения данной задачи разработана модификация метода вербального анализа многокритериальных альтернатив ШНУР (Шкала нормированных упорядоченных различий). Составлен список критериев для оценки вариантов и шкала их оценки. Представлен алгоритм сравнения альтернатив.

Ключевые слова: система экологического мониторинга атмосферного воздуха, множество Эджворта — Парето, оценка многокритериальных альтернатив, методы вербального анализа решений.

Экологическое благополучие населения является одним из приоритетных направлений национальной политики Российской Федерации.

В связи с этим возникает ряд задач, одна из которых связана с проблемой выбора участка городской территории для экологически безопасного размещения различных строительных объектов.

В работе [1] разработана система категорирования территорий по степени экологического благополучия, позволяющая принимать такие решения. Дополнительно предложена балльная система оценки степени влияния источника загрязнения на качество атмосферного воздуха с учетом объема выбросов и сезонности воздействия, которая должна позволить провести скрининговую комплексную оценку воздействия возможных источников загрязнения атмосферного воздуха, а также выделить приоритетный источник загрязнения для данной территории при конкретных метеорологических условиях с учетом времени воздействия.

В некоторых случаях, может возникнуть ситуация, когда есть несколько вариантов (альтернатив) размещения объекта, причем среди них нет явно доминирующей альтернативы (участка явно превосходящего другие по всем критериям, или нескольким критериям при равенстве остальных). В этом случае сравниваемые альтернативы относятся к множеству Эджворта — Парето (Э — П), и их невозможно сравнить непосредственно на основе критериальных оценок.

Сравнение альтернатив, принадлежащих множеству Э — П, возможно на основе методики равноценного обмена, которая представляет собой логическую систему поиска компромиссов при принятии решения с несколькими вариантами выбора [2]. При реализации системы поддержки принятия решений (СППР) могут быть использованы соответствующие методы оценки многокритериальных альтернатив.

Существует целый ряд аксиоматических и эвристических подходов к принятию многокритериальных решений [3—7]. Они получили широкое распространение, в том числе, и при решении сложных экологических задач [8—16].

Тем не менее, в работе [17] указывается, что в этих методах неявно предполагается, что человек является точным измерительным устройством, способным давать безошибочную информацию в количественном виде. И таким образом, для их применения требуется дополнительное обучение лиц, принимающих решения (ЛПР).

В отличие от вышерассмотренных методов, методы вербального анализа решений (ВАР) имеют на практике существенные преимущества. При сравнении с эвристическими методами можно утверждать, что все процедуры получения информации от ЛПР являются психологически обоснованными. Все преобразования информации имеют математическое обоснование. Учтены известные черты поведения человека в организациях при принятии решений, возможность поэтапной выработки решающего правила.

В частности, для выделения лучшей альтернативы разработан методы ПАРК (Парная компенсация) [18] и ШНУР (Шкала нормированных упорядоченных различий) [19].

Учитывая, что число реальных альтернатив очень невелико (может быть 3 или 4, но не более 10—15) и надо выбрать наиболее предпочтительную из них, для сравнения альтернатив нами был выбран метод ШНУР.

Метод ШНУР основан на предположении, что ЛПР обладает знаниями как о стоящей перед ним проблеме, так и о желаемых путях ее решения.

В методе объединяются две основные взаимосвязанные функции:

- структуризация проблемы;
- выбор наилучшей альтернативы (которая не обязательно является одной из первоначально рассматриваемых).

Выбор наилучшей альтернативы осуществляется на основе попарного сравнения альтернатив. Поэтому одним из основных опросов при изложении рассматриваемого метода является процедура сравнения на основе предпочтений ЛПР пары альтернатив, оцененных по многим критериям.

Предполагается, что:

- ЛПР обладает достаточными знаниями в области экологического градостроительства и может сравнивать по предпочтительности многокритериальные альтернативы, отличающиеся оценками только по двум критериям;
- ЛПР может сравнивать по предпочтительности две альтернативы, отличающиеся по большему, чем два числу критериев, если при этом одна альтернатива предпочтительнее другой по одному критерию и уступает ей не более чем по трем критериям.

ЛПР может давать один из трех возможных ответов:

- альтернатива A_i предпочтительнее альтернативы A_j;
- альтернатива A_j предпочтительнее альтернативы A_i;
- альтернативы A_i и A_j одинаково предпочтительны.

Также предполагается, что критерии независимы по предпочтению и предпочтения ЛПР транзитивны.

Эти принципы положены в основу процедуры парного сравнения двух многокритериальных альтернатив по принципу парной компенсации, когда

недостатки одной альтернативы пытаются уравновесить недостатками другой и в результате анализируют, какой же их двух альтернатив присуще меньше недостатков или больше достоинств.

Для сформированного множества альтернатив, проводится, так называемый подготовительный этап, результатом которого является выявление потенциально лучшей альтернативы, которая должна являться «эталоном» для ЛПР при попарном сравнении с другими альтернативами.

Все процедуры подготовительного этапа осуществляется без участия ЛПР и выполняются автоматически по следующему алгоритму:

1) если среди оценок критериев имеются вербальные, то они переводятся в соответствующие им баллы на шкалах качественных критериев;

2) для каждой из сравниваемых альтернатив A_i и A_j выполняется вычисление нормированных оценок в паре по каждому количественному и качественному критерию K_q по следующим формулам:

$$a^q_{i(j)} = \begin{cases} a^q_i / a^q_{(ij)}, \text{ если оценку } K_q \text{ нужно максимизировать;} \\ 2 - (a^q_i / a^q_{(ij)}), \text{ если оценку } K_q \text{ нужно минимизировать;} \end{cases}$$

$$a^q_{j(i)} = \begin{cases} a^q_j / a^q_{(ij)}, \text{ если оценку } K_q \text{ нужно максимизировать;} \\ 2 - (a^q_j / a^q_{(ij)}), \text{ если оценку } K_q \text{ нужно минимизировать;} \end{cases}$$

где $a^q_{(ij)} = (a^q_i + a^q_j)/2$ — усредненное значение оценок критериев сравниваемых альтернатив;

3) для каждой пары сравниваемых альтернатив A_i и A_j вычисляется разность их нормализованных оценок $d^q_{ij} = a^q_{i(j)} - a^q_{j(i)}$ по каждому критерию K_q; лучшей в паре является альтернатива, имеющая наибольшую сумму $D_{ij} = \sum_{q=1}^{N} d^q_{ij}$, где N — общее количество критериев;

4) на основании принципа Кондорсе может быть выбрана альтернатива A_k, которая окажется лучше всех других при парных сравнениях — эта альтернатива объявляется потенциально лучшей; назовем ее потенциально лучшей альтернативой (ПЛА);

5) все альтернативы, не превосходящие ПЛА A_k ни по одному из критериев (т. е. неоптимальные по Парето), исключаются из рассмотрения;

6) остальные альтернативы A_j упорядочиваются по величине убывания их формального отличия от ПЛА, вычисляемого как сумма разностей нормализованных оценок D_{ij}. Этим обеспечивается постепенное возрастание трудности сравнений альтернатив для ЛПР.

Поскольку на начальном этапе для определения ПЛА используется принцип Кондорсе, то это, как известно, может приводить к появлению циклов на множестве альтернатив. Для преодоления этой проблемы используется процедура, предложенная авторами метода. Она заключается в том, что если альтернативы A_i, A_j и A_k превосходят все другие при парных сравнениях и при этом образуют цикл, то в качества ПЛА следует взять альтернативу, являющуюся лучшей при групповом сравнении A_i, A_j и A_k. Если все они окажутся равноценными, то в качестве ПЛА можно взять любую из них.

По итогам предварительного этапа формируется последовательность вопросов, которая будет предъявлена ЛПР.

Проиллюстрируем работу предварительного этапа метода при выборе участка городской территории, наиболее подходящего для экологически безопасного размещения строительного объекта.

Согласно алгоритму метода и списка критериев оценки селитебных территорий, предлагаемого в работе [1], нами был составлен список критериев для оценки вариантов и шкала оценок для каждого критерия. Критерии оценки вариантов со шкалами представлены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценки вариантов селитебных территорий и множество оценок (шкала) для каждого критерия

Название критерия	Множество оценок критерия
Уровень загрязнения воздуха стационарными источниками	Отсутствует (не превышает ПДК)
	Невысокий (превышение ПДК в 1,1…1,5 раза при незначительном по времени воздействии)
	Средний (превышение ПДК в 1,1…1,5 раза при значительном по времени воздействии)
	Высокий (значительные превышения ПДК загрязняющих веществ)
Уровень загрязнения воздуха автотранспортом	Отсутствует (не превышает ПДК)
	Невысокий (превышение ПДК в 1,1…1,5 раза при незначительном по времени воздействии)
	Средний (превышение ПДК в 1,1…1,5 раза при значительном по времени воздействии)
	Высокий (значительные превышения ПДК загрязняющих веществ)
*Уровень загрязнения воздуха от неблагоустроенных территорий	Отсутствует (источники загрязнения воздуха отсутствуют)
	Невысокий (краткосрочное воздействие по ОНВ)
	Средний (среднесрочное воздействие по ОНВ)
	Высокий (длительное воздействие по ОНВ)
*Уровень загрязнения воздуха от объектов нового строительства / сноса жилых и промышленных объектов	Отсутствует (источники загрязнения воздуха отсутствуют)
	Невысокий (краткосрочное воздействие по ОНВ)
	Средний (среднесрочное воздействие по ОНВ)
	Высокий (длительное воздействие по ОНВ)

*По этим критериям берется максимальный уровень загрязнения, наблюдаемый, как правило, в теплое время года.

Всем критериям присвоены одинаковые числовые шкалы оценок:

7 баллов (высокий) — определяются максимальные концентрации загрязняющих веществ, выбрасываемых данным источником;

5 баллов (средний) — определяются средние концентрации загрязняющих веществ, выбрасываемых данным источником;

3 балла (невысокий) — определяются минимальные концентрации загрязняющих веществ, выбрасываемых данным источником;

1 балл (отсутствует) — отсутствие источника или загрязнения от него.

Используя информацию, полученную из системы мониторинга атмосферного воздуха, и табл. 1, мы можем подготовить набор данных для сравнения альтернатив. Например, мы можем сравнивать 4 альтернативы с модельными данными, представленными в табл. 2.

Таблица 2

Варианты участков городской территории для анализа

Критерий	Направление	Вариант A_1	Вариант A_2	Вариант A_3	Вариант A_4
Уровень загрязнения воздуха стационарными источниками загрязнения	min	Средний (5)	Невысокий (3)	Невысокий (3)	Отсутствует (1)
Уровень загрязнения воздуха автотранспортом	min	Отсутствует (1)	Невысокий (3)	Невысокий (3)	Средний (5)
Уровень загрязнения воздуха от неблагоустроенных территорий	min	Средний (5)	Средний (5)	Невысокий (3)	Невысокий (3)
Уровень загрязнения воздуха от объектов нового строительства, сноса жилых и промышленных объектов	min	Отсутствует (1)	Отсутствует (1)	Невысокий (3)	Невысокий (3)
Сумма баллов		12	12	12	12

Таблица 2 демонстрирует, что при пересчете в баллы, участки будут иметь абсолютно одинаковые оценки. Соответственно выбор на основе суммы баллов невозможен.

Проведем предварительный анализ, который должен производиться до предъявления вариантов ЛПР. Результат предварительного анализа альтернатив представлен в табл. 3—9.

Таблица 3

Результат предварительного анализа альтернатив A_1 и A_2

Критерий	K_1 min	K_2 min	K_3 min	K_4 min
Вариант A_1	5	1	5	1
Вариант A_2	3	3	5	1
Оценка $a^q_{i(2)} = 2 - (a^q_1 / a^q_{(12)})$	0,75	1,5	1	1
Оценка $a^q_{2(1)} = 2 - (a^q_2 / a^q_{(12)})$	1,25	0,5	1	1
Разность $d^q_{12} = a^q_{1(2)} - a^q_{2(1)}$	–0,5	1	0	0
Сумма разностей нормализованных оценок D_{12}	0,5 => A_1 лучше A_2			

Таблица 4

Результат предварительного анализа альтернатив A_1 и A_3

Критерий	K_1 min	K_2 min	K_3 min	K_4 min
Вариант A_1	5	1	5	1
Вариант A_3	3	3	3	3
Оценка $a^q_{1(3)} = 2 - (a^q_1 / a^q_{(13)})$	0,75	1,5	0,75	1,5
Оценка $a^q_{3(1)} = 2 - (a^q_3 / a^q_{(13)})$	1,25	0,5	1,25	0,5
Разность $d^q_{13} = a^q_{1(3)} - a^q_{3(1)}$	–0,5	1	–0,5	1
Сумма разностей нормализованных оценок D_{13}	1 => A_1 лучше A_3			

Таблица 5

Результат предварительного анализа альтернатив A_1 и A_4

Критерий	K_1 min	K_2 min	K_3 min	K_4 min
Вариант A_1	5	1	5	1
Вариант A_4	1	5	3	3
Оценка $a^q_{1(4)} = 2 - (a^q_1 / a^q_{(14)})$	0,3333	1,6667	0,75	1,5
Оценка $a^q_{4(1)} = 2 - (a^q_4 / a^q_{(14)})$	1,6667	0,3333	1,25	0,5
Разность $d^q_{14} = a^q_{1(4)} - a^q_{4(1)}$	–1,333	1,3333	–0,5	1
Сумма разностей нормализованных оценок D_{14}	0,5 => A_1 лучше A_4			

Таблица 6

Результат предварительного анализа альтернатив A_2 и A_3

Критерий	K_1 min	K_2 min	K_3 min	K_4 min
Вариант A_2	3	3	5	1
Вариант A_3	3	3	3	3
Оценка $a^q_{2(3)} = 2 - (a^q_2 / a^q_{(23)})$	1	1	0,75	1,5
Оценка $a^q_{3(2)} = 2 - (a^q_3 / a^q_{(23)})$	1	1	1,25	0,5
Разность $d^q_{23} = a^q_{2(3)} - a^q_{3(2)}$	0	0	–0,5	1
Сумма разностей нормализованных оценок D_{ij}	0,5 => A_2 лучше A_3			

Таблица 7

Результат предварительного анализа альтернатив A_2 и A_4

Критерий	K_1 min	K_2 min	K_3 min	K_4 min
Вариант A_2	3	3	5	1
Вариант A_4	1	5	3	3
Оценка $a^q_{i(j)} = 2 - (a^q_i / a^q_{(ij)})$	0,5	1,25	0,75	1,5
Оценка $a^q_{j(i)} = 2 - (a^q_j / a^q_{(ij)})$	1,5	0,75	1,25	0,5
Разность $d^q_{ij} = a^q_{i(j)} - a^q_{j(i)}$	–1	0,5	–0,5	1
Сумма разностей нормализованных оценок D_{ij}	0 => A_2 и A_4 равноценны			

Таблица 8

Результат предварительного анализа альтернатив A_3 и A_4

Критерий	K_1 min	K_2 min	K_3 min	K_4 min
Вариант A_3	3	3	3	3
Вариант A_4	1	5	3	3
Оценка $a^q_{i(j)} = 2 - (a^q_i / a^q_{(ij)})$	0,5	1,25	1	1
Оценка $a^q_{j(i)} = 2 - (a^q_j / a^q_{(ij)})$	1,5	0,75	1	1
Разность $d^q_{ij} = a^q_{i(j)} - a^q_{j(i)}$	–1	0,5	0	0
Сумма разностей нормализованных оценок D_{ij}	–0,5 => A_4 лучше A_3			

Таблица 9

Результат попарных сравнений вариантов A_3 и A_4

Вариант	A_1	A_2	A_3	A_4
Число выигранных парных сравнений	3	1	0	1

По результатам попарных сравнений лучшей оказывается альтернатива A_1, которая и берется в качестве ПЛА.

Далеко не очевидно, что потенциально выбранная альтернатива окажется лучшей на самом деле. Поэтому необходимо сформировать список вопросов к ЛПР и перейти к процедуре с непосредственным его участием.

Согласно алгоритму метода, при подготовке сравнений альтернатив ЛПР должно просмотреть предъявляемые оценки всех альтернатив и решить:

- нет ли среди оценок альтернатив таких, которые мало отличаются между собой и при парном сравнении могут рассматриваться как почти одинаковые;
- нет ли среди оценок альтернатив таких, которые характеризуются недопустимо малым качеством по некоторому критерию, что позволяет сразу же исключить альтернативу из рассмотрения?

Разработанная нами шкала оценок, исключает появление первого вопроса. Кроме того, данная шкала, позволяет предъявить эксперту и варианты с самым низким качеством по критериям. А полное вербальное описание шкалы оценки для каждого из критериев позволяет ЛПР легко ответить и на второй вопрос и исключить явно проигрышные варианты, сократив тем самым затраты на сравнение оставшихся альтернатив.

В нашем примере эксперт может исключить вариант A_1, имеющий наименьшее качество по двум критериям: «Уровень загрязнения воздуха стационарными источниками загрязнения» (превышение ПДК в 1,1…1,5 раза при значительном по времени воздействии) и «Уровень загрязнения воздуха от неблагоустроенных территорий» (среднесрочное воздействие по ОНВ), т. к. при таких их значениях размещение объектов жилой застройки недопустимо, а меры по их совместному улучшению будут наиболее затратными, по сравнению с другими вариантами. В этом случае рекомендуется выбрать новую ПЛА по результатам предварительного анализа. Так как есть две формально равноценные альтернативы A_2 и A_4, то назначим в качестве ПЛА альтернативу A_2.

Далее выполняются парные сравнения альтернатив. На этом этапе ЛПР последовательно выполняет парные сравнения ПЛА с альтернативами, оставшимися после предыдущего этапа. Эксперту предлагается сравнить один из недостатков одной альтернативы с одним или несколькими достоинствами другой. Если удается показать, что при всех сравнениях оценки альтернативы A_i не уступают оценкам альтернативы A_j, а хотя бы при одном сравнении A_i лучше A_j, то превосходство первой из альтернатив очевидно.

В силу небольшого количества критериев нами предварительно был установлен порядок расположения критериев по их степени важности и, в отличие от классического метода ШНУР, их дальнейшая нормировка и сортировка не выполняются.

Работу со сравнением альтернатив можно описать в виде последовательности нескольких шагов.

1. Пары альтернатив (лучшая и остальные, в порядке убывания по формальной предпочтительности) предъявляются ЛПР для сравнения.

2. Эксперт выбирает лучшую альтернативу, исходя из принципа парной компенсации, и учитывая свои веса критериев и знания о проблеме, которые представляют собой больший объем информации, чем тот, что может быть формализован в СППР.

3. Если все остальные альтернативы оказываются хуже, то лучшей признается ПЛА.

4. Если оказалось, что лучшей признана одна или несколько альтернатив, то худшая альтернатива исключается и проводится очередной раунд сравнений.

5. Если в итоге две альтернативы признаны равноценными (одинаково предпочтительными), то по этим альтернативам следует изучить дополнительную информацию.

В нашем примере эксперту первым для сравнения будет предъявлен вариант сравнения формально равноценных альтернатив A_2 и A_4, в виде, представленном на рис. 1.

Наименование критерия			
Уровень загрязнения воздуха стационарными источниками	**Уровень загрязнения воздуха автотранспортом**	**Уровень загрязнения воздуха от неблагоустроенных территорий**	**Уровень загрязнения воздуха от объектов нового строительства / сноса жилых и промышленных объектов**
Вариант А2			
Невысокий (превышение ПДК в 1,1-1,5 раза при незначительном по времени воздействии)	**Невысокий (превышение ПДК в 1,1-1,5 раза при незначительном по времени воздействии)**	**Средний (среднесрочное воздействие по ОНВ)**	**Отсутствует (источники загрязнения воздуха отсутствуют)**
Вариант А4			
Отсутствует (не превышает ПДК)	**Средний (превышение ПДК в 1,1-1,5 раза при значительном по времени воздействии)**	**Невысокий (краткосрочное воздействие по ОНВ)**	**Невысокий (краткосрочное воздействие по ОНВ)**

Рис. 1. Пример предъявления альтернатив A_2 и A_4 эксперту

Вариант A_4, доминируя по качеству критерия «Уровень загрязнения воздуха стационарными источниками загрязнения» (не превышает ПДК), совпадая по качеству критериев «Уровень загрязнения воздуха от неблагоустроенных территорий» и «Уровень загрязнения воздуха от объектов нового строительства / сноса жилых и промышленных объектов», проигрывает варианту A_2 по качеству критерия «Уровень загрязнения воздуха автотранспортом» (превышение ПДК в 1,1…1,5 раза при значительном по времени воздействии), что будет являться более важным для ЛПР при выборе участка для размещения объекта жилой застройки. В результате этого сравнения A_2 продолжает оставаться лучшей альтернативой.

Теперь эксперту для сравнения будет предъявлен вариант сравнения альтернатив A_2 и A_3, в виде, представленном на рис. 2.

Наименование критерия			
Уровень загрязнения воздуха стационарными источниками	**Уровень загрязнения воздуха автотранспортом**	**Уровень загрязнения воздуха от неблагоустроенных территорий**	**Уровень загрязнения воздуха от объектов нового строительства / сноса жилых и промышленных объектов**
Вариант А2			
Невысокий (превышение ПДК в 1,1-1,5 раза при незначительном по времени воздействии)	**Невысокий (превышение ПДК в 1,1-1,5 раза при незначительном по времени воздействии)**	**Средний (среднесрочное воздействие по ОНВ)**	**Отсутствует (источники загрязнения воздуха отсутствуют)**
Вариант А3			
Невысокий (превышение ПДК в 1,1-1,5 раза при незначительном по времени воздействии)	**Невысокий (превышение ПДК в 1,1-1,5 раза при незначительном по времени воздействии)**	**Невысокий (краткосрочное воздействие по ОНВ)**	**Невысокий (краткосрочное воздействие по ОНВ)**

Рис. 2. Пример предъявления альтернатив A_2 и A_3 эксперту

Вариант A_2, доминируя по качеству критерия «Уровень загрязнения воздуха от объектов нового строительства / сноса жилых и промышленных объектов» (источники загрязнения отсутствуют), совпадая по качеству критериев «Уровень загрязнения воздуха стационарными источниками загрязнения» и «Уровень загрязнения воздуха автотранспортом», проигрывает варианту A_3 по качеству критерия «Уровень загрязнения воздуха от неблагоустроенных территорий» (среднесрочное воздействие по ОНВ), скорее всего, качество этого критерия окажется более важным для ЛПР при выборе участка для размещения объекта жилой застройки, т. к. по завершении работ, определяющих значение 4-го критерия, альтернатива A_3 станет наиболее выгодной. В результате чего она и признается лучшей альтернативой.

Заметим, что в нашем примере, согласно результатам предварительного анализа вариант A_2 был лучше варианта A_3. Тем не менее, сравнения, сделанные ЛПР, показали обратное.

Таким образом, предлагаемый метод позволяет формально ранжировать альтернативы еще на предварительном этапе. Разработанная нами шкала оценок исключает появление альтернатив, для которых оценки сравниваемых критериев мало отличаются между собой. В то же время полное вербальное описание шкалы оценки для каждого из критериев позволяет ЛПР легко ответить на вопрос о наличии оценок таких альтернатив, которые характеризуются недопустимо малым качеством по некоторому критерию, позволяя исключить явно проигрышные варианты и сокращая тем самым затраты на сравнение оставшихся альтернатив.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Аброськин А. А.* Динамическая система экологического мониторинга атмосферного воздуха для обеспечения экологический безопасности строительных объектов: дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2017. 142 с.

2. Эффективное принятие решений / П. Друкер, Д. С. Хэммонд, А. Этциони [и др.]. М.: Альпина бизнес букс, 2006. 182 с. Серия: Классика Harvard Business Review.

3. *Кини Р. Л., Райфа Х.* Принятие решений при многих критериях предпочтения и замещения. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.

5. *Петровский А. Б.* Теория принятия решений: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Академия, 2009. 400 с.

15. *Olson D. L., Fliendner G., Currie K.* Comparison of the REMBRANDT system with analytic hierarchy process // European Journal of Operational Research. 1995. Vol. 82. Iss. 3. Pp. 522—539.

4. *Саати Т., Кернс К.* Аналитическое планирование. Организация систем. М.: Радио и связь, 1991. 224 с.

5. *Saaty T. L.* Decision making with the analytic hierarchy process // International Journal of Services Sciences. 2002. Vol. 1. Iss. 1. Pp. 83—98.

6. *Lootsma F. A.* Scale sensitivity in the multiplicative AHP and SMART // Journal of Multicriteria Decision Analysis. 1993. Vol. 2. Pp. 87—110.

7. *Vallee D., Zielniewicz P.* ELECTRE 3—4, version 3x. Guide d'Utilisation. Document LAMSADE № 85. Paris: Universite de Paris Dauphine, 1994.

8. *Bojórquez-Tapia L. A., Sánchez-Colon S., Florez A.* Building Consensus in Environmental Impact Assessment Through Multicriteria Modeling and Sensitivity Analysis // Environmental Management. 2005. Vol. 36. Vol. 3. Pp. 469—481.

9. *Beinat E.* Multi-criteria analysis for environmental management // Journal of Multicriteria Decision Analysis. 2001. Vol. 10. Iss. 2. Pp. 51.

10. *Bettinger P., Boston K.* A conceptual model for describing decision—making situations in integrated natural resource planning and modeling projects // Environmental management. 2001. Vol. 28. Iss. 1. Pp. 1—7.

11. *Bojórquez-Tapia L. A., Sánchez-Colon S., Martinez A. F.* Building consensus in environmental impact assessment through multicriteria modeling and sensitivity analysis // Environmental Management. 2005. Vol. 36. Pp. 469—481.

12. *Huang I. B., Keislerb J., Linkov I.* Multi-criteria decision analysis in environmental sciences: Ten years of applications and trends // Science of The Total Environment. 2011. Vol. 409. Iss. 19. Pp. 3579—3594.

13. *Giordano L. D, Riedel P. S.* Multi-criteria spatial decision analysis for demarcation of greenway: A case study of the city of Rio Claro, Sao Paulo, Brazil // Landscape and Urban Planning. 2008. Vol. 84. Pp. 301—311.

14. *Kapepula K. M, Colson G., Sabri K., Thonart P.* A multiple criteria analysis for-household solid waste management in the urban community of Dakar // Waste Management. 2007. Vol. 27. Pp. 1690—1705.

15. *Mavrotas G., Ziomas I. C., Diakouaki D.* A combined MOIP—MCDA approach to building and screening atmospheric pollution control strategies in urban regions // Environmental Management. 2006. Vol. 38. Pp. 149—160.

16. *Norese M.* ELECTRE III as a support for participatory decision-making on the localization of waste-treatment plants. // Land Use Policy. 2006. Vol. 23, Iss. 1. Pp. 76—85.

17. *Ustinovičius L., Łoniewski K.* Verbal analysis of decisions // Economics and Management. 2013. Vol. 2. Pp. 212—229.

18. *Ларичев О. И., Мошкович Е. М.* Качественные методы принятия решений. Вербальный анализ решений. М.: Наука. Физматлит, 1996. 208 с.

19. *Ларичев О. И.* Вербальный анализ решений. М.: Наука, 2006. 181 с.

© Игнатьев А. В., Сидоренко В. Ф., Аброськин А. А., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Игнатьев А. В., Сидоренко В. Ф., Аброськин А. А. Ранжирование городских территорий, относящихся к множеству Эджворта — Парето // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 220—230.

Об авторах:

Игнатьев Александр Владимирович — д-р техн. наук, доц., проф. каф. цифровой экономики и технологий управления в городском хозяйстве и строительстве, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; alignat70@yandex.ru

Сидоренко Владимир Федорович — д-р техн. наук, проф., проф. каф. урбанистики и теории архитектуры, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; ORCID: 0000-0002-4895-0094, kafedra_urbanistika14@mail.ru

Аброськин Алексей Андреевич — канд. техн. наук, ведущий тестировщик САО «ВСК». Российская Федерация, 400005, г. Волгоград, пр. Ленина 56а; aleksey.abroskin@inbox.ru

Alexander V. Ignatyev[a], Vladimir F. Sidorenko[a], Aleksey A. Abroskin[b]

[a] Volgograd State Technical University
[b] JSIC "VSK"

RANKING OF URBAN AREAS RELATED TO THE EDGWORTH — PARETO SET

The article discusses the problem of ranking urban areas belonging to the Edgeworth — Pareto set, which arises when choosing a site for an urban area for the environmentally friendly placement of various construction projects. To solve this problem, a modification of the method of verbal analysis of multicriteria alternatives LNUR (Scale of Normalized Ordered Differences) has been developed. A list of criteria for evaluating options and a scale for evaluating them have been compiled. An algorithm for comparing alternatives is presented.

K e y w o r d s: system of environmental monitoring of atmospheric air, Edgeworth — Pareto set, assessment of multicriteria alternatives, methods of verbal analysis of decisions.

For citation:

Ignatyev A. V., Sidorenko V. F., Abroskin A. A. [Ranking of urban areas related to the Edgworth — Pareto set]. *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], 2021, iss. 1, pp. 220—230.

About authors:

Alexander V. Ignatyev — Doctor of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., 400074, Volgograd, Russian Federation; alignat70@yandex.ru

Vladimir F. Sidorenko — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., 400074, Volgograd, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4895-0094, kafedra_urbanistika14@mail.ru

Aleksey A. Abroskin — Candidate of Engineering Sciences, JSIC "VSK". 56a, Lenin Ave., Volgograd, 400005, Russian Federation; aleksey.abroskin@inbox.ru

УДК 711.4

И. Н. Етеревская

Волгоградский государственный технический университет

ОСОБЕННОСТИ СОЦИАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ КРЕАТИВНЫХ ПРОСТРАНСТВ СОВРЕМЕННОГО ГОРОДА

Рассмотрены особенности трансформации городских общественных пространств в контексте инновационно-креативного вектора развития современного города, дано определение городского креативного пространства, описана специфика форм и способов их организации. В качестве площадок для развития креативного потенциала города предлагается использовать уже существующие общественные пространства, прилегающие к домам культуры, зачастую обладающие своей уникальной историей, идентичностью, «памятью места». Приведен пофакторный анализ данных территорий г. Волгограда с учетом их типологии по периодам и стилистике застройки, наличию (отсутствию) статуса объекта культурного наследия, специфики размещения в планировочной структуре города, композиционно-пространственной организации, функционального насыщения и современного использования объекта. Сформулированы принципы и методы формирования креативных пространств в контексте региональных особенностей г. Волгограда, на основе сценарного подхода, предусматривающего развитие по типам: «сценография», «деятельность», «информация», «сценарии обустройства», рассмотрены темы, рекомендуемые к реализации в рамках креативного пространства. Делается вывод о необходимости сохранения характерных пространств города, содержащих выдающиеся исторические элементы, и формировании креативных пространств на основе принципа исторической преемственности, построенного на сочетании исторических объектов и новых компонентов среды.

Ключевые слова: креативные пространства, городские открытые общественные пространства, городская среда, сценарное моделирование.

С учетом инновационно-креативного вектора развития общества и трансформационных процессов в городах особую значимость приобретают открытые общественные пространства, аккумулирующие самые разнообразные сферы жизнедеятельности города: социум, среду обитания, экономику, элементы институциональной системы. Современный город успешно развивается не благодаря реализации гениальных градостроительных теорий и архитектурных идей, а ввиду разнообразия и гибкости механизмов саморегуляции, способности соответствовать изменяющейся социальной активности современного человека [1]. Рассмотрение и изучение процессов трансформации общественных пространств как значительных структурных элементов современного города с позиций особенностей их социального развития и системного подхода позволяет считать их сложными постоянно изменяющимися социально-пространственными системами [2—5].

Анализ отечественного и зарубежного опыта функционирования городских общественных пространств показывает, что они в концентрированном виде отражают социальные процессы общества, обладают значительным потенциальным эффектом интеграции. Преобразования городских общественных пространств способны сформировать новые социальные практики, а значит, привести к появлению новых форм городской жизни [6]. В современных условиях одним из основных условий успешности города является наличие креативных пространств, основными качествами которых являются свобода

коммуникаций и самовыражения. Такие пространства притягивают активных, талантливых, творческих людей, а за ними и капитал. А социально-экономическое благополучие города и его стратегическая конкурентоспособность на долгосрочную перспективу зависят от создания успешного бренда и его реализации в архитектурном пространстве [7].

Актуальным подходом, позволяющим обеспечить активное участие местных сообществ в разработке общегородских стратегий становится изменение общественных пространств, направленное на раскрытие их творческого потенциала (организация мест проведения фестивалей и ярмарок народного творчества и традиционных ремесел, мастер-классов, сезонных кинотеатров, концертных и выставочных площадок под открытым небом, развитие событийного туризма). В качестве площадок для креативного развития можно использовать существующие общественные пространства, зачастую обладающие уникальной историей, идентичностью, «памятью места», но в настоящий момент утратившие свою актуальность.

В последние десятилетия все более очевидно, что творческая составляющая в развитии общественных пространств и города в целом имеет огромный потенциал. Помимо информации и знания в современном мире креативность является ключевым фактором развития общества [8]. В современных условиях креативные отрасли (реклама, архитектура, декоративно-прикладное искусство, дизайн, мода, кино, видео, фотография, музыка, исполнительское искусство, издательское дело, программное обеспечение, компьютерные игры, электронные публикации и телевидение/радио) дают толчок развитию инфраструктуры города и его общественных пространств и являются источником жизненной силы экономики. По данным Всемирной организации интеллектуальной собственности (ВОИС), они приносят в среднем более 5 % мирового ВВП. Темпы их развития также значительно выше по сравнению с традиционными отраслями — даже во время экономического спада объем глобального креативного сектора повысился на 14 %[1] [9].

Роль креативных пространств в поддержке творческих групп очевидна. Отсутствие привязанности к определенному месту работы, возможность отвлечься от монотонного труда, встречать людей других сфер деятельности — все это развивает способности творчески мыслить и находить креативные решения задач. Поэтому такие открытые площадки становятся эффективным способом создания отличительного образа города с максимально разнообразной и дружелюбной средой, привлекательной для жителей и туристов.

Под *креативными пространствами понимаются* перманентно трансформирующиеся адекватно потребностям и запросам социума многофункциональные открытые и/или закрытые зоны города, ориентированные на организацию целенаправленной творческой и научно-технической деятельности, отдыха и развлечений различных возрастных и социальных групп, на обмен новаторскими идеями между творческим населением, самовыражение, демонстрацию результатов своей творческой деятельности и оценку чужой, превращая ранее мало презентабельные районы или отдельные территории в центры активности [10]. Данные пространства ориентированы как на людей

[1] Мировые показатели деятельности в области ИС: доклад ВОИС. URL: https://www.wipo.int/pressroom/ru/articles/2020/article_0027.html.

творческих профессий, так и на простых жителей города, в свободное время занятых творчеством в формате досуговой или образовательно-развивающей деятельности. Креативные пространства способны внести серьезный вклад в социальную сферу городской жизни и определяются рядом исследователей как «хорошо продуманная среда, побуждающая человека создавать что-то новое, быть общительным и полным вдохновения» [11].

Анализируя отечественный и зарубежный опыт организации креативных пространств в современном городе можно выделить несколько вариантов:

1) арт-пространства, как правило, обширные по площади бывшие промзоны;

2) лофт — выставочные, торгово-развлекательные площади, возникшие в процессе реконструкции из объектов иного функционального назначения (бывшие склады, производственные цехи),

3) коворкинги — тип организации рабочего процесса, предусматривающий размещение в одном рабочем пространстве нескольких разнообразных видов деятельности;

4) арт-центры — технически оборудованные пространства, предоставляющие место для проведения выставок, семинаров, обучающих курсов.

Признавая уникальность формирования каждого отдельно взятого креативного пространства под влиянием множества разрозненных факторов (историко-культурных, социальных, функциональных, природно-климатических), можно сформулировать основные подходы к их организации [12]:

- «не уничтожать следы прошлого» — модернизация традиционного среды, на основе консервативной темы сохранения существующих исторических объектов;
- «сочетание старого и нового» — создание центров экспериментального искусства с использованием инновационных технологий на базе старой узнаваемой застройки;
- «превращение слабых сторон в сильные» — возрождение социально и экологически неблагополучных территорий.

Наряду с архитектурным объектом в организации креативного пространства зачастую задействована прилегающая территория, позволяющая обеспечить визуальную и смысловую связь объекта и ландшафтного окружения, усиливающая эффект от процесса, происходящего в здании. На территории могут размещаться арт-объекты со сменной экспозицией, тематические торгово-выставочные и фестивальные площадки, зоны пассивного отдыха и созерцания.

Опыт организации креативных пространств показывает, что наиболее часто они возникают в процессе трансформации первоначальной функции в более востребованную и популярную в современном городе. Это, как правило, ревитализированные промышленные объекты, получающие новое предназначение при сохранении архитектурного облика. Однако в планировочной структуре города заложен определенный резерв объектов, потенциально пригодных для размещения новых креативных пространств без существенного изменения сложившегося функционального зонирования. В качестве таких объектов видится возможным использование существующих домов и двор-

цов культуры и территорий, прилегающих к ним. В существующем виде эти традиционные российские учреждения культуры уже не в состоянии своевременно реагировать на происходящие изменения и гибко встроиться в систему функционирования креативных индустрий, поэтому они вызывают все меньший интерес у аудитории и у создателей объектов культуры, что приводит к их постепенной деградации. В то же время новое прочтение данных объектов создаст возможности для их активного включения в социальную и культурную жизнь современного города.

Дома (дворцы) культуры — явление, получившее широкое развитие в ходе повышения культурного уровня советских граждан начиная с первых лет Советской власти и заканчивая 1980-ми годами прошлого века. Анализируя характер размещения данных объектов в г. Волгограде можно отметить, что на всех этапах проектирования и строительства уделялось повышенное внимание особенностям их включения в планировочную структуру города (рис. 1). Так, в соответствии с градостроительным планом реконструкции Сталинграда 1931 г. город задумывался как система комплексных социалистических городов, на территории каждого из них предусматривались культурно-массовые зоны, включающие дом (дворец) культуры (ДК). Что делало их в сочетании с прилегающей рекреационной зоной (аванплощадью, парком, сквером) композиционной и смысловой доминантой прилегающей жилой территории и на протяжении многих десятилетий центрами социальной и культурной жизни, местом проведения тематических праздников, центрами кружковой деятельности, самодеятельного творчества. Очевидно, это укладывается в современную трактовку креативного пространства как площадки для организации целенаправленной творческой деятельности, отдыха и развлечений.

Следующей отличительной особенностью ДК являлось серьезное отношение к разработке объемно-планировочных, композиционно-пространственных стилистических решений, формированию единых градостроительных ансамблей, неповторимого облика здания. Значительная часть ДК Волгограда была построена по индивидуальным проектам, и в настоящий момент порядка 47 % из них являются объектами культурного наследия регионального значения[2] [13], что также создает уникальные возможности для формирования неповторимого облика среды с отпечатком аутентичности.

Однако в конце XX века со сменой политического строя меняются и социальные установки. Происходит отказ не только от коммунистической идеологии, но и от традиционных культурных ценностей. В это же время резко сокращается государственное финансирование учреждений культуры, на смену единой политике в сфере культуры приходит частное предпринимательство. Вследствие этого ДК остаются за бортом социальной жизни населения. Многие из них сдаются в аренду, продаются, находящиеся на перспективных городских территориях сносятся под новое строительство, а оставшиеся приходят в упадок без плановых мероприятий по поддержанию надлежащего состояния.

[2] Сведения из Единого государственного реестра объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации / Официальный сайт Минкультуры России. URL: https://opendata.mkrf.ru/opendata/7705851331-egrkn.

