

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ<sup>®</sup> № 12



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. [WWW.RIFSM.RU](http://WWW.RIFSM.RU) [WWW.JOURNAL-CM.RU](http://WWW.JOURNAL-CM.RU) ДЕКАБРЬ 2023 г. (820)

Группа компаний ШТАЙНБЛОК:  
20 лет проектируем, изготавливаем, осуществляем  
монтаж и сервисное сопровождение оборудования  
для производства строительных материалов



20

STEINBLOCK

STEINBLOCK

лет





Комитет Торгово-промышленной палаты РФ  
по предпринимательству в сфере строительства  
АО «ЦНИИЭП жилища – институт комплексного проектирования  
жилых и общественных зданий» (АО «ЦНИИЭП жилища»)  
Объединенная редакция научно-технических журналов  
«Жилищное строительство» и «Строительные материалы»®



# XIV Международная научно-практическая конференция «InterConPan-2024: инновации для индустриального домостроения»

## InterConPan-2024

International Conference of Large-panel Construction

16–17 апреля 2024 г.

г. Хабаровск  
Отель «Интурист» (Амурский бульвар, 2)

### ПРОГРАММА:

#### 1-й день

Пленарное заседание

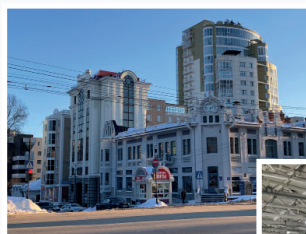
Секции:

«Архитектура индустриальных зданий  
и комплексное развитие территорий»;  
«Инновационная технология  
предприятий индустриального  
домостроения»

#### 2-й день

Выездная сессия

- Завод ЖБИ «АмурСтройМеханизация» (реконструкция действующего производства)
- Завод КПД «Прогресс» (реконструкция действующего производства)
- ЗЖБИ «Сахалин-Инжиниринг» (строительство нового предприятия)
- ЖК «Берёзки», ЖК «Нордик» (Хабаровск)



### ТЕМАТИКА:

- Оборудование и технологии для обеспечения технологического суверенитета индустриального домостроения
- Инновационные строительные системы
- BIM-технологии в сборном домостроении
- Современные инновационные строительные материалы
- Архитектура и планировочные решения
- Малоэтажное индустриальное строительство
- Инновационная организация строительного производства
- Комплексное развитие территорий застройки

Генеральный спонсор



[WWW.REKON-SMK.RU](http://WWW.REKON-SMK.RU)

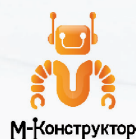
[WWW.REKON-TECH.RU](http://WWW.REKON-TECH.RU)

Постоянный партнер

# PBS

Petro Building Systems

Партнеры



[www.interconpan.ru](http://www.interconpan.ru)

Организационный комитет: +7 (499) 390-87-17

[kpd-conf@mail.ru](mailto:kpd-conf@mail.ru);

[mail@rifsm.ru](mailto:mail@rifsm.ru)

[www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru)

Учредитель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,  
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,  
д. 9, корп. 1, кв. 1

Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»  
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,  
д. 9, корп. 1, кв. 1

Свид. о регистрации ПИ № 77-1989  
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)

Входит в Перечень ВАК, РИНЦ,  
Russian Science Citation Index

Адрес редакции: Россия, 127434, г. Москва,  
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

## № 12

Основан в 1955 г.

(820) Декабрь 2023 г.

Тел.: (499) 390-87-17 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

### Материалы для дорожного строительства

С.С. ИНОЗЕМЦЕВ, Т.В. СУСАНИНА, Д.В. СТИБУНОВ, М.Л.Ф. КЕЙТА

**Тенденции развития научных направлений**

**в области дорожно-строительных материалов в России (обзор) ..... 4**

А.Н. БОДЯКОВ, И.Ю. МАРКОВА, В.В. СТРОКОВА, Д.О. БОНДАРЕНКО, Е.Н. ГУБАРЕВА, А.И. БУКОВЦОВА

**Анализ нормируемых свойств шлакового щебня в результате кристаллохимической стабилизации..... 20**

### Бетон и железобетон в промышленном и гражданском строительстве

В.С. АВАНЕСОВ, К.О. ТУРСУНБАЕВА

**Влияние параметров армированного основания на изменение компонентов**

**напряженно-деформированного состояния преобразованного основания ..... 26**

Н.К. РОЗЕНТАЛЬ

**Влияние жаркого влажного климата на коррозию железобетона ..... 32**

А.О. АДАМЦЕВИЧ, А.П. ПУСТОВГАР, Л.А. АДАМЦЕВИЧ, Д.В. КРАМЕРОВ, П.Ю. ВОРОБЬЕВ

**Исследование особенностей работы бетонных конструкций, изготовленных**

**с применением технологии аддитивного строительного производства ..... 38**

**Build Fest 2023 – крупнейший фестиваль технологий и решений КНАУФ**

**для строительства и отделки (Информация)..... 47**

Д.А. ЛЯШЕНКО, В.А. ПЕРФИЛОВ, М.Е. НИКОЛАЕВ, С.В. ЛУКЪЯНИЦА, Р.А. БУРХАНОВА

**Повышение прочности мелкозернистого бетона с применением углеродных нанотрубок**

**и механоактивации смеси..... 49**

А.В. МАНЬКО, О.В. КОПТЕВА

**Метод редевелопмента подземных объектов горной промышленности ..... 55**

### Композиционные строительные материалы

М.С. САЙДУМОВ, С.-А.Ю. МУРТАЗАЕВ, Д.А. МЕЖИДОВ

**Теоретические и практические аспекты вторичного использования отходов гидролизных производств**

**в композиционных строительных материалах (обзор)..... 61**

К.Р. ХУЗИАХМЕТОВА, А.М. ИСЛАМОВ, Л.А. АБДРАХМАНОВА, Р.К. НИЗАМОВ, Д.М. ВАЛИЕВА

**Изучение полимерных матриц на основе смесей поливинилхлорида и привитых сополимеров ..... 70**

В.В. ИЛЬИНА, В.В. СТРОКОВА

**Фотополимерные материалы в практике реставрационно-консервационных работ**

**на объектах историко-культурной ценности ..... 76**

**Указатель статей, опубликованных в журнале «Строительные материалы»® в 2023 г.,**

**см. на сайте [https://journal-cm.ru/images/files/2023/12\\_084.pdf](https://journal-cm.ru/images/files/2023/12_084.pdf)**



Founder of the journal: «STROYMATERIALY»  
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,  
Moscow, 125319, Russian Federation  
Publisher: «STROYMATERIALY»  
Advertising-Publishing Firm, OOO  
Address: 1, 9 Bldg. 1, Chernyakhovskogo Street,  
Moscow, 125319, Russian Federation  
Registration certificate PI № 77–1989  
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)  
Included in the list of journals of the Higher  
Attestation Commission (Russia),  
Russian Science Citation Index  
Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway,  
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

# STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 12

Founded in 1955 (820) December 2023

Tel.: (499) 390-87-17 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

## Materials for road construction

- S.S. INOZEMTSEV, T.V. SUSANINA, D.V. STIBUNOV, M.L.F. KEITA  
**Trends in the Development of Scientific Directions in the Field of Road Construction Materials in Russia (Review) ... 4**
- A.N. BODYAKOV, I.Y. MARKOVA, V.V. STROKOVA, D.O. BONDARENKO, E.N. GUBAREVA, A.I. BUKOVTSOVA  
**Analysis of Standardized Properties of Slag Crushed Stone Resulting From Crystal-Chemical Stabilization..... 20**