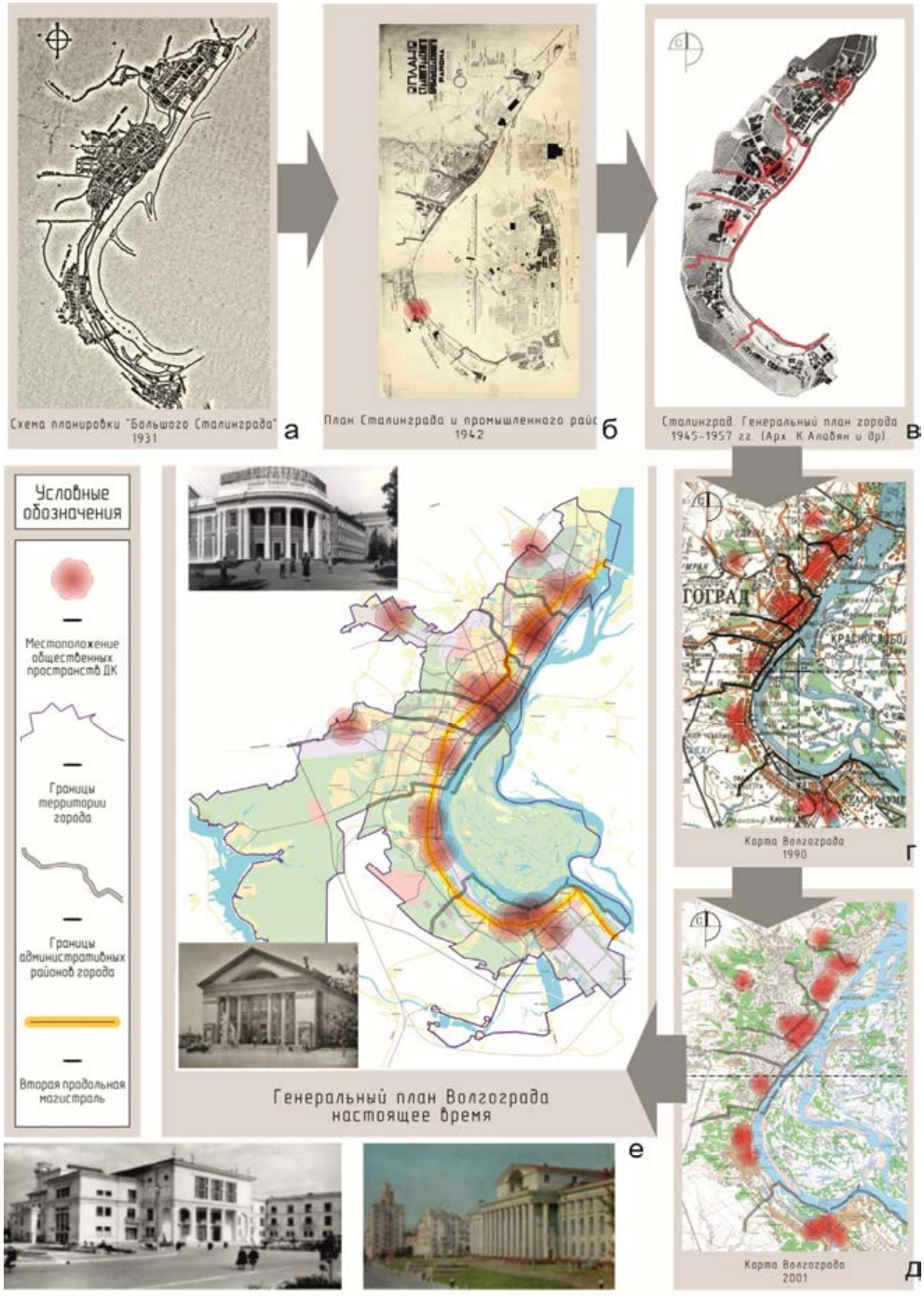


Рис. 1. Ретроспективная схема развития планировочной структуры Сталинграда — Волгограда с размещением домов (дворцов) культуры: *а* — схема планировки Большого Сталинграда, 1931 г.; *б* — схема Сталинграда и промышленного района, 1942 г.; *в* — генеральный план Сталинграда, 1945—1957 гг. (арх. К. Алабян и др.); *г* — карта Волгограда, 1990 г.; *д* — карта Волгограда, 2001 г.; *е* — генеральный план Волгограда с указанием местоположения общественных пространств ДК (настоящее время)

В настоящее время этой проблеме уделяется все большее внимание на государственном уровне. Разработана «Стратегия государственной культурной политики на период до 2030 года», другие федеральные документы, для которых приоритетным направлением является «решение задачи сохранения культурных ценностей и традиций народов Российской Федерации, материального и нематериального наследия культуры России и использования его в качестве ресурса духовного и экономического развития»[3] [14].

Поэтому возможность возвращения ДК к активной социальной жизни города является актуальной задачей. Для этого необходимо исследовать их состояние, оценить возможности использования в увязке с прилегающей территорией в контексте современного развития города с учетом возможности последующего формирования системы креативных пространств.

В рамках исследования [15] был проведен анализ существующих ДК г. Волгограда по следующим группам факторов:

- особенности размещения в планировочной структуре города, административных районов;
- композиционно-пространственная организация и связи с прилегающей территорией;
- периоды и стилистика застройки;
- наличие (отсутствие) статуса объекта культурного наследия;
- функциональное насыщение и особенности современного использования объекта.

Была выявлена высокая концентрация ДК в центральной части города, имеющей сравнительно небольшую площадь. Для периферийных районов сохраняется количество 2—3 объекта на район, однако из-за разницы в площадях административных единиц города во многих из них очевидна нехватка не только культурно-просветительских организаций, но и общественных пространств в целом. Были выявлены следующие приемы организации пространств:

- локальные пространства, образованные объектом культуры и прилегающей к нему накопительной площадью (размещаются в плотной исторической застройке и более разреженной периферийной);
- фронтальные пространства, включают объекты, ориентированные на основные магистрали главным фасадом, воспринимаются преимущественно фронтально и занимают весь участок, накопительная площадь часто отсутствует;
- глубинные пространства, расположены в отдалении от главных городских магистралей, формируют комплекс «здание + парковая зона или сквер».

Большинство рассмотренных объектов г. Волгограда продолжают выполнять первоначально заложенные культурно-просветительские функции (кружки и студии художественной самодеятельности, сценические площадки, музейно-выставочные площади), дополненные не свойственными функциями арендаторов, что не способствует повышению эстетического уровня и интереса горожан к данным территориям.

[3] Распоряжение Правительства РФ от 29.02.2016 № 326-р (ред. 30.03.2018) «Об утверждении Стратегии государственной культурной политики на период до 2030 года».

Анализ историко-культурной ценности ДК г. Волгограда установил основные периоды застройки (рис. 2):

- объекты, возведенные в 1930—1940 гг. XX века (в стиле советского конструктивизма);
- объекты, возведенные в 1950—1960 гг. XX века (в стиле сталинского ампира);
- объекты, возведенные в 1970—1980 гг. XX века (лаконичные проектные решения, часто типовые).

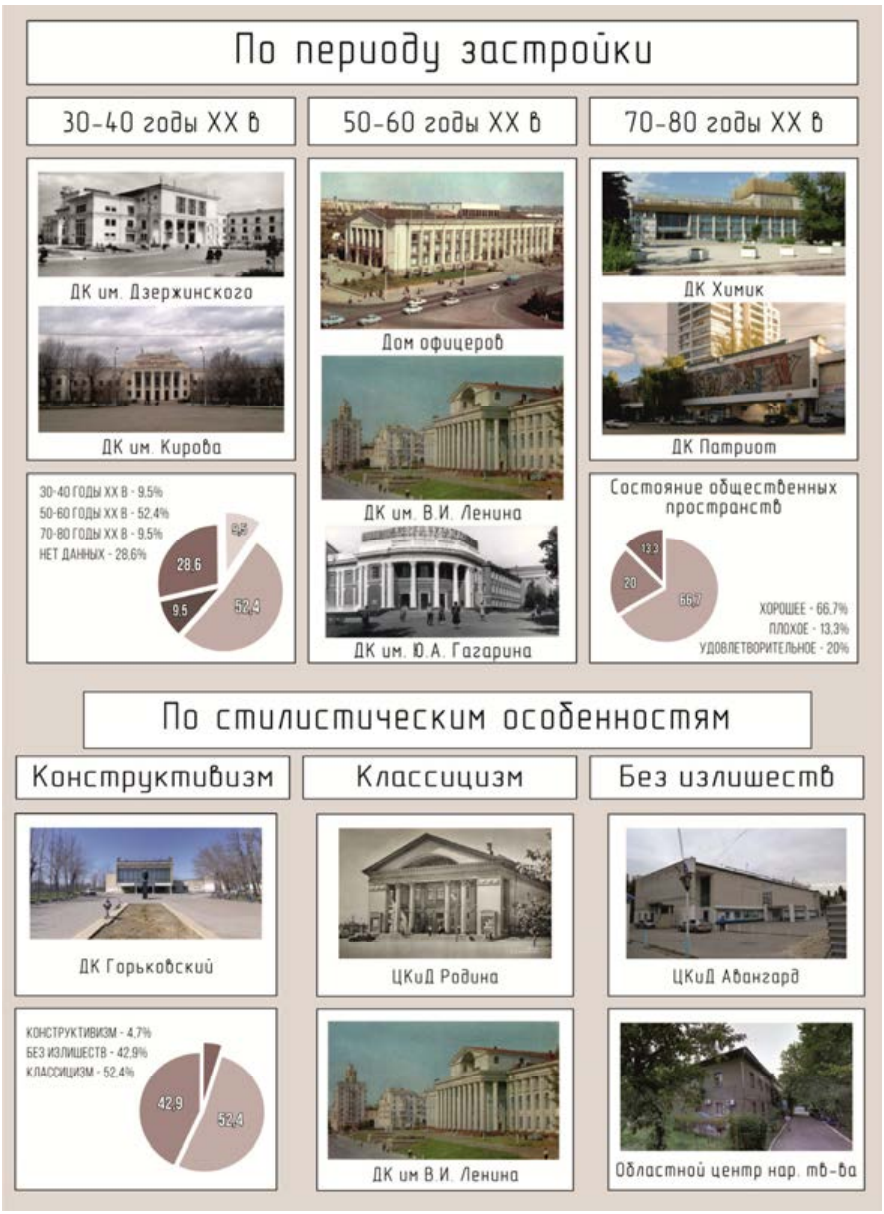


Рис. 2. Типология домов культуры г. Волгограда по периодам застройки и стилистическим особенностям

Социальная роль ДК и их территорий в современном городском сообществе снижена по сравнению с прошлыми десятилетиями, в настоящее время они охватывают интересы незначительной части населения, преимущественно школьников и пожилых людей и не приспособлены к проведению масштабных зрелищных городских мероприятий, способных заинтересовать широкий круг жителей.

Таким образом, несмотря на уникальный градостроительный и социокультурный потенциал территории, ДК г. Волгограда используются недостаточно эффективно и необходим поиск новых приемов их социально-пространственной трансформации.

На основе проведенного анализа и с учетом высокой социальной значимости территорий существующих ДК и их креативного потенциала можно выделить основные принципы формирования на их базе креативных пространств в контексте региональных особенностей г. Волгограда:

- адекватность предлагаемых преобразований характеру размещения объекта в планировочной структуре города (центр города / планировочных районов, жилая высотная или малоэтажная застройка), стилистическим и смысловым особенностям пространства;
- соответствие предлагаемой потребителю материально-пространственной среды социальному заказу (потребности в пространствах с общественно значимым содержанием, представляющим интерес для всех социальных слоев и групп населения);
- проницаемость — создание смысловых, визуальных, стилистических связей здания и прилегающего пространства;
- отсутствие однозначной фиксации границы функциональных зон пространства и возможность их трансформации друг в друга и в смежные элементы городской ткани при необходимости;
- многофункциональность открытых и закрытых пространств, готовность принять многие общественные функции;
- неординарность замысла формирования пространства, богатство форм и стилевых решений объемно-пространственных композиций объектов пространства, постоянное дополнение и обновление элементов среды;
- эксклюзивность элементов организации пространств: зданий, сооружений, малых форм архитектуры, арт-объектов, элементов благоустройства;
- перманентное изменение характера восприятия пространства за счет смены естественного и искусственного освещения, погодных условий времени суток и сезона;
- перфоманс — активное участие потребителя в формировании и трансформации пространства, взаимодействие художника и зрителя при создании.

Исходя из междисциплинарного и комплексного подходов, методы формирования креативных пространств должны быть пластичны и адаптивны к изменениям в социальных слоях творческих горожан. Развитие городских креативных пространств должно базироваться на использовании сценарного моделирования, позволяющего мобильно организовывать пространства с учетом изменяющихся требований. *Сценарный подход* предусматривает создание социально-пространственных комплексов, цепочки эпизодов средового поведения, следующих один за другим и объединенных маршрутом движе-

ния на основе социальных практик [16, 17], которые можно объединить в следующие группы:

- необходимые (функционально и технологически обусловленные);
- необязательные (прогулки, досуг);
- социальные (любые виды контактов) [18].

Городская среда представляется как пространственное выражение события — воображаемой схемы организации и использования пространства, построенной на основе общей темы или движения во времени, закрепляющих и изменяющих его форму [19]. Исходя из этого, в проектировании креативных пространств города можно выделить следующие типы сценариев: сценография, деятельностные, информационные, сценарии обустройства.

Так, разработка сценария организации креативного пространства по типу «сценография» предусматривает оформление пространства по аналогии с театральным спектаклем, действом, шоу за счет создания изобразительно-пластического образа в сценическом времени и пространстве. «Переживание» времени и пространства происходит по мере передвижения зрителя по маршруту, в котором городское окружение служит театрализованной декорацией, провоцирующей к созданию среды общения и социальных контактов. Инструментами моделирования пространства в этом случае становятся: свет и цветовое решение, организация направленности и характера движения посетителей, акустические спецэффекты и проекции, трансформирующиеся мобильные элементы декора и оборудования, арт-объекты.

Креативные пространства как территории общего пользования с наиболее высокой степенью социального освоения характеризуются полифункциональностью, наличием значительного количества точек притяжения, пересечения пешеходных маршрутов, становятся важными топологическими объектами, влияющими на окружение, что делает актуальной разработку деятельностных сценариев их развития. Деятельностные сценарии включают сценарий точек притяжения, реализуемый за счет использования выразительных форм в пространстве, смысловых акцентов и информационных доминант. Сценарий «праздников и повседневности» предусматривает размещение акцентов, информационное обеспечение, наличие трансформирующегося оборудования, имеет функциональные разновидности: искусство и ремесла, мультимедиа, обучение, сфера развлечений, арт-кафе. «Дневной» и «ночной» сценарии проектируются за счет динамической трансформации «мизансцен», «точек притяжения» в светлое и темное время суток. Функциональный сценарий связан со сложными технологическими процессами, перманентно или постоянно возникающими в интерьере городской среды: стабильный сценарий движения в пешеходной зоне или перманентный сценарий — городской концерт, велотуризм как часть событийного туризма в форме традиционных кратковременных экскурсий, военно-исторических и игровых программ (квестов), служащих популяризации вновь формируемых креативных пространств.

Коммуникационный сценарий обеспечивает связь между отдельными элементами пространства включает: архитектурные средства (входные группы, навесы, временные легкие конструкции), разработку поверхности земли с выделением транзитных и пассивных зон свободного общения, световые элементы коммуникативных связей.

Группа информационных сценариев предусматривает размещение и концентрацию в пространстве «опорных точек» и «точек доступа», закрепленных конструктивными, колористическими, архитектурными и декоративными приемами, средствами декоративно-прикладного искусства и информационных дизайнерских элементов (таблички, указатели, информационные табло).

В отдельную группу сценариев проектирования креативных пространств следует отнести «сценарии обустройства» — ярмарок, фестивалей, концертов, выставок под открытым небом, предусматривающие достаточную долю импровизации и аттрактивности. Организация зоны мастер-классов и ремесел предусматривает установку типовых павильонов, легких навесов оформленных в свободно выбранном стиле и концепте (арт-салоны, творческие мастерские, кафе), а в выходные и праздничные дни мобильные конструкции позволяют проводить ярмарки, концерты, фестивали.

В основе приведенной системы сценариев проектирования креативных пространств города лежит режиссура, а главными средообразующими компонентами выступают специальное оборудование и визуально-коммуникационные технологии организации и проектирования. При этом при разработке сценария функционирования пространства необходимо учитывать:

- тип пространства (по стилистике и периоду застройки);
- особенности его композиционного построения (локальные, фронтальные, глубинные);
- градостроительные особенности территории (часть более крупной рекреационной или планировочной системы, наличие развитой инфраструктуры, расположение в зоне ПЗЗ, предусматривающей организацию открытых общественных пространств);
- культурно-историческую ценность объекта (наличие статуса объекта культурного наследия).

Сценарный подход подразумевает наличие общей темы, объединяющей все виды активностей, реализуемых в рамках креативного пространства. В данном случае ядерный объект такого пространства — ДК, позволяет сгенерировать темы, дополняющие его образ и функциональное назначение. Так, на территориях креативных общественных пространств, ядром которых является ДК, в рамках сценарного подхода могут быть развиты следующие темы.

1. «Искусство» — объединяет различные формы пространственного, временного и пространственно-временного искусства. Тема предусматривает разработку выставочных площадок (открытых и закрытых), размещение арт-объектов, танцплощадок, открытых лекториев, временных легких сооружений для проведения мастер-классов. Дизайн пространства должен быть нацелен на создание вдохновляющей среды, побуждающей к творческой деятельности (рис. 3). Маршрут движения строится таким образом, чтобы по мере приближения к ядерному объекту росло количество эмоциональных впечатлений. Рекомендуется использовать классические приемы планировочной организации и композиции пространства. Освещение следует применять статическое, нейтрально белое.

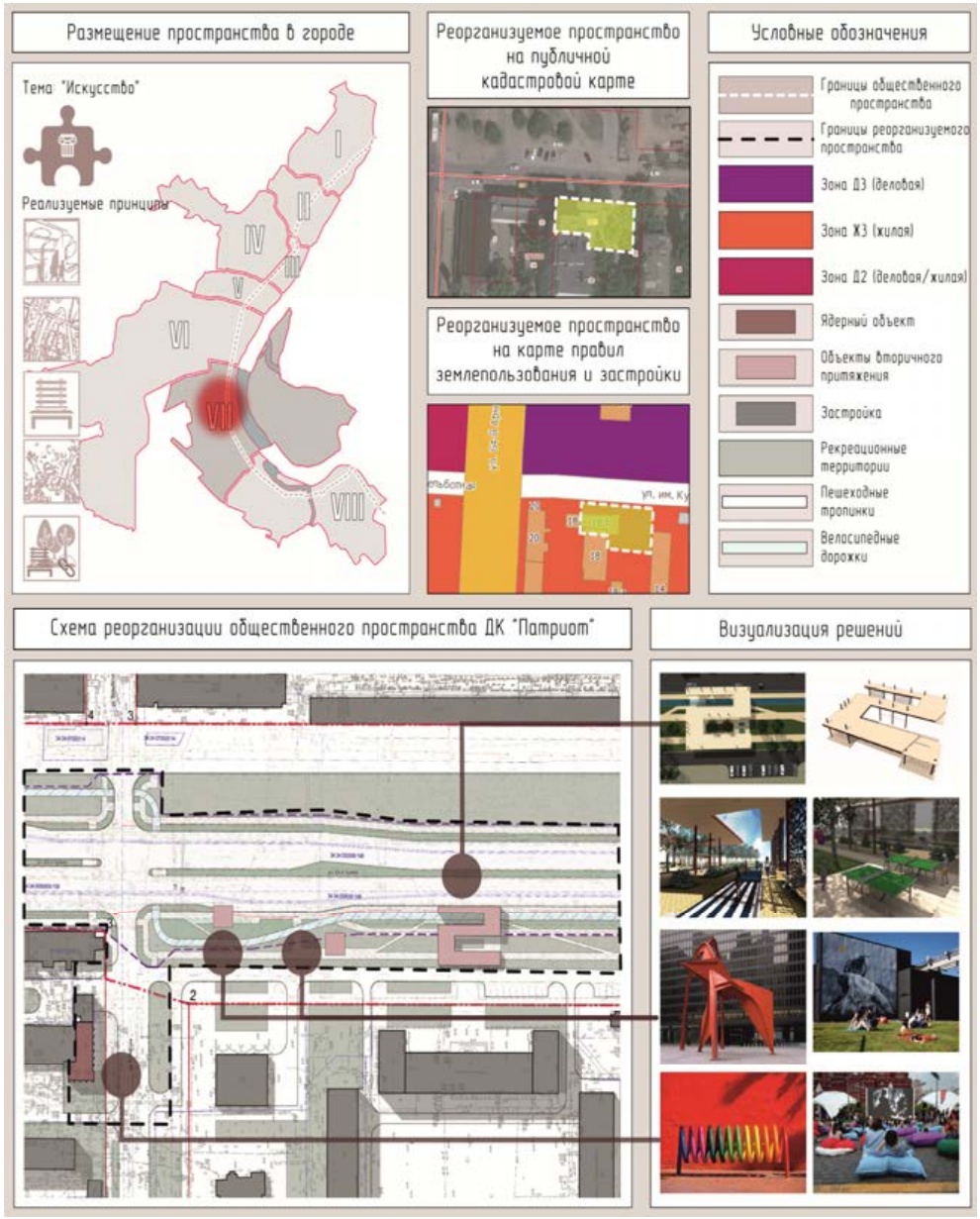


Рис. 3. Формирование креативного пространства на примере территории, прилегающей к ДК «Патриот» в Кировском районе г. Волгограда на основе реализации темы «Искусство» (автор С. А. Бровченко, научный руководитель И. Н. Етеревская)

2. «Приключение» — объединяет исторический контекст места с различными видами активностей, прямо или косвенно с ним соотносящихся. Сюда относятся не только исторические реконструкции, но и ролевые игры живого действия, это могут быть костюмированные представления по мотивам художественных произведений, квесты, веревочные парки, тематические детские площадки, минираскопки. В рамках данной темы рекомендуется разрабатывать площадки для размещения оборудования веревочных парков,

площадки для квестов, которые могут включать в себя исследование истории ядерного объекта. Рекомендуется сформировать активный ландшафт, а также использовать приемы свободной, живописной планировки, что позволит сформировать дух места и разнообразить получаемые впечатления. Дизайн среды должен быть нацелен на погружение в исторический, мифологический, фэнтезийный контекст. Освещение преимущественно теплых оттенков, в сочетании с динамической подачей.

3. «Исследование» — данная тема может объединять экспозиции достижений науки и техники, проведение тематических лекций, безопасных экспериментов, арт-объектов, построенных по принципу кинетических скульптур, VR-игры. В рамках данной темы рекомендуется разработка площадок для размещения научных и технических экспозиций, кинетических скульптур, интерактивных арт-объектов, лекториев (закрытых и на открытом воздухе), световых инсталляций, моделей в миниатюре, тематических детских площадок и прочее. Ландшафт рекомендуется проектировать смешанный, чередуя активный и спокойный рельеф. Планировка и композиция пространства может варьироваться. Дизайн среды должен отвечать современным направлениям, быть в некоторой степени футуристичным, может противопоставляться дизайну окружающей среды. Освещение следует выстраивать на сочетании теплого и холодного света.

4. «Актив» — данная тема может объединять любые спортивные занятия на открытом воздухе, подходящие под размеры территории, скейт-парки, велодорожки, танцплощадки, туризм в различных своих проявлениях, зоны медитации, уличные тренажеры, детские площадки. В рамках данной темы рекомендуется разработка пешеходных и веломаршрутов, площадок для коллективных физических упражнений, площадок, занимаемых уличными тренажерами, рамп для скейтеров и велосипедистов, площадок для выступлений. Рекомендуется проектировать активный ландшафт. Дизайн среды следует разрабатывать ярким, современным, апеллируя в большей степени к уличному искусству. Следует предусматривать динамическое освещение.

Таким образом, формирование креативных пространств на основе существующих ДК и прилегающих к ним территорий позволит оживить затухающие городские зоны, придать новый долгосрочный вектор их развитию. Исходя из особенностей и периода основания, в планировочной структуре города выделяются креативные пространства разной степени культурно-исторической ценности, характера пространственной организации и функционирования, что требует индивидуального гибкого подхода к выработке приемов их организации. А одним из основополагающих принципов социально-пространственной трансформации данных городских территорий, становится принцип исторической преемственности, предусматривающий выявление и сохранение исторически сложившейся среды с уникальными зданиями и сооружениями, элементами ландшафта, возрождение региональных «памятных мест». При этом социально-пространственная организация креативных пространств не предполагает погружение в прошлое через стилизацию и копирование, а предусматривает создание сценариев развития с учетом индивидуализации и эстетизации их облика, формирования устойчивых связей между прошлым и современностью через поиск гармоничного сочетания исторических объектов и прилегающего пространства.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Джекобс Дж.* Смерть и жизнь больших американских городов / пер. Л. Мотылев. М.: Новое издательство, 2011. 460 с. URL: https://socioline.ru/book/dzhejndzhekobs-smert-i-zhizn-bolshih-amerikanskih-gorodov.

2. *Лебедева Е. В.* Трансформация публичного пространства постсоветских городов // Социология. 2016. № 4. с. 107—115. URL: http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/172594/1/107-115.pdf.

3. *Eterevskaya I. N., Yastrebova N. A., Stetsenko S. E.* Features of the Transformation of Urban Public Spaces Based on Their Socio-Cultural Potential // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 753. International science and technology conference «FarEastCon—2019» (1—4 October 2019, Russky Island, Russian Federation) / Far Eastern Federal University; Vladivostok Branch of Russian Customs Academy. [IOP Publishing], 2020. Chapter 2. 7 p. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757—899X/753/3/032004.

4. *Madanipour A., Knierbein S., Degros A.* Public space and the challenges of urban transformation in Europe. New York, London, Routledge, 2014. 217 p. URL: https://carleton.ca/sics/wp-content/uploads/Elzanowski_Public_Space_2014.pdf.

5. *Харви Д.* Право на город // Логос. 2008. № 3. С. 80—94.

6. *Княгинин В. Н.* Креативная индустрия, трансформирующая пространство города. Лекция в центре современного искусства ВИНЗАВОД. Москва, 2009 г. URL: http://www.csr-nw.ru/publications/video/lekciya_kreativnaya_industriya_transformiruyuwaya_prostranstvo_goroda.

7. *Птичникова Г. А., Антюфеев А. В.* Имидж современного города и его архитектурный образ // Социология города. 2015. № 3. С. 5—21. URL: http://vgasu.ru/science/journals/city-sociology/archive.

8. *Флорида Р.* Креативный класс: люди, которые меняют будущее / Пер. с англ. М.: Классика XXI, 2005. 35 с.

9. *Лэндри Ч.* Креативный город. М.: Классика XXI, 2006. 399 с.

10. *Lloyd P.* Creativespace. U. K.: Capstone, 2009. P. 214—226.

11. *Быстрова Т. Ю.* Парк Эмшер: принципы и приемы реабилитации промышленных территорий // Академический вестник. УралНИИпроект; РААСН, 2014. № 2. С. 9.

12. *Eterevskaya I. N., Nazarova M. P.* Features of the socio-spatial organization of creative spaces of a modern city // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 962 : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020) (6—12 September 2020, Sochi, Russia). [IOP Publishing], 2020. Iss. 3. 7 p. DOI: 10.1088/1757-899X/962/3/032079.

13. *Крашенинников А. В.* Сценарное проектирование городской среды // Architecture and Modern Information Technologies. 2017. № 4(41). С. 242—256. URL: http://marhi.ru/AMIT/2017/4kvart17/18_krasheninnikov/index.php

14. *Shane D. G.* Recombinant Urbanism: Conceptual Modeling in Architecture, Urban Design and City Theory, 2005. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Recombinant-Urbanism%3A-Conceptual-Modeling-in-Urban-Shane/2db7d4890280e13e004b4e7902d1cc93a4e01a7a.

15. *Гейл Я.* Жизнь среди зданий / Концерн «КРОСТ», пер. с англ. М.: Альпина Паблишер, 2012. 200 с.

16. *Моисеев Ю. М.* Градостроительная интерпретация социального заказа: Хартия общественного пространства // Архитектура и строительство России. 2015. № 10. С. 2—11.

© Етеревская И. Н., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Етеревская И. Н. Особенности социально-пространственной организации креативных пространств современного города // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 231—244.

Об авторе:

Етеревская Ирина Николаевна — канд. арх., доц. каф. урбанистики и теории архитектуры, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; eterevskaya_irina@mail.ru

Irina N. Eterevskaya

Volgograd State Technical University

FEATURES OF THE SOCIO-SPATIAL ORGANIZATION OF CREATIVE SPACES OF A MODERN CITY

The features of the transformation of urban public spaces in the context of the innovative and creative vector of development of a modern city are considered, the definition of the urban creative space is given, the specificity of forms and methods of their organization is described. As the platforms for the development of the city's creative potential, it is proposed to use the existing public spaces adjoining to the houses of culture, which often have their own unique history, identity, "memory of the place"; a factor-by-factor analysis of these territories in Volgograd is given taking into account their typology by periods and stylistics of construction, the presence (absence) of the status of a cultural heritage object, the specifics of location in the planning structure of the city, compositional and spatial organization, functional saturation and modern use of the object. The principles and methods of formation of creative spaces in the context of the regional peculiarities of Volgograd are formulated, based on the scenario approach, which provides for development by types: "scenography", "activity", "information", "arrangement scenarios", topics recommended for implementation within creative space are considered. The conclusion about the need to preserve the characteristic spaces of the city is made, containing the outstanding historical elements, and the formation of creative spaces based on the principle of historical continuity, built on a combination of historical objects and new components of the environment.

K e y w o r d s: creative spaces, urban open public spaces, urban environment, scenario modeling.

For citation:

Eterevskaya I. N. [Features of the socio-spatial organization of creative spaces of a modern 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], 2021, iss. 1, pp. 231—244.

About author:

Irina N. Eterevskaya — Candidate of Architecture, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; eterevskaya_irina@mail.ru

УДК 711.3.32.711.4-168

Р. Х. Ишмаметов

Волгоградский государственный технический университет

ВОПРОСЫ КАЧЕСТВА ТЕРРИТОРИАЛЬНО-ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИИ ВАХТОВЫХ ПОСЕЛЕНИЙ

Рассмотрены тенденции глобальных процессов, на основе которых возможно создание алгоритма поэтапного освоения территорий России. Предлагается структура формирования модели пространственной организации вахтовых поселений с функциональной программой создания качества среды обитания, сопоставимого с качеством жизнеобеспечения в крупном урбанизированном пространстве, с учетом информационно-технологического ресурса современного мира, формирующего потенциал устойчивого развития.

К л ю ч е в ы е с л о в а: качество среды обитания, вахтовые поселения, урбанизированная среда, архитектурно-пространственная организация, тенденции глобальных процессов, антропогенно-интегрированная структура, мобильная адаптированная архитектура, планировочный модуль, архитектурно-планировочный кластер.

Введение

Освоение новых территорий всегда было и остается одной из приоритетных задач любого государства. Вся история человечества сводится к тому, что люди пытались получить для себя как можно больше пространства. Перманентное стремление к улучшению качества среды обитания, высокая мобильность, техническая и технологическая мощь и увеличивающаяся активность функциональных процессов в социуме позволяют сегодня осваивать территории, которые еще 20—30 лет назад были недоступны. Не просто осваивать, а создавать в них качество урбанизированного пространства, сравнимого с комфортной средой обитания крупных мегаполисов.

Целью статьи является определение принципов формирования пространственной организации вахтовых поселений на примере планировочной структуры системы территориального расселения в зоне влияния нефтегазового трубопроводного комплекса.

Задача исследования: определить тенденции, влияющие на формирование теоретической модели пространственной организации вахтового поселения различного таксономического уровня и иерархического статуса.

На территории России предпосылки, тенденции и возможности различного свойства для разработки концепции рассматриваемого аспекта вполне достаточны. Это обширные не освоенные, но разведанные месторождения Северной и Восточной Сибири, Дальнего Востока и Заполярья.

Основная гипотеза исследования формулировалась на комплексном анализе архитектурно-пространственной компоненты систематизации тенденций функционирования и развития зарубежных и отечественных вахтовых поселений с выявлением особенностей территориальной организации и качества среды обитания.

В результате определились модели пространственных, структурно-функциональных и инженерно-коммуникационных связей взаимодействия и морфологические типы пространственной адаптивности во внутренней

структуре вахтовых комплексов, которые в современной интерпретации определяются как *планировочные модули* [1, 2].

По пространственно-морфологическим признакам такие архитектурно-планировочные комплексы различаются как компактные, линейные, центричные. По своим блокировочным признакам они могут быть простыми — модули и комбинированными — кластеры (рис. 1, 2).

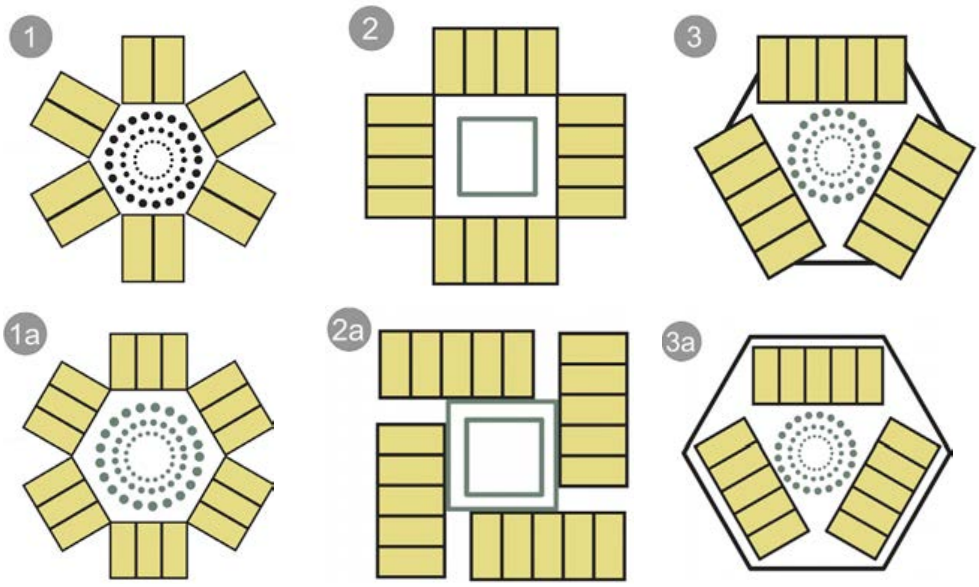


Рис. 1. Простые блокировочные типы архитектурно-пространственных структур (модули), разработано автором

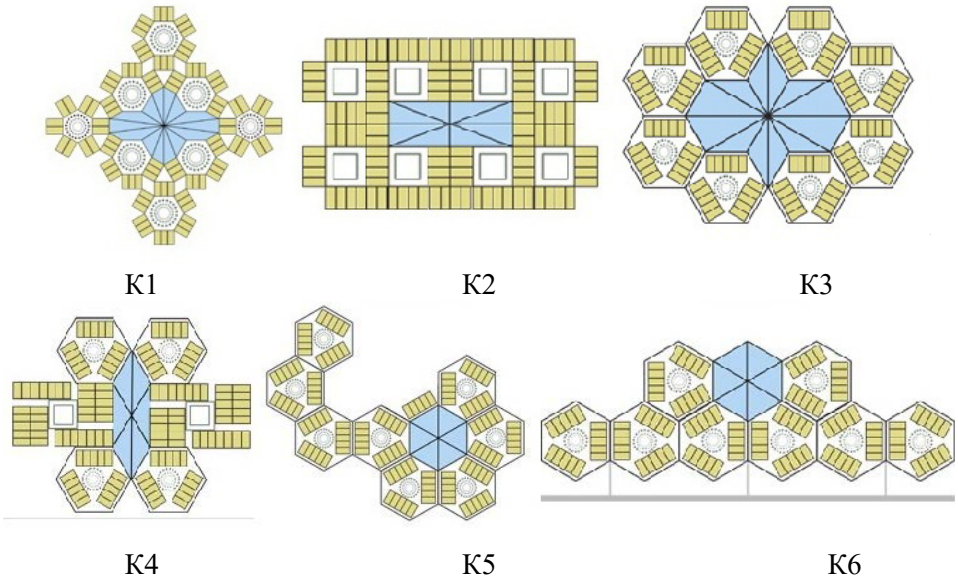


Рис. 2. Комбинированные типы архитектурно-пространственных структур (кластеры), разработано автором

Архитектурно-пространственные модули и кластеры формируют в своей структуре все необходимые для комфортной жизнедеятельности функциональные зоны — жилую, общественную, рекреационную, коммунальную и т. п. (рис. 3).

Рис. 3. Функциональная структура архитектурно-пространственного модуля

При необходимости любой планировочный сектор (участок) жилой функциональной зоны может быть трансформирован в объект социального или культурно-бытового обслуживания, такой как мини-школа (общеобразовательная, музыкальная, искусств и т. п.), детский сад или магазин [3]. Максимально возможное сближение жилой и производственной зон с расположением между ними сооружений инженерного оборудования способствуют наиболее эффективному экономическому и технологическому решению структуры сетей инженерных систем и коммуникаций при активном использовании BIM-технологий в процессе проектирования[4, 5] (рис. 4).

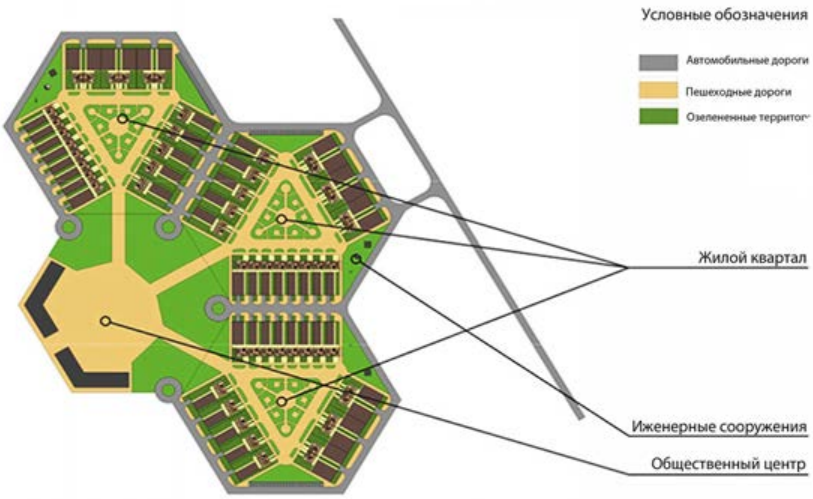


Рис. 4. Структура инженерных систем и коммуникаций пространственной организации жилого кластера с открытым типом общественного пространства

Комбинированные пространственные структуры вахтовых урбанизированных комплексов образовывают крупные по своей площади общественные центры, над которыми в районах Заполярья и Крайнего Севера рекомендуется устанавливать светопрозрачные купола, обеспечивающие оптимизацию температурно-влажностного режима и препятствующие проникновению атмосферных осадков в подкупольное пространство [6] (рис. 5).

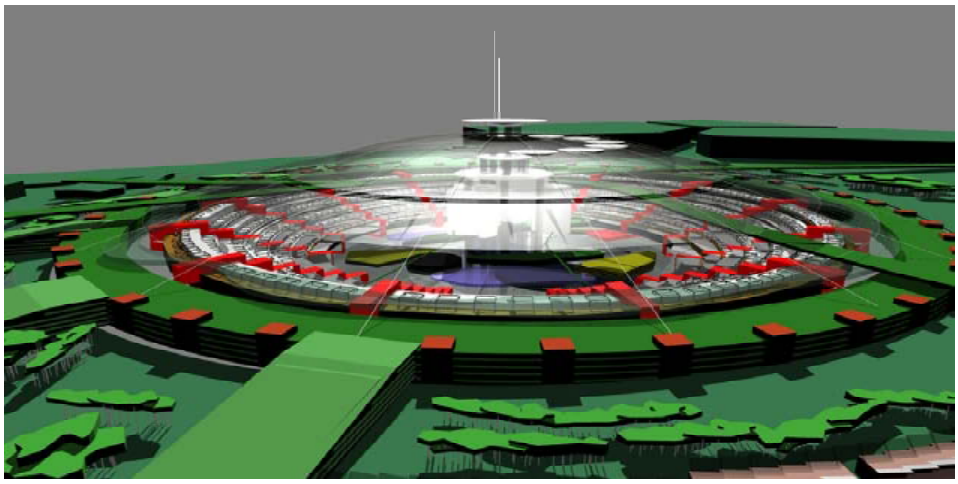


Рис. 5. Вариант применения светопроницаемого купола над общественным центром поселения (разработано проф. И. Г. Лежавой)

Форма и конструкция таких куполов будет зависеть от площади покрытия, геометрической конфигурации участка и рельефа местности [7, 8].

Таким образом, появляются два типа обустройства административно-общественных зон вахтовых поселений: открытые и крытые (рис. 6).

Рис. 6. Визуализация проекта центральной части вахтового п. Губкинский с применением светопроницаемого купола над общественным центром, разработано автором

Территориально-пространственная организация автономного вахтового комплекса должна обладать мобильными свойствами вахтового поселка, но при этом иметь функционально-пространственную структуру, характерную для стационарных малоэтажных урбанизированных пространств, основанную на принципах динамично развивающихся современных научно-технических и технологических процессов, позволяющих создать инновационную структуру пространственной организации вахтового мобильного комплекса.

Принципами оптимизации пространственной структуры вахтового комплекса являются:

• принцип группировки и центричности единого пространства;

• принцип строительно-технологической оптимизации;

• принцип учета природно-антропогенных факторов территории.

Создание модели пространственной структуры вахтового урбанизированного комплекса реализует первоочередные задачи, которые формируют потенциал дальнейшего диверсионного освоения региона. Реализация такой стратегии предполагает долгосрочную перспективу. Алгоритм строится на двух главных векторах, который называется *стратегией встречных динамик* [9]:

- модернизация сложившейся системы расселения с активным освоением природного ресурса на основе активности процессов пространственной связности [10];
- создание высоко урбанизированной адаптивной комфортной среды в рамках концепции *целевой аккупунктации пространственного освоения* на основе развития структуры вахтового урбанизированного комплекса различной отраслевой принадлежности.

Результаты исследования

При анализе и оценке сложившихся отечественных территориально-пространственных узловых систем расселения нефтегазовой отрасли и изучении окружающего антропогенного и природного контекста определились некоторые принципы формирования функционально-планировочной структуры и территориальной организации вахтовых поселений. Вахтовые мобильные и стационарные поселения — это пространственные компоненты, которые в рамках современных градостроительных теорий освоения пространства формулируются как урбанистические кластеры, пространственные ризомы и архипелаги антропогенного качества.

Урбанистические кластеры — плановые поселения без проблем больших городов с самодостаточной инфраструктурой.

Пространственные ризомы — фиксирующие принципиально нелинейный способ организации целостности, как для внутренней имманентной подвижности, так и для интерпретационного плюрализма.

Архипелаги антропогенного качества — группы схожих по функциональной и морфологической структуре пространственных мобильных и стационарных комплексов [11].

Основным *принципом формирования урбанистической структуры вахтового комплекса* является перманентное функциональное (согласно целевым программам социума) и территориальное развитие с учетом сложившегося природного и расселенческого контекста. Сформулированный принцип позволяет предложить теоретическую модель пространственной структуры вахтового урбанизированного комплекса с функциональной программой

формирования качества, сопоставимого с качеством жизнедеятельности в городской среде с учетом информационно-технологического ресурса современного мира с потенциалом устойчивого развития (рис. 7—9).

Рис. 7. Проектное решение п. Губкинский Пуровского района Ямало-Ненецкого автономного округа, разработано автором

Рис. 8. Проектное решение: п. Чуйское Республики Алтай Онгудайского района, разработано автором

В результате анализа по пяти основным аспектам (функциональным, социально-экономическим, экологическим, транспортно-коммуникационным, морфологическим) определены границы экспериментального проектирования — территории вахтовых поселений газопровода «Сила Сибири-2» при компрессорных станциях «Губкинская» (находящаяся в экстремально-холодной климатической зоне, рис. 7) и «Чуйская» (наиболее южная, расположенная в труднодоступной горной зоне, рис. 8).

Проведена работа по проектированию универсального вахтового комплекса для эксплуатации на равнинных, в том числе, труднодоступных территориях с нештатными климатическими условиями (рис. 9, 10).

Рис. 9. Универсальный вахтовый комплекс, разработано автором

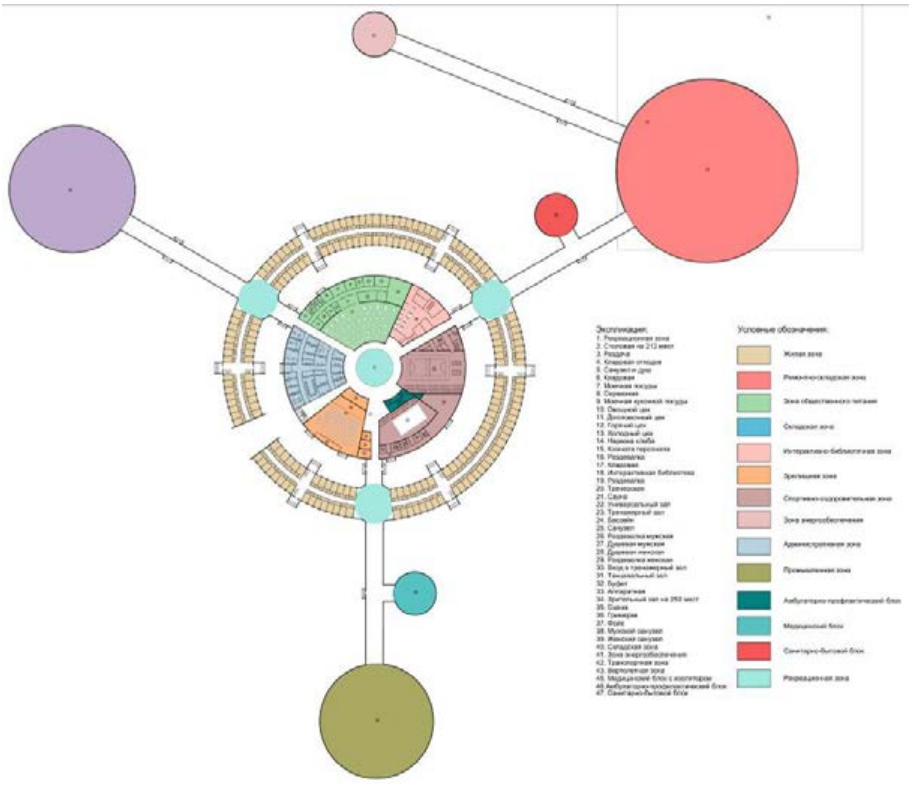


Рис. 10. Функционально-планировочная организация универсального вахтового комплекса, разработано автором

При решении планировочной организации вахтовых поселений на линейных объектах нефтегазовой отрасли необходимо обеспечить рациональное использование инженерного оборудования и благоустройства территории. Одним из важных планировочных показателей, учитывающих эти качества, является показатель линейной плотности. Сокращение его достигается уменьшением протяженности улиц. В жилой застройке это достигается сокращением ширины усадебных и квартирных участков. Для вахтовых стационарных комплексов предлагается показатель линейной плотности от 5 до 10 м^2 жилой площади на 1 п. м проездов.

Необходимо существенно разнообразить вариативность функционального наполнения и создать новое качество комфорта вахтовых поселений, интегрировав их в систему глобальных мировых процессов, отвечающих высоким требованиям эволюционирующего социума.

В контексте процессов формирования системы расселения на основе метода целевой акупунктуры пространства через создание локальных кластеров комфортной среды (в том числе вахтовых поселений), становится очевидным, что необходимо более эффективно проводить процесс освоения труднодоступных свободных территорий с возможностью формирования потенциала глобального функционально-пространственного ареала.

Заключение

Таким образом, дальнейшая работа над созданием модели целостного пространства вахтовых поселений в рамках архитектурно-планировочной организации вахтового урбанизированного кластера новой структурной формации позволит аргументировано подтвердить главную теоретическую гипотезу направленного освоения регионов России с перспективой вхождения в структуру глобальной сети информационно-технологической связности высокоорганизованных пространственных структур — мобильных и стационарных вахтовых поселений нового уровня. Одним из путей решения данной задачи является развитие транспортной трубопроводной сети нефтегазовой отрасли на основе интенсификации процесса расселения, при исследованном ресурсе и установленных пространственных характеристиках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Душко О. В., Ишмаметов Р. Х.* Использование жилого универсального модуля в градостроительной структуре малых городов // The Scientific Heritage. 2018. № 22. С. 45—47.

2. *Ишмаметов Р. Х., Самойлова Н. В.* Принципы архитектурно-планировочной организации автономных жилых комплексов нефтегазовой отрасли // Инженерный Вестник Дона. 2019. № 7. URL: http://www.ivdon.ru.

3. *Растяпина О. А.* Определение показателей оценки благоустройства дворового пространства // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 1(78). С. 287—296.

4. Новая парадигма городского домостроения / А. В. Антюфеев, А. Макулан, В. Б. Остробородов, М. П. Назарова // Социология города. 2016. № 1. С. 18—30.

5. *Бурлаченко О. В., Бурлаченко А. О., Оганесян О. В.* Выбор оптимальных технологических решений в условиях плотной городской застройки на основе BIM-технологий // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 1(78). С. 329—335.

6. *Ишмаметов Р. Х., Абрамян С. Г., Будунов Ш. М.* Архитектурно-планировочная организация общественных зон автономных жилых комплексов нефтегазовой отрасли // Инженерный Вестник Дона. 2019. № 8. URL: http://www.ivdon.ru.

7. *Абрамян С. Г., Ишмаметов Р. Х.* Устройство светопрозрачных покрытий современных зданий и сооружений: материалы и технологии (монография). Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2017. 131 с.

8. Energy savings with outdoor temperature-based smart ventilation control strategies in advanced California homes / B. D. Less, S. M. Dutton, I. S. Walker, M. H. Sherman [etc.] // Energy and Buildings. 2019. Vol. 194. Pp. 317—327. DOI: 10.1016/j.enbuild.2019.04.028.

9. *Тонкой И. В., Рублев И. В.* К вопросу формирования структуры межрусловых пространств в развитии региональных систем расселения // Тезисы докладов международной научно- практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов (4—8 апреля 2016 г.). М.: МАРХИ. С. 234—236.

10. *Де Портзампарк К.* От киберпространства к физическому пространству / пер. А. Муратов // «Проект International». 2011. № 28. С. 44.

11. *Тонкой И. В., Глухова А. В.* Концепция «умного города» как научно-производственного центра со средой нового качества / Тезисы докладов международной научно- практической конференции профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов (06—10 апреля 2015 г.). М.: МАРХИ. С. 308—310.

© Ишмаметов Р. Х., 2021

Поступила в редакцию
в феврале 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Ишмаметов Р. Х. Вопросы качества территориально-пространственной организации вахтовых поселений // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 245—253.

Об авторе:

Ишмаметов Рамиль Хамидуллович — доц. каф. урбанистики и теории архитектуры, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; ramil.euro-lux@mail.ru

Ramil' Kh. Ishmametov

Volgograd State Technical University

THE CONCEPT OF QUALITY OF THE TERRITORIAL SPATIAL COMPLEX OF MOBILE SETTLEMENTS

The trends of global processes based on the creation of an algorithm for the gradual development of the territories of Russia are considered. The structure of forming a model of spatial organization of shift settlements with a functional program for creating a quality of habitat comparable to the quality of life support in a large urbanized space, taking into account the information and technological resource of the modern world, which forms the potential for sustainable development, is proposed.

K e y w o r d s: habitat quality, shift settlements, urbanized environment, architectural and spatial organization, trends in global processes, anthropogenic-integrated structure, mobile adapted architecture, planning module, architectural and planning cluster.

For citation:

Ishmametov R. Kh. [The concept of quality of the territorial spatial complex of mobile settlements]. *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], 2021, iss. 1, pp. 245—253.

About author:

Ramil' Kh. Ishmametov — Docent of Urban Development and Theory of Architecture Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ramil.euro-lux@mail.ru

УДК 711.3.32.711.4-168

Р. Х. Ишмаметов

Волгоградский государственный технический университет

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ ФОРМИРОВАНИЯ ВАХТОВЫХ ПОСЕЛЕНИЙ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Рассмотрены предпосылки формирования территориально-пространственной организации вахтовых поселений в отечественной и зарубежной практике в структуре нефтегазовой отрасли. Предложены классификация и типы вахтовых поселений в соответствии с функциональной направленностью и продолжительностью функционирования. Определены основные факторы динамики развития функциональной и пространственной структуры вахтовых поселений. Выявлен потенциал структуроформирующего компонента системы расселения.

К л ю ч е в ы е с л о в а: вахтовые поселения, качество среды обитания, урбанизированная среда, архитектурно-пространственная организация, мобильная архитектура, моделирование пространства, освоение территории, качество комфортной среды, пространственное развитие, система расселения.

Введение

Пространственная организация мобильных поселений в историческом аспекте имеет многовековой опыт, и главной целью всегда было — оперативное освоение территорий для дальнейшего использования в стационарных режимах.

Моделирование пространства среды обитания любого таксономического уровня связано с перманентным процессом повышения комфорта с целью удовлетворения возрастающих потребностей социума [1]. В этой связи раскрываются новые возможности освоения территорий с особыми природно-климатическими и ландшафтными условиями. Наблюдаются активные процессы развития мобильных вахтовых поселений различного вида в условиях активных процессов добычи полезных ископаемых.

Современный уровень развития информационно-технологического потенциала обеспечивает возможность создания комфортной среды в любом ее проявлении и на всех этапах жизнедеятельности. При этом их функционирование сегодня определяется в основном производственно-технологической программой при слабой динамике повышения социального и экологического комфорта, обеспечивающей повышение качества проживания, связанного с эффективной и рациональной пространственной организацией жизнедеятельности. Для России процессы освоения свободных территорий происходят медленно и хаотично, в основном за счет мобильных вахтовых поселений, созданных на принципах техногенности и приоритете функционально-технологического компонента, без использования методов архитектурной и градостроительной практики.

Целью статьи является определение основных аспектов и тенденций, влияющих на формирование пространственной организации вахтовых поселений в зоне влияния нефтегазовой отрасли.

Задача исследования — провести комплексный обзор сложившихся форм пространственной организации вахтовых поселений в зарубежной и отечественной практике.

Мобильный образ жизни использовался на протяжении всей истории человечества, являясь прогрессивным видом организации пространства, впоследствии образовав новую форму трудовой деятельности — вахтовую, как основную в научно-экспедиционных и геолого-разведывательных процессах. Наиболее интенсивно этот способ используется со второй половины XX века в СССР с целью разведки и добычи крупнейших природных ресурсов, а также реализации научных программ для изучения природно-ландшафтных особенностей, что в результате формировало расселенческую структуру регионов страны.

Пространственная организация вахтовых поселений в современных условиях зависит от отраслевой направленности — научные исследования, изыскательские работы, военные и хозяйственные цели. Наиболее интенсивно в современных экономических условиях вахтовый метод используется в добывающей промышленности, а также объектного и линейного строительства. Вахтовые поселения эволюционировали в двух направлениях — в мобильные и стационарные образования при смене приоритета в процессах функционирования и развития.

Влияние административно-управленческого ресурса в новых экономических условиях определило выбор в сторону мобильного типа, как наименее затратного при организации пространственной среды вахтовых поселений. При этом качество среды остается на низком уровне, не обеспечивая необходимых социально-бытовых условий проживания. Функционально-планировочная структура не наполнена, пространство не ориентировано на сохранение здоровья и работоспособности человека, отсутствует потенциал функциональной имплементации в опорные пространственные узлы расселения.

Добывающая промышленность, а в ее составе нефтегазовая как наиболее востребованная и прибыльная — это экономическая платформа, способная интерполировать территориально-пространственную модель расселения в более рациональном алгоритме [2] (рис. 1).

Сегодня приоритет линейного вектора транспортной сети нефтегазовой отрасли России может обеспечивать структуроформирующую основу системы расселения различного таксономического уровня (рис. 2).

Выстраиваясь первоначально в территориально-планировочные элементы отраслевой транспортной структуры, возникает потенциал создания структуроформирующего компонента новой формы пространственной организации — от вахтового поселения к стационарным опорным узлам расселения (рис. 3).

В России и за рубежом накоплен большой практический опыт освоения новых территорий. Наиболее широкомасштабные научные проработки в этой сфере интенсивно велись в 1960—1980-е гг. прошлого века. Интенсификация промышленного производства, его бурный рост требовали большего количества природных источников энергии, таких как нефть и газ, на которых функционируют промышленность практически всех стран мира — от Европы до Китая и от Америки до Африки.

Эволюционные преобразования морфологии вахтовых поселений во всех странах происходили с учетом факторов и характеристик по природно-географическому, климатическому, социально-экономическому аспектам и функционально-отраслевой принадлежности. Функциональная направлен-

ность стала определяющей в развитии типового и классификационного многообразия объемно-пространственных и композиционных форм вахтового поселения.

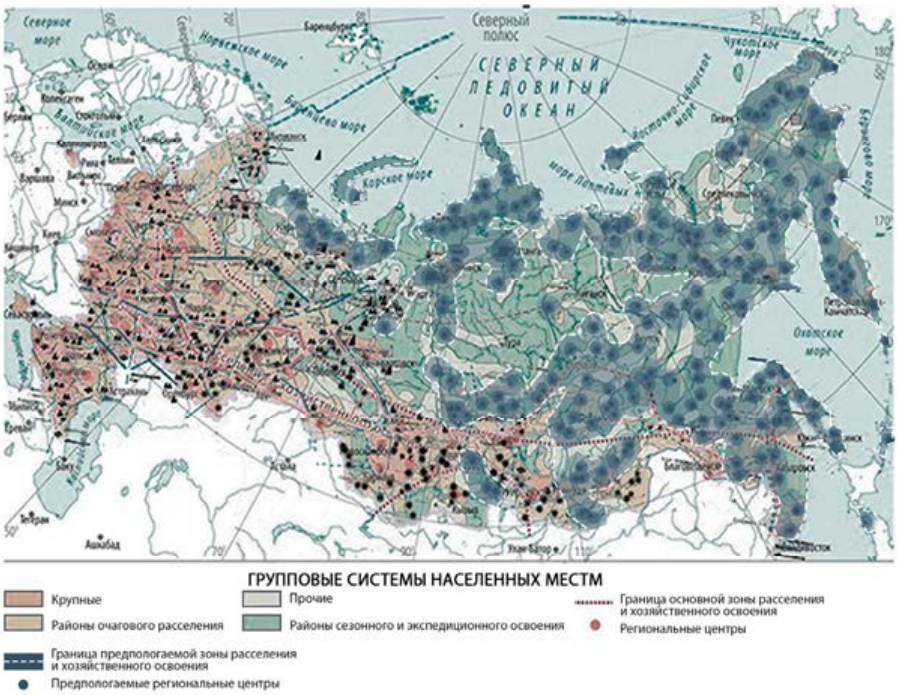


Рис. 1. Схема размещения разведанных месторождений полезных ископаемых на территории России с потенциалом стационарного освоения территорий

Рис. 2. Нефтегазовая структура Российской Федерации

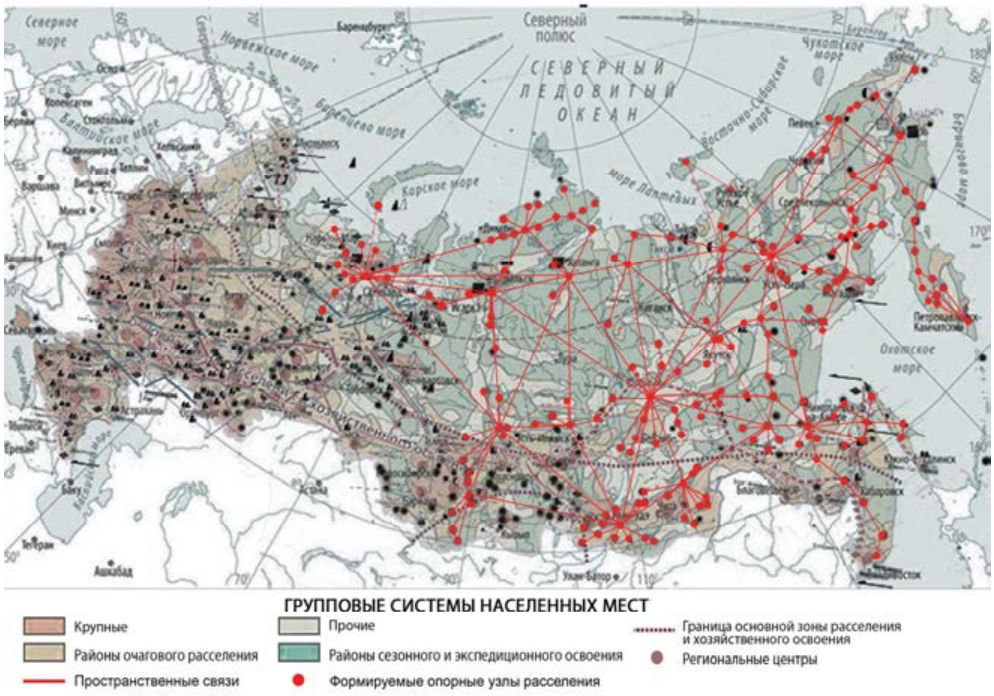


Рис. 3. Схема перспективного формирования системы расселения России на основе потенциала развития в опорные узловые структуры вахтовых поселений добывающей промышленности

Современные вахтовые и временные поселения можно классифицировать по следующим аспектам.

По причинам возникновения:

- проведение организационно-подготовительных работ освоения новых экономических районов;
- инженерно-геологические изыскания;
- строительство крупных промышленных объектов, железных дорог, каналов, трубопроводов, линий электропередач;
- добыча ресурсов промыслового характера;
- добыча ресурсов промышленного назначения;
- организация мест эвакуации от стихийных бедствий;
- военные лагеря временной дислокации.

В зависимости от контингента населения (по назначению): строителей; изыскателей; геологов; специалистов по обслуживанию трубопроводов; специалистов по эксплуатации и обслуживанию линейных объектов; приисковых рабочих; рыбаков и охотников; оленеводов; лесорубов; студенческих строительных отрядов; археологов; этнографических экспедиций; поселения беженцев; военные лагеря и полигоны.

Некоторые из этих поселений имеют свои разновидности. Поселок строителей подразделяется:

- на пионерный;
- базовый;

- линейный;
- участковый.

Геологические поселки имеют следующие виды:

- базовые поселки геологических экспедиций;
- поселки геологических партий;
- экспедиционные поселки.

По численности единовременно пребывающего населения:

- от нескольких десятков человек в поселениях оленеводов;
- от пятидесяти до двухсот человек;
- свыше двухсот человек до тысячи;
- свыше тысячи человек;
- от 10—15 тысяч в поселках на стройках энергетических объектов.

По продолжительности существования поселков:

- 2—3 недели,
- 1—2 сезона,
- 6—12 лет,
- 15—20 лет (базовые поселки геологических экспедиций, по добыче и переработке полезных ископаемых).

Все многообразие поселений временного характера подчиняется двум классификационным признакам:

- уровню стационарности,
- времени обитаемости поселков.

Поселения в зависимости от степени мобильности и продолжительности обитаемости можно разбить на следующие типы.

- временные поселки — срок существования которых на одном месте составляет не больше 1 года;
- постоянно обитаемые поселки — срок проживания людей больше 1 года;
- поселки на строительстве крупных энергетических и промышленных объектов, базы геологических экспедиций, поселки при лесоучастках.

Временно обитаемые поселки — срок проживания людей в которых составляет меньше 1 года: полевые станы, антарктические станции, кемпинги, поселки рыбаков и охотников, мобильные поселки (срок существования на месте менее 1 года).

Постоянно обитаемые поселки — срок существования от 1 до 3 лет: участковые поселки на приисках, поселки на строительстве железных дорог, поселки геологических партий (на одном месте проживания людей больше 1 года, но меньше 3 лет);

Временно обитаемые поселки на строительстве крупных объектов, базы геологических экспедиций, поселки при лесоучастках — срок проживания людей меньше 1 года: поселки строителей каналов, линий электропередачи, газопроводов и нефтепроводов; бригадные поселки строителей железных и автомобильных дорог; экспедиционные поселки изыскателей, геологов, археологов; стойбища оленеводов; поселения эвакуированных и беженцев; полигоны и лагеря военнослужащих.

Типы вахтовых поселков по системе производственной организации:

- стационарный, применяется при долгосрочной дислокации от 5 лет и более;
- мобильный, применяется при использовании поселка до 5 лет;

- высокомобильный, применяется при частом перемещении поселка по мере изменения фронта работ.

Помимо всех вышеперечисленных характеристик типы мобильных поселений и их состав можно классифицировать по продолжительности трудового цикла. В этой связи временные мобильные поселения могут быть нескольких типов:

- поселения, обслуживающие объекты, расположенные в радиусе одночасовой транспортной доступности от базового города с ежесменной доставкой рабочих на объекты;
- поселения, обслуживающие объекты, расположенные в радиусе двухчасовой транспортной доступности от базового города при вахтенном способе организации труда;
- поселения, обслуживающие объекты, расположенные в радиусе более чем двухчасовой транспортной доступности от базового города при экспедиционном способе организации труда.

Экологические вопросы тесно переплетены с проблематичным состоянием экономики и социальной сферы осваиваемых территорий. У окружающей среды появились проблемы вследствие вмешательства человека и использования ее ресурсов. Из-за добычи нефти и газа они стали масштабными. Особенно, когда мазут и природный газ стал основным источником получения энергии, вытеснив уголь.

Схожесть природно-климатических, географо-экономических факторов, совпадение временных рамок дают возможность провести аналогии, сравнить характер и конечные результаты процессов освоения малообжитых районов зарубежного (Канады, Аляски, Норвегии) и отечественного Севера [3]. В сопоставимых с Россией по объемам промышленного производства странах Америки и Европы (США, Канада, Германия), реальная потребность в обеспечении вахтовыми поселками колеблется от 500 тыс. до 2 млн $м^2$ в 10 лет (признанный срок износа поселков). Только в США более 2000 фирм работает с применением вахтового метода. При среднем размере поселка в 500…1000 $м^2$, суммарная потребность американской промышленности составляет от 1 до 2 млн $м^2$ в десятилетие.

В Норвегии, так же как в странах Ближнего Востока и Средней Азии, процесс нефтегазового освоения природных ресурсов полностью контролируется государством. Разработана законодательная база, способствующая повышению технологической и экономической эффективности отрасли. Однако вопросы организации пространственного развития вахтового поселения в структуре системы расселения не рассматриваются. Упор делается на технологическое совершенствование процесса добычи природных ресурсов и минимизации, как функциональной вариативности, так и размеров функциональных зон.

В 1930—1940 гг. на севере Канады и на Аляске создавались так называемые «города-компаний» (моноресурсная модель развития). Моноресурсная модель развития была основана на преднамеренном сужении специализации производственных центров. Компания — владелец поселка ограничивалась минимальными удобствами проживания работающего персонала. Эта модель предусматривала очаговый характер освоения территорий, при кото-

ром создавалась дисперсная сеть мелких поселений, не стимулировавшая общее хозяйственное развитие территории.

Зарубежные архитекторы отводят доминирующую роль созданию высокого класса комфорта внутреннего пространства вахтового жилища через внедрение высоких технологий, ориентированных на формирование техногенной пространственной среды, экологической безопасности, вариативному разнообразию функциональных зон при стремлении к компактности и минимизации объемов (рис. 4). Это приводит, с одной стороны, к высокому уровню качества комфорта обитания и жизнедеятельности, а с другой — к усилению социального дискомфорта в условиях длительной изоляции и торможению процесса создания «полинаправленной многоуровневой модели расселенческого каркаса» [4].

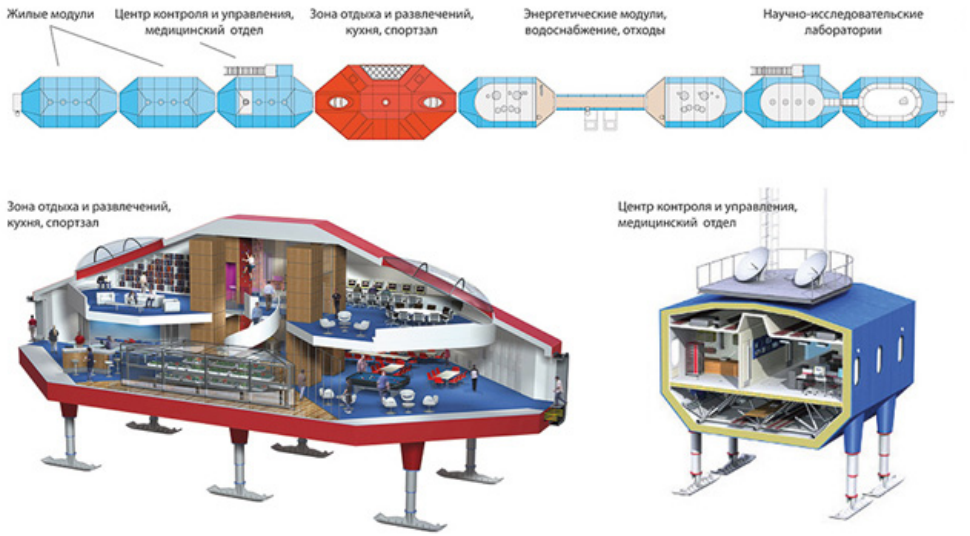


Рис. 4. Схема пространственно-функциональной организации мобильной британской полярной станции Halley VI

В результате анализа было установлено что:

- освоение зарубежного Севера с самого начала и до настоящего времени ориентировано на применение вахтовых методов и соответственно на временный характер проживания персонала;
- процесс освоения новых районов зарубежного Севера проходил в два этапа. Первый приходился на 1930—1940 гг., второй — на 1960—1980 гг.

В связи с относительно небольшими объемами промышленной добычи природных ресурсов в таких странах как США (где подавляющая часть крупных разведанных месторождений законсервирована), Канада, Гренландия, Япония, а так же в Норвегии, странах Ближнего Востока и Средней Азии мобильные поселения в них не трансформировались в территориальные опорные узлы расселения и не явились определяющим фактором формирования целостной «модели взаимосвязанного и взаимодействующего мира в триаде природа — социум — среда» [4].

Интенсификация процессов разведки и добычи природного сырья углеводородов в России явилась стимулирующим фактором строительства огромной, самой мощной в мире сети нефтегазового трубопроводного транспорта, что позволило диверсифицировать процессы развития протяженных расселенческих ареалов вдоль коммуникационных коридоров на сложившихся и новых транспортных магистралях [4]. Стратегия освоения пространства России, основанная на приоритете наземных видов транспорта (к которым можно отнести и трубопроводы) убедительно представлена в статье профессора И. Г. Лежавы [5]. Процессам интенсивного территориального расселения способствовала и программа разработки и освоения новых месторождений наиболее востребованных ресурсов, необходимых для наращивания экономического потенциала и производственной мощи государства.

Территориальными структурами развития расселенческих процессов воздействия нефтегазовой отрасли стали Тюменская и Томская области, Красноярский край, Сахалин, Западная Сибирь, Волго-Уральский и Тимано-Печерский нефтяные бассейны.

В территориальных комплексных схемах градостроительного планирования развития территорий РФ определяются: зонирование территорий, основные направления совершенствования системы расселения, развития поселений, производства, инженерной, транспортной и социальной инфраструктуры межрегионального значения, защиты территории от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, улучшения экологической обстановки градостроительными средствами, сохранений территорий объектов историко-культурного и природного наследия[1]. Так же содержатся предложения об установлении границ поселений и обеспечении ресурсами в целях комплексного развития территории РФ.

Исторически места расселения определялись пригодностью для жизни человека в основном климатическими факторами [6]. На современном этапе развития общества основными факторами, влияющими на расселение в масштабе крупных регионов и стран, являются:

- климат (температурный, ветровой, влажностный режимы, солнечная и ветровая активность);
- почва и гидрографические условия (обеспеченность пресной водой, рельеф местности, геологические условия строительства);
- наличие полезных ископаемых и топливно-энергетических ресурсов;
- природные формы, определяющие развитие транспортных коммуникаций (морские заливы и бухты, судоходные реки и озера, долины, перевалы через горные цепи).

Система расселения — система размещения населения и производительных сил на территории страны.

Формирование системы расселения преследует 3 главные цели:

- социальную — создание градостроительных предпосылок для всестороннего развития условий жизни общества;

[1] Земельный Кодекс Российской Федерации от 25 октября 2001 г. № 136-ФЗ (в ред. от 10.01.2021). URL: http://docs.cntd.ru/document/744100004.

- экономическую — создание условий для рационального размещения и развития производительных сил;
- экологическую — поиск путей выживания человека, как биологического вида и социального существа.

Место расселения связано с 3 предпосылками:

- место приложения труда (производство, администрация, сфера услуг и прочее);
- пригодность территории для жизни;
- возможность удобных перемещений.

Разведка и добыча нефти и газа привела к целой сети рассредоточенных населенных пунктов. Строительство магистральных нефтяных и газовых трубопроводов самим характером работ обусловливает временное пребывание на территории механизированных колонн строителей. Наличие ценных полезных ископаемых привело к вовлечению огромных территорий в орбиту народнохозяйственного использования [7].

Территории, на которых находятся эти поселения, разнообразны по своим климатическим и ландшафтным особенностям [8]. Автономные населенные пункты на линейных объектах нефтегазовой отрасли располагаются вдоль всей транспортной структуры трубопровода, обслуживают перекачивающие станции, начиная с месторождения и до конечной цели доставки. Такие станции расположены на расстоянии 50…250 км друг от друга. Количество рабочего персонала на них варьируется от 50 до 300 человек. А учитывая средний показатель количества человек в семье в РФ, получаем значение равное 200—1200 человек на одно поселение.

В советский период на территории СССР уделялось большое внимание вопросам расселения в нефтегазовой отрасли [9]. Сложилась система городов, поселков и вахтовых поселений на месторождениях. Развивался вахтовый метод производства работ с привлечением персонала из других районов страны.

Размещение жилищно-гражданского строительства преимущественно в сложившихся крупных городах [10] сдерживало развитие поселков, расположенных в районах наращивания добычи нефти и газа. Застройка городов и поселков велась некомплексно.

В социальном аспекте анализ отечественной и зарубежной практики использования вахтового метода работы позволяет выделить следующие его сущностные признаки:

- наличие базового города с высоким уровнем развития социальной инфраструктуры для постоянного проживания работников с семьями и вахтового поселка на местах приложения труда для проживания сменного персонала;
- обеспеченность регулярными транспортными связями базового города с вахтовыми поселками, в большинстве своем расположенными за пределами ежедневной транспортной доступности;
- использование режимов труда с удлиненной рабочей сменой и суммированным учетом рабочего времени;
- проживание в период вахты в вахтовом поселке только сменного персонала, в связи с чем в них складывается особая демографическая структура населения, в которой полностью отсутствуют неработающие члены семьи;

- расширенная социальная сфера, включающая службы бытового обслуживания, общественного питания, связи, учреждения культурно-спортивного назначения и т. д.

Особенностью вахтовых поселков помимо специфической структуры функций жизнеобеспечения, отличающих их от обычных поселений, является мобильное конструктивно-технологическое исполнение, позволяющее быстро монтировать и демонтировать поселки. Это позволяет перемещать мобильные конструкции и комплексы, устанавливая их в новых местах эксплуатации, обеспечивая их неоднократную оборачиваемость в течение жизненного цикла (рис. 5).

Вахтовый поселок обладает сложной инфраструктурой, состоящей из комплексов зданий и сооружений различного назначения, автономных систем жизнеобеспечения, инженерных сетей и коммуникаций: энергетического оборудования, экологического оборудования для обеспечения водоснабжения и водоотведения, системы очистки промышленных сточных вод, организации наружных и внутренних временных транспортных сетей.

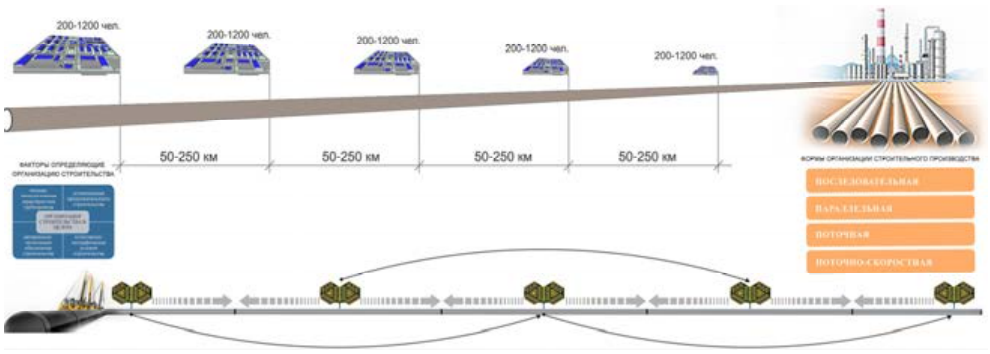


Рис. 5. Схема производственного цикла строительства магистральных трубопроводов, разработка автора

Усиливающийся технологический потенциал территорий способствовал формированию типологического и классификационного разнообразия территориальной структуры, пространственной организации вахтовых поселений, их морфологической и таксономической иерархии.

Ведомственный подход к проектированию и строительству вахтовых поселений не способствовал появлению значимых в архитектурном понятии образцов с точки зрения перспектив их развития.

В нашей стране на качество градостроительной продукции вахтового поселения влияли отсутствие достаточно обоснованной градостроительной концепции и недостаток времени на подготовку проектной документации. Это приводило к тому, что при подготовке генеральных планов поселений опыт черпался не из лучших мировых достижений архитектуры, используемых при застройке севера Канады и США, а из проектов застройки районов Поволжья, Татарстана и Башкирии. Заимствование приемов застройки средней полосы страны и нефтяных районов Поволжья оказалось одним из факторов снижения архитектурно-художественного и объемно-планировочного качества жизни в этих поселениях.

Результаты исследования

Анализ и оценка сложившейся отечественной и зарубежной практики создания архитектурно-планировочной организации вахтовых поселений в нефтегазовой отрасли во временном периоде с середины XX века до настоящего времени выявили основные факторы, влияющие на формирование функционально-пространственной структуры и территориальной организации вахтовых поселений.

Конфигурация современных вахтовых поселений основана на принципах утилитарности, создания минимальных условий для удовлетворения базовых потребностей персонала. Возрастающая интенсификация производственных процессов и недостаточный уровень социально-бытовых условий сформировали такие тенденции как минимизация функционально-планировочной вариативности, низкий уровень комфорта и архитектурной выразительности, обострение социальных проблем персонала.

Данные тенденции в новых экономических условиях России сохранились практически полностью. Исключение составили вахтовые поселения военного назначения, где вопросам функциональной вариативности и архитектурно-художественной выразительности уделяется больше внимания.

Были выделены следующие основные тенденции:

- динамика величины, множество параметров и вариантов размещения при повышении разнообразия контингента;
- вариативное насыщение функциональных процессов;
- усложнение и компактность структуры, формы и объемов;
- формирования специфического отраслевого разнообразия;
- техническая и технологическая модернизация через внедрение инновационного информационно-технологического потенциала;
- адаптация к изменяющимся факторам физической и информационно-цифровой трансформации;
- паритетность взаимодействия с окружающей средой;
- усеченность функциональной номенклатуры жизнеобеспечения;
- уровень комфорта, не отвечающий современным требованиям качества среды обитания.

Заключение

Нефтяные и газовые месторождения часто расположены в отдаленных необжитых регионах с суровым климатом. Для их освоения необходимо создать соответствующую социальную инфраструктуру, отвечающую возрастающим потребностям социума для привлечения высокопрофессионального персонала.

Решение этой проблемы предполагается в двух направлениях:

- функционально-пространственной организации вахтовых поселений для временного проживания только производственного персонала;
- архитектурно-пространственной организации полноценных стационарных населенных пунктов с широкой вариативностью функционального наполнения, через формирование качества пространственно-территориальной структуры вахтовых поселений высокого уровня, как потенциала структурообразующего компонента системы расселения страны, интегрировав их в систему глобальных расселенческих процессов (рис. 6) [11—13].

Рис. 6. Схема планировочной организации вахтового поселка КС «Чуйская», разработка автора

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тонкой И. В.* Трансформации качественных характеристик пространства в контексте тенденций развития городской среды в условиях глобальных процессов // Материалы международной научно-практической конференции (2—6 апреля 2018 г.). М.: Изд-во МАРХИ, 2018. С. 139—142.

2. *Ишмаметов Р. Х., Самойлова Н. В.* Принципы архитектурно-планировочной организации автономных жилых комплексов нефтегазовой отрасли // Инженерный Вестник Дона. 2019. № 7. URL: http://www.ivdon.ru.

3. *Крашенинников А. В.* Градостроительное развитие жилой застройки: исследование опыта западных стран : учебное пособие. М.: Архитектура—С, 2005. 112 с.

4. *Тонкой И. В.* Будущее архитектуры: осмысление систем и объектов расселения России // Academia. Архитектура и строительство России. 2019. № 2. С. 58—63.

5. *Лежава И. Г.* Будущее восточных регионов России // Academia. Архитектура и строительство. 2017. № 3. С. 84—92.

6. *Замараева З. П.* Социальное пространство региона как объект социологического анализа и регулирования. Дис. … канд. социол. наук: 22.00.08. М.: 2000. 143 с.

7. *Родоман Б. Б.* Территориальные ареалы и сети. Очерки теоретической географии. Смоленск: Ойкумена. 1999. 256 с.

8. *Ишмаметов 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. № 42(61). С. 140—153.

9. *Дридзе Т. М., Акимин Е. М.* Социально обоснованное градоустройство в режиме прогнозного проектирования. Обнинск: Институт муниципального управления, 2004. 492 с.

10. *Белоусов В. Н., Смирнова О. В., Семенов В. Н.* Генетическая структура городского сообщества как основа формирования территориального сознания // Социологические исследования. 2006. № 7. С. 133—136.

11. *Белицкий Я. М.* Окрест Москвы: история создания дачных поселений. М.: Легпромбытиздат, 1996. 237 с.

12. *Лейбович О. Л., Кабацков А. Н., Шушкова Н. В.* Большой город в постсоветском пространстве // Мир России. 2004. Т. XIII. № 1. С. 91—105.

13. *Тонкой И. В., Иншакова О. Ю.* Стратегии расселения будущего России в контексте динамики тенденций освоения пространства в условиях глобализации // Architecture and Modern Information Technologies. 2020. № 4(53). С. 266—280. URL: 2020/Architecture and Modern Information Technologies.

© *Ишмаметов Р. Х., 2021*

Поступила в редакцию
в феврале 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Ишмаметов Р. Х. Современные тенденции формирования вахтовых поселений нефтегазовой отрасли // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 254—266.

Об авторе:

Ишмаметов Рамиль Хамидуллович — доц. каф. урбанистики и теории архитектуры, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; ramil.euro-lux@mail.ru

Ramil' Kh. Ishmametov

Volgograd State Technical University

MODERN TRENDS IN THE FORMATION OF SHIFT SETTLEMENTS IN THE OIL AND GAS INDUSTRY

The prerequisites for the formation of the territorial and spatial organization of shift settlements in the domestic and foreign practice in the structure of the oil and gas industry are considered. The classification and types of shift settlements are proposed in accordance with the functional orientation and duration of operation. The main factors of the dynamics of the development of the functional and spatial structure of shift settlements are determined. The potential of the structure-forming component of the settlement system is revealed.

K e y w o r d s: shift settlements, habitat quality, urbanized environment, architectural and spatial organization, mobile architecture, space modeling, territory development, quality of comfortable environment, spatial development, settlement system.

For citation:

Ishmametov R. Kh. [Modern trends in the formation of shift settlements in the oil and gas industry]. *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], 2021, iss. 1, pp. 254—266.

About author:

Ramil' Kh. Ishmametov — Docent of Urban Development and Theory of Architecture Department, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ramil.euro-lux@mail.ru

УДК 712.4

***Е. А. Сасова*[а], *Г. А. Птичникова*[а, б]**

[а] ***Волгоградский государственный технический университет***
[б] ***филиал ЦНИИП Минстроя РФ «Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства»***

ОСОБЕННОСТИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СОВРЕМЕННЫХ БУЛЬВАРОВ В ГОРОДАХ НИЖНЕГО ПОВОЛЖЬЯ

Статья посвящена исследованию условий для реновации сети бульваров в городах Поволжья и ЦЧР. На основании анализа новейшего мирового опыта проектирования бульваров выявлены возможности его адаптации для российских городов. Определены современные тенденции формирования и сформулированы принципы проектирования бульваров применительно к условиям городов Поволжья и ЦЧР.

К л ю ч е в ы е с л о в а: бульвары, микроклимат, открытые общественные пространства, транспортные и пешеходные потоки, города Поволжья.

Введение

Сегодня одной из наиболее актуальных проблем градостроительства является проектирование открытых общественных пространств. Особое место среди них занимают бульвары.

Особенность бульваров как открытых общественных пространств заключается в том, что они сочетают в себе рекреационную и экологическую функции, а также высокую плотность потока движения разных категорий пользователей городских улиц и большую насыщенность объектами массового культурно-бытового тяготения.

В разное время вопросами проектирования городских бульваров занимались отечественные специалисты.

Созданием классификации и типологии бульваров — Л. А. Козинец, Т. Ф. Саваренская, М. В. Горбаневский, В. С. Теодоронский и др.; историей возникновения и эволюции бульваров — Л. Б. Лунц, Л. С. Залесская, Е. М. Микулина, В. Т. Горбачев, Т. Ф. Саваренская и др.