## Concrete and reinforced concrete in industrial and civil engineering

- V.S. AVANESOV, K.O. TURSUNBAEVA  
**Influence of Parameters of the Reinforced Base on the Change of Components  
of the Stress-Strain State of the Transformed Base ..... 26**
- N.K. ROZENTAL  
**The Effect of a Hot Humid Climate on Corrosion of Reinforced Concrete..... 32**
- A.O. ADAMTSEVICH, A.P. PUSTOVGAR, L.A. ADAMTSEVICH, D.V. KRAMEROV, P.Yu. VOROBEV  
**Investigation of the Working Features of Concrete Structures Manufactured  
Using Technologies of Additive Building Manufacturing ..... 38**
- Build Fest 2023 is KNAUF's Largest Technology and Solutions Festival  
for Construction and Finishing (Information)..... 47**
- D.A. LYASHENKO, V.A. PERFILOV, M.E. NIKOLAEV, S.V. LUKIANITSA, R.A. BURKHANOVA  
**Increasing the Strength of Fine-Grained Concrete with the Use of Carbon Nanotubes  
and Mechanical Activation of the Mixture ..... 49**
- A.V. MANKO, O.V. KOPTEVA  
**Method of Redevelopment of Underground Mining Facilities ..... 55**

## Composite building materials

- M.S. SAIDUMOV, S.-A.Yu. MURTAZAEV, D.A. MEZHIDOV  
**Theoretical and Practical Aspects of the Secondary Use of Hydrolysis Productions Waste  
in Composite Building Materials (Review)..... 61**
- K.R. KHUZIAKHMETOVA, A.M. ISLAMOV, L.A. ABDRAKHMANOVA, R.K. NIZAMOV, D.M. VALIEVA  
**Study of Polymer Matrices Based on Blends of Polyvinyl Chloride and Grafted Copolymers ..... 70**
- V.V. IL'INA, V.V. STROKOVA  
**Photopolymer Materials in the Practice of Restoration and Conservation Works  
on Objects of Historical and Cultural Value ..... 76**

**Главный редактор:**

**ЮМАШЕВА Е.И.,**

инженер-химик-технолог, почетный строитель России

**Председатель редакционного совета:**

**РЕСИН В.И.,**

д-р экон. наук, профессор, академик РААСН (Москва)

**АЙЗЕНШТАДТ А.М.,**

д-р хим. наук, профессор (Архангельск)

**АСКАДСКИЙ А.А.,**

д-р хим. наук, профессор (Москва)

**БУРЬЯНОВ А.Ф.,**

д-р техн. наук, директор Российской гипсовой ассоциации (Москва)

**ВЕРЕЩАГИН В.И.,**

д-р техн. наук, профессор (Томск)

**ГОРИН В.М.,**

канд. техн. наук, президент Союза производителей керамзита и керамзитобетона (Самара)

**ЕРОФЕЕВ В.Т.,**

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Саранск)

**КОРОЛЕВ Е.В.,**

д-р техн. наук, профессор (Санкт-Петербург)

**КОТЛЯР В.Д.,**

д-р техн. наук, профессор (Ростов-на-Дону)

**ЛЕОНОВИЧ С.Н.,**

д-р техн. наук, профессор (Беларусь)

**ЛЕСОВИК В.С.,**

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Белгород)

**МУРТАЗАЕВ С.-А.Ю.,**

д-р техн. наук, профессор (Грозный)

**НЕДОСЕКО И.В.,**

д-р техн. наук (Уфа)

**ПИЧУГИН А.П.,**

д-р техн. наук, профессор (Новосибирск)

**ПУХАРЕНКО Ю.В.,**

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН (Санкт-Петербург)

**РУДАКОВ О.Б.,**

д-р хим. наук, профессор (Воронеж)

**СТРОКОВА В.В.,**

д-р техн. наук, советник РААСН (Белгород)

**ТРАВУШ В.И.,**

д-р техн. наук, академик РААСН (Москва)

**ФЕДОСОВ С.В.,**

д-р техн. наук, профессор, академик РААСН (Москва)

**ФИШЕР Х.-Б.,**

доктор-инженер (Германия)

**ХОЗИН В.Г.,**

д-р техн. наук, профессор (Казань)

**ШЕБЛ С.М.,**

д-р наук, профессор (Египет)

**ШЛЕГЕЛЬ И.Ф.,**

канд. техн. наук (Омск)

**ШТАКЕЛЬБЕРГ Д.И.,**

д-р техн. наук, профессор (Израиль)

**ЯКОВЛЕВ Г.И.,**

д-р техн. наук, профессор (Ижевск)

**Editor-in-chief**

**YUMASHEVA E.,**

engineer-chemist-technologist, Honorary Builder of Russia

**Chairman of Editorial Board**

**RESIN V.,**

Doctor of Science (Economy), Professor (Moscow)

**ASKADSKIY A.,**

Doctor of Science (Chemistry), Professor (Moscow)

**AYZENSHTADT A.,**

Doctor of Sciences (Chemistry), Professor (Arkhangelsk)

**BURYANOV A.,**

Doctor of Science (Engineering), Director of the Russian Association of gypsum (Moscow)

**EROFEEV V.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Saransk)

**FEDOSOV S.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor, Academician of RAACS (Moscow)

**FISHER H.-B.,**

Doctor-Engineer (Germany, Weimar)

**GORIN V.,**

Candidate of Science (Engineering), President of the Union of Haydite and Haydite Concrete Producers (Samara)

**KHOZIN V.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor (Kazan)

**KOROLEV E.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

**KOTLYAR V.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor (Rostov-on-Don)

**LEONOVICH S.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor (Belarus, Minsk)

**LESOVIK V.,**

Doctor of Science (Engineering), Corresponding Member of RAACS (Belgorod)

**MURTAZAEV S.-A.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor (Grozniy)

**NEDOSEKO I.,**

Doctor of Science (Engineering) (Ufa, Bashkortostan)

**PICHUGIN A.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor, Member of the Russian Academy of Natural Science (Novosibirsk)

**PUKHARENKO Yu.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor (St. Petersburg)

**RUADKOV O.B.,**

Doctor of Sciences (Chemistry), professor (Voronezh)

**SHEBL S.M.,**

Doctor of Science, Professor (Egypt)

**SHLEGEL I.,**

Candidate of Science (Engineering), OOO «INTA-Stroy» (Omsk)

**SHTACKELBERG D.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor (Israel)

**STROKOVA V.**

Doctor of Science (Engineering), Advisor of RAACS (Belgorod)

**TRAVUSH V.,**

Doctor of Science (Engineering), academician of RAACS (Moscow)

**VERESHCHAGIN V.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor (Tomsk)

**YAKOVLEV G.,**

Doctor of Science (Engineering), Professor (Izhevsk)