В настоящее время специалисты обращают все больше внимания на современные подходы к проектированию улиц и вопросы безопасности, организации движения и экологии. Среди них О. А. Лисина (исследование многоуровневых пешеходных пространств), О. Б. Сокольская (особенности архитектурно-планировочной структуры Саратова, в т. ч. пешеходных пространств), Т. Б. Сродных (культурные функции и шумозащитные свойства бульваров), О. А Поспелова, Е. Е. Степаненко, Т. Г. Зеленская, С. В. Округ, И. А. Степанова, А. С. Степанов, Н. К. Белова, Э. С. Соколова, Д. А. Белов (экологическое состояние среды бульвара, в т. ч. почв и насаждений).

Несмотря на глубокую проработку и прогрессивные решения в планировке и функциональном зонировании, бульвары, созданные в прошлом веке, теряют популярность, что связано с исчезновением бульварной культуры времен Советского Союза и научно-техническим прогрессом, усилившим транспортную нагрузку на дороги [1—4].

Актуальность работы по поиску новых подходов к проектированию бульваров заключается в необходимости улучшения качества городской среды в соответствии с требованиями современности.

Цель настоящей статьи — исследование существующей сети бульваров крупных городов, структурирование бульваров по функционально-планировочным характеристикам и формулировка принципов проектирования этих общественных пространств, отвечающих современным требованиям.

В этой связи были использованы методы сравнительного анализа основных функционально-планировочных характеристик бульваров крупных городов Поволжья и ЦЧР, нормативной и научно-теоретической отечественной и зарубежной литературы по особенностям проектирования бульваров, проведено экспериментальное проектирование.

Результаты исследования

По итогам данного исследования были сформулированы основные принципы проектирования современных бульваров в городах Поволжья и ЦЧР.

Бульвар являлся одним из ключевых структурных элементов города, начиная с XVII в. В общем виде он представлял собой озелененное пространство для прогулок горожан [5].

Современный бульвар продолжает быть важной частью в системе городских пространств. Это проявляется, во-первых, в архитектурно-планировочной роли бульваров при формировании транспортной сети и пространственного облика города. Во-вторых, в санитарно-гигиенической и экологической роли бульваров: шумо- и пылезащитная функция, обеспечение потребности населения в зеленых насаждениях. В-третьих, эстетическое и культурно-ценностное наполнение визуального облика бульвара влияет на восприятие общей городской среды, поскольку он является одним из самых пространственно протяженных ее элементов. Бульвар выполняет и другие важные функции, среди которых можно отметить рекреационную, общественно-коммуникативную, информативную.

Таким образом, у существующих бульваров можно выделить общие черты, отвечающие основным их функциям:

- полоса озеленения, которая проходит по центру, с одной или обеих сторон бульвара;
- обеспечение социокультурной функции, т. е. создание условий на прогулочной аллеи для развития тех или иных видов деятельности горожан и различных ритуалов повседневной жизни;
- создание определенного архитектурного облика выходящими на бульвар фасадами зданий;
- наличие пешеходной зоны, иногда совмещенной с зоной отдыха: скамейками, беседками и т. п.

В соответствии со своими функциями бульвары размещаются в городе:

- на магистралях городского и районного значения;
- в местах со сложной организации транспортных и пешеходных потоков;
- вблизи точек притяжения (улицы в общественно-деловом центре города, района);
- вблизи центров общественной жизни и социальной активности (набережные, жилые районы и микрорайоны).

В российских нормативных градостроительных документах существует несколько сходных между собой определений термина «бульвар»:

- одна или несколько пешеходных аллей шириной не менее 18 м для размещаемых по оси улиц; и 10 м — с одной стороны улицы между проезжей частью и застройкой (СП 42.13330.2016 «Градостроительство. Планировка и застройка городских и сельских поселений», п. 9.5);
- озелененная территория общего пользования вдоль магистралей, набережных в виде полосы различной ширины, предназначенная для пешеходного транзитного движения и кратковременного отдыха (ГОСТ 28329-89 «Озеленение городов. Термины и определения»);
- озелененная территория линейной формы, расположенная, как правило, вдоль улиц и рек, предназначенная для транзитного пешеходного движения, прогулок, повседневного отдыха, шириной не менее 15 м с минимальным соотношением ширины и длины не менее 1:3 (ТСН 30-304-2000 г. Москвы (МГСН 1.01-99) «Нормы и правила проектирования планировки и застройки г. Москвы», с изменениями на 23.12.2015).

В качестве ***объекта исследования*** были выбраны бульвары в крупных городах Поволжья и Центрального Черноземного района: Волгоград, Астрахань, Саратов и Воронеж. Общими для данных городов являются климатические условия, в т. ч. условия экологической и микроклиматической комфортности [2, 6, 7], почвенно-климатические условия для выбора растений, направления пространственного развития в стратегии социально-экономического развития городов, приречное расположение города (для Воронежа — Воронежское водохранилище), рост нагрузок на транспортные магистрали в связи с увеличением автомобилизации населения.

В связи с появлением в последнее десятилетие в градостроительстве таких понятий как «устойчивое развитие» (sustainable development), «удобный город» (livable city), «умный город» (smart city), «устойчивая городская мобильность» (green mobility) было пересмотрено отношение к организации транспортного обслуживания городов, следовательно, к проектированию улиц и бульваров[1].

В качестве теоретической базы для исследования по современному проектированию бульваров были отобраны и изучены такие источники как рекомендации PIARC («Международная дорожная Ассоциация»); Gateway Boulevard design guidelines («Руководство по проектированию бульвара»); новые стандарты проектирования городских улиц NACTO («Национальной ассоциации транспортных департаментов США»); «Рекомендации по планированию дорог и тротуаров в жилых кварталах» (Residential Roads and Footpaths: Layout Considerations, Великобритания); «20 принципов проектирования городских улиц», предложенные журналом «Arch:Speech» [8, 9].

Согласно им общими требованиями к современным бульварам как к элементам улично-дорожной сети являются[2]: мультимодальность; создание бульваров в местах расположения точек общественного притяжения; многофункциональность; баланс между транспортными и пешеходными потоками[3] [8, 9].

[1] Tukwila International Boulevard. Design Manual//City of Tukwila, January 1999. 89 p.

[2] PIARC: Urban road design and architecture. 1995. Pp. 51—126. URL: piarc.org/en/
PIARC: The urban road network design. 1991. Pp. 45—84. URL: piarc.org/en/

[3] New York City Department of Transportation. Street Design Manual. New York, NY: NYC DOT, 2009. URL: https://nacto.org/wp-content/uploads/2016/05/2-6_NYCDOT-Street-Design-Manual-2nd-ed-ch-2_2015.pdf;

На первом этапе исследования были детально рассмотрены сети бульваров гг. Волгограда, Астрахани, Саратова и Воронежа (рис. 1—4).

Бульвары исследовались по основным четырем критериям:

- функциональное назначение,
- композиционное решение,
- планировочная структура,
- параметры (длина, ширина).

Предварительный анализ позволил выявить общие характеристики бульваров и разработать классификации по заявленным параметрам.

По функциональному назначению основные виды бульваров в исследуемых городах делятся на прогулочные, многофункциональные, микрорайонные, историко-мемориальные.

По композиционному решению бульвары можно классифицировать на симметричные и ассиметричные, по планировочному решению — на осевые, односторонние и двусторонние.

Волгоград является одним из городов-миллионников России и самым крупным городом Нижнего Поволжья. У Волгограда есть большой потенциал для развития сети бульваров, благодаря особенностям советской планировочной системы города, сочетающей линейную шахматную планировку и большую ширину улиц в линиях застройки (рис. 1).

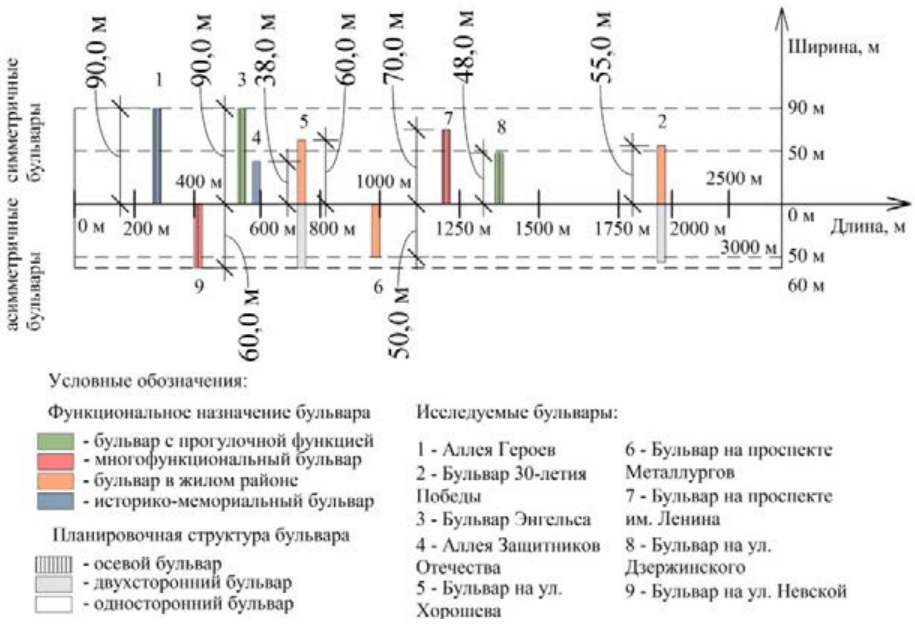


Рис. 1. Схема характеристик бульваров г. Волгограда

Вторым исследуемым городом является Воронеж. Его население превышает 1 млн человек. Воронеж активно развивается и застраивается, за последние 5 лет в городе было построено 5 новых бульваров и 3 аллеи и не-

20 принципов проектирования городских улиц / arhspeech.com. 2016 г. URL: https://archspeech.com/article/20-principov-proektirovaniya-gorodskih-ulic.

сколько парков и скверов. Потенциал для развития сети бульваров есть как в историческом центре города, так и на периферии, восстановленной после Второй мировой войны и имеющей удобную прямоугольную структуру и большую ширину в линиях застройки. При этом наибольшую сложность для развития представляют транспортные развязки с сопряжением автомагистралей с железнодорожной сетью (рис. 2).

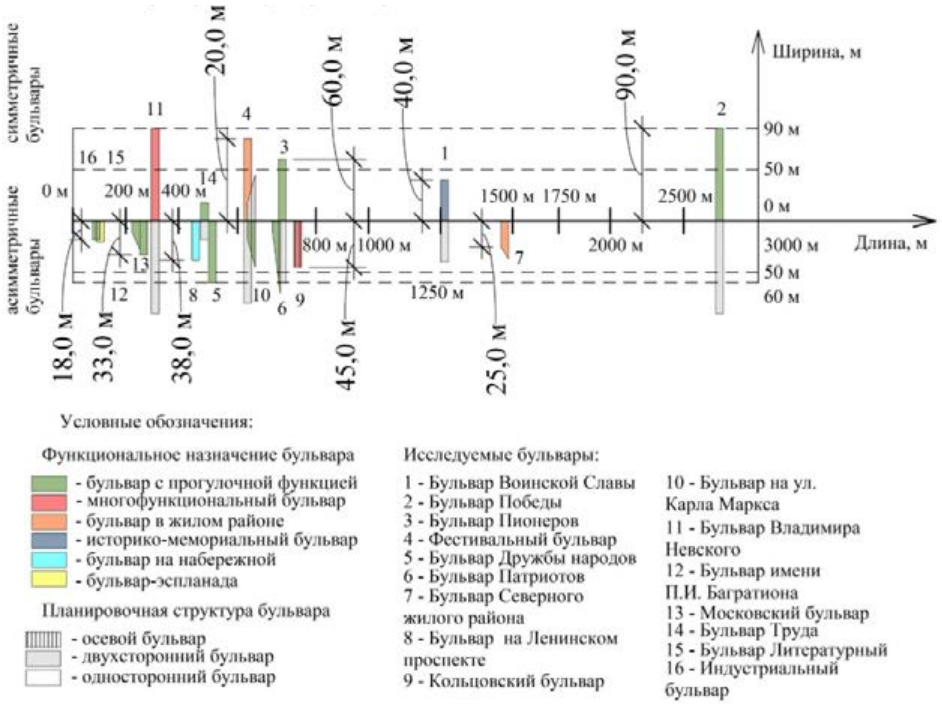


Рис. 2. Схема характеристик бульваров г. Воронежа

Еще одним крупным городом Нижнего Поволжья является Астрахань, расположенная на 11 островах в Прикаспийской низменности. Исторической центр города имеет сложную веерную планировку с включением усадебной застройки и небольшой шириной улиц. Развитие города в южном направлении происходило по прямоугольной сетке. При этом большая часть улиц застроена индивидуальными жилыми домами (рис. 3).

Одним из наиболее активно развивающихся городов Поволжья является Саратов. Вместе с г. Энгельсом и другими населенными пунктами он образует агломерацию численностью 1,15…1,2 млн. человек. В городе стоит отметить высокий уровень автомобилизации и широкий круг охвата сетью общественного транспорта. Слабым местом транспортной сети являются узкие улицы — подъезды к мостам и сами мосты, как места образования больших пробок. У города сложная планировочная структура представляющая собой сочетание кластерно-линейной и кольцевой планировки. Наиболее перспективным подходом представляется развитие транспортной сети с соответствующим благоустройством в виде бульваров для улиц-подъездов к мостам и внутри периферийных спальных районов с индивидуальной жилой застройкой (рис. 4).

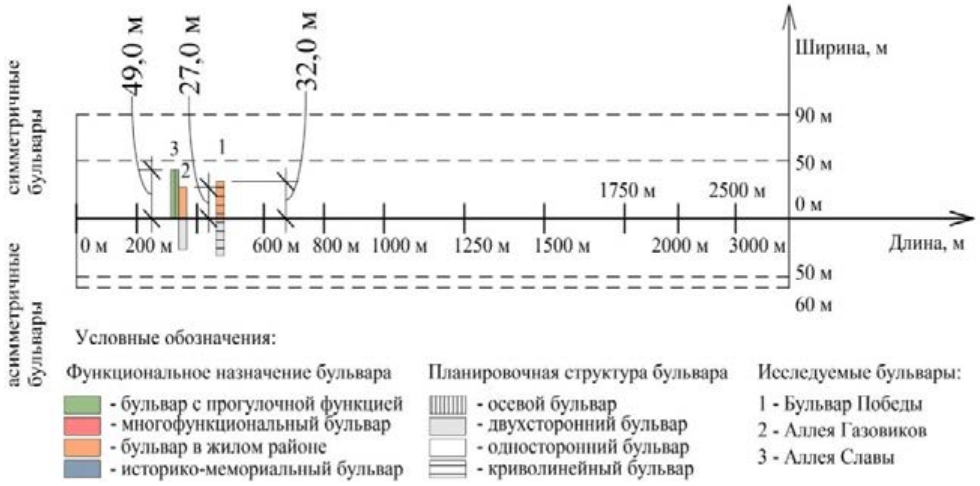


Рис. 3. Схема характеристик бульваров г. Астрахани

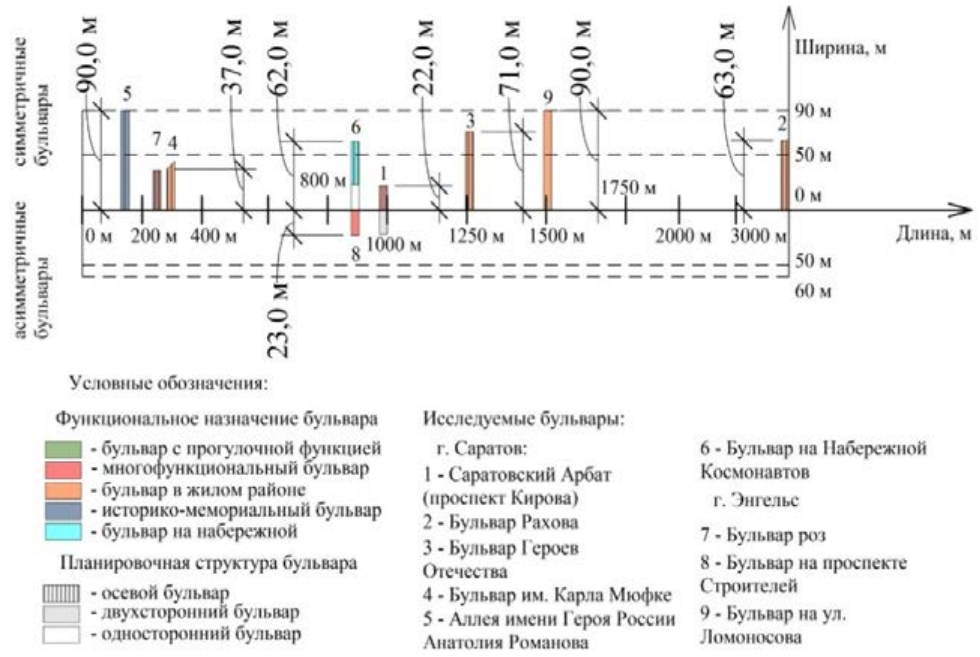


Рис. 4. Схема характеристик бульваров г. Саратова и г. Энгельса

На основании приведенных на рис. 1—4 данных были сделаны выводы об общих характеристиках бульваров в крупных городах Поволжья и ЦЧР, представленные на рис. 5.

Данные таблиц, гистограмм и диаграмм позволили выделить 3 наиболее распространенных вида бульваров по функциональному назначению: прогулочный, микрорайонный, многофункциональный. Была построена табл. 1, коротко описывающая существующие типы бульваров и их характеристики.

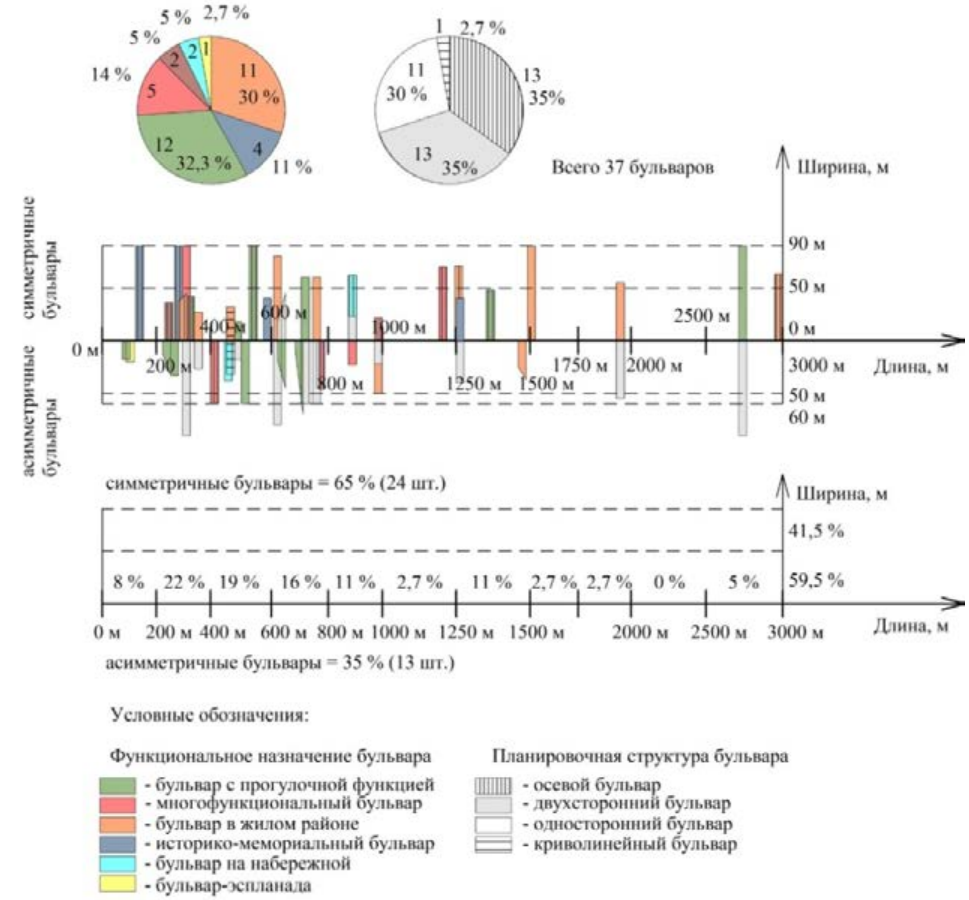


Рис. 5. Анализ характеристик бульваров крупных городов Поволжья и ЦЧР

Таблица 1

Характеристики бульваров по функциональному назначению

Вид бульвара	Габариты	Планировочное решение [10]	Статус улицы
1	2	3	4
Прогулочный	Длина — 450…520 м Ширина — 45 м (по 1 аллее шириной 1,5…2,5 м + полоса защитного озеленения по обеим сторонам дороги)	Двухсторонний симметричный криволинейный с 2 аллеями	Улица местного значения
Бульвар в жилом районе	Длина — 450…520 м (1—2 жилые группы) Ширина — 60…65 м (помимо прогулочной аллеи и полосы защитного озеленения включает разные функциональные зоны)	Осевой симметричный с 3 аллеями	Улица местного значения, пешеходная улица
Многофункциональный	Длина — 650…750 м (1—2 квартала) Ширина — 45…50 м	Осевой симметричный с 3 аллеями	Улица районного значения

На основании отзывов посетителей, опубликованных в таких Интернет-источниках как «Коммерсант», официальный сайт «Комсомольская правда» для гг. Волгоград, Астрахань, Саратов и Воронеж, «Аргументы и факты» для г. Воронеж, «Блокнот» для гг. Волгоград, Астрахань, Воронеж, ЛентаРу, V1, РИАЦ, «СтройСар», «ПунктА» были выявлены следующие проблемы существующей сети бульваров:

- физический и моральный износ МАФов (скамейки, урны, навесы) и инженерных систем (полив, освещение, ливневая канализация);
- необходимость обновления озеленения (бульвары на периферии жилых районов);
- физический износ или разрушение покрытия и бордюрного камня;
- недостаточное количество детских игровых площадок;
- недостаточное количество спортивных площадок;
- устаревший дизайн коммуникационного пространства, иногда отсутствие сформированного коммуникационного пространства;
- необходимость более четкой трассировки потоков: пешеходы, велосипедисты, пользователи портативных транспортных средств;
- необходимость включения зоны для выгула собак на обособленной площадке;
- необходимость включения площади под парковочные места.

На втором этапе исследования был проанализирован климатический фактор. Для бульвара как открытого общественного пространства он заключается в устранении негативных характеристик климата и смягчении экологической ситуации [11, 12].

Климатические особенности, влияющие на планировку и благоустройство бульваров следующие: жарко, сухое и продолжительное лето, высокие скорости ветра, маленькое количество осадков, высокое содержание солей в почвах и грунтовых водах [13—15]. Результаты анализа представлены в табл. 2.

Таблица 2

Особенности планировки и благоустройства бульваров, вызванные климатическими условиями

Климатическая характеристика	Влияние на планировку и благоустройство бульвара
Жарко, сухое и продолжительное лето	Необходимо затенение территории, избегать больших открытых площадей; при выборе покрытия тротуара. Предпочтительны материалы, обладающие наименьшим коэффициентом поглощения солнечной радиации
Высокая обеспеченность солнечной радиацией	
Высокие скорости ветра	При ориентации бульвара по преобладающему направлению ветра стоит устраивать планировку аллей и посадки деревьев таким образом, чтобы они снижали скорость ветра
Маленькое количество осадков	Необходимо предусматривать систему орошения
Высокое содержание солей в почвах и грунтовых водах	Использовать виды растений, прошедшие адаптацию в опытных посадках ВНИАЛМИ, указанные в «Нормах посадок деревьев и кустарников городских зеленых насаждений» и «Методических рекомендация по озеленению региона и городов»

На завершающем этапе исследования были сформулированы принципы проектирования бульваров на основании проведенного выше анализа.

1. Развитие точек притяжения — размещение на магистралях городского и районного значения; в местах со сложной организации транспортных и пешеходных потоков; вблизи точек притяжения (улицы в общественно-деловом центре города, района); вблизи центров общественной жизни и социальной активности (набережные, жилые районы и микрорайоны), что обеспечит бульвару востребованность и многофункциональность).

2. Мультимодальность — учет в транспортной схеме, составление иерархии и разведение транспортных коммуникаций по категории пользователей (местные жители, транзитные пешеходы, велосипедисты, автомобилисты).

3. Умеренная инсоляция — необходимо предусматривать затенение территории зон отдыха, избегать больших открытых площадей.

4. Формирование комфортного температурно-ветрового режима территории — при выборе покрытия тротуара следует отдавать предпочтение материалам, обладающим наименьшим коэффициентом поглощения солнечной радиации; при ориентации бульвара по преобладающему направлению ветра стоит устраивать планировку аллей и посадки деревьев таким образом, чтобы они снижали скорость ветра и пр.

5. Контингентированное функциональное зонирование — данный принцип состоит в приоритетном выделении площадей функциональным зонам, отвечающим основному назначению бульвара (прогулочный, микрорайонный или многофункциональный) и коммуникационному пространству).

6. Размещение функциональных зон бульвара на основе неконфликтности, центрированности, привязки в транспортным коммуникациям. Данный принцип предполагает расположение функциональных зон таким образом, чтобы избежать их взаимного негативного влияния вследствие разного уровня шума, возможных нарушений нормального функционирования зон при пересечении границ их пользователями. Также принцип предполагает учет возможности размещения зон на периферии и вблизи входных групп бульвара).

7. Культурное наследие, самобытность и чувство места — каждый участок территории города имеет свою особую архитектурную среду, климат и т. д. Проект бульвара должен учитывать все эти факторы, включая материалы, историю и пожелания населения [16, 17].

На основании сформулированных принципов автором Е. А. Сасовой был разработан экспериментальный проект нового бульвара в жилом районе г. Волгограда (рис. 6, 7).

Главной идеей проекта стало формирование нового общественного пространства, которое могло бы функционировать как в дневное, так и ночное время. Для эффективного использования существующей территории был выбран линейный двухсторонний ассиметричный тип планировки бульвара с 4 аллеями. Основные элементы планировочной структуры бульвара включают прямолинейную пешеходную ось, зеленые площади с активной и тихой зонами, входную группу и общественное пространство.

Рис. 6. Визуализация бульвара «Ночные Огни» в г. Волгограде

Рис. 7. Визуализация бульвара «Ночные Огни» в г. Волгограде

Выводы

В ходе анализа существующей сети бульваров городов Поволжья и ЦЧР был выявлен большой потенциал для развития. Этому может способствовать, в частности, развитая транспортная сеть с широкими в линиях застройки улицами, формирование в городских и районных центрах общественных пространств, содержащих несколько крупных точек притяжения, наличие нуждающихся в обновлении бульваров.

В результате проведенного исследования были сформулированы принципы проектирования бульваров в городах Поволжья и ЦЧР, направленные на улучшение городской среды и совершенствование существующей сети бульваров.

Исследование может быть продолжено и направлено на создание моделей основных функционально-пространственных типов бульваров (прогулочный, микрорайонный, многофункциональный).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Глазычев В. Л.* Урбанистика. Т. 2. М.: Европа, 2008. С. 220.

2. *Калистратова А. Д., Багина Е. Ю.* Современное состояние бульваров на примере города Екатеринбурга // Современное строительство и архитектура. 2019. № 1(13). С. 12—18.

3. *Подколзин М. М.* Функционирование объектов озеленения в условиях техногенной нагрузки на примере г. Волжского : учебное пособие. Волгоград: Изд-во ВолГУ, 2011. С. 40.

4. *Лейзерова А. В., Булавина Л. В., Багина Е. Ю.* Новая жизнь бульваров // Архитектон: известия вузов. 2018. № 2(62). С. 58—72.

5. *Черных П. Я.* Историко-этимологический словарь современного русского языка. Т. 1. М.: Русский язык, 1999. С. 122.

6. *Багина Е. Ю., Лейзерова А. В.* Смерть бульвара // Проект Байкал. 2018. № 56. С. 86—90.

7. *Третьякова Т. А., Сокольская О. Б.* Анализ современного ландшафтно-экологического и планировочного состояния исторического бульвара в городской среде // Успехи современного естествознания. 2016. № 4. С. 111—115. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_25953153_72885415.pdf.

8. Gateway Boulevard design guidelines / Nashville, Metropolitan Development and Housing Agency Metropolitan, Planning Department, Everton Oglesby Architects, 2005. 19 p.

9. *Noble J., Elvin K., Whitaker R.* Residential Roads and Footpaths: Layout Considerations / Great Britain. Department of the Environment, Great Britain. Department of Transport. 1997. P. 75.

10. *Allan B. J., Macdonald E., Rofé Y.* The Boulevard Book: History, Evolution, Design of Multiway Boulevards. 2002.

11. *Подколзин М. М.* Особенности озеленения крупных городов Нижнего Поволжья в условиях техногенной нагрузки : на примере г. Волжского : автореферат дис. ... канд. с.-х. наук: 06.03.03. Волгоград: ВНИИ агролесомелиорации, 2011. С. 26.

12. *Косицына Э. С., Птичникова Г. А., Иванова Н. В.* Архитектурно-ландшафтные основы проектирования городов Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2006. 144 с. URL: https://ibooks.ru/reading.php?productid=29691.

13. *Етеревская И. Н.* Принципы эколого-ландшафтного проектирования городских общественных пространств: на примере г. Волгограда: дис. … канд. арх. Волгоград, 2004. С. 256.

14. *Антюфеев А. В., Птичникова Г. А., Чернявская Т. А.* Региональные основы ландшафтной архитектуры. Волгоград: Изд-во ВолгГАСУ, 2005. 188 с.

15. *Candemer J.* Recherches en climatologie. Urbanisme. 1976. Vol. 8. Iss. 156.

16. *Паченков О. В.* Публичное пространство города перед лицом вызовов современности // Новое литературное обозрение. 2012. № 117 (5). С. 67—83.

17. *Птичникова Г. А.* Новые архитектурные модели общественных пространств города // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2017 году: сб. науч. тр. РААСН. Т. 1. М.: АСВ, 2018. С. 516—521.

© Сасова Е. А., Птичникова Г. А., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Сасова Е. А., Птичникова Г. А. Особенности проектирования современных бульваров в городах Нижнего Поволжья // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 267—278.

Об авторах:

Сасова Евгения Александровна — студентка, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; evgeniasasova@gmail.com

Птичникова Галина Александровна — д-р архит., проф., чл.-корр. РААСН, главный научный сотрудник филиала ЦНИИП Минстроя РФ «Научно-исследовательский институт теории и истории архитектуры и градостроительства»; проф. каф. урбанистики и теории архитектуры, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; ptichnikova_g@mail.ru

Evgenia A. Sasova[a], Galina A. Ptichnikova[a, b]

[a] Volgograd State Technical University

[b] The Branch of the Research Institute of the Theory and History of Architecture and Town Planning of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIITIAG RAASN)

DESIGN FEATURES OF MODERN BOULEVARDS IN THE CITIES OF THE LOWER VOLGA REGION

The article is devoted to the study of conditions for updating the network of boulevards in the cities of the Lower Volga region and the Central district, the study of the latest world experience in designing boulevards and the possibility of its adaptation for the cities of the Lower Volga region and the Central district. Modern trends in the design of city streets and boulevards are considered. Based on the obtained material, the principles of designing modern boulevards in relation to the conditions of the cities of the Lower Volga region and the Central district are proposed.

K e y w o r d s: boulevards, microclimate, open public spaces, transport and pedestrian flows, cities of the Lower Volga region.

For citation:

Sasova E. A., Ptichnikova G. A. [Design features of modern boulevards in the cities of the Lower Volga region]. *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], 2021, iss. 1, pp. 267—278.

About authors:

Evgenia A. Sasova — Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; evgeniasasova@gmail.com

Galina A. Ptichnikova — Doctor of Architecture, Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Chief Researcher of the Branch of the Research Institute of the Theory and History of Architecture and Town Planning of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (NIITIAG RAASN); Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; vp_niitag@mail.ru

УДК 725.4(470.45)

В. В. Серебряная, В. Я. Дергилёв

Волгоградский государственный технический университет

РЕВИТАЛИЗАЦИЯ ОБЪЕКТА КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ — КОМПЛЕКСА КАЗЕННОГО ВИННОГО СКЛАДА В Г. КАМЫШИНЕ

В статье рассматривается ревитализация комплекса казенного (государственного) винного склада в г. Камышине (1901 г.) Волгоградской области. В основу разработки концепции преобразования исторического промышленного комплекса в культурно-этнографический музей легли комплексные научные исследования. Они включили в себя всестороннее изучение объекта, анализ архивных и исторических материалов, иконографических, библиографических источников, натурные исследования, изучение отечественного и зарубежного опыта. На основе результатов исследования студентом В. Я. Дергилёвым под руководством автора В. В. Серебряной выполнена выпускная квалификационная работа.

К л ю ч е в ы е с л о в а: ревитализация, промышленный комплекс, этнографический музей.

История архитектуры промышленных предприятий дореволюционного периода в Волгоградской области практически не исследована. Скупая информация о заводах г. Камышина, в том числе и пивоваренных, встречается в трудах, посвященных фабрично-заводской статистике Российской империи. Это работы А. Н. Минха [1], Л. К. Езиаранского [2], В. Е. Варзара [3], П. А. Орлова [4], «Альманах русских пивоваров» под редакцией Я. Ф. Дворковского, Ф. Г. Нетча [5]. Надо заметить, что «Альманах» не пользовался большим авторитетом и в него вполне могли не попадать некоторые сведения по статистике российских фабрик и заводов. Автор, изучая указанные источники, ни в одном из них не обнаружил упоминания о существовании государственного казенного винного склада в Камышине в эти годы.

Интерес к памятникам промышленной архитектуры возник в России еще в начале XX в. [6]. В последние годы появился повышенный интерес к промышленному наследию конца XIX—начала XX вв. Активным изучением истории промышленного наследия, его охраной и сохранением занимались и занимаются Н. С. Алферов, Р. М. Лотарева [7], Л. П. Холодова [8] — на Урале, М. С. Штиглиц [9] — в Санкт-Петербурге. Региональная историография пополняется только работами автора статьи В. В. Серебряной, выявившей и исследовавшей дореволюционную промышленную архитектуру региона [10, 11].

Анализ доступных материалов показал, что на территории современной Волгоградской области были построены промышленные здания и комплексы, интересные в архитектурном плане. Так в Саратовской губернии было построено 5 казенных винных складов для производства и продажи водки. Два из них располагались в городах южных уездов губернии: Камышине и Царицыне (Волгограде). Профессором В. В. Серебряной были проведены обследования и обмеры архитектурных объектов, по результатам которых был составлен историко-культурно опорный план, а данные промышленные комплексы как образцы промышленной архитектуры конца XIX—начала XX вв. включены в реестр объектов культурного наследия региона[1].

[1] Охранное обязательство от 24.12.2012 № 0214АРС/2012. URL: http://docs.cntd.ru/document/423977448.

Сегодня данные промышленные комплексы, которые подвергались искажению, не используются и постепенно разрушаются. Поэтому актуальным для их сохранения является ревитализация.

При разработке проекта изучался зарубежный и отечественный опыт ревитализации промышленный сооружений и комплексов [12—14]. Можно отметить наличие как положительных так и отрицательных примеров таких работ.

Рассмотрим проект «Ярославская текстильная мануфактура» (рис. 1).

Рис. 1. Ярославская текстильная мануфактура, автор проекта Kremnev Atelier, по инициативе Юлии Кривцовой и Сергея Кремнева, 2013 г.

Масштабная территории находится на противоположной стороне от г. Ярославля через р. Которосль.

На базе данной территории имеется два проектных предложения — проект «Мануфактура» и культурный центр.

Их положительные стороны:

- проведен глубокий предпроектный анализ;
- задействованы все постройки данной территории;
- сохранены основные функции и здания фабрики;
- графическая часть выполнена лаконично и удобочитаемо.

Отрицательные стороны:

- являются градостроительными проектами;
- отсутствие дизайнерских предложений.

Другой проект — «Фабрика Станиславского», Москва (рис. 2).

Его положительные стороны:

- архитектурные решения XIX в. подчеркнуты декоративной подсветкой на фасадах;
- в состав бывшей производственной территории входят различные функциональные пространства: офисы, общественное питание, культурно-развлекательные и образовательные.

Отрицательные стороны — дисгармония новостроек и благоустройства территории по отношению к исторической застройке.

Проект архитекторов: «Medusagroup» — адаптации бывшего склада в Польше (рис. 3).

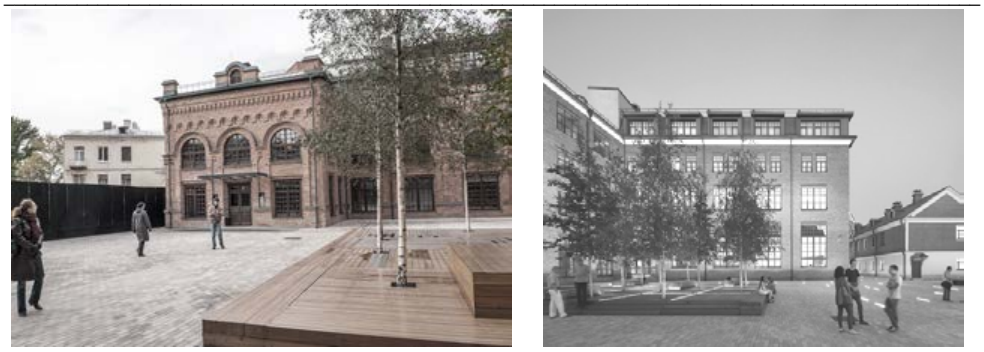


Рис. 2. Фабрика Станиславского, авторы John McAslan & Partners, 2004—2010 гг.

Рис. 3. Адаптация бывшего хранилища, авторы «Medusagroup», 2008 г.

Положительные стороны — проект согласован с организацией по охране архитектурных памятников. На этой основе выполнена реконструкция фасадов здания и реконструкция внутренних пространств.

Отрицательные стороны — белые стены и деревянные балки добавляют безликость помещениям. Кирпичная отделка стен в такой среде теряется.

На базе исторических зданий созданы также музей истории горнозаводской промышленности в Нижнем Тагиле, городской краеведческий в Туле.

Объектом настоящего исследования является сохранившийся комплекс винного склада в г. Камышине. Предлагается концепция его преобразования под культурно-этнографический музей, который будет объединять в своей деятельности музейные и просветительские функции с торговыми и развлекательными. Такой объект одновременно увеличит туристическую привлекательность города — разными способами, вплоть до воссоздания технологии какого-либо производства.

В Камышине, как и в других исторических городах России, подобные винные предприятия строились на средства министерства финансов. Их стали называть «казенными винными складами». Они являются ярким примером типовой промышленной архитектуры конца XIX—начала XX вв. (рис. 4).

Здания выполнены в традициях позднего «кирпичного стиля» — демократичной разновидности эклектики последней трети XIX в. Однако в них еще сохраняются незначительные элементы классицизма (замковый камень). Начинают прослеживаться формы рационального модерна начала XX в.

К атрибутам модерна относятся: асимметрия в объемной композиции, в планировке, различные размеры и форма окон со сложной расстекловкой, характерный абрис крупной лучковой арки над чердачными окнами, ризалиты с характерным декоративным обрамлением.

Рис. 4. Общий вид комплекса винного склада в г. Камышине, фото В. Я. Дергилева, 2020 г.

Благодаря хорошей сохранности этого комплекса, есть возможность рассмотреть принцип его архитектурно-пространственной организации. Казенный винный склад в Камышине возводился как компактный комплекс зданий. Его открытие как склада № 1 состоялось 24 июня 1901 г. По существующей в России традиции завершение строительства и открытие винного склада ознаменовалось торжественным молебном. Несомненно, что открытие винного склада в Камышине было важным событием и не могло не быть отмеченным торжественно.

Под строительство казенного винного склада был отведен участок на пустующей земле за городской чертой «старого города», за железнодорожным полотном в непосредственной близости от железнодорожной станции. Расположение склада за чертой «старого города», не нарушило при этом исторически сложившейся застройки правобережной части поселения. Выбор места для строительства был неслучайным и способствовал удобной транспортировке винной продукции.

Еще одна причина возведения винного склада на данной территории — для приготовления водки требовалась чистейшая вода. Волга не могла использоваться для этой цели из-за крайне неудовлетворительного санитарного состояния воды, постоянно и периодически загрязнявшейся различными предприятиями, которыми в конце XIX—начале XX вв. были застроены ее берега. Поэтому возникла потребность поиска подземных вод, видимо, в этом месте они были обнаружены. Пробили неглубокие скважины (30—48 сажень) с чистейшей артезианской водой.

Комплекс строился по «образцовому» (типовому) проекту[2]. Как правило, все здания возводились из красного кирпича. Если в конце XVIII—начале XIX вв. к промышленному строительству привлекались архитекторы, получившие образование в Академии художеств, то в конце XIX—начале XX вв., в проектировании и строительстве казенных винных складов

[2] РГИА. Ф. 575. Оп. 10. Д. 303. Проекты зданий винных складов и построек при них. 1890 г. 15 л.; РГИА. Ф. 1293. Оп. 167 (354). Д. 30. Типовые проекты винных казенных складов от 100 тыс. вед. до 600 тыс. вед. Б/д.

были задействованы многие архитекторы и инженеры, получившие образование в Институте гражданских инженеров в Петербурге. Известно, что проектные чертежи рассматривались и утверждались Техническо-строительной инспекцией, которая состояла при Главном управлении неокладных сборов и казенной продажи питей в Санкт-Петербурге. Рекомендованный проект выдавался хозяйственным комитетом губернского акцизного управления министерства финансов Российской империи[3].

Все постройки в комплексе казенного винного склада Камышина увязаны между собой, как функционально, так и стилистически и композиционно. Внимание уделено не только технической, но и художественной стороне. Комплекс размещается на участке почти прямоугольной формы (площадь 544,3 м^2), вытянут вдоль красной линии ул. Некрасова, лицевым фасадом обращен к вокзалу, образуя протяженную фронтальную композицию. Состоит из нескольких корпусов, которые по периметру оформляют границы участка, и объединены архитектурно оформленной оградой из красного лицевого кирпича (сохранилась частично). Все корпуса комплекса имеют хорошие пропорции, высокое качество строительных работ.

Главное здание выделяется среди других построек, которое в комплексе заводских корпусов по абсолютным размерам и масштабу архитектурных форм доминирует среди всех остальных. Симметрично от главного корпуса на красную линию выходили расположенные по бокам два небольших одинаковых одноэтажных здания — приемная (контрольная проходная) располагалась рядом с въездом на территорию предприятия со стороны ул. Некрасова (утрачена) и сторожка (сохранилась) (рис. 5).

Рис. 5. Сторожка и вид на главный корпус, фото В. Я. Дергилёва, 2020 г.

Другие здания комплекса поставлены перпендикулярно или параллельно направлению железнодорожного полотна, и составляют в плане четырехугольник с большим внутренним двором. Дополняла комплекс и служила его силуэтным акцентом высокая труба (утрачена).

Композиция дворового фасада главного корпуса в отличии от уличного асимметрична из-за пристроенного к его западному торцу длинного одноэтажного корпуса. Дворовой фасад отмечен слабо выступающим ризалитом с композицией в три оси, где окно на средней оси второго этажа трактовано как

[3] РГИА. Ф. 575. Оп. 11. Д. 132. Проект «Правил о производстве построек и наблюдений за исправным состоянием казенных зданий для надобностей казенной винной операции». 1905 г.

ложное. Асимметричность ризалиту придает устроенный центральный вход в здание по оси крайнего окна справа с массивным зонтом на чугунных ажурных кронштейнах. Двупольная дверь сохранилась до наших дней в первоначальном виде. По своему образному решению дворовый фасад главного корпуса идентичный с уличным фасадом.

Обильный фасадный декор здания типичен для кирпичного стиля. Здания выполнены в традициях позднего кирпичного стиля, в котором прослеживаются рационалистические тенденции начала XX в. Сохранилась медная фурнитура — дверные ручки.

В интерьере главного корпуса использованы достижения строительной техники конца XIX—начала XX вв., которые сегодня в хорошем состоянии: своды Монье, новые отделочные материалы (метлахская плитка). Как элемент отделки в интерьере применена чугунная отливка в виде входной лестницы и с рисунком перил в духе модерна. Даже поддерживающие лестницу колонны и плиты на площадках лестничной клетки выполнены из чугуна (рис. 6).

Рис. 6. Чугунная лестница, фото: В. В. Серебряной, 2018 г.

Несколько в стороне от корпусов производственной зоны к востоку от нее, на отдельной территории возводилась жилая зона. Это был жилой дом для инженерно-технического персонала, он был неотъемлемой частью ансамбля заводских построек. Строился дом одновременно с производственными зданиями. Это здание является уникальным для Камышина, по сути, это пример дома квартирного секционного типа начала XX в. в городе. Строение оформлено в общей стилистике с главным производственным корпусом и другими постройками. В этом здании, как и в главном корпусе, фасад со двора украшали чугунные сильно вынесенные козырьки на чугунных ажурных кронштейнах с рисунком в духе модерна. На сегодняшней день они варварски сняты. Похищена и чугунная лестница в интерьере. Сохранились двупольные деревянные филенчатые двери (рис. 7).

В настоящее время склад входит в историческую часть Камышина «Старый город», является памятником архитектуры регионального значения. Однако его судьба вызывает опасения, так как неоднократная смена собственников привела к ряду серьезных значительных изменений, которые ставят объект архитектурного наследия на грань разрушения. Так как комплекс — объект культурного наследия, на него наложено обременение, что учитывалось при ревитализации.

Рис. 7. Филенчатые двери главного корпуса, фото В. В. Серебряной, 2018 г.

Анализ архитектурно-планировочного решения комплекса винного склада выявил предметы особой охраны, в том числе, в главном здании и жилом доме для работников завода:

- архитектурная композиция фасадов;
- габариты оконных и дверных проемов, обрамления дверей и окон;
- конструкция и материал наружных и внутренних несущих стен;
- в главном здании конструкция и перила чугунной лестницы;
- филенчатая дверь с обрамлением в тамбуре входа на лестницу.

Все учитывалось при разработке проекта. Исторические здания освобождаются от современных пристроек. Восстанавливаются подлинные утраченные фрагменты на главном фасаде жилого дома для работников. Новая художественная среда создается с использованием современных материалов и конструкций с деликатным походом к старинной промышленной архитектуре (рис. 8).

Согласно проекту ревитализации винного комплекса главный двор будет иметь стеклянное перекрытие, при этом проявляется максимальная деликатность к памятнику архитектуры начала XX в. Здесь будут проходить различные выставки, концерты, конференции. В подвале предполагается разместить зал для дегустации вин, хранилища сортов элитных вин, арбузного меда.

Что касается планировки музейного комплекса, то она будет основана на создании застекленных переходов, соединяющих между собой здания с различными функциями, таким образом будет сформирована система взаимосвязей всех экспозиционных залов. На эксплуатируемой кровле одного из зданий предлагается сделать площадку на открытом воздухе с озеленением, где разместится летние кафе.

Предполагается создание виртуальной площадки, где посетители смогут ознакомиться с историей памятника промышленной архитектуры, с его 3D моделью, визуализационными материалами. Разрабатывается концепция для каждого отдельного здания.

Согласно предлагаемому проекту этнографический музей состоит из ряда экспозиций, которые показывают, рассказывают о традициях различных этносов, проживающих в Камышине, демонстрирует образцы быта ремесел, культуры.

Изменение интерьеров проводится с сохранением исторических конструкций (своды Монье, деревянные чердачные перекрытия) и декоративных элементов.

Восстановление крылец в доме для служащих проводится на основании, сохранившихся подлинных фрагментов. В центральной части главного корпуса под крышей планируется создать лофт-библиотеку.

В процессе работы над генеральным планом участка, особое внимание уделялось связи объекта с городской средой. Близкое расположение комплекса винного склада к вокзалу и размещение между ними зеленой зоны (рис. 9), привело к решению создать связующую аллею между этими объектами (рис. 10).

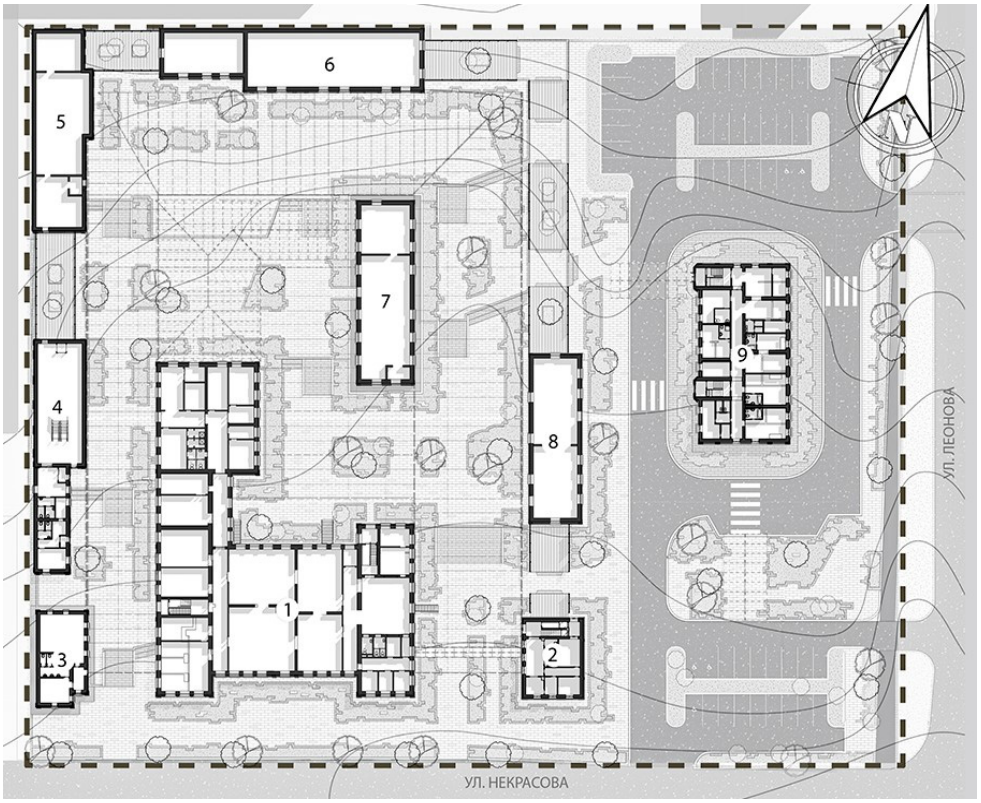


Рис. 8. Проектное решение СПОЗУ объекта: *1* — этнический музей народов России, библиотека, музей истории архитектурного объекта; *2* — кафе; *3* — пункт охраны; *4* — этнический музей народов Германии; *5* — выставочный павильон; *6* — скад; *7* — выставочный павильон; *8* — предприятие общественного питания; *9* — гостиница

Комплекс состоит из 9 корпусов, проектом разрабатываются 5, включая гостиницу. На схеме функционального зонирования генплана приведены зоны и расположение корпусов комплекса (рис. 11).

В главном корпусе центра на первом этаже размещается музей национального состава Камышина (рис. 12).

На втором этаже — лофт-библиотека (рис. 13).

Рис. 9. Схема существующего ландшафта

Рис. 10. Схема организации пешеходного движения

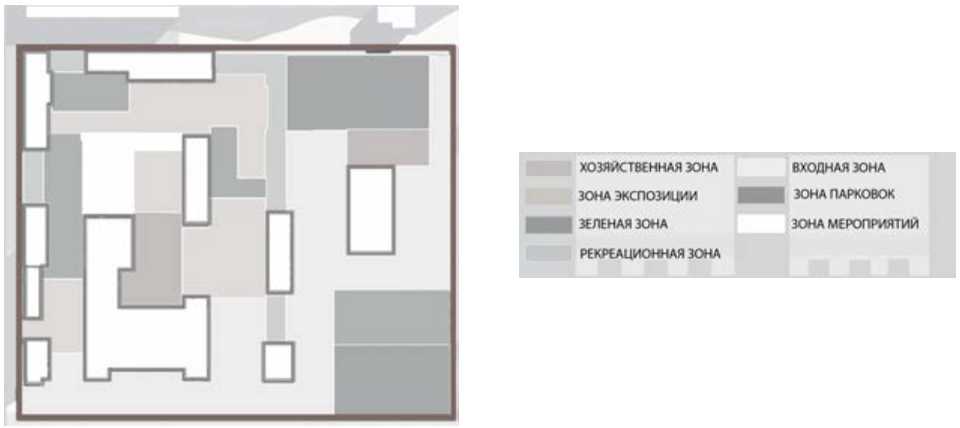


Рис. 11. Схема функционального зонирования территории комплекса, проектное предложение

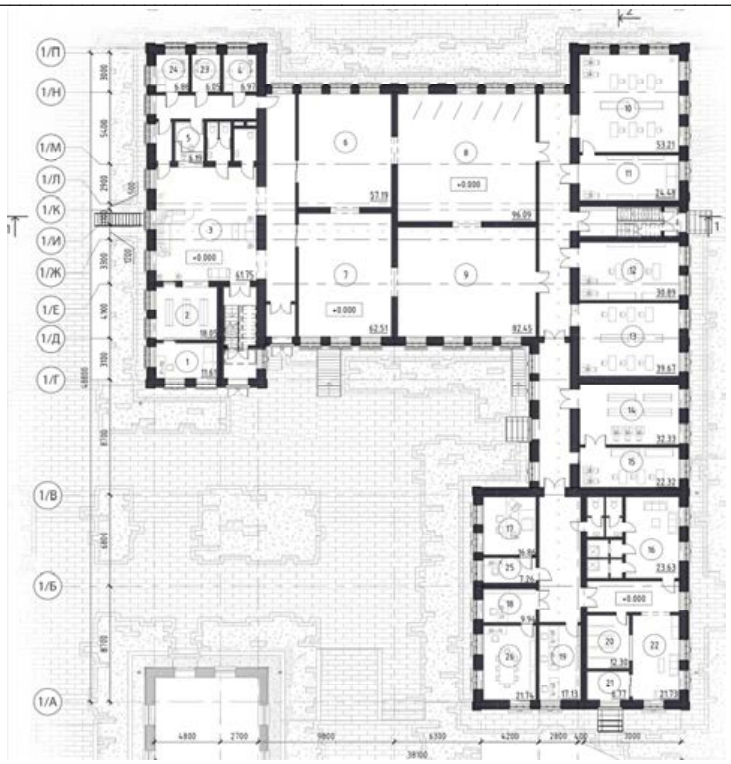


Рис. 12. План первого этажа главного корпуса

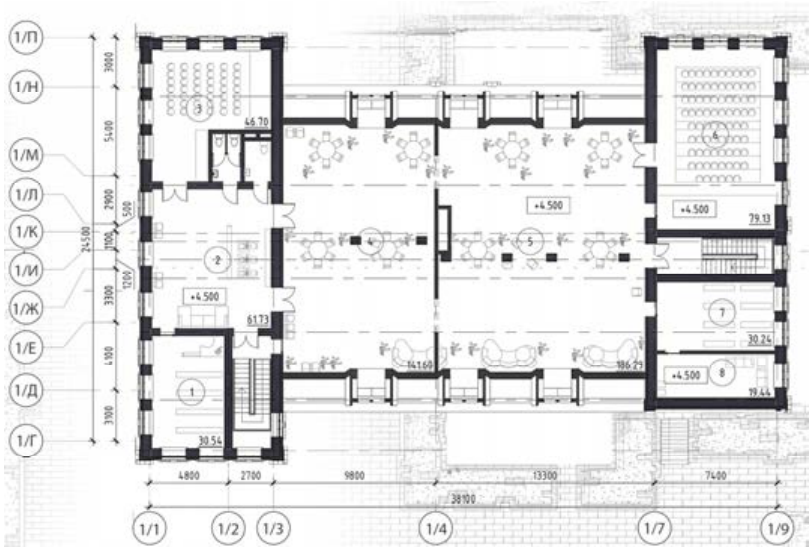


Рис. 13. План второго этажа главного корпуса

Административные помещения главного корпуса расположены в его северо-западном одноэтажном крыле; пространство построено таким образом, что помещения для посетителей, мастерские и прочие обслуживающие помещения, а также администрация, изолированы друг относительно друга, но, в то же время, связаны экспозиционным пространством, каждая группа имеет

к нему непосредственный доступ. В подвале запроектирован музей истории промышленного объекта в стиле винного погреба с дегустационным залом.

В корпусе справа от главного было принято решение устроить кафе. Компактность корпуса накладывает отпечаток на особенности поэтажного разделения помещений функциональных групп как производственной, так и обслуживающей посетителей (рис. 14).

Рис. 14. Разработанные решения корпуса кафе

По левую сторону от главного корпуса размещены остальные два разрабатываемых в проекте комплекса, помимо гостиницы. Это корпус охранного пункта и корпус этнического музея Германии.

Комплекс казенного винного склада, созданный в начале XX в., занял определенное место в структуре г. Камышина. Несмотря на то, что он трансформировался в советское время, он не утратил своего архитектурно-художественного и градообразующего значения в планировочной системе города.

Сохранение и активное использование комплекса казенного винного склада, будет способствовать формированию бережного отношения к архитектурному наследию города. Ревитализация исторического промышленного комплекса представляет собой ресурс для развития туристического бизнеса (рис. 15).

Рис. 15. Визуализация проектного решения комплекса

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Минх А. Н.* Историко-географический словарь Саратовской губернии: южные уезды Царицынский и Камышинский. Современная версия / под ред. И. О. Тюменцева. Волгоград, 2010.

2. *Езиоранский Л. К.* Фабрично-заводские предприятия Российской империи. СПб. 1909. 1443 с.

3. *Варзар В. Е.* Список фабрик и заводов Российской империи (1907—1909). СПб.: Типография В. Ф. Киршбаума, 1912. 720 с.

4. *Орлов П. А.* Указатель фабрик и заводов Европейской России и Царства Польского: материалы для фабрично-заводской статистики / составлен по официальным сведениям Департамента торговли и мануфактур. Изд. 2-е, испр. и значит. доп. СПб.: Типография Р. Голике, 1887. 824 с.

5. Альманах русских пивоваров / под ред. Я. Ф, Дворковского, Ф. Г. Нетча. М., 1894.

6. *Шустов А. С., Степанов А. О.* О промышленном зодчестве // Зодчий. Спб. 1915. № 12. С. 119—123.

7. *Лотарева Р. М.* Города-заводы России. XVIII—первая половина XIX века. Екатеринбург: Сократ, 1993. 287 с.

8. *Холодова Л. П.* Исторические концепты организации Уральских промышленных городов. // Управленец. 2009. № 1—2(28—29). С. 39—45.

9. *Штиглиц М. С.* Промышленная архитектура Петербурга в сфере «индустриальной археологии». СПб.: Белое и Черное, 2003. 221 с.

10. *Серебряная В. В.* Промышленная архитектура малого исторического города Дубовки как пример индустриальной цивилизации России // Пространство городской цивилизации: идеи, проблемы, концепции: материалы международной научной конференции. ФГБОУ ВО «Уральский государственный архитектурно-художественный университет». Екатеринбург, 2017. С. 180—184.

11. Investigation of industrial architecture's monuments in the 19th—early 20th centuries in Volgograd Region / V. Serebryanaya, S. Makhova, T. Makhova, I. Mordvincev // Publisher. Atlantis Press 2019. Pp. 123—129. URL: https//www atlantis press com /proceedings /ahtii-19/125910053.

12. *Кадыров Т. Э.* Формирование общественных пространств в исторических центрах городов на примере г. Казани // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2019. Вып. 3(76). С. 196—208.

13. *Stieglitz M.* Historical Industrial Ensembles in the Landscape of Saint Petersburg: Renovationas and Losses // Proceedings of the 2nd International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (AHTI 2020). Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Vol. 471. Publisher. Atlantis Press 2019. Pp. 113—120.

14. *Malaya E. V.* Revival of Light Industry Enterprises (On the Example of Silk-Weaving Factories in Shchelkovo) // Proceedings of the 2nd International Conference on Architecture: Heritage, Traditions and Innovations (AHTI 2020). Advances in Social Science, Education and Humanities Research. Vol. 471. Publisher. Atlantis Press 2019. Pp. 179—186.

© Серебряная В. В., Дергилёв В. Я., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Серебряная В. В., Дергилёв В. Я. Ревитализация объекта культурного наследия — комплекса казенного винного склада в г. Камышине // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 279—291.

Об авторах:

Серебряная Валентина Васильевна — канд. истор. наук, проф. каф. дизайна и монументально-декоративного искусства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; val38@mail.ru

Дергилёв Виктор Яковлевич — магистрант, каф. урбанистики и теории архитектуры, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1; archiboy7623@gmail.com

Valentina V. Serebryanaya, Viktor Ya. Dergilev

Volgograd State Technical University

REVITALIZATION OF THE OBJECT OF CULTURAL HERITAGE — THE COMPLEX OF THE STATE WINE WAREHOUSE IN KAMYSHIN

The article deals with the revitalization of the state-owned wine warehouse complex in Kamyshin (1901) (Volgograd Region). The concept of transforming the historical industrial complex into a cultural and ethnographic museum was based on complex scientific research, that included a comprehensive study of the object, analysis of archival and historical materials, iconographic and bibliographic sources, field research, study of local and foreign experience. On the basis of the research results obtained under the guidance of the author, the student V. Ya. Dergilev completed the final qualification work.

K e y w o r d s: revitalization, industrial complex, ethnographic museum.

For citation:

Serebryanaya V. V., Dergilev V. Ya. [Revitalization of the object of cultural heritage — the complex of the state wine warehouse in Kamyshin]. *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], 2021, iss. 1, pp. 279—291.

About authors:

Valentina V. Serebryanaya — Candidate of Historical Sciences, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; val38@mail.ru

Viktor Ya. Dergilev — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; archiboy7623@gmail.com

УДК 72.03(470.45)

П. П. Олейников

Волгоградский государственный технический университет

КУПЦЫ РЫСИНЫ И ИХ РОЛЬ В ОБЩЕСТВЕННОМ РАЗВИТИИ ЦАРИЦЫНА

В статье исследована деятельность известных в конце XIX начале XX века царицынских купцов Рысиных. Представлены сведения о благотворительной деятельности братьев. Показано участие и роль Василия Никаноровича и Ивана Никаноровича Рысиных в реализации строительства главного храма города — собора Александра Невского. Впервые выявлены особенности восстановления и реконструкции бывшего жилого дома братьев Рысиных под Волгоградский дом архитекторов. В статье представлен обширный источниковедческий и иллюстративный аппарат.

К л ю ч е в ы е с л о в а: Царицын, архитектура, собор Александра Невского, купечество, строительное и проектное дело.

В центре Волгограда частично сохранилось одно из самых интересных в архитектурном отношении зданий царицынской постройки — дом купцов Рысиных (сейчас — Волгоградский Дом архитекторов). Сведения о его владельцах имеются в некоторых печатных изданиях Царицына — в газетах «Волжско-Донской листок», «Царицынский вестник», ряде справочников. Важными источниками стали опубликованные А. В. Материкиным «Очерки истории Царицынской городской думы», книга I и книга II. [1, 2], и А. Г. Байкиным «Царицын: путешествие по страницам городской печати» [3].

Первое упоминание в прессе Царицына фамилии Рысиных датируется 17 января 1890 г. Газета «Волжско-Донской листок» сообщила, что в Царицыне в начале года открылся магазин по продаже церковной утвари московского купца Рысина Никанора Мефодьевича[1]. О его деятельности в Москве сведений пока нет, известно лишь, что фирма была создана в 1862 г.

Первые годы в Царицыне

В городе фамилия Рысиных довольно быстро становится известной не только как торговцев, но и авторитетных общественных деятелей и благотворителей. Наибольших успехов добивается Василий Никанорович, старший брат. Уже 24 ноября 1893 г. он избирается в Царицынскую городскую думу на четырехлетие 1894—1897 гг. За него проголосовало 29 избирателей, против было 17[2]. В 1897 г. его вновь избирают гласным городской думы. Он также стоял у истоков создания в Царицыне приюта для девочек. В 1893 г. он был избран в состав попечительского совета приюта. В 1894 г. Василий — ктитор церкви Иоанна Предтечи, а через 2 года — староста древнейшего храма Царицына, Иоанно-Предтеченской церкви, купец 2-й гильдии.

В мае 1896 г. В. Н. Рысин направляется в Москву хоругвеносцем на коронацию Николая II. 22 июня 1896 г. Всемилостивейше пожалован золотой меда-

[1] Волжско-Донской листок. № 775. 17 января 1890 г.

[2] Российский государственный исторический архив. Отчет о состоянии Саратовской губернии за 1894 г. Типографский экземпляр, хранящийся в библиотеке архива, С. 10.

лью «За усердие» для ношения на Станиславской ленте[3]. Данная награда была учреждена в 1801 г., ею награждали купцов, крестьян и мещан, не имеющих классных чинов гражданских лиц всех ведомств за различные услуги, оказанные правительству, а также нижних воинских чинов за сверхсрочную службу. Награда получена, видимо, за участие в торжествах коронации.

В начале сентября 1896 г. фирма представляла Царицын на Всероссийской промышленной и художественной выставке в Нижнем Новгороде. Среди других экспонатов торгового дома был выставлен церковный заклиросный дубовый киот, исполненный по художественному рисунку в византийском стиле с резными колоннами и изящной позолотой. Его высота 5 аршин 8 вершков, ширина 2 аршина 6 вершков. Данный киот был сделан в мастерской Рысиных и считался художественным изделием[4]. 13 сентября 1896 г. сообщается о присуждении наград выставки, где по «Художественно-промышленному отделу» бронзовую медаль получил Никанор Мефодьевич Рысин[5]. Два года спустя читаем сообщение: «Получены местной полицией и розданы по назначению награды за Нижегородскую всероссийскую промышленную и художественную выставку. Серебряная медаль и диплом на нее — тор. Дом «В. Воронин и сын», бронзовая медаль и диплом на нее — тор. Дом «Н. М. Рысин с сыновьями», диплом 4-го разряда — царицынской женской гимназии, диплом 4 разряда — царицынскому детскому приюту, похвальный лист М. Х. Миллеру, похвальный лист бр. Папаевым» [3] Конечно, медаль стала постоянно фигурировать в рекламных листках (рис. 1)[6].

Рис. 1. Бронзовая медаль Нижегородской выставки 1896 г.

Участие торгового дома в промышленной выставке позволило нам, спустя более 120 лет, увидеть пока единственную фотографию Василия Никаноровича, опубликованную в фотоальбоме всех участников Нижегородской выставки 1896 г. [4]. Именно он представлял фирму на ярмарке. Необходимо добавить, что в альбоме в отчестве Василия Никаноровича допущена описка (Никанорович, но не Никифорович) (рис. 2).

[3] Волжско-Донской листок. № 1792. 30 августа 1896 г.
[4] Волжско-Донской листок. № 1792. 26 мая 1896 г.
[5] Волжско-Донской листок. № 1798, 13 сентября 1896 г.
[6] Бронзовая медаль Нижегородской выставки 1896 г. Электронный ресурс, режим доступа: https://contragents.ru/culture/exhibits/prev_7945422

Рис. 2. В.Н. Рысин. 1896 г.

Через семь лет после открытия торгового дома в Царицыне газета «Волжско-Донской листок» публикует объявление купца Н. М. Рысина[7] следующего содержания: «С 1 февраля 1897 года вместо моей торговли в городе Царицыне под фирмою «Н. М. Рысин с сыновьями» основан торговый дом моими сыновьями под фирмою «Бр. В. и И. Рысины», т. е., Василием Никаноровичем и Иваном Никаноровичем Рысиными [5]. В то же время в 1899 г. издание [6] в разделе «Стекло, фарфор, фаянс и гончарные изделия» сообщает, что Рысин Никанор Мефодьевич имеет в Царицыне на Базарной площади торговые ряды. Такую нестыковку с предыдущим утверждением можно объяснить или устаревшими сведениями «Адрес-календаря», а возможно и то, что Н. М. Рысин все же оставил определенную часть торговли себе.

Газеты также сообщили, что в ночь на 16 ноября 1897 г. из магазина Бр. Рысиных (Александровская площадь) посредством пролома потолка было похищено церковной утвари на 437 рублей, весьма значительная по тому времени сумма[8].

Удалось обнаружить и несколько фотографий продаваемых в магазине часов. В магазине продавались карманные трехкрышечные серебряные часы марки Borel Fils & Cie с гравировкой «Торговый дом «Бр. В. и И. Рысины в Царицыне Н/В».

Братья Рысины, понимая значение рекламы, не жалеют на это средства (рис. 3—5). Они рекламируют свою фирму во всех крупнейших газетах, справочниках, календарях, где сообщают о продаваемых товарах, предоставляемых услугах, добавляя для солидности, что они являются комиссионерами Московской Синодальной типографии и предлагают к продаже книги «богослужебного и духовного содержания», продаваемые по ценам каталогов Синоидальной типографии. Даже в Сибири, в «Иркутских епархиальных ведомостях» в 1902 г. появилось объявление: «От отделения церковной утвари торгового дома «Бр. В. и И. Рысины в Царицыне Н/В» вследствие понижения курса на серебро, с прейскуранта ризниц и всей церковной утвари скидка увеличена с 3-х на 5 % с рубля. Причтам церквей допускается рассрочка платежа. Бр. Рысины». Через 10 лет после создания фирмы братьев Рысиных к ним приходит большой успех и на международной арене. За художественное исполнение резных работ из дерева на выставке во Флоренции фирма удостоена почетного диплома, почетного креста и золотой медали[9]. Конечно, и эти награды появляются на рекламных проспектах.

[7] Волжско-Донской листок. № 1858. 2 февраля 1897 г.
[8] Волжско-Донской листок. № 1979 19 ноября 1897 г.
[9] Царицынский Вестник. № 2577 17 июня 1907

Рис. 3. Реклама торгового дома «Бр. В. и И. Рысины», 1902 г.

Рис. 4. Реклама торгового дома «Бр. В. и И. Рысины»[10]

[10] Саратовские епархиальные ведомости. Отдел официальный. № 20. 17 июля 1905 г.

Рис. 5. Реклама торгового дома братьев Рысиных [7]

Газета «Царицынский вестник» сообщает еще об одной награде В. Н. Рысина — серебряной медали на Андреевской ленте для ношения в петлице, а с ней и разрешение на ее ношение. Отмечается, что во время коронации Николая II Василий Никанорович побывал также и в охране Императора, за что и был награжден[11]. Интересное сообщение появляется в местной прессе в 1897 г.: «Подкинутая к приюту 2-х летняя девочка Катя взята на воспитание В. Н. Рысиным. Она, по всей видимости, нашла в чете Рысиных заботливых и нежных воспитателей…»[12]. Справедливости ради необходимо сказать, что в тот период достаточно часто подбрасывали детей в купеческие семьи, и считалось богоугодным брать их на воспитание.

Авторитет Рысиных в Царицыне неоспорим. Царицынским купеческим старостой на 1899 г. утверждается избранный купеческим обществом 10 ноября 1898 г. купец Василий Рысин, его также избирают купеческим старостой и на 1900 г.[1314]. Дума в феврале 1899 г. принимает постановление о

[11] Царицынский Вестник. № 8. 10 декабря 1897 г.
[12] Царицынский Вестник. № 12. 14 декабря 1897 г.
[13] Царицынский Вестник. № 314. 9 января 1899 г.

разрешении купцу В. Н. Рысину открыть в помещении городского ночлежного дома дешевую чайную и столовую для бедных. В июле 1900 г. в верхнем этаже 1-й пожарной части Царицына открылась городская публичная библиотека. В ее организации принимал участие В. Н. Рысин, избранный членом организованной при думе подготовительной комиссии[15].

23 октября 1906 г. младший сын Никанора Мефодьевича царицынский купец И. Н. Рысин впервые избирается гласным Царицынской городской думы, за него проголосовал 91 избиратель (против 80). Василий Никанорович в эту избирательную компанию избран кандидатом в гласные (за — 47, против — 41) [2]. Послереволюционное время 1905 года наложило свой отпечаток на требования к благонадежности гласных при их утверждении Губернатором Саратовской губернии. Сообщается при этом, что И. Н. Рысин относится к «кадетствующим», т. е., сочувствующий кадетам. В апреле 1909 г. И. Н. Рысин избирается в состав исполнительной попечительной комиссии по составлению проекта и заведыванию постройкой храма в 3-й части города. Речь идет о строительстве храма Сергия Радонежского[16]. Также он избирается в члены попечительного совета 1-й Мариинской гимназии на трехлетие с 1909 г. В 1910 г. И. Н. Рысин — один из учредителей общества трезвости.

Торговый дом братьев Рысиных последний раз в прессе города упоминается в 1911 г., позже рекламируется только «Оптово-розничный посудно-ламповый, мебельный и церковной утвари магазин «Иван Рысин» в Царицыне Н/В» (рис. 6, 7) [8]. Вероятно И. Н. Рысин стал правоприемником торгового дома, т. к. указывается о том, что фирма существует с 1862 г., и на рекламе сохранены награды за Нижегородскую художественно-промышленную ярмарку 1896 г. Реорганизация фирмы возможно связана с тем, что 13 апреля 1911 г. Василий Никанорович был избран членом Управы с жалованием 2400 руб. в год и вынужден официально отказаться от коммерческой деятельности[17].

Рис. 6. Реклама торгового дома И. Рысина [9]

В экспозиции музея архитектуры Царицына — Сталинграда — Волгограда Института архитектуры и строительства ВолгГТУ имеется уникальнейший экспонат, подтверждающий

[14] Царицынский Вестник. № 608. 20 января 1900 г.
[15] Царицынский Вестник. № 753. 23. июля 1900 г.
[16] Государственный архив Саратовской области. Ф. 25. Оп. 1. Д. 2721, Л. 428 об.
[17] Государственный архив Саратовской области. Ф. 25. Оп. 1. Д. 3079, Л. 258.

рекламируемые выше товары — это фарфоровая подставочка с надписью по окружности «Посудно-Ламповый и Мебельный магазин „Иван Рысин“ Царицын Н/В». В ее центре изображены две вишенки, а на обратной стороне стоит клеймо известнейшей в то время, да и сейчас, немецкой фирмы Villeroy Boch, которая была создана еще в 1748 г. И хотя этот экспонат более чем за 100 лет не сохранил свой первоначальный вид, его демонстрация в музее вызывает неизменный интерес у всех посетителей музея (рис. 8).

Рис. 7. Магазин И. Рысина на Александровской площади

Рис. 8. Фарфоровая подставочка от магазина И. Рысина

В документах дореволюционного периода можно найти некоторые сведения и о финансовом состоянии братьев, состоявшими гласными Царицынской городской думы (избраны 15 декабря 1910 г.). Василий Никанорович — владелец недвижимого имущества на сумму в 13888 рублей, по оценке на 1 сентября 1914 г. Иван Никанорович — владелец Торгового Дома «Рысин И. Н.» на сумму в 8135 рублей, по оценке на 1 сентября 1914 г., а также жилого недвижимого имущества на сумму в 4202 руб. по данным на 1 сентября 1914 г. [9].

Братья Рысины внесли значительный вклад в осуществление строительства в Царицыне собора Александра Невского. В 1899 г. для ознакомления с собором в г. Оренбурге городской думой были направлены гласные А. М. Шлыков и В. Н. Рысин с губернским архитектором Ю. Н. Терликовым. На них собор, построенный по проекту архитектора А. А. Ященко, произвел глубокое впечатление, и они убедили думу сделать такой же собор в Царицыне[18]. С этого периода Василий Никанорович избирается членом попечительской комиссии по сооружению собора Александра Невского и утверждается председателем строительной комиссии. Он был в составе представительной комиссии, которая и определила местоположение будущего собора на городской площади.

Один из самых своих благородных поступков братья Рысины совершают в марте 1900 г., показав горожанам пример того, как надо уважать свой родной город и его жителей. Торговый дом «Бр. В. и Н. Рысины» пожертвовали три тысячи рублей «на постройку собора, включая в эту сумму и стоимость приобретенных торговым домом 4000 арш. (2845 м) цокольного белого камня» (рис. 9)[19]. Также торговый дом установил за свой счет 50 кружек для сбора пожертвований на строительство собора в местных церквях, банках, магазинах и учреждениях, общественных местах. Кружечный сбор дал в фонд строительства собора еще восемь тысяч рублей [10]. Справедливо, что на заседании Царицынской городской думы, состоявшемся 14 марта 1900 г., купцам Рысиным была выражена благодарность[20].

Рис. 9. Заготовка цокольного камня для собора (слева от часовни), слева в глубине — магазин братьев Рысиных

[18] Институт по реставрации памятников истории и культуры «Спецпроектреставрация». Тема «Воссоздание памятника архитектуры 1901—1918 гг. Собора Св. Александра Невского. Г. Волгоград. Научно-технический архив, Инв. № 13296. 27.10.1905.

[19] Государственный архив Саратовской области. Ф. 25. Оп. 1. Д. 4788, Л. 196.

[20] Государственный архив Саратовской области. Ф. 25. Оп. 1. Д. 4788. Л. 177.

В воскресенье 22 апреля 1901 г., после поздней литургии, отслуженной в соборе, преосвященным епископом Гермогеном была совершена закладка нового собора (рис. 10)[21].

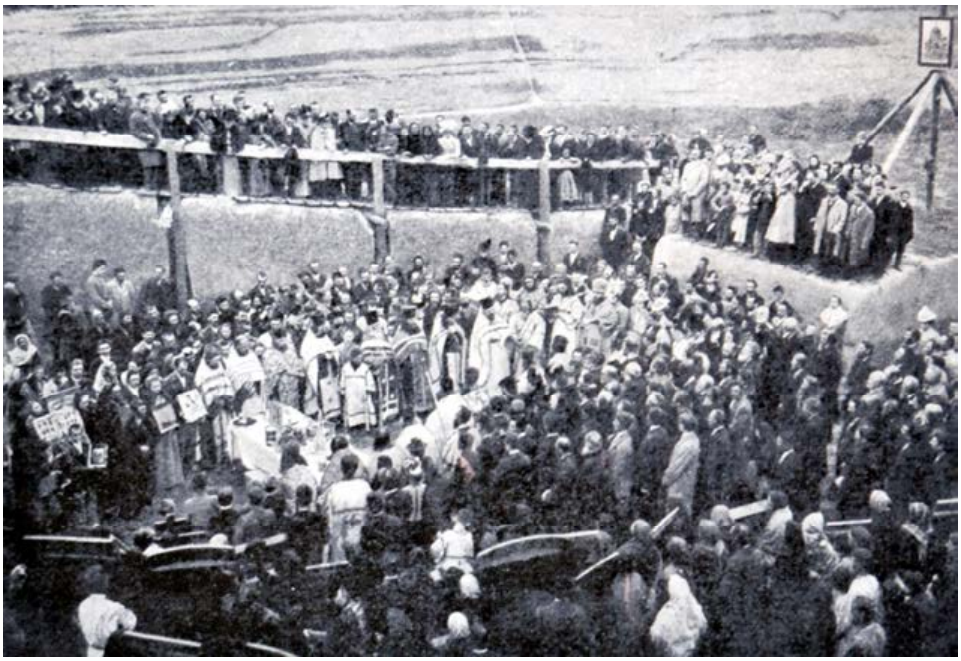


Рис. 10. Торжественная закладка собора 22 апреля 1901 г.

После окропления святой водой мест под алтарем и стенами будущего собора, была заложена под местом нахождения будущего престола металлическая доска с вырезанной на ней надписью «Во имя Отца и Сына и Святого Духа…». На ней также выгравировано и имя председателя попечительской комиссии по сооружению собора Александра Невского — В. Н. Рысина[22]. В мае того же года Царицынская городская дума избирает в члены подготовительной попечительной комиссии по постройке собора Ивана Никаноровича Рысина.

Время строительства собора Александра Невского стало для братьев Рысиных серьезным испытанием их финансового положения и нравственной проверкой. Постоянно приходилось заботиться о поиске финансовых средств, были целые периоды приостановки строительства, при этом необходимо было изыскивать средства на консервацию уже возведенных конструкций и стен, что могло значительно удорожать строительство.

Читаем письмо: «Господину Царицынскому Городскому Голове Василию Викторовичу Кленову.

[21] Институт по реставрации памятников истории и культуры «Спецпроектреставрация». Тема «Воссоздание памятника архитектуры 1901—1918 гг. Собора Св. Александра Невского. Г. Волгоград. Научно-технический архив, Инв. № 13296. 27.10.1905.

[22] Царицынский Вестник. № 969. 25 апреля 1901 г.

Попечительно-исполнительная комиссия по постройке Александро-Невского собора в собрании 4 декабря 1908 г. предложила мне через Вас, Милостивый государь, открыть подписку среди гласных городской думы и граждан на постройку Александро-Невского собора, как общего городского соборного храма, строящегося по постановлению Царицынской думы. При этом комиссия считает своею обязанностью довести до сведения думы, что без определенной ежегодной отчисляемой суммы со стороны думы, постройка соборного храма может остановиться на неопределенное время с большим вредом для уже возведенной от стихийных влияний.

Ввиду всего вышеуказанного, комиссия убедительно просит городскую думу на просьбу ее обратить серьезное внимание, так как в противном случае председатель комиссии вынужден будет сложить с себя нравственную ответственность перед городом за могущие произойти несчастные случаи разрушения постройки, вызванные неудовлетворением просьбы исполнительной комиссии со стороны городской думы.

О всем вышеизложенном благоволите доложить в первом же собрании городской думы. В. Рысин»[23].

15 декабря 1910 г. братья Рысины вновь были избраны гласными Царицынской городской думы и оставались таковыми вплоть до конца 1917 г. [2].

История купеческого дома

Жилой дом царицынских купцов В. и И. Рысиных, начатый строительством в конце XIX в., сохранился до нашего времени. Точная дата постройки пока неизвестна, но в календаре «Весь Царицын на 1902 г.», где указан год его подготовки и издания — 1901, размещена реклама торговых промыслов братьев Рысиных, в которой, в частности, говориться: «Иконостасная мастерская. Александровская улица, собственный дом» и «Столярная мастерская. Александровская улица, собственный дом» [5]. Следовательно, в 1901 г. свой дом у братьев уже был (рис. 11).

Издание «Вся Россия. Русская книга промышленности, торговли, сельского хозяйства и администрации: торгово-промышленный адрес-календарь Российской империи» в разделе «Торгово-промышленные предприятия — иконописные мастерские» сообщает, что в Царицыне действует торговый дом «Бр. Рысины», Т. Д., Александровская (ул.)», в разделе «Посуда» читаем «Бр. Рысины», Т. Д., Базарная площадь» [6].

Рис. 11. Реклама столярной мастерской «Торгового Дома Бр. Рысиных», 1901 г.

В Российском государственном архиве фото-кинодокументов удалось обнаружить документальный фильм 1924 г., в котором еще в Царицыне запечатлено изображение этого здания. Наши архивные поис-

[23] Государственный архив Саратовской области. Ф. 25. Оп. 1. Д. 2722, Л. 123.

ки и научные исследования принесли неожиданные результаты — это здание очень сильно отличалось от современного, восстановленного в 1952 г. Оказывается, центральный ризалит главного фасада, выходящего на Александровскую улицу, венчала небольшая башенка (рис. 12). Более того, современный фасад с этой стороны был расширен за счет пристройки фрагмента фасада левого крыла по всей его высоте. И наиболее интригующим моментом может стать предположение, что помещение, в котором теперь находится библиотека, использовалось или как домовая церковь, или как некая обсерватория! На такую мысль наталкивает анализ нескольких фотографий царицынского периода, где четко виден сферический купол на цилиндрическом основании над крышей этой части здания (рис. 13). Впервые такая версия была выдвинута в 2017 г. [11].