С.С. ИНОЗЕМЦЕВ, канд. техн. наук (inozemtsevss@mail.ru),  
Т.В. СУСАНИНА, студентка (tanya.susanina.02@mail.ru),  
Д.В. СТИБУНОВ, студент (danilastibunov@gmail.com),  
М.Л.Ф. КЕЙТА, аспирант (keitalamine87@mail.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Тенденции развития научных направлений в области дорожно-строительных материалов в России (обзор)

В представленной статье проведен анализ тематик исследований за период с 2000 по 2023 г., следствием проведения которых являлись защиты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук с целью выявления тенденции развития научных направлений в области дорожно-строительных материалов. В качестве базы исследования использовались открытые источники, в том числе электронные, из которых проанализированы статьи с результатами, опубликованными в рамках подготовки не менее ста диссертационных работ, защищенных по научной специальности «Строительные материалы и изделия». Для удобства анализа работы сведены в таблицы: по объекту исследования; по виду технического решения. Сделан вывод, что в рассматриваемый период произошла трансформация исследовательских направлений от традиционных видов материалов к многокомпонентным композитам со сложной усовершенствованной структурой. Показано, что для апробации результатов исследований в рамках подготовки диссертаций в рассматриваемый период среднее количество публикаций увеличилось с 5–6 до 13–23. Сформулированы обобщенные задачи дальнейшего развития научных направлений в области дорожно-строительных материалов. Выявлен перечень актуальных вопросов современной науки в области дорожно-строительных материалов.

**Ключевые слова:** дорожно-строительные материалы, асфальтобетон, бетон, структурообразование, эффективность, модифицирование.

**Для цитирования:** Иноземцев С.С., Сусанина Т.В., Стибунов Д.В., Кейта М.Л.Ф. Тенденции развития научных направлений в области дорожно-строительных материалов в России (обзор) // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 4–19.  
DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-4-19>

S.S. INOZEMTSEV, Candidate of Sciences (Engineering) (inozemtsevss@mail.ru), T.V. SUSANINA, Student (tanya.susanina.02@mail.ru), D.V. STIBUNOV, Student (danilastibunov@gmail.com), M.L.F. KEITA, Graduate Student (keitalamine87@mail.ru)  
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Trends in the Development of Scientific Directions in the Field of Road Construction Materials in Russia (Review)

The presented article analyzes the research topics for the period from 2000 to 2023, the result of which was the defense of dissertations for the degree of Candidate and Doctor of Sciences in order to identify trends in the development of scientific directions in the field of road construction materials. Open sources, including electronic ones, were used as the research base, from which articles with the results published in the preparation of at least 100 dissertations defended in the scientific specialty "Building Materials and Products" were analyzed. For the convenience of the analysis, the works are summarized in tables: by the object of research; by the type of technical solution. It is concluded that during the period under review, there was a transformation of research directions from traditional types of materials to multicomponent composites with a complex improved structure. It is shown that in order to test the results of research in the preparation of dissertations in the period under review, the average number of publications increased from 5-6 to 13-23. The generalized tasks of further development of scientific directions in the field of road construction materials are formulated. A list of topical issues of modern science in the field of road construction materials has been identified.

**Keywords:** road construction materials, asphalt concrete, concrete, structure formation, efficiency, modification.

**For citation:** Inozemtsev S.S., Susanina T.V., Stibunov D.V., Keita M.L.F. Trends in the development of scientific directions in the field of road construction materials in Russia (review). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 4–19. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-4-19>

Чтобы понять какую-либо науку,  
необходимо знать историю этой науки.  
*Огюст Конт*

С 2019 г. в Российской Федерации реализуется национальный проект «Безопасные качественные дороги», целями которого обозначено увеличение доли автомобильных дорог, соответствующих нормативным требованиям: не менее чем 60% дорог регионального значения и не менее 85% дорог крупнейших городских агломераций (Официальный сайт национального проекта «Безопасные качественные дороги» <https://bkdrf.ru>). При этом одним из критериев достижения указанных целей является реализация не ме-

нее 80% контрактов на осуществление дорожной деятельности, в которых используются новые и наилучшие технологии, материалы и технические решения повторного применения. Реализация проекта сопряжена с большой материалоемкостью отрасли дорожного строительства и предполагает использование материалов с улучшенными свойствами, что обуславливает широкий запрос к научному сообществу в области материаловедения и актуализирует исследования по разработке эффективных дорожно-строительных материалов.

С целью установления тенденций развития научных направлений в области дорожно-строительных материалов в настоящей статье проведен анализ

тематику исследований за период с 2000 по 2023 г., следствием проведения которых являлись защиты диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук. В качестве базы исследования использовались открытые источники, в том числе электронные (Официальный сайт ВАК <https://vak.minobrnauki.gov.ru/>; НЭБ <https://www.elibrary.ru/>), из которых проанализированы статьи с результатами, опубликованными в рамках подготовки не менее 100 диссертационных работ, защищенных по научной специальности «Строительные материалы и изделия» (рис. 1).

В первой половине исследуемого периода очевидно наличие ежегодной защиты не менее одной диссертационной работы на соискание ученой степени доктора наук в области дорожно-строительных материалов. Количество диссертационных работ на соискание ученой степени кандидата наук увеличивалось до 2012 г., после чего наблюдается резкое снижение этого показателя.

В качестве объектов исследования в научных направлениях наиболее распространенными являлись асфальтобетон, битум и цементобетон. При этом в первой половине исследуемого периода эти три вида материалов были выбраны как объект исследования в 84% случаев. В остальных работах исследовались другие разновидности материалов, в том числе щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА), литой асфальтобетон и т. п. С 2012 г. область интересов исследователей изменилась в пользу технических решений по разработке материалов с комплексными вяжущими веществами и композитов с уникальным набором свойств. Наблюдается и большее разнообразие в типах исследуемых материалов, среди которых асфальтобетон, цементобетон, битум и ЩМА, полимерасфальтобетон и сероасфальтобетон, грунтобетон и фибробетон, цементасфальтобетон и битумно-минеральные композиции и др.

#### Период с 2000 по 2012 гг.

В исследованиях [1, 2] А.В. Руденский изучал усталостные характеристики асфальтобетона и по результатам разработал систему дифференцирования требований к показателю прочности при динамическом изгибе для асфальтобетона, а также разработал и обосновал критерии дифференцирования требований деформативности материала в различных условиях эксплуатации, позволяющие обеспечить сдвиговую устойчивость и стойкость к образованию трещин.

Технологию дисперсного армирования предложил В.Н. Лукашевич [3–5], в которой полимерные материалы, в том числе в виде отходов промышленности, вводятся в виде расплава или раствора в асфальтобетонную смесь, где происходит волокнообразование с формированием объемной пространственной сетки в структуре асфальтобетона, что приводит к улучшению комплекса физико-механических свойств.

В [6–8] М.А. Завьяловым предложена термодинамическая теория жизненного цикла дорожного покрытия, в соответствии с которой время начала вы-

полнения ремонтных работ дорожного асфальтобетонного покрытия определяется моментом утраты квазилинейности графиками функции удельной теплоты от времени эксплуатации покрытия. Также в ходе исследования установлено, что момент начала ремонтных работ характеризуется дефицитом свободной энергии, ее отрицательным приращением, поэтому для численной оценки этого состояния предложен коэффициент дефицита свободной энергии.

Э.В. Котлярский предложил основные принципы направленного регулирования процессов формирования структуры асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов [9, 10] за счет изменения соотношения количества и свойств элементарных контактов с позиций теории структурообразования высококонцентрированных дисперсных систем и специфики контактных взаимодействий. Кроме того, получены количественные взаимосвязи между структурообразующими и деструктивными факторами со свойствами асфальтобетона, которые свидетельствуют, что достижение нормативной плотности асфальтобетона не гарантирует получения требуемого комплекса свойств и структуры материала, отвечающих эксплуатационным условиям.

Вклад состояния поверхности дисперсных наполнителей и заполнителей в процессы структурообразования органоминеральных композитов исследован В.В. Ядыкиной [11–13]. В ходе работы установлено, что кислотно-основные свойства поверхности минерального материала оказывают определяющее влияние на взаимодействие с битумом. Подтверждено взаимодействие активных центров Льюиса и Бренстеда поверхности минеральных материалов в контактной зоне с органическим вяжущим. Это позволило доказать, что с применением кислых минеральных порошков из техногенного сырья КМА возможно получение высококачественных асфальтобетонов за счет активного взаимодействия адсорбционных центров на их поверхности и сопряженных кислот и оснований в составе битума.

В исследованиях [14, 15] подтверждено, что асфальтобетон с использованием минеральных компонентов из кварцитопесчаника отличается повышенной теплостойкостью, морозостойкостью и водостойкостью. Это объясняется протеканием адсорбционных процессов на границе раздела «битум–кварцитопесчаник» с образованием химических связей и водонерастворимых соединений за счет содержания кварца метаморфогенного происхождения с большим количеством адсорбционных центров, активных по отношению к компонентам органического вяжущего. Механическая активация минеральных порошков на основе кремнеземсодержащего сырья позволяет управлять степенью аморфизации дисперсных материалов, регулируя реакционную способность наполнителей [16].

При использовании известьсодержащего минерального порошка в составе асфальтобетона установлено [17, 18], что образуются кристаллы портландита в результате взаимодействия оксида кальция с водой

и фенолятов кальция, способствующих упрочнению структуры асфальтобетона за счет армирования ее новообразованиями и кольматации пор. Показано, что наличие оксида кальция способствует увеличению структурирующей способности известьсодержащего минерального порошка по сравнению с карбонатным, что обуславливает улучшение адгезии битума к нему. В исследовании доказано, что активное взаимодействие с битумом минерального порошка, содержащего от 20 до 40% CaO, приводит к ингибированию окислительно-полимеризационных процессов и замедлению старения битума в асфальтобетоне.

Минеральные порошки на основе активированного перлита и кварцита [19] обладают высокой адсорбционной активностью и структурирующей способностью вяжущего, увеличивая термостойкость битумных пленок и повышая прочность асфальтобетона. Похожий эффект влияния на свойства асфальтобетона достигается при использовании в качестве наполнителя железосодержащего минерального порошка [20] за счет ингибирующего влияния оксидов железа в составе материала на процессы старения битума в результате образования хемосорбционных связей на границе раздела фаз. А в работе [21] предложено технологическое решение по замене карбонатного наполнителя минеральным порошком из карбидной извести, которое способствует повышению устойчивости асфальтобетона к образованию колеи.

В работах [22, 23] исследовалось использование крупного и мелкого заполнителя из кварцитопесчаника в составе щебеночно-мастичного асфальтобетона совместно со стабилизирующей добавкой в виде волокнистых отходов. Используемые отходы «П-2», содержащие в составе макромолекул амидные группы, взаимодействуют с ароматическими структурами битума, а водород амидной группы способен замещаться на алкильные и другие радикалы с формированием макромолекул свободных радикалов, которые могут инициировать образование привитых и сетчатых структур. В результате достигается дополнительное армирование и повышение физико-механических свойств ЦМА.

Особенности взаимодействия пористого минерального порошка в составе асфальтобетона исследованы на примере перлитового наполнителя [24, 25]. Высокопористая структура перлита позволяет поглощать низкомолекулярные компоненты битума и в дальнейшем за счет их обратной диффузии в процессе эксплуатации подпитывать ими граничные слои, что препятствует обеднению матрицы легкими фракциями и замедляет интенсивность старения вяжущего. При этом отмечается более высокая релаксационная способность асфальтобетонов с перлитовым наполнителем при перепадах температуры, что обуславливает снижение вероятности накопления остаточных деформаций и увеличение срока службы асфальтобетонных покрытий. Положительный эффект от применения пористых материалов в виде заполнителей из вулканического туфа в составе асфальтобетона также

отмечен в работах [26], он заключается в улучшении низкотемпературной трещиностойкости и термостабильности. А использование высокодисперсного отсева керамзита в качестве наполнителя позволяет увеличить сдвигустойчивость асфальтобетонов, что доказано в исследовании [27].

В исследованиях совместного использования вспученного вермикулита и вторичного полипропиленового волокна в составе асфальтобетона [28, 29] доказано улучшение условий формирования макроструктуры в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси за счет наличия микрополостей с заземленным воздухом, который замедляет остывание смеси. Следствием этого является повышение прочности асфальтобетона и его трещиностойкости.

Способ модифицирования минеральных материалов из техногенного сырья КМА для производства асфальтобетонов за счет ультрафиолетового облучения исследовался в работах [30, 31]. В результате установлено, что под воздействием УФ-облучения на поверхности минерального порошка увеличивается количество обменных центров, которые определяют активность адсорбционных взаимодействий в контактной зоне с вяжущим. Полученный эффект объясняется автором изменением гидрофильно-гидрофобных свойств поверхности наполнителя, выражающийся в замедлении скорости регидратации. Отмечается, что образование более прочных структур наблюдается при использовании модифицированного наполнителя для производства композитов как на органическом, так и на минеральном вяжущем.

В работе [32] подтверждена возможность получения асфальтобетонных смесей с использованием минерального наполнителя из отвалных кеков гидрометаллургического производства, модифицированного анион-активными поверхностно-активными веществами.

Распространенным направлением научных исследований является улучшение свойств асфальтобетонов за счет использования битумных вяжущих веществ, модифицированных различного рода полимерными добавками. Так, в работе [33] предложено использовать смесевой термоэластопласт, состоящий из полиэтилена высокого давления, этиленпропиленового каучука тройного и изопренового каучука. В результате исследования структуры получаемого битумно-полимерного вяжущего установлено возможность снизить молекулярную подвижность и повысить теплостойкость за счет перехода структуры от дискретно-матричной к непрерывной сетчатой, пронизывающей битумную матрицу.

Структурная особенность формирования пространственной асфальтено-полиолефиновой решетки в объеме битума установлена также при использовании модификатора на основе каучуко-полиолефинов [34, 35]. Формирование такой структуры значительно улучшает комплекс физико-механических свойств асфальтобетонов из холодных смесей, в том числе повышает стойкость к термоокислительному старению на 30–40%. А использование поли-

мера на основе этилена повышает способность асфальтобетона сопротивляться сдвиговому воздействию и погоднo-климатическим факторам [36].