Рис. 12. Башенка на главном фасаде дома братьев Рысиных, 1924 г., музей архитектуры Царицына-Сталинграда-Волгограда, публикуется впервые

Кроме этого, подтверждением возможной надстройки является и ныне существующая конструкция, которая очевидно поддерживала купол — два поперечных ригеля на потолке второго этажа, сразу за лестницей. С полной уверенностью утверждать это нельзя, т. к. данная часть здания была сильно разрушена во время Сталинградской битвы и ригели могли появиться в процессе реконструкции. О существовании в Царицыне домовых церквей имеется информация в издании «Весь Царицын на 1902 г.», в котором сообщается о имеющихся в городе 2-х домовых церквях: домовой церкви при мужской гимназии, во имя Благоверного Князя Александра Невского, и домовой церкви при царицынской тюрьме во имя святого Апостола Андрея Первозванного. Нельзя не учитывать того факта, что братья активно торговали церковной утварью, а Василий Никанорович длительное время был руководителем строительства Собора Александра Невского и постройка купола могла быть осуществлена позже, уже после возведения жилого дома.

Последние исследования подтвердили ранее высказанную версию. В 1907 г. в газете «Царицынский Вестник» был опубликован язвительный фельетон, за подписью «Мцыри». В нем сказано: «В. Н. Рысин на крыше своего дома выстроил голубятню, которую называет обсерваторией. Вместе с податным инспектором Кузьменко бывают там по ночам, но пока ничего не открыли…». И далее дается характеристика В. Рысина «…Любит печататься в газетах, но размещается только в „Царицынском листке“. Издал описание путешествия о. И. Кронштадтского в Черноярский монастырь, но после того, как отправил о. Иоанну один экземпляр своего произведения, получил от него нижайшую просьбу ничего не печатать, „поелику вельми мнози грехи против грамматики и здравого смысла“». И еще важное замечание «…На собра-

ниях черносотенцев часто произносит речи»[24]. Таким образом, приходим к выводу — на доме Рысиных в 1907 г. была построена именно обсерватория, как об этом заявлял сам В. Рысин (заметим — первая в городе!), ну а мнение фельетониста, наверное, было неким упреком хозяевам, возможно, не допустившим корреспондента для ознакомления с необычной надстройкой.

Рис. 13. Купол на жилом доме братьев Рысиных (справа): вид с Октябрьской улицы, 1924 г., музей архитектуры Царицына — Сталинграда — Волгограда, публикуется впервые

В цокольном этаже дома братьев Рысиных располагались, как мы теперь знаем, иконостасная и столярная мастерские, подсобные помещения, складские и жилые комнаты прислуги. На первом и втором этажах размещались конторские и жилые помещения. Здание было оборудовано водопроводом, в цокольном этаже находились санузлы. Дом имел печное отопление, два входа, а сообщение между этажами осуществлялось с помощью двух деревянных лестниц. Купеческий дом имел скатную стропильную крышу, покрытую кровельным железом.

В предвоенные годы здание Рысиных использовалось городскими властями для различных нужд. Во время Сталинградской битвы дом сильно пострадал, но в нем сохранились некоторые кирпичные несущие конструктивные элементы с первоначальным декором фасадов. В 1951—1952 гг. дом был восстановлен по проекту архитекторов Е. Левитана, В. Симбирцева и Э. Богод, сейчас здесь размещается Волгоградский Дом архитекторов.

И еще один важный факт — анализ фотографий этого жилого дома, сделанных сразу после окончания Сталинградской битвы известным архитектором Ф. М. Коимшиди, подтверждает наличие веранды на первом и втором этажах южного фасада здания, вход в который был в левом крыле этой части здания, а не в центре, как сейчас (рис. 14). Сохранились и старинные кованые ограждения входной лестницы и веранды второго этажа. Очевидно, что современное здание дома архитекторов отличалось от довоенного еще и тем, что его цокольная часть сейчас сильно заглублена в грунт, связано это с послевоенными архитектурно-градостроительными и планировочными работами в центральной части города. На фотографии 1952 г. фасад здания показан

[24] Царицынский Вестник. № 2525. 8 апреля 1907 г.

с высоким крыльцом, т. е. еще до выполнения планировочных земляных работ (рис. 15). Истинные, «царицынские» фасады жилого дома купцов Рысиных теперь представлены проектом реваloризации его фасадов и макетом, выполненным по этим проектам и хранящимся в зале «Царицын» музея архитектуры Царицына — Сталинграда — Волгограда (рис. 16).

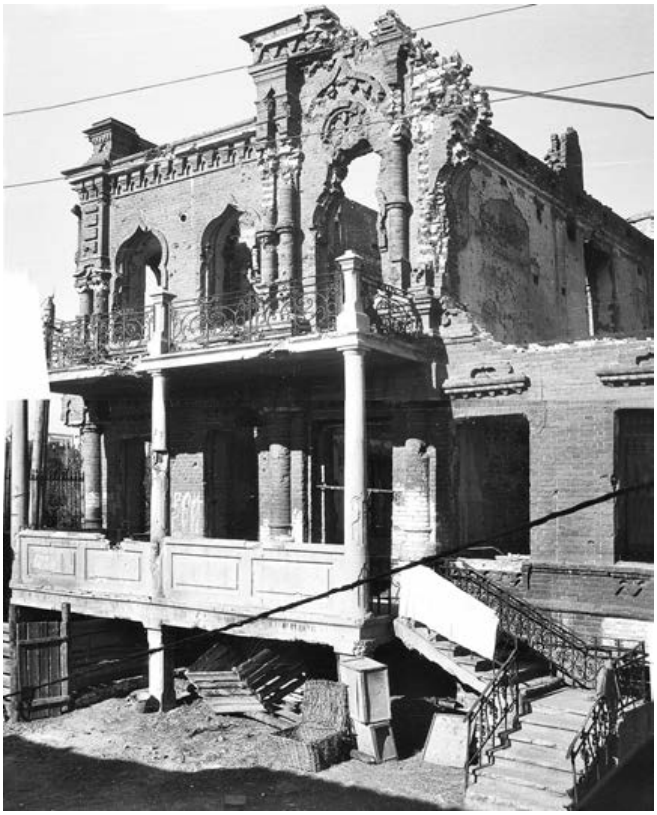


Рис. 14. Здание бывшего дома братьев Рысиных после Сталинградской битвы: фасад со стороны ул. Краснознаменской, реконструкция фотографии архитектора Ф. М. Коимшиди

Рис. 15. Вход и фасад Волгоградского Дома архитекторов, 1952 г., кадры из документального фильма

Рис. 16. Дом братьев Рысиных в 1924 г.: макет, архитектурная реконструкция студентов, руководитель проф. П. П. Олейников

В некоторых публикациях указывается на имеющиеся у каждого из братьев Рысиных собственные дома. Пока документального подтверждения этому не обнаружено. Но то, что братья одновременно владели одним домом, подтверждает информация в издании «Весь Царицын на 1902 год. Адрес-календарь». В торгово-промышленном отделе адрес-календаря сообщается о наличие в Царицыне нескольких иконописных мастерских, одна из которых расположена на Александровской улице в собственном доме Рысиных Василия и Ивана (рис. 17) [5].

Стилистическая характеристика архитектурных форм указывает на то, что дом Рысиных возведен в конце XIX века местными мастерами из кирпича, изготовленного на одном из царицынских заводов.

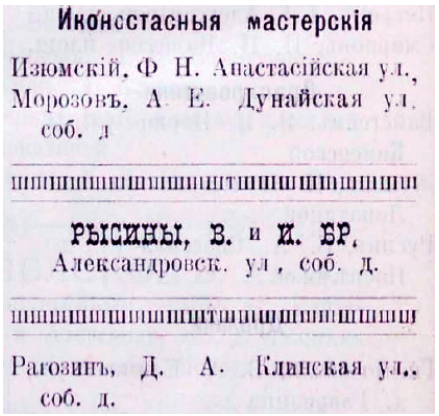

Иконостасныя мастерскія
Изюмскій, Ф. Н. Анастасійская ул., соб. д.
Морозовъ, А. Е. Дунайская ул.
РЫСИНЫ, В. и И. БР.
Александровск. ул., соб. д.
Рагозинъ, Д. А. Клинская ул., соб. д.

Рис. 17. Иконописные мастерские Царицына, 1902 г.

Проектно-строительная деятельность в Царицыне

В начале XX в. в Царицыне уже существовали многочисленные торговые заведения и фирмы, предлагающие свои услуги по проектированию, поставкам строительных материалов и строительству зданий самого различного назначения (рис. 18).

Проектную деятельность осуществляла мастерская А. В. Бочкарева, в которой выполнялись чертежные, картографические, автографические и межевые работы, а также разрабатывались планы и сметы на постройки (рис. 18, *а*).

Строительная контора Д. И. Михайлова, расположенная на ул. Московской, принимала подряды на строительно-инженерные работы (рис. 18, *б*) [12].

Техник Ф. Д. Столбин в 1914 г. выполнял широкий спектр строительных работ и огнестойкое строительство, его фирма находилась в собственном доме на ул. Медведицкой, 4. (рис. 18, *в*). Предлагались ответственные железобетонные работы, черепица, ступени, пустотелый кирпич, мозаичные работы, а также домовая канализация для присоединения к городским магистралям. Нам известно, что и после революции Ф. Д. Столбин работал в городе, он был автором проектов переустройство церкви Сошествия Святого Духа в

Свято-Духовом монастыре под киноклуб и читальню (1926 г.) и проектировал один из лучших кинотеатров Сталинграда — «Красная Звезда» в кв. № 52 по ул. Ленина, 8 (1926 г.). Известно, что в этом здании ранее размещался кинотеатр «Модерн», открытый в 1912 г. (дом купца Воронина).

а

б

в

Рис. 18. Рекламные объявления: *а* — объявление А. Бочкарева о выполняемых работах; *б* — реклама конторы и магазина Д. М. Михайлова; *в* — реклама Ф. Д. Столбина

Не менее известными в Царицыне были техники Ф. И. Чернов и Д. П. Мешков, они служили в техническом отделе городской Управы и предлагали услуги на разработку проектно-сметной документации (рис. 19) [11].

Рис. 19. Реклама проектно-сметных работ, 1911 г.

Жителям Царицына также предлагались и работы по художественному оформлению построек. Так, на ул. Софийской, 2, в доме М. П. Сусоколова располагалась скульптурная мастерская Л. Д. Кравчунаса, в которой выполнялись «…лепка архитектурных орнаментов всех стилей, фигур и проч., из цемента и

гипса и полная их обработка. Постройка: часовен, памятников, балконов, карнизов, балюстрад, фонтанов и проч. Лепные работы: внутренней отделки из алебастра и стюка. Лепка фигур, бюстов, съемка посмертных масок. Отливка медалей и гербов» (рис. 20, *а*). Именно Л. Д. Кравчунас известен нам как скульптор на строительстве Дома науки и искусств, открытого в 1915 г. в Царицыне. В доме М. П. Сусоколова А. Н. Павловым было организовано производство цементно-мозаичных, бетонных и железобетонных изделий. Крупной компанией представлены М. В. Божесков и Я. Л. Корчеофе, выполнявшие основные строительные объемы, начиная от проектов, смет и чертежей и заканчивая постройкой жилых домов, бань, производством цементно-мозаиковых (так в тексте), железобетонных и асфальтовых изделий [7].

В начале XX в. в городе насчитывалось более двадцати кирпичных заводов, все они находились в заполотновской части Юго-Восточной или Владикавказской железной дороги. Это были кирпичные заводы И. В. Анурина, П. С. Башкирова, Н. И. и А. И. Кудрявцевых, В. и А. Деревенсковых, В. М. Овчинникова и др. (см. рис. 20, *а*). В издании за 1902 г. [7] о кирпичных заводах Царицына сообщается следующее: «Деревенсков, Никл. Матв., за полотном Ю-В. ж.д.; Ежов, Вас. Федот., за полотном Ю-В. ж.д.; Ежов, Пет. Вас., на выгоне; Кольман, Алдр. Карл., за полотном Ю-В. ж.д.; Пилипенко, Мих. Пет., на выгоне».

а

б

в

Рис. 20. Рекламные объявления: *а* — рекламы товаров и услуг; *б* — реклама фабрики масляных красок А. Акимова, 1911 г.; *в* — объявление в справочнике за 1902 г.

Торговый дом «В. Я. Кленов и Сын» располагал двумя магазинами на городской площади в центре и на базаре за Царицей, где продавалось железо, инструменты для плотников и столяров, водопроводные принадлежности, железные балки для построек, цемент, огнеупорная глина, кирпич, краска, олифа, лаки — практически весь перечень строительных материалов.

Стекло для строительства продавалось В. А. Пашковой и Н. М. Титкиным на ул. Московской и Александровской площади, свои услуги предлагали столяры С. К. Горчаков, В. К. Ежунков, М. Н. Жук, А. И. Новиков, штукатур Козлов. Краску можно было приобрести в товариществе Лапшина на Вознесенской площади, у Э. Ф. Гейне на ул. Московской, или у В. Я. Кленова на Базарной площади. А. Г. Акимов держал специальный магазин по реализации продукции фабрики масляных красок, торговля в котором велась еще с 1882 г. (см. рис. 20, *б*).

Существовала даже конкуренция при поставках на строительные объекты цемента. Вольский портландцементный завод М. Ф. Плигина поставлял в Царицын портландцемент высшего качества под утвержденной правительством маркой «Сокол», а Санкт-Петербургское товарищество по производству Глухозерского портландцемента для удешевления продукта ввело продажу цемента в мешках с заводской пломбой вместо бочечной упаковки (см. рис. 20, *в*) [7]. И уже в то время Центральным электрическим обществом, расположенным на углу Петровской и Царицынской улиц, осуществлялись работы по устройству электроосвещения.

Новые данные о строительной деятельности в Царицыне начала XX в. и фотографии родственников предоставил нам д-р. геол.-мин. наук профессор М. А. Шубин (рис. 21). Он сообщил, что его дед, Михаил Иванович Шубин, был крупным и богатым строительным подрядчиком, среди его последних работ — устройство городской канализации в Царицыне. Предки Шубиных упоминаются еще с середины XVIII в., один из них, Шубин Алексей Иванович, в чине капитан-поручика служил во времена императрицы Елизаветы Петровны. М. И. Шубин от первого брака имел сына Якова, который учился в лесном институте в Санкт-Петербурге. Он умер в 1913 г. от холеры. Вторая жена Михаила Ивановича, Шубина Александра Ивановна (в девичестве Куприянова), происходила из обедневших дворян. В их семье родилось четверо детей: Ольга, Василий, Александр и Алексей — отец профессора М. А. Шубина (рис. 22).

Рис. 21. М. И. Шубин, А. И. Шубина, Я. М. Шубин, около 1904 г., личный архив М. А. Шубина; публикуется впервые

Большая семья имела в собственности несколько построек, жили они в центре, в районе здания Общественного собрания Царицына (дворянского собрания, по словам Ольги Михайловны). В качестве дачи имели еще одно

здание во второй части Царицына — дом на углу ул. Каширской (Циолковского) и Дубовской (Академической) (рис. 23). Это очень известное здание Волгограда, сейчас там находится рекламное агентство, но длительное время, и теперь очевидно, что ошибочно, считалось, что это церковно-приходская школа Вознесенской церкви. Ошибочность такого утверждения высказала и профессор В. В. Серебряная, которая утверждает, что церковно-приходские школы возводились в пределах отвода земли для храма, за оградой рядом с храмом. Ольга Михайловна (в замужестве Рождественская) рассказывала племяннику М. А. Шубину, что она училась в 4-й женской гимназии (дом Шлыкова на Дубовской ул.), ходить ей было недалеко, достаточно только перейти Каширскую улицу. Сейчас на фронтоне правого крыла одноэтажной пристройки бывшей дачи Шубиных сохранилась дата постройки — 1906 г., а в недавнем прошлом на фронтоне левого крыла была надпись «ШУБИН».

Рис. 22. Семья Шубиных: сидят слева направо — дочь Ольга, Шубин Михаил Иванович, сын Василий, Шубина Александра Ивановна, стоят — сын Шубин Яков Михайлович, подруга Якова, 1907 г., личный архив М. А. Шубина; публикуется впервые

Рис. 23. Здание «Торгрекламы», бывший дом Шубиных

Революционные события в Царицыне не обошли стороной и семью Шубиных. И если Михаил Иванович скончался рано, 54 лет (в 1916 г.), то Александра Ивановна (рис. 24) пережила серьезные жизненные испытания, она попала на ту злополучную баржу, куда помещали неугодных новой власти граждан. Только чудо помогло ей выжить, при затоплении баржа села на мель, люди в трюмах с трудом держались на плаву, уже оставалось над головой 20…30 см до потолка, но ей все же удалось спастись.

Рис. 24. Шубина Александра Ивановна, бывшая владелица дома на Каширской улице в Царицыне, 1933 г., личный архив М. А. Шубина, публикуется впервые

В государственном архиве Саратовской области хранится «Список лиц и учреждений, имевших право участия в выборах по городу Царицыну на основании ст. 24 Городового Положения, высочайше утвержденного 11 июня 1892 года. Четвертое четырехлетие (1906—1909 гг.)» (ГАСО. Ф. 25. Оп. 1. Д. 2181. Л. 14 — 22). В списке указаны лица и учреждения, владеющие недвижимым имуществом более одного года в пределах г. Царицына с оценкой имущества не менее 1000 руб. Таковых указано 354 человека. Именно эти граждане совместно со 148 выборщиками от торгово-промышленных предприятий и выбирали Гласных Царицынской городской думы. Оценка имущества М. И. Шубина составляла 2171 руб., он был 148-м из тех 354 по величине оцененного имущества, опережая такие известные в городе фамилии, как К. А. Туркин, Н. М. Титкин, А. К. Репникова, В. М. Миллер, П. И. Калинин, А. К. Гильдебранд и др.

В таком же «Списке лиц…», но уже на пятое четырехлетие 1910—1913 гг. сообщается о имеющемся у М. И. Шубина имуществе с оценкой в 10598 руб., а у его супруги, Александры Ивановны Шубиной — в 3331 руб. (по сведениям А. В. Материкина). Можно предположить, что так были оценены их дома в центре Царицына и во 2-й части города

К 1917 г. Царицын стал крупным торгово-промышленным центром на юго-востоке Европейской части России. Население города составляло около 120 тыс. человек, в нем преобладали пролетарские слои — рабочие промышленных предприятий города, грузчики, речники, сплавщики. Этот факт сказался на большой роли Царицына в период установления советской власти в 1917—1919 гг.

Архитектура Царицына в целом, соответствовала тому положению, который он занимал как уездный город Саратовской губернии в начале XX в., а жилой дом братьев Рысиных может служить образцом замечательного творения царицынских зодчих и строителей и является в настоящее время свидетелем ушедшей исторической эпохи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Материкин А. В.* Очерки истории Царицынской городской думы. Кн. 1. (1797—1887 гг.). Волгоград: Арт-линия, 2009. 464 с.

2. *Материкин А. В.* Очерки истории Царицынской городской думы. Кн. 2. (1898—1909 гг.). Волгоград: Арт-линия, 2009. 440 с.

3. *Байкин А. Г.* Царицын: путешествие по страницам городской печати. М.: Книга по Требованию, 2013. 464 с.

4. *Шустов А. С.* Альбом участников Всероссийской Промышленной и Художественной Выставки в Нижнем Новгороде 1896 г. СПб., 1896. URL: http://elib.shpl.ru/ru/nodes/795-shustov-a-s-albom-uchastnikov-vserossiyskoy-promyshlennoy-i-hudozhestvennoy-vystavki-v-nizhnem-novgorode-1896-g-spb-1896.

5. Весь Царицын на 1902 год. Адрес-календарь. Торгово-промышленная и справочная книга. Издание И. М. Чесалкина в Царицыне. Царицын: Типография В. А. Кононова. 1901. С. 15.

6. Вся Россия. Русская книга промышленности, торговли, сельского хозяйства и администрации. Адрес-календарь Российской империи. Издание А. С. Суворина, 1899. URL: https://rusneb.ru/catalog/000199_000009_005452503/viewer.

7. Царицынский справочный календарь на 1914 год. Первый год издания газетчика М. Я Сокова. Типо-литография т-во И. Д. Меннов и М. М. Котов, Царицын Н/В. URL: https://documentbase.net/downtimer/?fileid=1333828.

8. *Авчухов А. Ю.* Портрет купца Василия Рысина. Вопросы краеведения: материалы краеведческих чтений. Вып. 14: материалы XIX краеведческих чтений / Волгоградский областной краеведческий музей, Волгоградское областное общество краеведов. Волгоград: Издатель, 2018. С. 49—52.

9. *Материкин А. В.* Собор Александра Невского. Страницы истории первого Царицынского кафедрального собора. Волгоград: Издатель, 2004. С. 76.

10. Проект Нижняя Волга. Дом братьев Рысиных. Была ли домовая церковь в доме братьев Рысиных. № 9(50). 2017. С. 8—9.

11. Весь Царицын: справочник по гор. Царицыну и Царицынскому уезду, 1911. Царицын: Царицынская мысль, 1911. 113 с. URL: https://dlib.rsl.ru/viewer/01003327418#?page=1.

12. Спутник по реке Волге и ее притокам Каме и Оке. Год II. Саратов: Типо-Литография П. С. Феокритова. На 1902 г. URL: https://dlib.rsl.ru/viewer/01003327418#?page=155.

© Олейников П. П., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Олейников П. П. Купцы Рысины и их роль в общественном развитии Царицына // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 292—312.

Об авторе:

Олейников Петр Петрович — канд. техн. наук, проф., директор Информационного музейно-выставочного центра, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ), член Союза архитекторов РФ, почетный архитектор РФ; Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, poleynikov@mail.ru

Petr P. Oleinikov

Volgograd State Technical University

MERCHANTS RYISIN AND THEIR ROLE IN SOCIAL DEVELOPMENT OF TSARITSYN

The article explores the activities of the well-known Tsaritsyn merchants Rysins at the end of the 19th and beginning of the 20th centuries. Provides information on the charitable activities of the brothers. The participation and role of Vasily Nikanorovich and Ivan Nikanorovich Rysin in the con-

struction of the main church of the city — the Cathedral of Alexander Nevsky is shown. For the first time, the features of the restoration and reconstruction of the former apartment building of the Rysin brothers under the Volgograd House of Architects were revealed. The article presents an extensive source study and illustrative apparatus.

K e y w o r d s: Tsaritsyn, architecture, Alexander Nevsky Cathedral, merchants, construction and design.

For citation:

Oleinikov P. P. [Merchants Ryisin and their role in social development of Tsaritsyn]. *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], 2021, iss. 1, pp. 292—312.

About author:

Petr P. Oleinikov — Candidate of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; poleynikov@mail.ru

УДК 711.4-112

В. В. Прокопенко, И. Н. Плешаков

Волгоградский государственный технический университет

ФОРМИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ ГОРОДА С ПРИГОРОДНОЙ ЗОНОЙ НА ПРИМЕРЕ ВОЛГОГРАДА

В исследовании выделены основные функции пригородной зоны и рассмотрены градостроительные процессы ее формирования. Установлены условные границы пригородной зоны г. Волгограда. Проведен анализ функциональных связей г. Волгограда с его пригородной зоной.

К л ю ч е в ы е с л о в а: пригородная зона, пригород, функциональные связи.

В начале XXI столетия все сферы жизнедеятельности человека стремительно развиваются, прослеживается процесс субурбанизации, что способствует активному развитию пригородов — зон, расположенных вокруг крупнейших городов[1].

Пригородная зона — это территория, окружающая город и находящаяся с ним в тесной экономической, санитарно-гигиенической, архитектурной взаимосвязях. Пригородная зона выполняет оздоровительные функции для городского населения и имеет разностороннее хозяйственное значение. Но в современной градостроительной теории и практике вопрос пригородной зоны города остается нерешенным [1, 2].

Исторически пригородная зона располагалась в посадах. В Киевской Руси посадом называлась часть города вне городских стен. В посадах, как и в слободах, жили те, кто занимался торговлей, ремеслом и другими промыслами. Они размещались рядом с городом (кремлем) [3].

Также можно указать на городские выгоны, как одну из ранних форм хозяйственного использования пригородных земель в интересах городского населения. В старых русских городах за чертой застройки размещались кирпичные заводы, смолокурни, кузницы, а также железные, медные, стекольные и винокуренные заводы, для которых пригородные леса служили топливной базой. Но не одни только хозяйственные функции выполняли пригородные территории в старину. В окрестностях города находились излюбленные места народных гуляний. Такие места были почти в каждом городе [4].

Вопросы организации пригородной зоны в рамках системы расселения в 1940—1960 гг. решались одновременно с планированием городской территории. Границы пригородной зоны устанавливались в зависимости от величины города, местных условий (рельефа, расположения лесов, водоемов и т. п.), развития транспортных связей, фактического и предполагаемого размещения мест массового отдыха. Средний радиус пригородной зоны принимали 60…80 км от городской черты. Внутренней границей пригородной зоны являлась перспективная черта городской застройки, установленная проектом планировки города [5].

[1] The new era of the biggest agglomeratins—2050 Earth. URL: https: //www.predictions > the 2018.

Историческое изменение понятия «пригородная зона» прослеживается в течение последнего времени. При разработке генеральных планов города пригородная зона рассматривалась исключительно как природное окружение города и территория сельскохозяйственного назначения, а теперь пригород — это значительное окружающее город пространство, выделение которого имеет важное градостроительное значение.

Важно отметить, что в современной нормативно-правовой базе точного определения пригородной зоны нет. В Земельном кодексе Российской Федерации в редакции от 23.06.2014 № 171-ФЗ статью 86 «Пригородные зоны» признали утратившей силу.

Для современного градостроительного использования пригородной зоны необходимо выделить основные функции пригорода [4, 6]:

- обеспечение экологического равновесия между городской чертой и пригородным ландшафтом;
- обеспечение города необходимыми для его жизнедеятельности природными ресурсами;
- обеспечение города продуктами сельскохозяйственного назначения, что требует организации отраслевой структуры сельского хозяйства, подчинения его нуждам города;
- обеспечение горожан местами длительного и кратковременного отдыха.

В зависимости от градостроительного использования пригородной зоны и ее взаимосвязи с городом, необходимо устанавливать функциональные связи. Функциональные связи могут исходить как из города, так и из пригородной зоны (рис. 1).

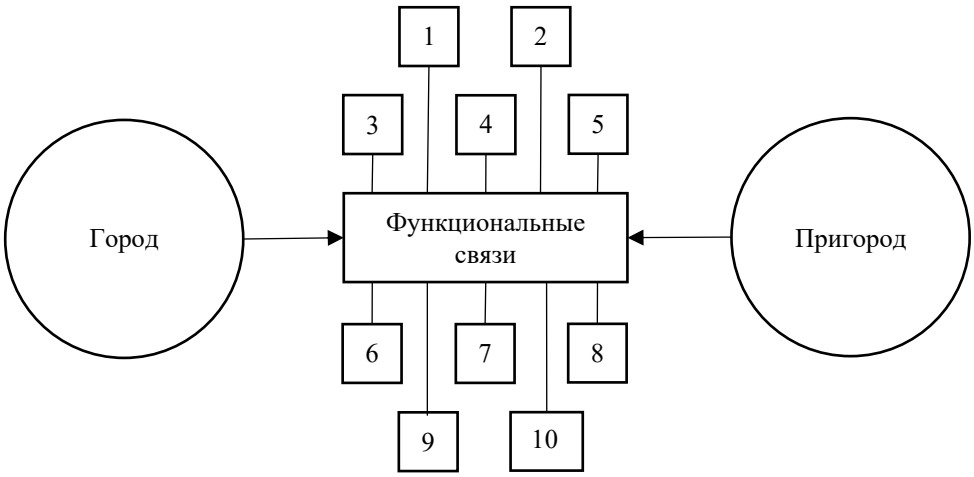


Рис. 1. Функциональные связи города и пригорода: 1 — экономические; 2 — трудовые; 3 — миграционные; 4 — рекреационные; 5 — природоохранные; 6 — историко-культурные; 7 — учебно-опытные; 8 — культурно-бытовые; 9 — инфраструктурные; 10 — земельно-ресурсные

Функциональные связи взаимодействия города и пригорода, необходимо устанавливать через конкретную градостроительную ситуацию.

Формирование пригородной зоны Волгограда состоит из двух градостроительных процессов:

- установление условных границ пригородной зоны города в структуре Волгоградской области;
- определение функциональных связей Волгограда с населенными пунктами, входящими в пригородную зону.

В градостроительную концепцию пригородной зоны Волгограда вошли семь муниципальных районов и два городских округа, а условную границу пригородной зоны установили путем ранжирования муниципальных районов (рис. 2) [7—9].

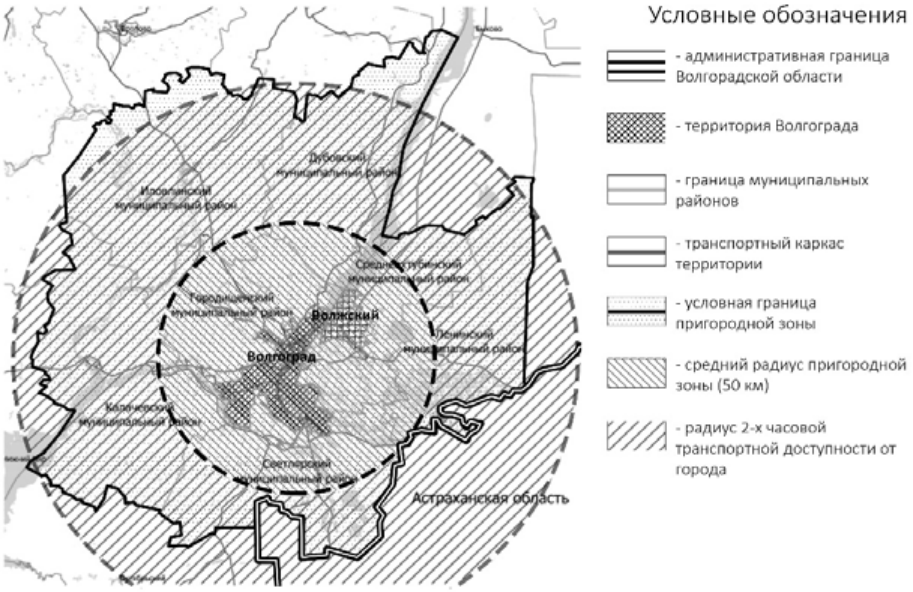


Рис. 2. Условные границы пригородной зоны Волгограда в структуре Волгоградской области

К 1-му рангу относятся муниципальные районы, которые имеют следующие критерии:

- муниципальный район имеет общие административные границы с Волгоградом;
- административный центр муниципального района граничит или расположен не более чем в 40 км от административных границ Волгограда;
- муниципальный район попадает в 50 км радиус от городской черты Волгограда.

По данным критериям отобраны три муниципальных района, которые относятся к 1-му рангу (рис. 3):

Городищенский муниципальный район;

Среднеахтубинский муниципальный район;

Светлоярский муниципальный район.

В центре пригородной зоны в западном направление от Волгограда находится Городищенский муниципальный район. Район расположен в междуречье Волги и Дона. Восточная граница примыкает к городской черте Волго-

града. Район граничит с Иловлинским, Дубовским и Калачевским муниципальными районами. Административным центром является рабочий поселок Городище. Площадь района составляет 218 тыс. га. На территории района проживает более 60 тыс. человек.[2].

В восточном направлении от Волгограда расположен Среднеахтубинский муниципальный район. Среднеахтубинский район образован в 1928 г., располагается в юго-восточной части области, между реками Волгой и Ахтубой и входит в Волжский территориальный округ. Расстояние до Волгограда — 38 км. Занимаемая площадь — 2039 км^2. Численность населения — 60,5 тыс. человек. В состав района входит 12 поселений. Административный центр — рабочий поселок Средняя Ахтуба[3].

В южном направлении от Волгограда расположен Светлоярский муниципальный район, который входит в Котельниковский территориальный округ. На севере район граничит с Волгоградом, на юге — с республикой Калмыкия. По своему географическому положению является транзитным. Площадь района составляет 3,3 тыс. км^2. Население — 36,7 тыс. человек. Административный центр — поселок Светлый Яр. Расстояние до Волгограда — 55 км[4].

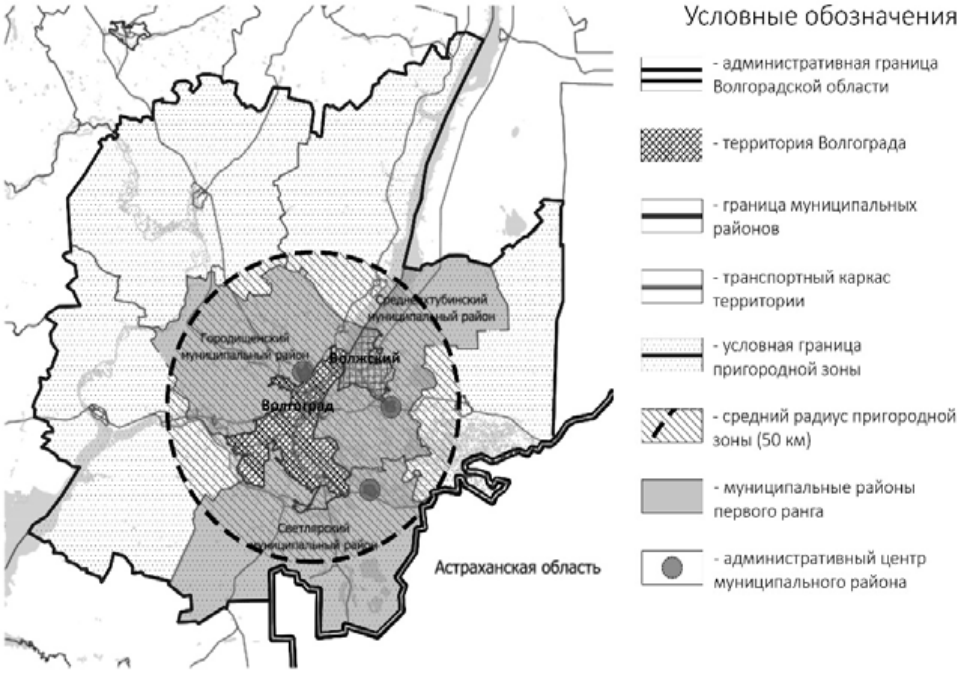


Рис. 3. Муниципальные районы первого ранга

[2] Волгоградская область. Общая информация. URL: https://volgoduma.ru/vlg-region/local-government/cities/497.

[3] Волгоградская область. Общая информация.

[4] Там же.

Районы 1-го ранга имеют устойчивые функциональные связи с Волгоградом, а именно:

- экономические;
- историко-культурные;
- природоохранные;
- инфраструктурные.

Экономические функциональные связи обеспечены основным видом деятельности муниципальных районов. Городищенский и Светлоярский являются сельскохозяйственными и занимают лидирующие позиции в области по выращиванию овощных и зерновых культур. Среднеахтубинский муниципальный район занимается производством стройматериалов.

Историко-культурную функциональную связь обеспечивает развитая инфраструктура культуры муниципальных районов. На территории Городищенского и Светлоярского районов находится большое количество памятников архитектуры, культуры и археологии. В муниципальных районах 1-го ранга расположены памятники регионального и федерального значения, посвященные Великой Отечественной Войне. Организация культурно-познавательных туристических кластеров на территории районов 1-го ранга обеспечивает устойчивость не только историко-культурных связей, но и развитие рекреационного потенциала территории [6, 10, 11].

Природоохранная связь обеспечена территориями, представляющими особую ценность для сохранения объектов животного и растительного мира, занесенных в Красную книгу Волгоградской области. На территории Светлоярского и Среднеахтубинского муниципальных районов расположен природный парк «Волго-Ахтубинская пойма» [12].

Ко 2-му рангу относятся муниципальные районы, которые имеют следующие критерии:

- муниципальный район имеет общие административные границы с населенным пунктом или муниципальными районами первого ранга;
- муниципальный район попадает в радиус 2-х часовой транспортной доступности от Волгограда.

По данным критериям отобраны четыре муниципальных районов, которые относятся ко второму рангу (рис. 4):

Дубовский муниципальный район;

Ленинский муниципальный район;

Калачевский муниципальный район;

Иловлинский муниципальный район.

На севере пригородной зоны расположен Дубовский муниципальный район. Территориальные границы, утверждены в 1977 г. Районным центром Дубовского муниципального района является г. Дубовка, основанный в 1734 г., расположен в 52 км северо-восточнее Волгограда, на правом берегу Волгоградского водохранилища, связан с Волгоградом автомобильной дорогой регионального и межмуниципального значения Р-228. Автомобильная дорога проходит по территории Самарской, Ульяновской, Саратовской и Волгоградской областей. На территории района, кроме городского поселения г. Дубовки, расположено 13 сельских поселений. Численность населения Дубовского района 29,7 тыс. человек, в том числе в г. Дубовка проживает около 15 тыс. человек (сельского населения — 50,9 %, городского — 49,1 %).

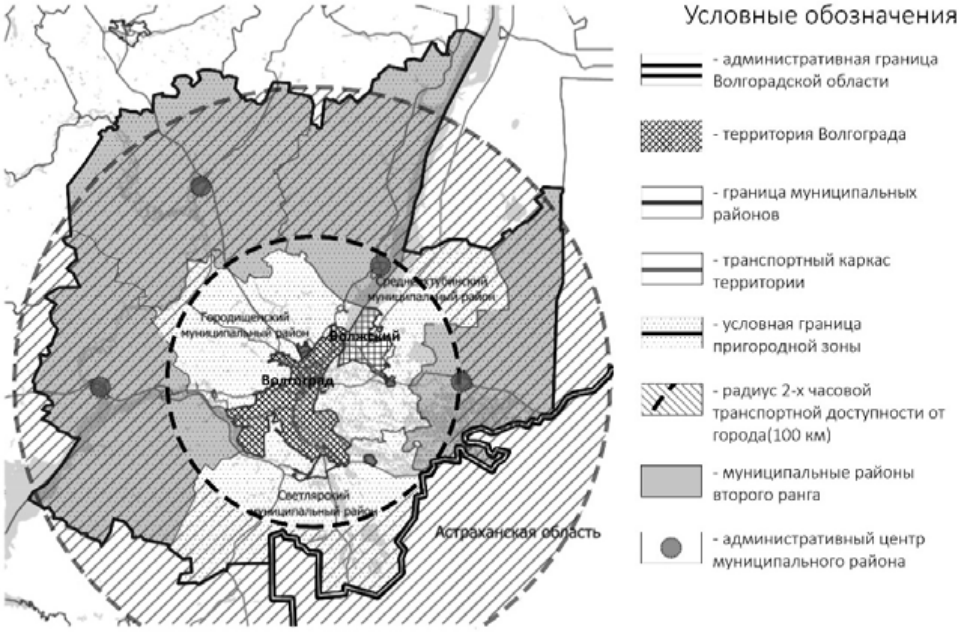


Рис. 4. Муниципальные районы второго ранга

В восточном направлении от Волгограда расположен Ленинский муниципальный район. Ленинский муниципальный район расположен в юго-восточной части Волгоградской области на левом берегу р. Ахтубы, в 78 км от Волгограда. Граничит с Астраханской областью, занимает площадь 4000 км^2. Входит в Волжский территориальный округ области. Район основан в 1928 г. Общая численность населения — 30,4 тыс. человек. Административный центр — г. Ленинск. На территории района находятся 14 муниципальных образований[5].

В западном направлении от Волгограда расположен Калачевский муниципальный район. Район характеризуется выгодным географическим положением, располагается по обе стороны Цимлянского водохранилища. На территории расположено 12 сельских поселений, которые объединяют 46 сельских населенных пунктов, и городское поселение г. Калач-на-Дону, расположенный в 80 км от города Волгограда. Территория — 4,2 тыс. км^2. Численность населения — 54,4 тыс. человек.

В северо-западном направлении от Волгограда находится Иловлинский муниципальный район. В существующих границах Иловлинский муниципальный район образован в 1965 г. Территория района расположена в междуречье Дона, Иловли и Волги, на Донской гряде в южной части Приволжской возвышенности. Центр района — рабочий поселок Иловля, с населением 12,7 тыс. человек расположен в 80 км от Волгограда на р. Иловле[6].

[5] Волгоградская область. Общая информация. URL: https://volgoduma.ru/vlg-region/local-government/cities/497.

[6] Там же.

Районы 2-го ранга имеют устойчивые функциональные связи с Волгоградом, а именно:

- экономические;
- природоохранные;
- земельно-ресурсные;
- инфраструктурные.

Основным направлением деятельности районов 2-го ранга является сельское хозяйство. Сельское хозяйство обеспечивает экономическую функциональную связь пригородной зоной [13].

Особо охраняемые природные территории обеспечивают природоохранную функциональную связь пригорода с Волгоградом. В границах Дубовского муниципального района расположены памятники природы регионального значения «Александровский грабен» и «Полунино» и территории, которые представляют особую ценность для объектов животного и растительного мира, занесенных в Красную книгу: «Система балок Кучугуры-Безымянная». На территории Ленинского муниципального района расположен природный парк «Волго-Ахтубинская пойма». Особо охраняемые природные территории Иловлинского муниципального района: природный парк «Донской» и государственный охотничий заказник регионального значения «Задонский». Из районов 2-го ранга менее устойчивую природоохранную связь имеет Калачевский муниципальный район, в его границах находится памятник природы «Ирисовый».

Земельно-ресурсные функциональные связи обеспечивают выгодное географическое положение муниципальных районов 2-го ранга. На территории Дубовского муниципального района находятся залежи песков для строительных работ и нефтяной промышленности. Ленинский район богат хвалынскими морскими глинистыми отложениями (сырье для производства кирпича, черепицы, керамзитового гравия). В границах Калачевского муниципального района разведано несколько месторождений твердых полезных ископаемых. На территории Иловлинского района сосредоточены запасы известняков.

Анализ функциональных связей Волгограда с его пригородом позволил установить три группы функциональных связей:

- функциональные связи устойчивого постоянного характера;
- функциональные связи временного характера;
- функциональные связи перспективного развития отношений города с пригородом.

Функциональные связи устойчивого постоянного характера выражены в экономических, природоохранных, рекреационных связях. Территория пригорода Волгограда имеет потенциал для развития рекреационных функций в особо охраняемых природных зонах. Вместе с этим можно отметить, что экономические связи ярко выражены в муниципальных районах 1-го ранга.

Функциональные связи временного характера выражены в трудовых, миграционных, учебно-опытных связях.

Функциональные связи перспективного развития отношений города с пригородом выражены в культурно-бытовых, историко-культурных, инфраструктурных связях. В условных границах пригородной зоны Волгограда находится большое количество памятников истории и археологии, что является перспективным потенциалом развития региона в целом.

В результате проведенного исследования пригородной зоны Волгограда можно сделать вывод, что назначение, размеры пригородной зоны меняются в зависимости от конкретной градостроительной ситуации, на которую влияют:

- климатические условия;
- величина города; уровень развития транспортного каркаса;
- архитектурно-планировочная структура;
- производственная база и ряд других факторов, которые формируют функциональные связи между населенными пунктами, входящие в состав пригородной зоны города.

На сегодняшний день не существует комплексного подхода к аспектам формирования и функционирования пригородной зоны. Поэтому трудно определить принципы образования и хозяйственную деятельность в границах пригородной зоны городов и иных поселений. Комплексный подход к изучению, проектированию и развитию пригорода будет способствовать решению проблем и повышению комфортности среды, как города, так и его окружения.

Проблему формирования пригородной зоны городов и иных населенных пунктов необходимо рассматривать на уровне градорегулирования в схеме территориального планирования и генерального плана.

Сегодня пригородная зона городов и иных населенных пунктов представлена комплексом архитектурно-планировочных особенностей территорий, которые состоят из сети населенных мест, объемно-планировочных объектов, расположенных в соответствии с функциональным назначением, планировочной структуры территорий различного назначения, а также особенностей взаимодействия с окружающей средой.

В законодательстве отсутствует термин «Пригородная зона», что ограничивает принятия решений по формированию пригородной зоны городов и иных населенных пунктах в рамках градостроительного проектирования. Введение понятия «Пригородная зона» в градостроительный кодекс позволит развивать пригород и регулировать в его границах градостроительную и хозяйственную деятельность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Прокопенко В. В., Ганжа О. А., Растяпина О. А.* Формирование экологических поселений на территории Волгоградской области // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 2(79). С. 233—244.

2. *Prokopenko V. V., Ganzha O. A., Rastyapina O. A.* Urban ecology features of large city disturbed territory development (case of Volgograd) // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 687 : International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS—2019) (25—27 September 2019, Chelyabinsk, The Russian Federation). Iss. 5. Architecture, urban studies and design. [Published by IOP Publishing], 2019. 7 p. DOI: 10.1088/1757—899X/687/5/055038 .

3. *Дорофеева Л. А.* К вопросу о термине «пригородная территория» // География и геоэкология на службе науки и инновационного образования: материалы Всероссийской с международным участием научно-практической конференции, посвященной Всемирному дню Земли и 60-летию кафедры экономической географии КГПУ им. В. П. Астафьева. (Красноярск, 23 апреля 2015 г.) Вып. 10. С. 147—150.

4. *Хауке М. О.* Пригородная зона большого города. М.: Госстройиздат, 1960. 170 с.

5. *Антюфеев А. В., Птичникова Г. А.* Приоритеты градостроительного развития города через призму генеральных планов (на примере Сталинграда — Волгограда) // Вестник Волго-

градского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2012. Вып. 28(47). С. 292—300.

6. *Sherbina E. V., Danilina N. V., Vlasov D. N.* City planning issues for sustainable development // International Journal of Applied Engineering Research. 2015. Vol. 10. Iss. 22. Pp. 43131—43138.

7. *Антюфеев А. В., Птичникова Г. А.* Линейный город. Градостроительная система «Большой Волгоград». Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2018. 196 с.

8. *Antyufeev A. V., Antyufeeva O. A., Ptichnikova G. A.* Urban transportation planning in the linear city // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 918. Iss. 1. IOP Publishing, 2020. 7 p. DOI: 10.1088/1757-899X/918/1/012059.

9. *Ptichnikova G. A., Antyufeev A. V.* Problems of sustainable urban development considering the negative impact of hydropower projects on biosphere resources of the territory // International Conference on Smart, Sustainable and Sensuous Settlements Transformation (3SSettlements): proceedings. Munich: Technische Universität München (TUM). Germany, 2018. Pp 121—124. URL: http://www.iaarc-academy.com/download/CIB_IAARC_W119_CIC_2018_Proceedings.pdf.

10. *Yastrebova N. A., Stetsenko S. E., Yeterevskaya I. N.* Technique of Formation of Ecologically Reasonable Structure of Resettlement in the System of a Local Component of a Biospheric Complex // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 753. International science and technology conference "FarEastCon—2019" [IOP Publishing], 2020. Iss. 1. 7 p. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/753/2/022057.

11. *Stetsenko S. E., Yastrebova N. A., Emelyanova O. E.* The main stages of landscape-environmental reconstruction of the «Green Ring» of Russian // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 962. International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS 2020). [IOP Publishing], 2020. Iss. 3. 6 p. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/962/3/032069/pdf.

12. *Иванова Н. В., Ганжа О. А.* Ландшафтно-экологические особенности формирования комфортной среды умного города (на примере исторического строительства зеленого кольца Сталинграда — Волгограда) // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Вып. 49(68). С. 153—166.

13. *Ястребова Н. А.* Основные этапы урбанизации Волгоградской области // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2017. Вып. 48(67). С. 194—204.

© *Прокопенко В. В., Плешаков И. Н., 2021*

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

Прокопенко В. В., Плешаков И. Н. Формирование функциональных связей города с пригородной зоной на примере Волгограда // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 313—322.

Об авторах:

Прокопенко Вячеслав Валентинович — канд. техн. наук, доц., доц. каф. урбанистики и теории архитектуры, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; v.v.p_24@mail.ru

Плешаков Илья Николаевич — студент, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; pleshackovi@yandex.ru

Vyacheslav V. Prokopenko, Ilya N. Pleshakov

Volgograd State Technical University

FORMATION OF FUNCTIONAL LINKS OF THE CITY WITH THE SUBURBAN AREA ON THE EXAMPLE OF VOLGOGRAD

The study highlights the main functions of the suburban area. A group of factors has been identified that influence the formation of functional ties between the suburban area and the city. The con-

ditional boundaries of the suburban area of Volgograd have been established. The analysis of functional connections of Volgograd with its suburban area is carried out.

K e y w o r d s: suburban area, suburb, functional connections.

For citation:

Prokopenko V. V., Pleshakov I. N. [Formation of functional links of the city with the suburban area on the example of Volgograd]. *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], 2021, iss. 1, pp. 313—322.

About authors:

Vyacheslav V. Prokopenko — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; v.v.p_24@mail.ru

Ilya N. Pleshakov — Student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; pleshackovi@yandex.ru

УДК 69:004

С. Г. Абрамян, О. В. Бурлаченко, О. В. Оганесян, А. О. Бурлаченко, А. Р. Шаюнусов

Волгоградский государственный технический университет

BIM-ТЕХНОЛОГИИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ: ФУНКЦИИ, РАЗВИТИЕ И ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

Рассматриваются этапы создания готовой модели строительной системы на основе BIM-технологий, основные функции проектной команды при создании модели, изменения этих функций в зависимости от применяемого пакета программного обеспечения. Отмечается, что теоретические разработки по BIM-технологии опережают ее практическое применение.

К л ю ч е в ы е с л о в а: модель, этапы создания, функции проектной команды, модификация, программный продукт.

Строительное производство в силу своей сложности, многогранности и многосоставности особенно сфокусировано на применении наиболее прогрессивных технологий для всех стадий жизненного цикла конечной продукции. Анализ публикаций [1—4] показывает, что на современном этапе развития строительной отрасли BIM-технологии являются наиболее передовыми, их применение отвечает требованиям обеспечения устойчивого развития, в частности энергоэффективности и экологической безопасности. Особая роль цифровых технологий приведена и в публикациях [5—8].

Несмотря на то, что многими учеными доказано преимущество использования BIM-технологии на строительной площадке, до сих пор у данной технологии нет утвержденного статуса, и она не применяется повсеместно. Возможно, это связано с тем, что теоретические разработки опережают практическое применение. Существующие проблемы внедрения BIM-технологии в мировую строительную отрасль должны со временем решиться. В итоге данная технология станет неотъемлемой частью строительного производства.

Целью данной статьи является рассмотрение:

- этапов создания готовой модели строительной системы на основе BIM-технологий;
- основных функций проектной команды при создании модели, изменений этих функций в зависимости от применяемого пакета программного обеспечения;
- опыта применения на примере строительства конкретных объектов.

Мировой опыт проектирования и строительства высотных зданий показывает, что переход на BIM-технологии означает не только освоение интерфейсных технологий, но и изменение некоторых организационно-структурных изменений в проектном коллективе. При работе в технологии BIM более рациональной представляется трехуровневая иерархия работающих над проектом сотрудников в зависимости от выполняемых ими задач, т. е. происходит некоторое преобразование традиционных функций членов проектной команды. С принятием BIM участники проекта меньше занимаются 2D-чертежами и многочисленными техническими документами. Вместо

этого они выполняют непосредственно свои функции — проектирование, снятие, оценка, планирование, управление качеством и т. д. — с помощью информации, которая генерируется, хранится и доступна из одного цифрового местоположения BIM. Таким образом, модель обеспечивает трехмерное представление здания, которое в дальнейшем может преобразоваться в четырехмерное (4D) и пятимерное (5D). При этом 4D BIM — это 3D-модель, связанная с данными о времени или расписании. Объекты и элементы модели с прикрепленными этими данными можно использовать для анализа и управления составлением графика строительства. Она также может быть использован для создания анимации процессов построения проекта. 5D BIM — это 4D BIM, связанная с данными о затратах. Данные о времени добавляют другое измерение к данным о затратах, позволяя сопоставлять расходы с программой проекта для анализа денежных потоков и т. д.[1] Каждая профессиональная функция должна нести ответственность за управление своей частью модели, а их усилия должны координироваться новой личностью — менеджером BIM, который будет координировать все разнообразные мероприятия, основанные на BIM в проекте. Ощущение сложности этой роли может быть получено из приведенного на рис. 1 списка моделей, которые потенциально должны быть скоординированы.

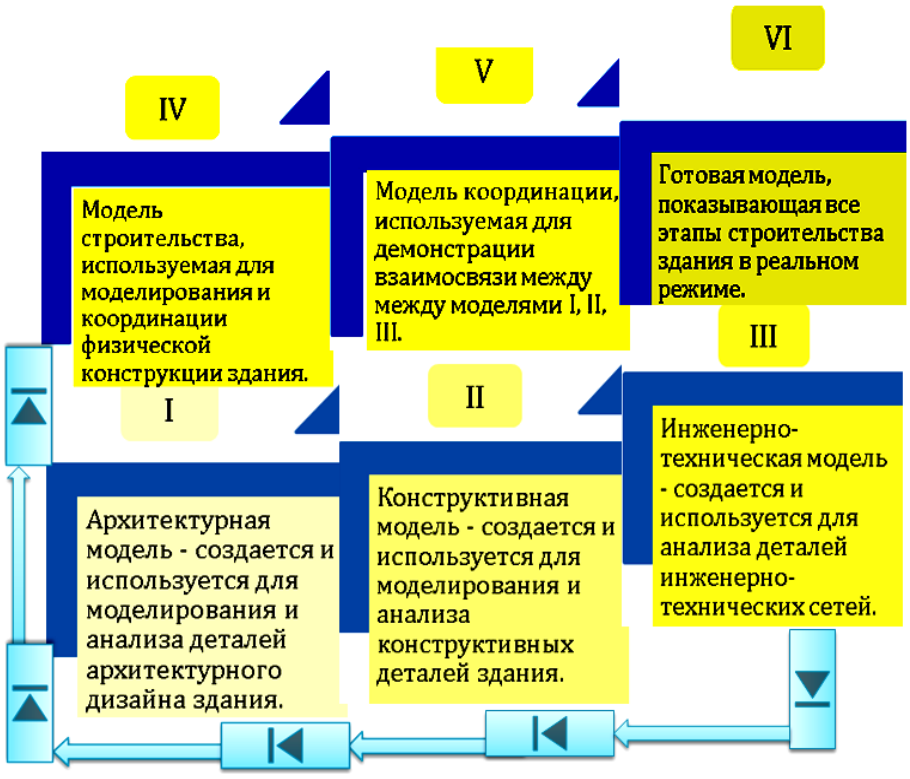


Рис. 1. Этапы (I—VI) создания готовой модели здания на основе BIM-технологий

[1] NATSPEC // National BIM Guide. 2011. URL: https://docviewer.yandex.ru/view/0/?page=1&*=S9mTzVapAgo4JCGIvYQL5dZVaHJ7InVybCI6ImIvYQL5dZVaHJ7InVybCI6Im.

В конечном счете модели, заполненные соответствующими данными и интегрированные с необходимыми программными инструментами, позволят команде проекта эффективно выполнять ряд аналитических процессов, которые ранее были бы гораздо более дорогостоящими, занимали много времени и, как следствие, часто упускались из виду, включая[2]:

- визуальный анализ;
- структурный (конструктивный) анализ;
- идентификацию и анализ несоответствий, при обнаружении;
- количественный подъем/количественный анализ;
- анализ планирования;
- анализ затрат;
- анализ энергии/окружающей среды (LEED);
- дневной свет/анализ освещения.

Для наглядности этапы создания конечной модели, с учетом аналитических процессов, приведены на рис. 2.

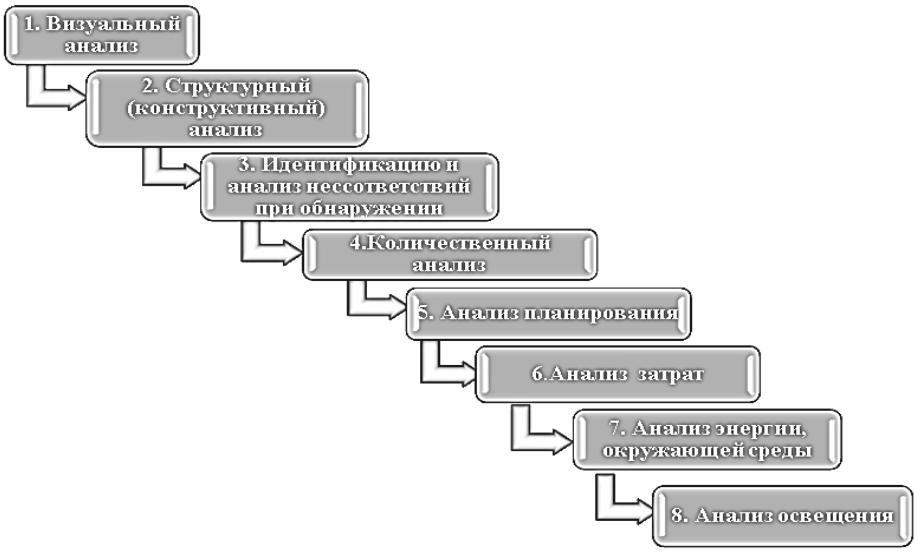


Рис. 2. Функции проектной команды для создания конечной модели строительной продукции на основе BIM-технологии

С другой стороны[3], приведенные на рис. 1 модели, созданные с помощью BIM-технологий, могут сопоставлять огромные объемы данных в цифровом пространстве, позволяя оптимизировать некоторые аспекты проектирования здания.

[2] Autodesk BIM Deployment Plan: A Practical Framework for Implementing BIM // San Rafael, CA, Autodesk. 2010. P. 42. URL: https://docviewer.yandex.ru/view/0/?page=1&*=tLKhJEKtjsNZYfmPtlRUx07NkKJ7InVybCI6Imh0dHBzOi8vdmRjc2NvcmVjYXJkLnN0YW5mb3JkLmVkdS9zaXRlcy9nL2ZpbGVzL3NiaXliajg4NTYvZi9iaW1fZGVwbG95bWV.

[3] NATSPEC // Draft National BIM Guide Part 2. 2011. URL: https://docviewer.yandex.ru/view/0/?page=1&*=S9mTzVapAgo4JCGIvYQL5dZVaHJ7InVybCI6Imh0dHBzOi8vdmRjc2NvcmVjYXJkLnN0YW5mb3JkLmVkdS9zaXR.

Важно отметить, что не все эти модели или функции BIM обязательно потребуются во всех проектах. Для достижения цели используются также различные программные обеспечения.

Например, для проектирования Вильнюсского муниципального центра (рис. 3) концептуальный дизайн, визуализация, рабочие чертежи и спецификации материалов сгенерированы на основе 3D-модели и выполнены программами Bentley Triforma и Bentley Structural. Далее 3D-модель здания, разработанная с помощью Bentley Structural, экспортируется в программу Bentley Navigator, оттуда в программу STAAD.Pro для структурного анализа и дальнейшего проектирования и управления проектом (рис. 4).

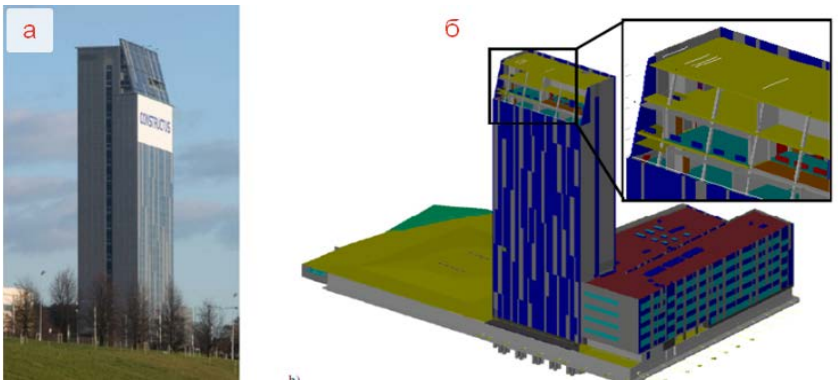


Рис. 3. Вильнюсский муниципальный центр: *а* — внешний вид; *б* — виртуальная модель BIM для управления объектами

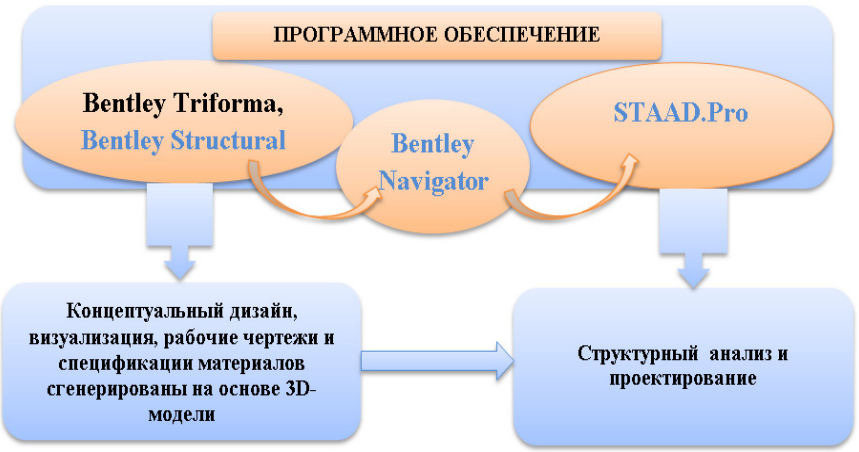


Рис. 4. Алгоритм проектирования Вильнюсского муниципального центра и применяемое программное обеспечение

Новым подходом в этом проекте офисного здания MG Valda Victoria стало параллельное сравнение дизайна, выполненного обычным способом, и 3D-моделирования. Таким образом, была получена информация о пропущенных дизайнерских решениях и возможных проблемах.

Алгоритм проектирования офисного здания MG Valda Victoria и применяемое программное обеспечение приведены на рис. 5.

Рис. 5. Алгоритм проектирования офисного здания MG Valda и применяемое программное обеспечение

Разработанная CAES (SAS) — автоматизированная система оценки в строительстве, основанная на концепции BIM, соединяет структурное проектирование, оценку затрат и планирование [9].

Эволюционность BIM-технологии в строительстве является необратимым процессом. Определяющим критерием выбора BIM-технологии для обеспечения устойчивого развития строительного производства является возможность использования данной технологии на всех этапах жизненного цикла строительной продукции, что в итоге позволит оптимизировать необходимые ресурсы и затраты, минимизировать количество строительных отходов, уменьшить негативное воздействие строительного производства на окружающую природную среду, при этом не теряя, а увеличивая надежность функционирования строительной продукции.

Для каждого этапа строительного процесса в BIM-технологии разработан эффективный инструмент, программный продукт, который поможет решить проектные, технологические, организационные, эколого-экономические задачи.

С учетом существующих программных обеспечений для создания проектной модели на всех стадиях 1-го этапа (2-й этап — реконструкция объекта) жизненного цикла строительной системы на основе BIM-технологии и анализа упомянутых публикаций приведем модифицированную схему функций проектной команды, ранее предложенной AIA, и создания цифровой модели (рис. 6).

Итак, в 3D-моделирование входят визуальный и структурный (конструктивный) анализ, на основание 3D создается 4D-модель, включающая в себя планирование организационно-технологических решений. Далее создается 5D-модель, в которой выявляются затраты, необходимые для сдачи в эксплуатацию строительного объекта.

Модификация схемы заключается в том, что современные программные обеспечения позволяют идентификацию и анализ несоответствий при их обнаружении, и количественный анализ (см. п. 3 и п. 4 рис. 6) при 3D-моделировании. Анализ энергии (считаем, что в данном случае имеются в виду энергоэффективности и влияние на окружающую среду п. 7 рис. 6) дол-

жен выполняться на более ранних этапах, чем 5D-моделирование, т. е. определение стоимости выполнения работ. Допустим после календарного планирования (п. 5 рис. 6).

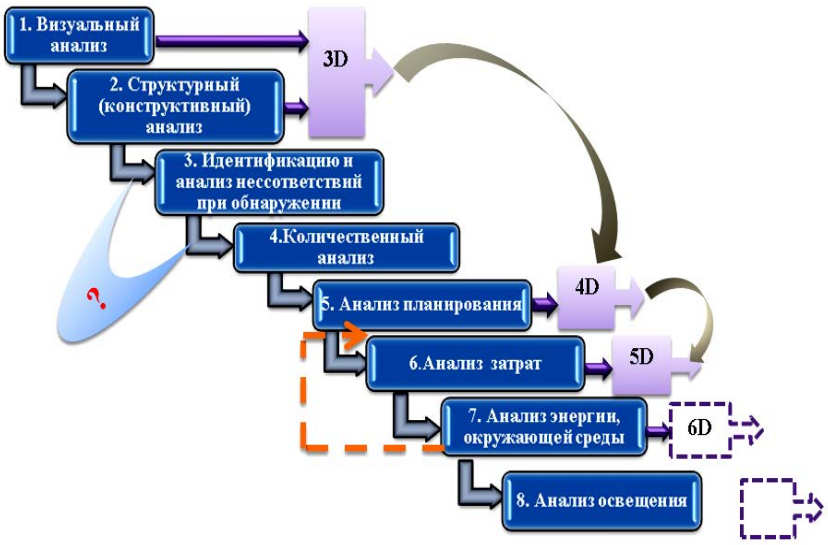


Рис. 6. Модифицированная схема функций проектной команды, ранее предложенной AIA, и создание цифровой модели строительной системы на разных стадиях жизненного цикла

Таким образом, модель развития BIM-технологии применительно к строительному производству, представляющая собой некую абстрактную модель поэтапного (ступенчатого) развития, приведена на рис. 7. Разработана она на основе модифицированной схемы функций проектной команды, ранее предложенной AIA, и создания цифровой модели строительной системы (рис. 6), анализа приведенных научных публикаций, а также публикаций с интернет-ресурсов [10—13].

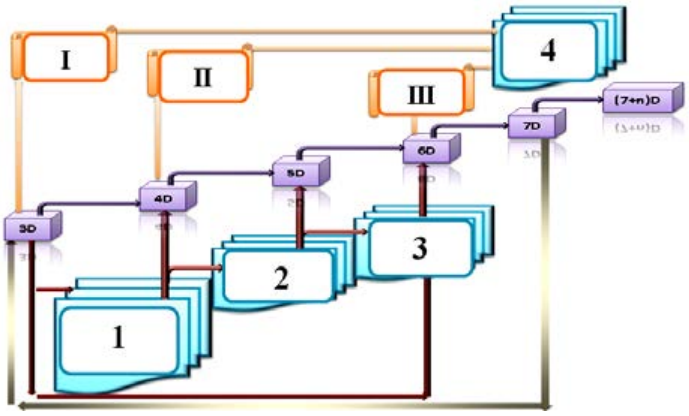


Рис. 7. Модель развития BIM-технологии применительно к строительному производству

Этапы 3D—6D являются традиционными во многих «строениях» BIM-технологии, они же обеспечивают доступ для одновременной работы специалистов различных направлений и возможность комбинации их технических решений в едином пространстве [14].

Рассмотрим каждой этап предлагаемой модели.

Этап 3D представляет собой общую скоординированную модель будущего строительного объекта с визуализацией, инженерными решениями, подготовленной рабочей документацией, а также с моделированием возможных воздействий абиотических факторов окружающей среды [13]. На этом этапе используются различные программные обеспечения.

Этап 4D — за основу взята модель этапа 3D. На этом этапе проводится автоматизация оптимального времени строительства объекта (выполняется в виде календарного плана строительства, сетевого графика, циклограммы), на рис 7 представлен блоком 1. Согласно [15] оперативно решаются задачи экологического моделирования с помощью программного продукта Plant-4D. Также Plant-4D используют для проектирования промышленных объектов, особенно магистральных трубопроводов [16]. На этапе 4D очень важно применение данных, полученных при помощи GIS-технологии.

Этап 5D основывается на модели этапа 4D. На этом этапе возможна автоматизация оценки затрат до начала строительства, управления затратами во время строительства [17]. Данный этап представлен в виде выполнения работ по утвержденной сметной стоимости строительства и на рис. 7 представлен блоком 2.

Этап 6D — его основанием является модель 3D-этапа. На 6D-этапе возможна автоматизация мониторинга состояния строительного объекта во время эксплуатации (блок 3 рис. 7). Также возможно вносить необходимые исправления в электронный паспорт строительной системы. В целях улучшения эксплуатационных показателей и энергоэффективности на этом этапе можно провести капитальный ремонт здания или сооружения. Если по каким-либо причинам проведение капитального ремонта невозможно, то ставится вопрос о сносе строительного объекта. На этом этапе главное ошибочно не включить реконструкцию строительной системы в необходимые виды работ, так как при реконструкции улучшаются не только эксплуатационные показатели, но и изменяются объемно-планировочные решения, при этом может кардинально измениться функциональное назначение данного объекта недвижимости. Как правило, после реконструкции строительный объект начинает свой второй жизненный цикл. При реконструкции используют современные инновационные материалы, которые позволяют во много раз уменьшить нагрузки на нижележащие элементы. Применяемые сегодня технологии отвечают необходимым требованиям энергоэффективности и экологичности, что обеспечивает устойчивое развитие строительного производства. Большинство инженерных решений, принимаемых во время реконструкции объекта и выполняемых на этапе 3D, подготовленная рабочая документация значительно отличаются от этого же на этапе нового строительства.

Этап 7D — на этом этапе собирается информация для проведения общего экологического мониторинга на разных этапах жизненного цикла строительного объекта (блок 4 рис. 7). Ранее указано, что воздействия абиотических факторов окружающей среды на строительную систему моделируются

на этапе 3D. На этапе проектирования можно определить, какое влияние оказывают солнце, осадки, ветер и т. п. на строительные материалы, конструктивные элементы или в целом на здание. Но как направление ветра, интенсивность осадков, температура воздуха и т. п. будут влиять на ход выполнения строительных работ, возможно учесть только на этапе 4D, а во время эксплуатации объекта — на этапе 6D. Вся известная информация собирается в специальные блоки «I, II, III» для дальнейшей оптимизации работ на всех этапах жизненного цикла строительной продукции.

Эффективное функционирование каждого этапа во многом зависит от правильно подобранных программных продуктов. На рис. 7 приведена обратная связь между этапами 7D и 3D, что означает применение накопленной информации по экологическому мониторингу на этапе 7D при новом строительстве, а на этапе 3D при моделировании реконструируемого объекта.

(7+*n*)D — это условный этап, показывающий динамичность предлагаемой модели и дальнейшее ее развитие.

За основу в разработанной модели развития BIM-технологии применительно к строительному производству (рис. 7), ранее представленной на международной конференции FarEastCon—2020, берется новое осмысление эволюции BIM-технологии, так как в данный момент существуют различные позиции по поводу этапов создания модели. Например, в публикации [18] отмечается, что 7D может быть применена для помощи инженерам и руководителям проектов в обнаружении конфликтов, при проектировании конструкций, модификации, установке оборудования, управления 3D-проектами, техническом обслуживании после сдачи объекта в эксплуатацию. Однако указанные позиции можно рассмотреть и на этапах 3D—6D, это позволяют современные цифровые технологии.

В заключение отметим, BIM-технология — это современная высокотехнологичная информационная технология (пусть пока в теоретическом ее осмыслении), которая является стратегической базой эффективной деятельности организаций строительной отрасли.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Integrating BIM with building performance analysis in project life-cycle / R. Y. Jin, B. T. Zhong, L. Ma., A. Hashemi., L. Y. Ding // Automation In Construction. 2019. Vol. 106. Article number: UNSP 102861. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102861.

2. *Kunieda Y., Codinhoto R., Emmitt S.* Increasing the efficiency and efficacy of demolition through computerised 4D simulation // Engineering Construction and Architectural Management. 2019. Vol. 26. Iss. 10. Pp. 2186-2205. DOI: 10.1108/ECAM-11-2018-0492.

3. *Бурлаченко О. В., Елфимов К. А., Бунин Д. В.* Информационное обеспечение управления жизненным циклом строительных объектов в концепции BIM // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2018. Вып. 54(73). С. 217—227.

4. *Alwan Z., Jones P., Holgate P.* Strategic sustainable development in the UK construction industry, through the framework for strategic sustainable development, using Building Information Modeling // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 140 Iss. 1. SI. Pp. 349—358. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.085.

5. *Гареев И. Ф., Мухаметова Н. Н.* Внедрение цифровых технологий на этапах жизненного цикла объектов жилой недвижимости // Жилищные стратегии. 2018. Т. 5. № 3. С. 305—322. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/vnedrenie-tsifrovyh-tehnologiy-na-etapah-zhiznennogo-tsikla-obektov-zhiloy-nedvizhimosti/viewer.

6. *Бурлаченко О. В., Бурлаченко А. О., Оганесян О. В.* Выбор оптимальных технологических решений в условиях плотной городской застройки на основе BIM-технологий // Вестник

Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 1(78). С. 329—335.

7. *Абрамян С. Г., Бурлаченко О. В., Оганесян О. В., Бурлаченко А. О.* Роль цифровых технологий при строительстве и повышении остаточного ресурса промышленной и строительной продукции // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2020. Вып. 4(81). С. 429—437.

8. *Травуш В. И.* Цифровые технологии в строительстве // Academia. Архитектура и строительство. 2018. № 3. С. 107—117.

9. *Migilinskas D., Ustinovichius L.* Computer-aided modelling, evaluation and management of construction project according PLM concept // Lecture Notes in Computer Science 4101. 2006. Pp. 242—250.

10. *Доробин Д. И., Сукачев К. Н.* Применение 3D/4D/5D-моделирования в строительстве. «BIM-система НЛМК». URL: http://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20781.

11. Что такое технология BIM? Ее применение в строительстве. Координация строительного проекта с применением технологии информационного моделирования на примере ЖК «Палацио» [Электронный ресурс]. URL: https://yurlkink.ru/kreditnye-ucherezhdeniya/chto-takoe-tehnologiya-bim-ee-primenenie-v-stroitelstve-koordinaciya-stroitelnogo-proekta-s-primene.html.

12. Информационное 3D—4D моделирование в строительстве: модель ГРЭС. URL: http://integral-russia.ru/2017/10/21/informatsionnoe-3d-4d-modelirovanie-v-stroitelstve-model-gres.

13. Разбираемся, что такое: BIM 4D, BIM 5D, BIM 6D моделирование? URL: https://bimlab.ru/faq-bim4d5d6d.html.

14. Так ли эффективны BIM технологии проектирования, как об этом говорят? URL: https://maistro.ru/articles/stroitelnye-konstrukcii.-proektirovanie-i-raschet/obzor-bim-tehnologij.

15. *Храпов С. С., Кобелев И. А., Писарев А. В., Хоперсков А. В.* 4D-модели в задачах экологического моделирования: проектирование информационной системы // Вестник ВолГУ. 2011. Серия 10. Вып. 5. С. 119—124.

16. Plant-4D — четвертое измерение промышленного проектирования. URL: https://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_10_plant4d.html.

17. *Ghazaryan M.* BIM and Cost Estimation Issues (5D): Case of Armenia // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 698: The International Scientific Conference “Construction and Architecture: Theory and Practice for the innovation Development” (CATPID-2019) 01-05 October 2019, Kislovodsk / eds.: B. Yazyev [et al.]. [IOP Publishing], 2019. 022076—7 p. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/698/2/022076/pdf.

18. *Wang Z. M., Liu J.* A Seven-Dimensional Building Information Model for the Improvement of Construction // Advances in Civil Engineering. 2020. 8842475. DOI: 10.1155/2020/8842475

© Абрамян С. Г., Бурлаченко О. В., Оганесян О. В., Бурлаченко А. О., Шаюнусов А. Р., 2021

Поступила в редакцию
в январе 2021 г.

Ссылка для цитирования:

BIM-технологии в строительстве: функции, развитие и опыт применения / С. Г. Абрамян, О. В. Бурлаченко, О. В. Оганесян, А. О. Бурлаченко, А. Р. Шаюнусов // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 323—332.

Об авторах:

Абрамян Сусанна Грантовна — канд. техн. наук, доц., проф. каф. технологий строительного производства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; susannagrant@mail.ru

Бурлаченко Олег Васильевич — д-р техн. наук, проф., зав. каф. технологий строительного производства, зам. директора по научной работе, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; info@vgasu.ru

Оганесян Оганес Валерьевич — магистрант, каф. технологий строительного производства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Волгоград, 400074, ул. Академическая, 1; ogoganesyan@mail.ru

Бурлаченко Александр Олегович — магистрант, каф. технологий строительного производства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Волгоград, 400074, ул. Академическая, 1; a.o.burlachenko@gmail.com

Шаюнусов Артем Русланович — магистрант, каф. технологий строительного производства, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Волгоград, 400074, ул. Академическая, 1

Susanna G. Abramyan, Oleg V. Burlachenko, Oganes V. Oganesyan, Aleksandr O. Burlachenko, Artem R. Shayunusov

Volgograd State Technical University

BIM-TECHNOLOGIES IN CONSTRUCTION: FUNCTIONS, DEVELOPMENT AND EXPERIENCE

The article discusses the stages of creating a finished model of a building system based on BIM technologies, the main functions of the project team when creating a model, changing these functions depending on the software package used. It is noted that theoretical developments in BIM technology are ahead of its practical application.

K e y w o r d s: model, stages of creation, functions of the project team, modification, software product.

For citation:

Abramyan S. G., Burlachenko O. V., Oganesyan O. V., Burlachenko A. O., Shayunusov A. R. [BIM-technologies in construction: functions, development and experience]. *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], 2021, iss. 1, pp. 323—332.

About authors:

Susanna G. Abramyan — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; susannagrant@mail.ru

Oleg V. Burlachenko — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; info@vgasu.ru

Oganes V. Oganesyan — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ogoganesyan@mail.ru

Aleksandr O. Burlachenko — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; a.o.burlachenko@gmail.com

Artem R. Shayunusov — Master's Degree student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation

УДК 69.058.2, 531.781.2

Ю. Ю. Арушонок

Волгоградский государственный технический университет

ПРИМЕНЕНИЕ ЭЛЕКТРОТЕНЗОМЕТРИИ И ЦИФРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ИСПЫТАНИИ КОНСТРУКЦИЙ

Описаны лабораторные испытания тензорезисторных упругих элементов арочного и S-образного типа для измерения деформаций и нагрузок на строительные конструкции с помощью аналого-цифрового преобразователя Zet-210.

Ключевые слова: аналого-цифровой преобразователь, ZetLab, испытания строительных конструкций, тензорезистор, упругий элемент, преобразователь механической величины.

Введение

Данная работа продолжает тему практического применения современных цифровых технологий при испытании строительных конструкций зданий и сооружений, затронутую в статьях [1, 2], где описаны примеры практического применения портативного информационно-измерительного комплекса на базе аналого-цифрового преобразователя Zet-210 и ноутбука при проведении натурных испытаний различных строительных конструкций.

Использование данного портативного комплекса для измерения линейных деформаций электротензометрическим методом при разрушающих испытаниях стандартных стальных образцов более подробно описано в работах [3, 4], при натурных испытаниях металлоконструкций промышленных зданий — в работах [5, 6], для контроля прикладываемой нагрузки в процессе неразрушающих испытаний прочности стали различных элементов металлических конструкций по методу Бриннеля — в работе [7].

Этот комплекс в вибродиагностической комплектации неоднократно применялся для определения таких параметров свободных колебаний разнообразных строительных конструкций, как собственная частота и логарифмический декремент колебаний. В статье [8] описано решение такой задачи при натурных испытаниях железобетонной балки перекрытия этажерки, стальных стропильных ферм складского здания, металлических башни и дымовых труб.

При оснащении лаборатории «Испытания сооружений» закупка оборудования для усиления и оцифровки аналоговых сигналов от первичных датчиков деформаций, перемещений, ускорений, усилий позволила сформировать две информационно-измерительных системы (ИИС).

Первая 8-ми канальная ИИС на базе одного 16-ти разрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) типа Zet-210 и четырех предварительных усилителей Zet-412, изготовленных отечественной компанией ZETLAB, используется на протяжении нескольких лет в лабораторном практикуме по дисциплине «Обследование и испытание зданий и сооружений» при обучении студентов специальностей 08.03.01 и 08.05.01. В частности, с помощью этой системы при выполнении лабораторных работ студентами производятся:

- измерение линейных деформаций при растяжении стальной полосы ступенчато изменяемой нагрузкой электротензометрическим методом;
- построение амплитудно-частотной характеристики, определение динамического модуля упругости бетона и логарифмического декремента затухания колебаний железобетонной балки резонансным методом с использованием в качестве первичного преобразователя колебаний акселерометра ВС-201 компании ZETLAB;
- определение основных характеристик (частоты, амплитуды, логарифмического декремента затуханий) свободных и вынужденных колебаний стальной балки по сигналам от закрепленного на ней электромагнитного датчика;
- контроль усилия вдавливания металлического шарика в стальной образец при определении его прочности неразрушающим методом с помощью первичного тензорезистроного упругого преобразователя S-образного типа H3-C3-300kg-3B-D05 фирмы ZEMIC.

Вторая 16-ти канальная ИИС сформирована на базе двух 16-ти разрядных модулей Zet-210 и восьми предварительных усилителей Zet-412, а также 8-ми канального 24-ти разрядного модуля АЦП Zet-220. Модуль Zet-220 по сравнению с Zet-210 имеет более широкий динамический диапазон 120 Дб (84 Дб) и более высокое входное сопротивление 100 кОм (2 кОм), но меньшую максимальную частоту преобразования 8 кГц (500 кГц) и межканальное проникновение –90 Дб (–72 Дб). В скобках указаны значения соответствующих параметров для модуля Zet-210.

Указанные характеристики АЦП Zet-220 позволяют выполнять измерения с более высокой точностью.

Все модули ИИС смонтированы в корпусе от системного блока персонального компьютера и запитываются от встроенного блока питания. Выдаваемые этим же блоком постоянные напряжения 5 В и 12 В используются для питания внешних датчиков и устройств. Управление ИИС осуществляется с помощью персонального компьютера.

В описанной конфигурации ИИС предназначена для решения широкого круга измерительных задач, связанных с проведением испытаний строительных конструкций и их узлов.

В данной статье рассмотрены особенности практической реализации измерений деформаций материалов и нагрузок, прикладываемых к испытываемым конструкциям, с помощью электротензометрического метода, наиболее приспособленного к применению цифровых технологий в практике измерений.

Средства электротензометрических измерений и цифровых технологий

Электротензометрирование производят с помощью комплекса средств измерений, включающего меры, измерительные преобразователи и измерительные (регистрирующие) приборы [9, 10].

К мерам относятся средства измерений, предназначенные для воспроизведения физических величин заданного размера (образцов). В рамках настоящего исследования в качестве меры для задания образцовых величин деформаций (перемещений) использовался универсальный калибровочный прибор системы Аистова (УКПА5) с ценой деления 0,1 мкм, а для контроля значений нагрузки – образцовый динамометр сжатия системы Н. Г. Токаря (ДОС-3) с максимальным усилием 3000 кгс.

Измерительные преобразователи непосредственно воспринимают измеряемую механическую величину, в данном случае деформацию или усилие, преобразуют ее в изменение величин электрического свойства, удобных для дальнейшего преобразования, передачи, обработки и хранения, в том числе в цифровом виде.

Первичными преобразователями при тензометрировании являются тензорезисторы, наклеиваемые на испытываемую конструкцию и преобразующие измеряемую деформацию в изменения омического сопротивления.