В исследовании [37] отмечается, что для получения однородной структуры битумных вяжущих веществ, модифицированных полимером важную роль играет пластификатор, обеспечивающий гомогенизацию, стабильность и стойкость к технологическим температурам. Сходный эффект достигается авторами [38], где рассматривается каучуко-полиолефиновый модификатор для асфальтобетона, который сочетает в себе преимущества полиолефинов и эластомеров, позволяя придать жесткость материалу при высокой эксплуатационной температуре, а также эластичность и трещиностойкость в области низкой температуры. А использование вяжущих на основе полимерных адгезионных добавок позволяет повысить срок службы дорожных покрытий и их устойчивости к пластическим деформациям, что было показано авторами [39].

Регулирование интенсивности взаимодействия битума с минеральными компонентами асфальтобетона как из кислых, так и основных пород за счет использования амфолитной адгезионной добавки исследовалось в работе [40]. Содержание анионных и катионных функциональных групп в добавке позволяет улучшать сцепление битума вне зависимости от состава породы и состояния ее поверхности. Как дополнительный эффект отмечается снижение технологической температуры приготовления асфальтобетонной смеси на 20–30°C.

При этом регулирование свойств асфальтобетонно-возможно с использованием отходов, в том числе полимерного производства. В исследовании [41] доказана возможность получения литого асфальтобетона на основе битумного вяжущего, модифицированного отходами производства поликапроамида.

В исследованиях [42, 43] выявлено, что для эффективного использования резиновой крошки из автомобильных шин необходимо осуществление ее девулканизации в расплаве дорожного битума в присутствии катализаторов основного типа, в частности неозона Д и наноструктурированного кремнезоля. Отмечено, что при девулканизации резины в среде битума увеличивается содержание бензолных и спиртобензолных смол, ответственных за эластичность битумов, которые способствуют образованию коагуляционной структуры вяжущего, стойкого к механическим воздействиям. Улучшение свойств асфальтобетона на основе получаемого вяжущего обеспечивается за счет отверждения полиуретанового регенерата полиизоцианатом в среде битума в результате химического его взаимодействия с концевыми гидроксильными и аминными группами асфальтенов битума. При этом отмечается большая эффективность битумов, модифицированных девулканизаторами резиновой крошки из автомобильных шин, чем традиционных битумно-эластомерных композиций.

В исследованиях [44, 45] предложен механоактивный способ получения мелкодисперсного по-

рошка из резиновой крошки путем совместного помола с песком в дезинтеграторной установке для применения модифицирования асфальтобетона. Использование получаемой смеси в составе асфальтобетона позволяет повысить его физико-механические свойства при концентрации от 0,7 до 1% от массы минеральной части. А в работе [46] предложен комплексный резинополимерный модификатор на основе вторичного полиэтилена и резиновой крошки для асфальтобетона, применяемого в условиях повышенной температуры и влажности. При этом автор отмечает синергетический эффект от совместного применения разработанного модификатора и гидратной извести, который обуславливает увеличение усталостной долговечности в 1,5 раза.

Предложенная полимерно-битумная композиция [47] на основе дивинилстирольного термоэластопласта, выступая в качестве стабилизатора, позволяет получать регенерированную асфальтобетонную смесь при добавлении в асфальтобетонную крошку в процессе горячего ресайклинга. Авторами [48] показано, что для частиц сфрезерованного асфальтобетона, образованных при холодном фрезеровании, характерно возникновение свежих поверхностей, обладающих высокой химической активностью, обусловленной образованием свободных радикалов. Использование триэтаноламина в качестве омолаживателя для составленного битума и катионоактивного ПАВ позволяет использовать сфрезерованный асфальтобетон для получения ремонтных смесей, обладающих технологическими свойствами литых смесей. Похожий эффект получен в исследовании [49], где с помощью синтетического высокомолекулярного полибутадиена и резинокарбонатсодержащего термоэластопласта фрезерованный асфальтовый лом используется для получения композиционной литой смеси и асфальтобетона, обладающего высокой температурной устойчивостью и повышенной стойкостью к старению.

Добавление дробленого асфальтобетона в укатываемую бетонную смесь позволяет получать структуру материала с кристаллическими и коагуляционными связями [50], обеспечивающую повышение деформативности, морозостойкости, сопротивляемости изгибающим и растягивающим нагрузкам оснований дорожных одежд. В исследовании [51] показана возможность получения органоминеральной смеси на основе регенерированного асфальтобетона и диспергированного сланцевого битума. Отмечается, что свойства получаемого композита регулируются заменой части минерального порошка на портландцемент и известь.

В ряде работ [52–54] исследовались физические способы воздействия с целью управления процессами структурообразования. Так, при ультразвуковой обработке расплава битума в процессе производства асфальтобетонных смесей в нем происходит возникновение кавитационных пузырьков и акустических течений различного масштаба с разрушением асфальтенов и распределением свободных радикалов на поверхности каменного материала [52]. Указанный

способ увеличивает адгезию битума к каменным материалам кислотных групп и повышает водостойкость получаемого асфальтобетона.

Приложение сдвиговых усилий при пониженной температуре к битуму способствует преобразованию его структуры путем разрушения слабых ковалентных связей с образованием активных свободных радикалов [52, 54], что способствует усилению взаимодействия образовавшихся активных центров с минеральным материалом. Увеличение интенсивности взаимодействия на границе раздела фаз «битум – минеральный материал» позволяет снизить концентрацию битума в составе асфальтобетонной смеси на 8–10% и увеличить водостойкость на 15–20%.

В работах [55, 56] предложен подход по созданию эмульсий пластификаторов и технологии их приготовления для поверхностной обработки состаренных асфальтобетонных покрытий с целью восстановления их способности сопротивляться механическим воздействиям. Использование катионных эмульсий пластификаторов для поверхностной обработки асфальтобетонных покрытий приводит к снижению степени выкрашивания заполнителей. При этом наблюдается закрытие трещин размером не более 20 мм.

#### Период с 2012 по 2023 г.

В качестве местного сырья для производства минерального порошка авторами [57–59] предложено использовать природный цеолит и бурый уголь. Использование такого материала позволяет за счет пористости поглощать мальтеновую часть битума в процессе приготовления асфальтобетонной смеси. Наблюдаемый эффект приводит к снижению склонности к старению за счет эффекта обратной диффузии мальтенов и повышению термостойкости асфальтобетона.

Для интенсификации процессов хемосорбции битума в составе асфальтобетонов могут быть использованы алюмосиликатные отходы ТЭС в виде золуноса [60, 61]. Их использование также повышает теплостойкость асфальтобетонов и деформативную устойчивость при эксплуатации в летний период.