Тензорезисторы обладают следующими достоинствами:

- простота конструкции, малые габариты и вес, возможность установки в труднодоступных местах;
- возможность использования при статических и динамических испытаниях;
- дистанционность измерений, непрерывность регистрации, информативность.

Вместе с тем, им присущи и недостатки, в том числе:

- однократность использования, не позволяющая использовать тензорезисторы после тарировки;
- низкая чувствительность.

Для устранения указанных недостатков, а также для согласования диапазона измеряемой деформации с допустимой деформацией для тензорезисторов и измерения других механических параметров, например усилия, применяются специальные чувствительные элементы (обычно упругие), преобразующие эти параметры в деформацию упругого элемента, воспринимаемую наклеенными на него тензорезисторами.

Выбор конструктивного исполнения чувствительного упругого элемента зависит от решаемых задач. Так для измерения перемещений и пластических деформаций целесообразно использовать упругие элементы с коэффициентом преобразования много меньше единицы, например рамного типа или в виде консольной балки [9—13]. Для работы в области упругих деформаций оптимальны упругие элементы с коэффициентом преобразования больше единицы. Поэтому при выборе формы упругих элементов для измерения упругих деформаций элементов строительных конструкций предпочтение было отдано элементам арочного типа, имеющим высокий коэффициентов преобразования [9].

Кроме того, были учтены следующие дополнительные обстоятельства:

- использование двух одинаковых арочных элементов для размещения активных и компенсационных тензорезисторов позволяет легко производить начальную балансировку моста регулировкой базы арочного элемента с компенсационными тензорезисторами;
- возможность многоразового использования и варьирования базы измерений за счет прикрепления опор упругого элемента к поверхности конструкции на разных расстояниях друг от друга.

За первичными преобразователями в электротензометрической измерительной цепи располагаются промежуточные преобразователи, в первую очередь, электрические схемы включения тензорезисторов.

В них изменение сопротивления тензорезисторов преобразуется в изменение электрического сигнала на выходе промежуточного преобразователя.

Наиболее широкое применение в электротензометрии получила мостовая схема включения тензорезисторов, показанная на рис. 1 [9—13] и состоящая из четырех плеч R_1—R_4. По крайней мере один тензорезистор (R_1) является активным, он наклеивается на испытываемую конструкцию и воспринимает измеряемую деформацию. Тензорезистор R_2 наклеивается на такой же материал, из которого изготовлена конструкция, но деформацию под нагрузкой не воспринимает, а реагирует на температурные деформации материала, компенсируя влияние изменения температуры окружающей среды.

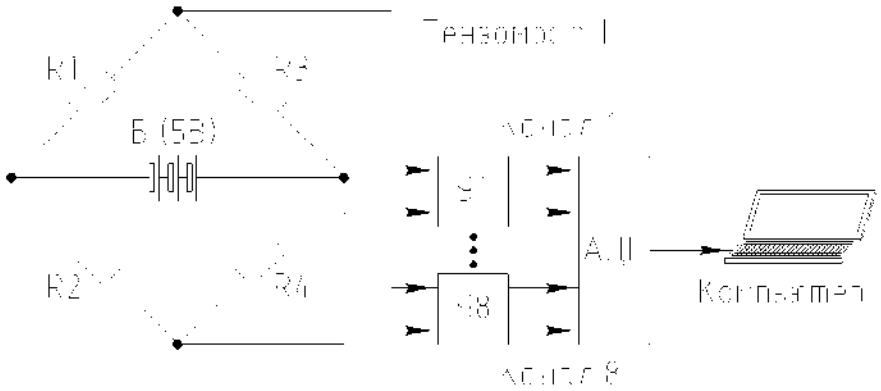


Рис. 1. Схема цифровой системы для измерения деформаций электротензометрическим методом

В случае с арочным преобразователем деформаций в плечи моста подключались четыре идентичных фольговых тензорезистора типа BF 350-5AA(11)N6-X с базой 5 мм и начальным сопротивлением 350 Ом, наклеенные попарно на противоположные стороны двух одинаковых арочных упругих элементов как показано на рис. 2. Рабочий упругий элемент с тензорезисторами R_1 и R_2 воспринимал измеряемую деформацию, а элемент с тензорезисторами R_3 и R_4 находился вблизи, но деформацию не воспринимал. Тензорезисторы R_3 и R_4, реагируя на изменения температуры окружающей среды также, как R_1 и R_2, выполняют функции компенсирующих плеч моста. Условие баланса моста имеет вид

$$R_1 \cdot R_4 = R_2 \cdot R_3. \quad (1)$$

При этом напряжение на его выходе равно нулю $\Delta U = 0$.

При идентичном изменении сопротивления всех плеч моста, например, вследствие изменения температуры окружающего воздуха, баланс моста сохраняется. При изменении сопротивлений активных тензорезисторов R_1 и R_2 на величину ΔR возникает разбаланс моста и на его выходе появляется напряжение ΔU, равное:

$$\Delta U = \frac{U_{\text{П}} \cdot \Delta R}{2 \cdot R}, \quad (2)$$

здесь $R = R_1 = R_2 = R_3 = R_4$; $U_{\text{П}}$ — напряжение питания моста ($U_{\text{П}} \approx 5$ В).

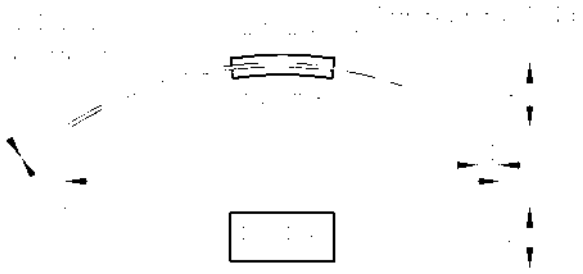


Рис. 2. Первичный преобразователь деформаций в виде арочного упругого элемента с наклеенными на него тензорезисторами R_1 (R_3) и R_2 (R_4)

Как было отмечено, тензорезисторы имеют низкую чувствительность, поэтому величина сигнала на выходе мостовых промежуточных преобразователей мала (доли милливольта). Для усиления сигнала использованы специальные промежуточные преобразователи — тензометрические усилители Zet-412 (У1...У8 на рис. 1) с выставленным коэффициентом усиления $1000^{\times}$.

Заключительным звеном промежуточных преобразователей является АЦП типа Zet-210 или Zet-220, который оцифровывает с заданной частотой усиленный аналоговый сигнал с выхода мостовой схемы, что позволяет использовать в качестве измерительного прибора компьютер. Установленное на компьютере специальное программное обеспечение позволяет управлять работой АЦП, получать измерительную информацию о величине контролируемой деформации или усилия, а также записывать сигналы от нескольких первичных датчиков на жесткий диск, наблюдать их на мониторе в режиме реального времени, обрабатывать, анализировать и прочее.

К основным характеристикам средств электротензометрии относятся коэффициент преобразования преобразователей и чувствительность приборов, номинальные статические характеристики преобразователей, градуировочные характеристики приборов, диапазон и погрешности измерений.

Коэффициент преобразования измерительного преобразователя равен отношению сигнала на его выходе к вызывающему его сигналу на входе и для преобразователей перемещений с упругими элементами он вычисляется по формуле [10]:

$$K_{\text{П}} = \frac{n \cdot \varepsilon_{\text{Т}}}{d}, \tag{3}$$

где n — число активных плеч моста, установленных на преобразователе; $\varepsilon_{\text{Т}}$ — максимальная деформация упругого элемента в месте наклейки тензорезисторов в пределах измерительного диапазона; d — максимальное перемещение (деформация), соответствующая измерительному диапазону преобразователя.

Согласно справочным данным [10] для преобразователей перемещений с упругими элементами арочного типа коэффициент преобразования может быть вычислен через геометрические параметры элемента (см. рис. 2) по формуле

$$K_{\text{П}} = \frac{7 \cdot n \cdot h}{2 \cdot f^2}. \quad (4)$$

Чувствительность тензометрического прибора S выражается отношением изменения сигнала на выходе измерительного прибора $\Delta U_{\text{вых}}$ к вызвавшему его изменению измеряемой деформации $\Delta\varepsilon$:

$$S = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta\varepsilon}. \quad (5)$$

По существу, коэффициент преобразования равен средней величине чувствительности. У преобразователей и приборов с линейными градуировочными характеристиками в пределах диапазона измерений значения коэффициента преобразования и чувствительности совпадают в любой точке характеристики [14].

Чувствительность и коэффициент преобразования тензометрических преобразователей силы обычно выражаются соотношением:

$$S_{\text{Н}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{П}}}, \quad (6)$$

где $U_{\text{вых}}$ — изменение напряжения на выходе преобразователя при номинальном значении нагрузки.

Результаты экспериментальных исследований

Метрологические характеристики как отдельных тензорезисторов, так и различных преобразователей на их базе, определяются экспериментально [15].

Упругие элементы первичных преобразователей деформаций (малых перемещений) для описываемого исследования были изготовлены из хромоникелевой нержавеющей стали с модулем упругости 203 ГПа, пределом текучести и прочности 200 МПа и 550 МПа соответственно. Заготовками для них послужили пластинки толщиной h = 0,08 мм, длиной L = 35,53 мм и шириной b от 5,06 до 5,41 мм (см. рис. 2), имеющие на торцах специальные полукруглые пазы для надежной фиксации элементов между опорами. Вес пластинок с наклеенными тензорезисторами и элементами крепления подводящих проводов не превышал 0,2 г.

Арочная форма упругим элементам придавалась за счет предварительного уменьшения расстояния между опорами на величину Δl до значения l, принимаемого за базу измерений.

Согласно данным справочника [16] величины горизонтального распора (упругой реакции) элемента H и изгибающего момента M в середине пролета двухшарнирной параболической арки от горизонтального смещения опоры на величину Δ соответственно равны:

$$H = \frac{15 \cdot E \cdot J \cdot \Delta}{8 \cdot f^2 \cdot (1+\nu) \cdot l}; \quad (7)$$

$$M = H \cdot f, \quad (8)$$

где $\nu = \frac{15 \cdot J}{8 \cdot f^2 \cdot F}$.

В приведенных формулах J и F — момент инерции и площадь сечения элемента; f — высота арки (стрела выгиба элемента); $\Delta = \Delta l + d$ — суммарное смещение опор арки с учетом максимального прикладываемого к элементу перемещения (деформации) под нагрузкой — d.

Тогда, исходя из упругой работы материала элемента во всем диапазоне деформаций d, получим формулы для вычисления максимальных напряжений σ и деформаций ε_T в середине пролета арки (в месте наклейки тензорезисторов):

$$\sigma = \frac{M}{W}; \tag{9}$$

$$\varepsilon_T = \frac{M}{W \cdot E} = \frac{H \cdot f}{W \cdot E}, \tag{10}$$

где W — момент сопротивления сечения арки.

Величина максимальной рабочей деформации, допустимой из условия минимизации нелинейности и гистерезиса статической градуировочной характеристики первичного преобразователя, была определена для вышеописанных арочных упругих элементов путем расчетов по формулам (7—10) и подтверждена в ходе предварительных оценочных испытаний при различных величинах прикладываемой деформации d.

Расчеты показали, что оптимальной базой арочного упругого элемента с указанными выше геометрическими параметрами является $l = 35{,}2$ мм, которая при рабочей деформации сжатия $d = 0{,}1$ мм уменьшается до $l = 35{,}1$ мм. При этом напряжения в материале σ увеличиваются с 89 Н/мм^2 до 96,5 Н/мм^2, а коэффициент запаса по пределу текучести стали изменяется в интервале 0,44...0,48, что соответствует рекомендуемым значениям (< 0,5).

Подтверждение данных расчетов было получено при проведении предварительных оценочных испытаний упругого арочного элемента на калибровочном приборе УКПА5 (рис. 3) при трех различных прикладываемых деформациях d, равных 100, 120 и 250 мкм.

Из рисунка 4 видно, что градуировочные характеристики упругого элемента ожидаемо имеют заметную нелинейность и гистерезис (несовпадение показаний прямого и обратного хода). При этом коэффициент вариации приращений величины сигнала на входе АЦП равен 19 % при $d = 250$ мкм, 12 % при $d = 120$ мкм и 5 % при $d = 100$ мкм (см. рис. 5).

Для получения статических градуировочных характеристик измерительных каналов с подключенными к ним предварительным усилителем, мостовой схемой и первичным преобразователем деформаций были изготовлены восемь арочных упругих элементов с наклеенной на каждый из них парой фольговых тензорезисторов типа BF 350-5AA(11)N6-X. Тензорезисторы двух упругих элементов соединялись по мостовой схеме, выходное напряжение с которой поступало на входы тензометрических усилителей Zet-412, затем на АЦП Zet-210 и далее на шину USB управляющего компьютера.

Таким образом были сформированы четыре независимых измерительных канала для контроля деформаций. Любой из двух упругих элементов, подключенных к мосту, может использоваться как рабочий либо как компенсационный.

Рис. 3. Градуировка арочного упругого элемента на калибровочном приборе УКПА5

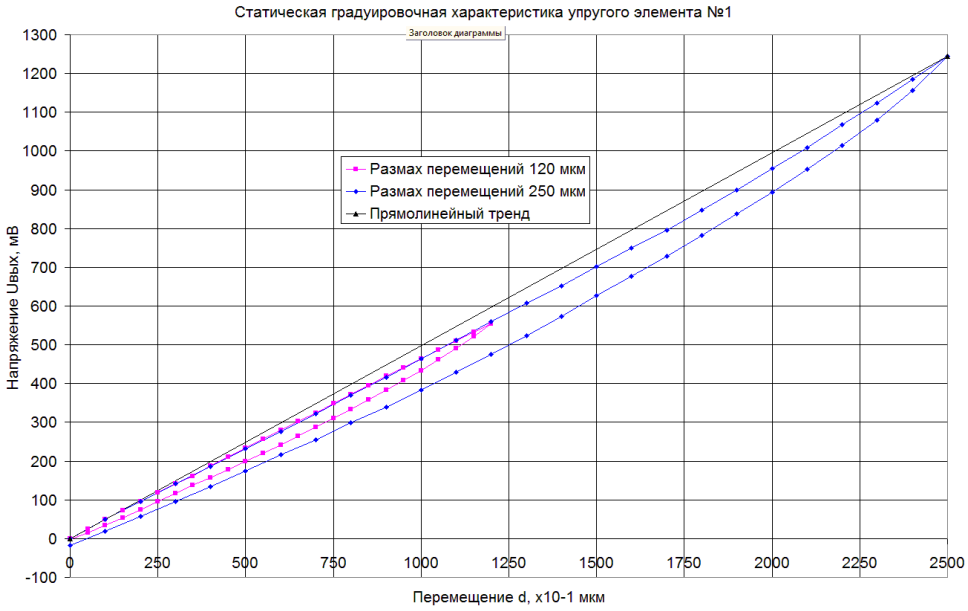


Рис. 4. Результаты предварительных испытаний упругого элемента

Программа калибровочных испытаний упругих элементов на приборе УКПА5 включала три этапа. На первом этапе деформация сжатия к упругому элементу прикладывалась ступенчато от 0 до максимального значения $d = 100$ мкм и обратно до 0 с шагом $\Delta d = 5$ мкм. При этом средняя скорость деформирования составляла $\approx 0{,}12$ мкм/с.

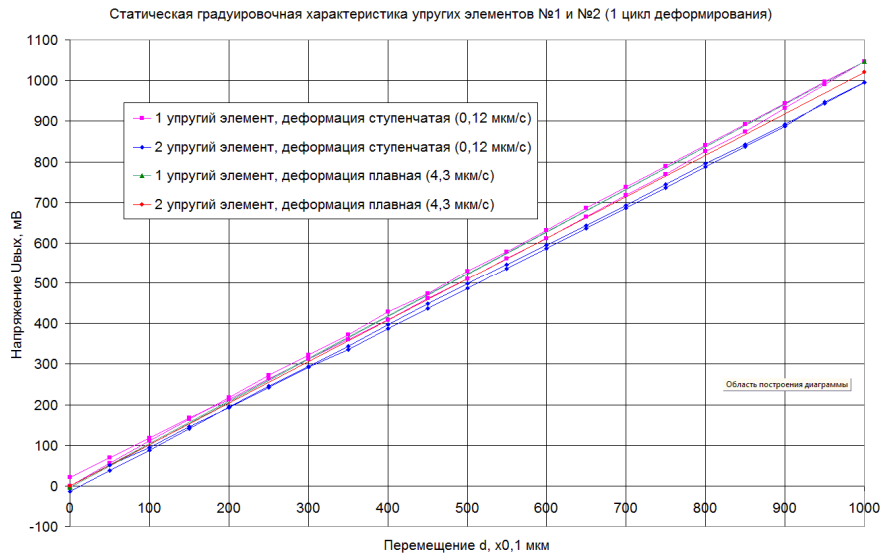


Рис. 5. Результаты одиночных испытаний арочных упругих элементов 1 и 2 при ступенчатом и плавном деформировании

На втором этапе деформация величиной d прикладывалась равномерно с постоянной скоростью ≈ 4,3 мкм/с.

На третьем этапе деформация величиной d прикладывалась ступенчато с шагом $\Delta d = 20$ мкм четырьмя последовательно повторяющимися циклами.

В качестве примера результатов таких испытаний для упругих элементов 1 и 2 тензомоста Т1 показаны статические градуировочные характеристики, полученные на первых двух этапах (рис. 5), а также на третьем этапе (рис. 6).

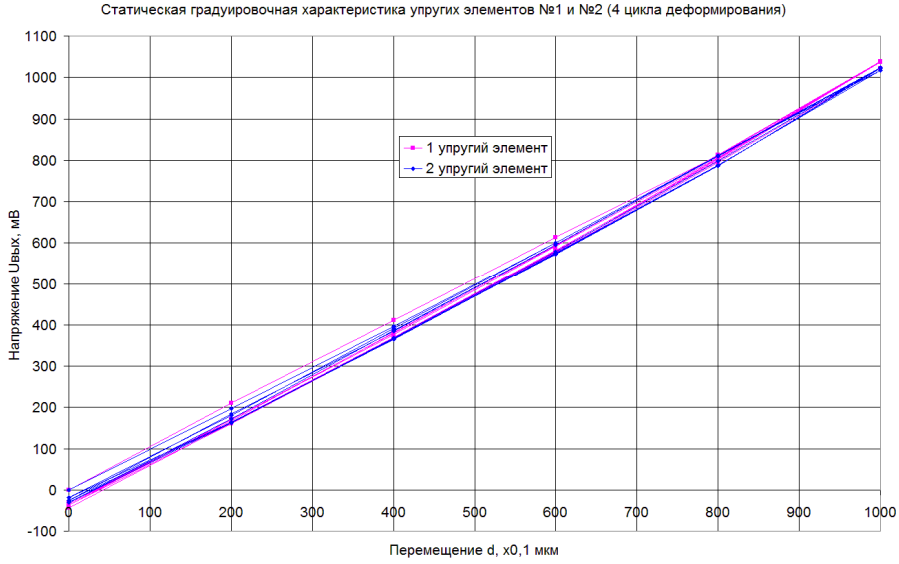


Рис. 6. Результаты циклических испытаний арочных упругих элементов 1 и 2 при ступенчатом деформировании

Из представленных на рисунках данных видно, что градуировочные зависимости элементов на всех ступенях приложения деформаций практически линейны, что делает возможным использование единого значения коэффициента преобразования для всего рабочего диапазона деформации d:

$$K_{\text{П}} = \frac{\Delta U}{\Delta d}, \tag{11}$$

где ΔU — приращение напряжения на входе АЦП (мВ) от заданного приращения деформации (перемещения между опорами упругого элемента) на этапе деформирования Δd (мкм).

Результаты расчета величины коэффициента преобразования для измерительного канала, включающего первичный преобразователь, мостовую схему, тензометрический усилитель и АЦП, представлены в таблице.

Коэффициент преобразования для измерительного канала

№ упр. эл.	I этап		II этап	III этап	
	коэф. преобразов. $K_{\text{П}}$, мВ/мкм	коэф. вариации V, %	коэф. преобразов. $K_{\text{П}}$, мВ/мкм	коэф. преобразов. $K_{\text{П}}$, мВ/мкм	коэф. вариации V, %
1	10,360	6,6	10,480	10,651	5,3
2	10,025	4,9	10,215	10,440	5,3

Из приведенных в таблице данных видно, что при увеличении скорости деформирования с 0,12 до 4,3 мкм/с коэффициенты преобразования упругих элементов увеличились менее, чем на 2 %. Их увеличение при циклическом деформировании оказалось более заметным: на 2,8 % для элемента 1 и на 4,1 % для элемента 2. Значения коэффициента вариации V значений приращения напряжений ΔU во всех испытаниях не превысили 6,6 %.

Для определения величин нагрузок применяют тензорезисторные датчики с чувствительными элементами различных типов [17].

В качестве преобразователя силы для контроля прикладываемых при испытаниях нагрузок взят промышленно изготавливаемый тензометрический датчик типа SH3-C3-1,5t-3B-M02 с номинальным усилием P = 1,5 т и чувствительностью $S_{\text{Н}}$ = 2 мВ/В.

Упругий элемент датчика S-образной формы выполнен из никелерованной конструкционной стали и предназначен для работы как на сжатие, так и на растяжение. На упругий элемент наклеены четыре рабочих тензорезистора (n = 4), соединенные по мостовой схеме и подключаемые с помощью кабеля к усилителю Zet-412 и АЦП Zet-210.

Программа его калибровочных испытаний на силовом стенде (рис. 7) предусматривает проведение четырех последовательных циклов нагружения от 0 до 1500 кгс и обратно до 0 со ступенчатым изменением нагрузки с шагом изменения ΔP = 150 кгс. Величина приложенной нагрузки контролировалась по образцовому динамометру сжатия ДОС-3 системы Н. Г. Токаря.

Статическая градуировочная характеристика тензодатчика силы, полученная по результатам испытаний и показанная на рис. 8, стабильна на всех циклах нагружения и линейна во всем исследованном диапазоне рабочих нагрузок.

При этом полученный коэффициент преобразования испытанного датчика силы, вычисляемый по формуле: $K_C = \frac{\Delta U}{\Delta P}$, равен $K_C = 0{,}6588$ мВ/кгс.

Измеренное среднее приращение выходного сигнала составило $\Delta U = 98{,}83$ мВ при ожидаемом по паспортным данным значении — 100,4 мВ.

Коэффициент вариации приращений сигнала на входе АЦП ΔU от изменения нагрузки на этапе нагружения ΔP составил 1,6 %.

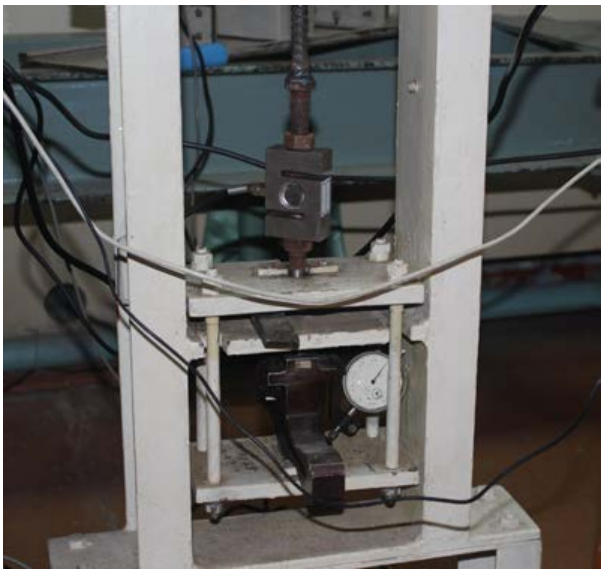


Рис. 7. Циклические испытания S-образного тензометрического датчика силы на стенде с образцовым динамометром ДОС-3

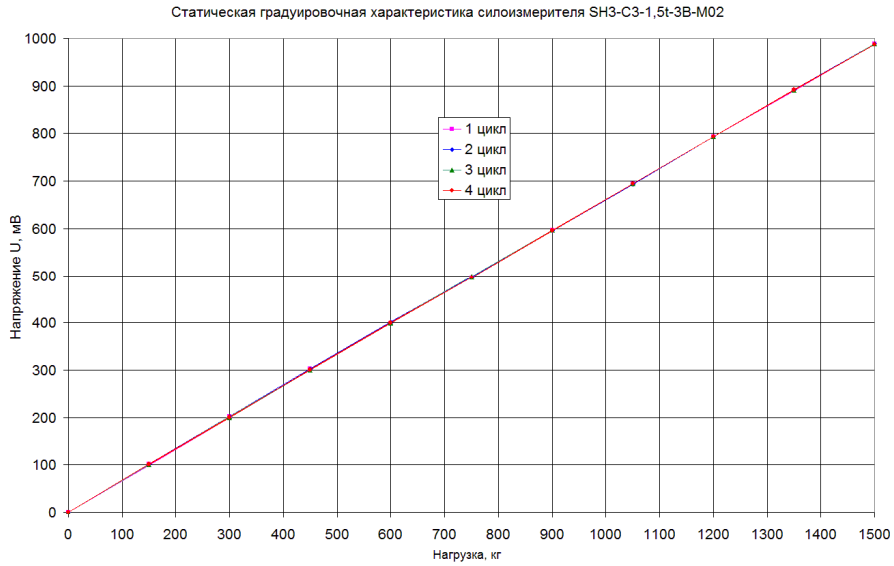


Рис. 8. Результаты циклических испытаний S-образного датчика силы

По результатам вышеописанных циклических испытаний в соответствии с рекомендациями [10] были рассчитаны статические погрешности измерительного канала контроля нагрузок, включающего тензометрический датчик силы с соединительным кабелем, предварительный усилитель Zet-412 с коэффициентом усиления $100^{\times}$ и модуль АЦП Zet-210.

Суммарная систематическая абсолютная погрешность измерений составила $\Delta_c = 1{,}675$ мВ, что соответствует относительной погрешности измерений, вычисляемой по формуле $\delta = \frac{\Delta_c}{\Delta U}$, δ=1,67%.

Нелинейность статической градуировочной характеристики измерительных приборов принято оценивать коэффициентом нелинейности

$$K_{\text{Н}} = \frac{\text{tg}\alpha_2 - \text{tg}\alpha_1}{\text{tg}\alpha_2}, \qquad (12)$$

где $\text{tg}\alpha_1$ и $\text{tg}\alpha_2$ — тангенсы наибольшего и наименьшего углов наклона в любой точке графика градуировочной характеристики в пределах измерительного диапазона средства измерения. Для градуировочной характеристики на рис. 8 величина $K_{\text{Н}} = 0{,}0625$.

Выводы

1. Применение современных АЦП для оцифровки аналоговых сигналов от различных датчиков является ключевым условием внедрения в практику испытаний строительных конструкций цифровых технологий, позволяющих автоматизировать процесс измерений, повысить его информативность и оперативность, удобство записи, хранения и обработки поступающей информации.

2. Электротензометрический метод благодаря достоинствам тензорезисторов, предоставляет широкие возможности для использования современных цифровых технологий для измерения таких механических параметров при испытаниях строительных конструкций, как деформация материалов и величина прикладываемой нагрузки [18, 19].

3. Вместе с тем, такие недостатки тензорезисторов как одноразовость использования и связанная с ней невозможность применения тензорезистора после тарировки, а также низкая тензочувствительность препятствуют их более широкому внедрению.

Негативное влияние этих недостатков может быть в значительной степени снижено или устранено, благодаря применению первичных преобразователей механических величин в изменения электрических параметров, в которых тензорезисторы наклеиваются на специальные упругие элементы. Такие первичные преобразователи представляют собой съемные устройства, имеющие индивидуальные градуировочные характеристики и допускающие многократное повторное применение. Использование упругих элементов, конструкция которых наилучшим образом соответствует решаемой измерительной задаче, позволяет при необходимости механически увеличивать измеряемый параметр, согласовывать характеристики регистрирующей аппаратуры с диапазоном варьирования контролируемых параметров.

4. Проведенные в рамках настоящей работы исследования показали, что упругие элементы арочной формы пригодны для измерения малых перемещений или линейных деформаций величиной до 100 мкм, что при реализо-

ванной базе элементов $l = 35{,}2$ мм соответствует относительной деформации $\varepsilon = 0{,}258$ %, перекрывающей диапазон упругих деформаций пластичных строительных сталей. При этом величина максимальной измеряемой относительной деформации может изменяться как в большую, так и в меньшую сторону за счет варьирования расстояния между точками прикрепления опор арочного элемента к поверхности испытываемой конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Арушонок Ю. Ю.* Определение параметров работы строительных конструкций под нагрузкой // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса: сборник статей международной научно-технической конференции. Волгоград, 2019. С. 23—30.

2. *Арушонок Ю. Ю.* Определение параметров работы строительных конструкций под нагрузкой в процессе их испытаний // Металлические конструкции. 2019. Т. 25. № 2. С. 53—64.

3. *Арушонок Ю. Ю., Арушонок Н. Ю.* Качество стали строительных конструкций как критерий при оценке промышленной и экологической безопасности эксплуатации зданий старой постройки // Малоэтажное строительство: материалы международной научно-технической конференции. Волгоград, 2009. С. 118—122.

4. *Арушонок Ю. Ю., Арушонок Н. Ю.* Оценка качества стали строительных металлоконструкций при экспертизе промышленной безопасности зданий старой постройки // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: материалы V международной научно-технической конференции. Волгоград, 2009. С. 160—166.

5. *Арушонок Ю. Ю., Арушонок Н. Ю.* Экспериментальные исследования параметров работы стальных подкрановых балок для обеспечения их безопасной эксплуатации // Малоэтажное строительство: материалы международной научно-технической конференции. Волгоград, 2009. С. 122—125.

6. *Арушонок Ю. Ю., Арушонок Н. Ю.* Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния стальных подкрановых балок // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: материалы V международной научно-технической конференции. Волгоград. 2009. С. 166—172.

7. *Арушонок Ю. Ю., Арушонок Н. Ю.* Оценка прочности стали металлоконструкций при обследовании эксплуатируемых зданий и сооружений // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: материалы VI международной научно-технической конференции. Волгоград, 2011. С. 22—26.

8. *Арушонок Ю. Ю., Арушонок Н. Ю.* К вопросу о мониторинге технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: материалы VI международной научно-технической конференции. Волгоград, 2011. С. 27—33.

9. *Дайчик М. Л., Пригоровский Н. И., Хуршудов Г. Х.* Тензометрия в машиностроении. М.: Машиностроение, 1989. 240 с.

10. *Касаткин Б. С., Кудрин А. Б., Лобанов Л. М.* Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений. Киев: Наукова думка, 1981. 583 с.

11. *Dhiman P. K., Pal K., Sharma R. K.* Strain gauge based displacement sensor // Journal of Physical Sciences. 2006. Vol. 10. Pp. 164—166.

12. *Petrucelly Vincent J.* Resistance wire strain gauges as elements of Wheatstone bridge // AIEE Transactions. 1950. Vol. 69. Iss. 2. Pp 742—744.

13. *Chattopadhyay S., Banerjee M., Pal S. Modified A. C.* Wheatstone bridge network for accurate measurement of pressure using strain gauge type pressure sensor // Sensors & Transducers Journal. 2012. Vol. 136. Iss. 1. Pp. 25—34.

14. *Murugan S., Umayal S. P.* An evolutionary optimized algorithm approach to compensate the non-linearity in linear variable displacement transducer characteristics // Journal Electr. Eng. Technol. 2014. Vol. 9. Iss. 6. Pp. 2142—2153.

15. In situ cross-calibration of in-fiber Bragg grating and electrical resistance strain gauges for structural monitoring using an extensometer / Simon K. T. Grattan, Su E. Taylor, Tong Sun, P. A. Muhammed Basheer, Kenneth T.V. Grattan // IEEE Sensors Journal. 2009. Vol. 9. Iss. 11. Pp. 1355—1360.

16. *Ферстер М.* Справочная книга для инженеров-строителей. Ч. 1. Перевод с немецкого. М., Л.: Государственное научно-техническое издательство, 1931. 778 с.

17. *Takezawa A., Nishiwaki S., Kitamura M., Silva Emilio C. N.* Topology optimization for designing strain-gauge load cells // Struct. Multidisc. Optim. 2010. Vol. 42. Pp. 387—402.

18. *Zhou K., Wu Z. Y.* Strain gauge placement optimization for structural performance assessment // Engineering Structures. 2017. Vol. 141. Pp. 184—197.

19. Determination of dynamic loads from the road surface acting on the chassis experimental methods / V. V. Luong, T. Q. Nguyen, H. Q. Le, V. A. Le, P. H. Tran, X. H. Nguyen, T. V. Van. // 10th TSME-International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2019). IOP Conf. series: Materials Science and Engineering 886 (2020) 012008. 8 p.

© *Арушонок Ю. Ю., 2021*

Поступила в редакцию
в декабре 2020 г.

Ссылка для цитирования:

Арушонок Ю. Ю. Применение электротензометрии и цифровых технологий при испытании конструкций // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. Вып. 1(82). С. 333—346.

Об авторе:

Арушонок Юрий Юрьевич — канд. техн. наук, доц., доц. каф. строительных конструкций, оснований и надежности сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). Российская Федерация, 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; aryuus@mail.ru

Yurij Yu. Arushonok

Volgograd State Technical University

APPLICATION OF ELECTROTENSOMETRY AND DIGITAL TECHNOLOGIES IN STRUCTURAL TESTING

In article laboratory researches of tenzorezistorny elastic elements of arch and S-shaped type for measurement of deformations and loads of building constructions by means of the analog-digital converter ZET-210 are described.

K e y w o r d s: analog-digital converter, ZetLab, tests of building constructions, strain gauge, elastic element, converter of mechanical size.

For citation:

Arushonok Yu. Yu. [Application of electrotensometry and digital technologies in structural testing]. *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], 2021, iss. 1, pp. 333—346.

About author:

Yurij Yu. Arushonok — Candidate of Engineering Sciences, Docent, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation, aryuus@mail.ru

ОТ РЕДКОЛЛЕГИИ

«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета» ***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.

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, а рецензия, кроме того, в отсканированном виде.

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: ORCID, ScopusID (при наличии); *индекс УДК;* на русском и английском языках: *фамилия и инициалы автора, заглавие, аннотация* (на русском языке до 500 знаков, на английском — от 500 знаков до целой страницы), *ключевые слова*. Текст статьи заверяется личной подписью автора (соавторов).

Объем статьи — 8—12 с. установленного формата «Вестника» (см. ниже), включая название, аннотации, ключевые слова, текст, таблицы, рисунки, библиографический список. Последняя страница считается полной независимо от фактического заполнения.

Оригинал статьи должен быть набран с помощью пакета программ *Microsoft Office* (*Word 2003*); шрифт *основного текста* — Times New Roman (Cyr) № 11 (11 пунктов). Параметры страницы — поля, см: верхнее — 3,7; нижнее — 4,5; левое — 2,0; правое — 6,0; переплет — 0, поля зеркальные. Расстояние от края до верхнего колонтитула, см — 3,0, от края до нижнего колонтитула — 3,7. Абзацный отступ равен 0,75 см. Межстрочный интервал одинарный. Автоматически устанавливаются переносы (не более 4 подряд в одном абзаце). Автоматически устанавливается запрет висячих строк.

Для *набора формул* используется редактор формул *Microsoft MathType 5*; по умолчанию устанавливаются размеры шрифта для одно- и двухстрочных формул: обычного — 11 пт, крупного и мелкого индекса — соответственно 8 и 6 пунктов, крупного и мелкого символа — соответственно 16 и 11 пунктов. Греческие и русские буквы набираются прямым шрифтом, латинские — курсивом. Если написание в формулах отличается от традиционного, автор должен сделать соответствующие пометки на полях распечатанной статьи, при этом греческие буквы обводятся красным карандашом, готические — синим. Формулы выключаются в левый край с абзацным отступом. Запись формулы выполняется автором с использованием всех возможных способов упрощения и не должна содержать промежуточные преобразования.

Векторные рисунки, сохраненные в формате WMF, *растровые* — в TIF или BMP; *графики и диаграммы*, построенные в *Microsoft Excel*, а также *рисунки*, созданные в *Corel Draw 12* или *AutoCAD 2006* и сохраненные в оригинальном формате, дополнительно помещаются на электронный носитель отдельными файлами. Имя файла должно соответствовать наименованию или номеру рисунка в тексте статьи. Кроме того, *иллюстрации* обязательно присылаются распечатанными на отдельных листах формата А4 в масштабе 1:1, в пригодном для сканирования виде. Размер шрифта текста в рисунках — 9-10 пт. *Подписи к рисункам* выполняются непосредственно в тексте статьи шрифтом Times № 10 (10 пт), экспликация в подрисуночной подписи — Times № 9 (9 пт). Для сжатия больших файлов использовать архиваторы *Arj* и *WinZip*, *WinRAR*.

Цветные и черно-белые фотографии присылать в оригинальном виде с подписями на обороте. Цифровые фотографии выполнять с разрешением не менее 300…600 dpi, присылать в электронном виде в любом графическом формате, кроме .jpg.

Текст *таблиц* набирается шрифтом Times New Roman (Cyr) № 10 (10 пунктов).

Пристатейные *баблиографические списки* размещаются после основного текста статьи.

В библиографическом списке приводится *только* цитируемая в статье литература. Редколлегией приветствуется цитирование журнала. Библиографический список должен состоять не менее чем из 15 статей в научных журналах, из них 8 — иностранные. Источники группируются в списке в порядке упо-

минания в тексте. Ссылки на источники приводятся в тексте в квадратных скобках (запрещается использовать ссылки-сноски для указания источников). В библиографическую запись включаются только основные элементы библиографического описания (ГОСТ 7.0.5–2008). Разделительные знаки «тире» между областями опускаются. Шрифт Times New Roman (Cyr) № 9 (9 пунктов). Язык библиографических записей соответствует языку описываемых источников. Анонимные источники (законы, СНиПы, ГОСТы, интернет-сайты и т.п.) приводятся в подстрочной ссылке. Нумерация подстрочных ссылок статьи — сквозная.

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. Корректура статей авторам не предоставляется. Согласование редакционных и авторских изменений текста статьи (переписка, тел. переговоры) производится за счет автора.

Гонорар за опубликование статьи не выплачивается, плата за публикацию статей с аспирантов не взимается.

КОМПЛЕКТОВАНИЕ ОЧЕРЕДНОГО НОМЕРА ЗАВЕРШАЕТСЯ ЗА 3 МЕСЯЦА ДО ПЛАНИРУЕМОГО ВЫХОДА В СВЕТ.

Примерный график выпуска **серии «Строительство и архитектура» — март (прием статей до 1 декабря); июнь (прием статей до 1 марта); сентябрь (прием статей до 1 июня); декабрь (прием статей до 1 сентября).**

Тематические рубрики

Строительные конструкции, здания и сооружения. Основания, фундаменты, подземные сооружения. Строительная механика. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей. Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов. Строительные материалы и изделия. Гидротехническое строительство. Гидравлика и инженерная гидрология. Технология и организация строительства. Безопасность жизнедеятельности и охрана труда в строительстве. Инновации в строительном производстве, интенсификация, энергосбережение и энергоэффективность. Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности. Градостроительство. Теория развития города. Управление инвестиционно-градостроительной деятельностью. Экологические проблемы градостроительства. Информационные технологии в строительстве и архитектуре. Научно-методический раздел. Организация высшего образования в области строительства и архитектуры. Методика преподавания дисциплин строительного и архитектурного направлений в вузе. Хроника.

Подробная информация о журнале представлена на сайте ВолгГТУ **http://vgasu.ru/science/journals/herald-volggasu/sia** (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, 715а** (ответственный секретарь журнала Растяпина Оксана Анатольевна). vestnik_volgasy@mail.ru

Уточнить ***условия публикации статей и приобретения*** очередного номера журнала можно у нее же.

За консультацией по вопросам подготовки авторского оригинала статьи к печати обращаться по адресу: 400074, Волгоград, ул. Академическая, 1, ком. В-210, редакционно-издательский отдел ВолгГАСУ. Тел. (8442)-96-98-28. E-mail: mariapes@mail.ru.

Вниманию читателей и авторов!
«Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета»
Подписной индекс по каталогу «Пресса России» 85343,

Уважаемые читатели и авторы!
С марта 2019 г. нумерация выпусков журнала изменена.

По вопросам публикации статей в научно-теоретическом журнале
«СОЦИОЛОГИЯ ГОРОДА»
обращаться к гл. редактору Б.А. Навроцкому по тел. 8-8442-96-99-25.
Подписаться на журнал можно по каталогу «Пресса России», подписной индекс **29507**
и по Интернет-каталогу на сайте агентства «Книга-Сервис», подписной индекс **Е 29507**.
*Журнал включен в **Перечень** ведущих научных журналов и изданий, выпускаемых в Российской Федерации, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук, **утвержденный ВАК** Министерства образования и науки Российской Федерации.*
Свидетельство о регистрации СМИ ПИ № ФС77-71951 от 13 декабря 2017 г. выдано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия. **ISSN 1994-0351**, включен в базу РИНЦ (www.elibrary.ru).
Подробная информация о журнале на сайте ИАиС ВолгГТУ по адресу: **http://vgasu.ru/publishing/journals/**

Научное издание

ВЕСТНИК
ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-теоретический и производственно-практический журнал

Серия: Строительство и архитектура
2021. Выпуск 1(82)

Корректор *Р. А. Жулите*
Компьютерная правка и верстка *А. Г. Сиволобова*
Компьютерный дизайн обложки *О. Ю. Мелешин*
Информационно-библиографическое обслуживание *Е. В. Подшивалина*

Дата выхода в свет 28.05.2021. Формат 70×108/16. Бумага офсетная
Гарнитура Times New Roman. Цена свободная
Уч.-изд. л. 10,8. Усл. печ. л. 30,5. Тираж 500 экз. Заказ № 56

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»
Типография ИАиС
Адрес издателя: 400005, г. Волгоград, пр-т им. В. И. Ленина, 28
Адрес типографии: 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1