В работах [62–64] предлагается использование в качестве наполнителя в асфальтобетоне пористого наномодифицированного минерального сырья, получаемого совместным интенсивным измельчением цеолитсодержащего туфа и полимерного компонента, в результате чего формируется разрыхленная высокоаморфизованная пористая структура поверхностного слоя частиц порошка (рис. 2). Получаемый гибридный минеральный порошок при взаимодействии с битумом образует сложноструктурированную микроармированную систему на границе раздела фаз. Отмечается, что происходит кольматация пор наполнителя в результате модифицирования, пористость снижается на 15%, а площадь удельной поверхности возрастает, что свидетельствует о заполнении порового пространства полимерным компонентом высокой дисперсности. Применение полученного напол-

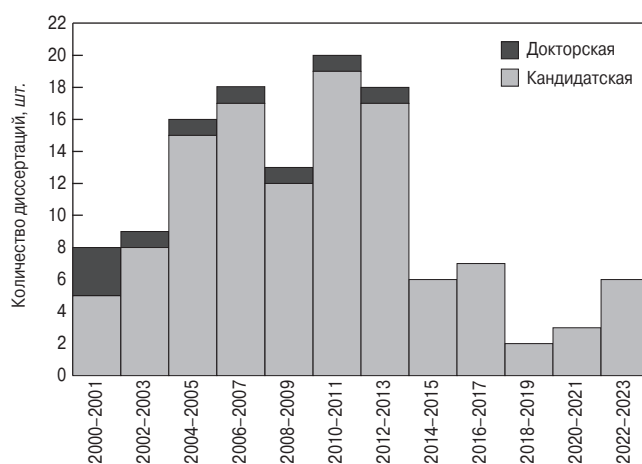


Рис. 1. Распределение количества диссертационных работ по специальности «Строительные материалы и изделия» в области дорожного строительства

Fig. 1. Distribution of the number of dissertations in the specialty “Building materials and products” in the field of road building materials

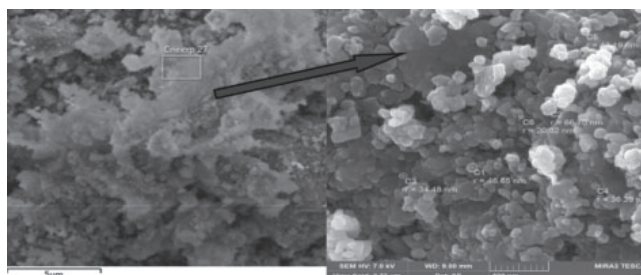


Рис. 2. Микрофотографии поверхности модифицированного цеолита [64]

Fig. 2. Microphotographs of the surface of a modified zeolite [64]

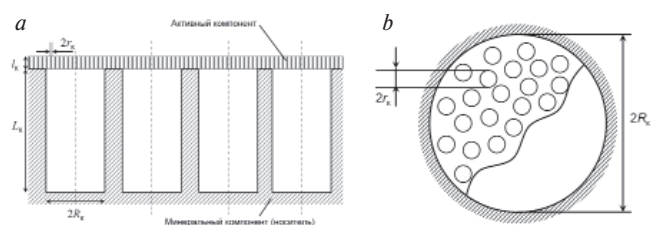


Рис. 3. Модель комплексного модификатора (а) и схема поверхности капилляра (б)

Fig. 3. Model of a complex modifier (a) and diagram of the capillary surface (b)

нителя позволило увеличить морозо- и трещиностойкость, а также сдвигоустойчивость.

Технология поверхностного модифицирования минерального наполнителя предложена в работах [65–67], где пористый диатомовый порошок в виде минеральной подложки подвергается обработке активным компонентом, золем гидроксида железа (III) и кремниевой кислоты, ускоряющим процесс сорбции легких фракций битума (рис. 3). Установлено, что получение эффективного наномодифицированного наполнителя для асфальтобетона достигается при использовании минерального компонента с высокопористой структурой в качестве носителя, на поверхность которого нанесен активный компонент слоем толщиной менее 100 нм. Использование такого компонента в составе щебеночно-мастичного

асфальтобетона позволяет управлять начальным структурообразованием посредством формирования на границе раздела фаз прочной и плотной битумной пленки и регулирования содержания легких фракций битума. Также обеспечивается получение материала с повышенными показателями физико-механических и эксплуатационных свойств [68] за счет блокирования процессов окисления и полимеризации битума при его взаимодействии с наночастицами гидроксида и оксида железа, расположенными в активной части наномодификатора.

Использование углеродных наноматериалов в качестве модификаторов в составе асфальтобетонных смесей предложено авторами [69–71]. Показано, что использование фуллеренсодержащего наномодификатора в количестве 0,1% от массы битума позволяет увеличить работу адгезии битума с минеральным заполнителем на 30–40% и в 1,3–1,4 раза увеличить коэффициент теплостойкости асфальтобетона. В работах [72, 73] в качестве модификатора для полимерно-битумного вяжущего (ПБВ) вещества рассматриваются многостенные и одностенные углеродные нанотрубки, которые позволяют сократить использование полимера до 38%. Для эффективного введения нанотрубок предложена предварительная подготовка наносuspension в пластифицирующей среде путем диспергирования с помощью ультразвукового воздействия. Использование одностенных и многостенных углеродных нанотрубок в количестве  $5 \cdot 10^{-5}$  и  $5 \cdot 10^{-4}\%$  от массы битума в составе ПБВ соответственно позволяет увеличить температуру размягчения на 20–24% и снизить температуру хрупкости на 20–38%. Отмечено возрастание эластичности ПБВ на 24–30%, что способствует увеличению усталостной долговечности асфальтобетонов на его основе на 105–130%.

В исследованиях [74, 75] битум используется как реакционная среда для радикальной полимеризации виниловых мономеров с целью получения полимер-битумных композиций с повышенными эксплуатационными характеристиками. Авторами доказано, что в среде битума реакционная способность стирола по сравнению с винилацетатом незначительно отличается, чем при полимеризации в массе. В результате предложен подход получения вяжущего путем совмещения резины с битумом за счет девулканизации резины и перевода ее в растворенное состояние посредством расторяющей добавки каменноугольной смолы.

В [76, 77] приведены исследования смеси битума и резиновой крошки, которые показывают, что в композиционных материалах образуется сеточная структура с включениями микро- и наноразмерных резиновых фрагментов. Эффект от применения активного порошка дискретно девулканизованной резины выражается в увеличении стойкости к образованию пластических деформаций и повышению усталостной долговечности материала.

Авторами [78–80] предложен способ интенсификации взаимодействия механоактивированной резиновой крошки и битума за счет использования цео-

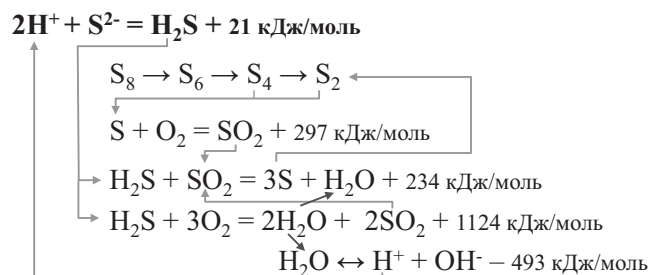


Рис. 4. Модель процессов, происходящих в битумных материалах, содержащих серу

Fig. 4. Model of processes occurring in bitumen materials containing sulfur

лита, который способствует образованию развитого переходного слоя из частично растворенной резины в легких фракциях битума, возникающего на границе раздела фаз «резиновая крошка – битум». Предложенный комплексный подход позволяет повысить водостойкость и морозостойкость асфальтобетона.

Также с целью расширения сырьевой базы для производства дорожных материалов исследовались отходы кровельных материалов [81, 82], которые образуются в процессе реконструкций или ремонта зданий. Исследована возможность получения компаунда на основе отходов кровельных материалов с гудроном в качестве пластифицирующего агента для производства вяжущих, сходных по свойствам с битумами марок БНД 40/60, БНД 60/90 и БНД 90/130. При этом полученным компаундом можно заменить до 40% дорожного битума в составе асфальтобетонной смеси, которые целесообразно использовать при устройстве оснований автомобильных дорог и покрытий для дорог III и IV категорий.

В исследовании [83–86] решалась проблема выделения токсичных газов при использовании в качестве модификатора в асфальтобетонах отхода переработки нефти и газа в виде технической серы. Авторами разработана модель химических процессов, протекающих в сероасфальтобетонной смеси (рис. 4). Разработан эффективный способ применения серы совместно с нейтрализаторами токсичных газов в виде комплексной добавки для производства сероасфальтобетона, который позволяет снизить кратность эмиссии токсичных газов в 3–6 раз. При этом разработана математическая модель формирования дополнительных пор в сероасфальтобетоне [85] и способ борьбы с этим процессом, позволяющие увеличить водостойкость [86].

В исследовании [87] автор рассматривает различные виды стабилизирующих добавок для щебеночно-мастичных асфальтобетонов и производит оценку их вклада в процессы структурообразования и степени влияния на физико-механические свойства дорожных композитов.

В исследовании [88, 89] рассматривалось комплексное использование топливных зол и битумных эмульсий для получения цементаасфальтобетона. Отмечена интенсификация гидратации и уплотнение цементного камня, а также улучшение структурно-

механических свойств битумных пленок в процессе структурообразования. Описан механизм формирования структуры, который включает взаимодействие битумной эмульсии с крупным наполнителем с образованием локальных уплотненных зон вяжущего за счет структурирования частиц битума с образованием открытых зон, обеспечивающих адгезию к цементному камню. Разработанный полужесткий композит имеет предел прочности при сжатии не менее 10 МПа при температуре от 0 до 50°C.

**Результаты исследования**

Обзор работ, опубликованных в рамках апробации результатов, полученных при подготовке диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, свидетельствует об изменении области интересов исследователей в период с 2000 по 2023 г. Простым способом проследить направление изменения области интересов исследователей возможно по объектам исследования (табл. 1).

Очевидно, что основным научным направлением в области дорожно-строительных материалов являются исследования, в которых объектом является асфальтобетон. Однако видно, что во второй половине рассматриваемого периода произошло общее уменьшение количества исследований в области дорожно-строительных материалов; при этом наблюдается смещение интересов ученых в сторону исследований, где объектом являются другие виды материалов, в том числе асфальтобетоны, модифицированные функциональными добавками (полимеры, сера), и бетоны на минеральном или комбинированном вяжущем.

Для решения научных или отраслевых проблем в научных исследованиях используются различные

**Таблица 1**

**Table 1**

**Изменение научного интереса к объекту исследования  
Changes in scientific interest in the object of research**

Объект исследования	2000–2011 гг.		2012–2023 гг.	
	Кол-во работ	%	Кол-во работ	%
Асфальтобетоны	33	56	16	46
Битум	12	20	0	–
ЩМА	5	8	3	9
Цементобетон	4	7	4	12
Литой асфальтобетон	2	3	–	–
Полимерасфальтобетон	1	2	–	–
Битумная эмульсия	1	2	–	–
Битумное вяжущее вещество	1	2	1	3
Битумная мастика	–	–	1	3
Битумно-минеральная композиция	–	–	1	3
Сероасфальтобетон	–	–	2	6
Укрепленный грунт	–	–	2	6
Грунтобетон	–	–	1	3
Фибробетон	–	–	1	3
Цементоасфальтобетон	–	–	1	3
Композит органоминеральный	–	–	1	3
Всего	59	100	34	100

подходы, позволяющие в различной степени достичь повышения технико-экономической эффективности.

Стоит отметить, что состав материалов для дорожного строительства со временем усложняется. Ранее простые композиты из двух видов материалов, вяжущего и минерального наполнителя различного гранулометрического состава, в настоящий момент

**Таблица 2**

**Table 2**

**Достижимые результаты при введении дополнительного компонента в состав дорожно-строительных материалов  
Achieved results when introducing an additional component into the composition of road building materials**

Матричный материал	Компонент	Результат	Ссылка на источник
Органическое вяжущее	Полимер	Увеличение эластичности, повышение термостойкости и снижение хрупкости	[3–5, 33–46]
	Минеральная добавка	Увеличение термостойкости и сдвигоустойчивости	[11–32, 57–61]
	Поверхностно-активные вещества	Улучшение адгезии на границе раздела «вяжущее–заполнитель»	[48, 49]
	Пластификатор	Увеличение подвижности смеси, снижение температуры приготовления	[55, 56]
	Наномодификатор	Увеличение стойкости к старению, термостойкости и сдвигоустойчивости	[62–73]
	Резиновая крошка	Увеличение сдвигоустойчивости и водостойкости	[74–80]
	Техногенные отходы	Увеличение термостойкости и сдвигоустойчивости, снижение температуры приготовления смеси	[50, 51, 81–86]
	Целлюлозное волокно	Увеличение стабильности смеси	[87]
Минеральное вяжущее	Минеральная добавка	Увеличение прочности	[32, 88, 89]
	Органическая добавка	Увеличение водостойкости и трещиностойкости, снижение жесткости	[50, 88, 89]
	Фибра	Увеличение трещиностойкости, снижение хрупкости	[90, 91]
	Химическая добавка	Увеличение подвижности смеси, улучшение удобоукладываемости, улучшение адгезии матрицы к наполнителю	[90–93]

дополняются новыми функциональными компонентами, как пластифицирующими добавками и стабилизирующими волокнами, так и специальными веществами, придающими композитам уникальное сочетание свойств (табл. 2).

Очевидно, что использование дополнительных компонентов в составе материалов для дорожного строительства обусловлено стремлением улучшить качественные показатели с целью увеличения срока службы конструкций с их применением. При этом стоит отметить, что для материалов на органическом вяжущем обеспечение длительного срока эксплуатации не обуславливается достижением экстремальных значений показателей свойств. Так, увеличение теплостойкости материала будет способствовать увеличению его хрупкости и склонности к образованию трещин. А в случае снижения хрупкости возрастает риск образования пластических деформаций в результате динамических нагрузок при положительной температуре (рис. 5).

Таким образом, для обеспечения большей стойкости к эксплуатационным факторам необходимо достижение баланса между упругопластичными и хрупкими свойствами материала. С этим связан поиск исследователями таких решений, которые позволят получить материал необходимого качества с учетом требований потребителя (комфортность при эксплуатации, срок службы) и нормативными требованиями (показатели свойств).

При этом оценка достижения указанной цели осуществляется по факту достижения установленных значений для структурно-чувствительных показателей качества, которые определяются исходя из условий эксплуатации материала. Важно учитывать, что установленные целевые значения для структурно-чувствительных параметров качества, как правило, относятся к материалу в начальный период его эксплуатации, в котором завершен процесс структурообразования. При этом кинетика изменения структурно-чувствительного параметра  $F$  материала описывается дифференциальным уравнением [94]:

$$\frac{dF}{dt} = -k_t F^n,$$

а его решение имеет вид:

$$\frac{F(t)}{F(0)} = \sqrt[n]{1 - k_t \frac{1-n}{F(0)^{1-n}} t}, \quad (1)$$

где  $F(0)$  – значение структурно-чувствительного параметра в начальный период времени;  $n$ ,  $k_t$  – энергетическая и кинетическая константы;  $t$  – время.

Очевидно, что изменение структурно-чувствительного параметра материала в течение эксплуатации характеризуется интенсивностью процесса деградации, которая обуславливает срок эксплуатационной пригодности материала. Требования к скорости изменения структурно-чувствительного параметра материала не предъявляются, что осложняет процесс установления технической эффективности разрабатываемых решений в эксплуатационных условиях.

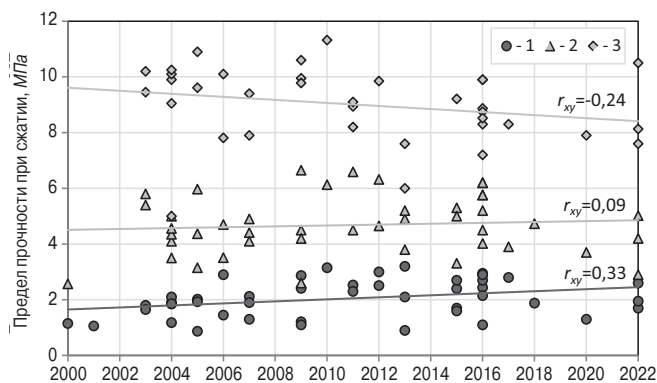


Рис. 5. Изменение значений предела прочности при сжатии при температуре 50°C (1); 20°C (2); 0°C (3) в исследованиях с 2000 по 2022 г.  
Fig. 5. Changes in the values of ultimate compressive strength at temperatures 50°C (1); 20°C (2); 0°C (3) in studies from 2000 to 2022

Поэтому основным целевым показателем при разработке новых дорожно-строительных материалов стала усталостная долговечность, которая характеризует длительность сопротивления материала динамическим нагрузкам до момента выхода его из строя [95, 96]. Контролирование данного показателя стало в большей степени возможно и доступно для исследователей после внедрения новых методов измерения в рамках модернизации нормативной системы проектирования и испытания органоминеральных композитов [97].

При этом условия эксплуатации материалов дорожных конструкций характеризуются многопараметрическими нестационарными воздействиями внешних сил, приводящих к ухудшению начальных свойств, интенсивность которого зависит от скорости развития дефектов в структуре [98]. Развитие дефектов под влиянием эксплуатационных факторов представляется, как многостадийный процесс на различных масштабных уровнях, конечным результатом которого является достижение материалом критического состояния и потери эксплуатационной пригодности. Разнообразие видов внешних воздействий, оказывающих влияние на процесс деградации структуры дорожных материалов, обуславливает различный механизм разрушения, степень агрессивности и скорость накопления дефектов, которые необходимо учитывать при оценке долговечности. Исходя из этого актуальными вопросами современной науки в области дорожно-строительных материалов могут являться:

1. Установление степени агрессивности эксплуатационных факторов, оказывающих индивидуальное и совместное воздействие. Ранжирование эксплуатационных факторов по степени агрессивности для материала позволит проектировать структуру материала с заданным комплексом свойств, учитывая доминирующий фактор в условиях эксплуатационной среды.

2. Установление механизмов деградации структуры под влиянием эксплуатационных воздействий с учетом нестационарной природы внешних сил.

3. Установление эксплуатационно-временной корреляции воздействия эксплуатационных факторов, которые позволят моделировать процесс в условиях

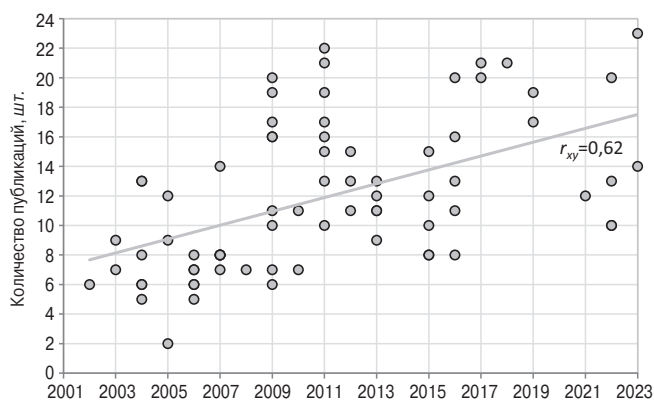


Рис. 6. Изменение количества публикаций при апробации результатов исследований в рамках подготовки диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук

Fig. 6. Change in the number of publications when testing research results in the framework of preparing dissertations for the degree of candidate of technical sciences

эмпирических исследований для дальнейшего прогнозирования интенсивности деградации структуры.

4. Разработка универсального подхода для оценки степени дефектности дорожно-строительного материала, который расширит методологическую базу при разработке долговечных материалов, а также позволит создать цифровой профиль качества автомобильных дорог страны.

Решение указанных задач позволит в процессе разработки новых технических решений учитывать интенсивность деградации структуры материала в предполагаемых условиях эксплуатации. Это позволит использовать инновационные подходы для увеличения способности материалов сопротивляться агрессивным факторам, в том числе способы реализации адаптивной структуры в композитах, которые обладают механизмом реагирования на внешние факторы в критическом состоянии или условиях с целью снижения ущерба.

### Список литературы

1. Руденский А.В. Алгоритм расчета вариаций характеристик асфальтобетонных покрытий в нестационарных эксплуатационных условиях // *Труды ГипродорНИИ*. 1981. Вып. 33. С. 62–69.
2. Руденский А.В. Усталость асфальтобетона – один из важнейших критериев эксплуатационной долговечности асфальтобетонных покрытий // *Труды РосдорНИИ*. 1998. Вып. 9. С. 37–42.
3. Лукашевич В.Н., Погорелый А.В. Увеличение срока службы дорожных покрытий за счет дисперсного армирования и двухстадийной технологии приготовления асфальтобетонных смесей // *Вестник ТГАСУ*. 2001. № 2. С. 45.
4. Лукашевич В.Н. Совершенствование технологии асфальтобетонных смесей для увеличения срока службы дорожных покрытий // *Строительные материалы*. 1999. № 11. С. 5–7.
5. Лукашевич В.Н. Исследование процессов структурообразования асфальтобетонных смесей, приготовленных с использованием двухстадийной технологии // *Известия вузов. Строительство*. 2000. № 2–3. С. 25.

### Заключение

В данной обзорной статье проведен анализ работ многочисленных авторов, опубликованных в рамках апробации результатов, полученных при подготовке диссертаций на соискание ученой степени кандидата и доктора наук, защищенных по научной специальности «Строительные материалы и изделия» в период с 2000 по 2023 г. (рис. 6).

Стоит отметить, что среднее количество публикаций при апробации результатов исследований в рамках подготовки диссертаций на соискание ученой степени кандидата технических наук за исследуемый период увеличилось с 5–6 до 13–23.

Рассмотренные работы направлены на разработку технологических решений и подходов, позволяющих синтезировать материалы с комплексом показателей свойств, обеспечивающих комфорт эксплуатации их в конструкции и длительную стойкость к воздействию агрессивных факторов различной природы. Основной сложностью является наличие конкурирующих свойств, которые при улучшении одних показателей приводят к ухудшению других.

Решение вышеуказанных научных задач позволит сформулировать подходы по прогнозированию скорости разрушения дорожно-строительных материалов от воздействия комплекса эксплуатационных факторов и разрабатывать технические решения, позволяющие синтезировать материалы с длительной способностью сопротивляться агрессивным факторам. Также установление механизма деградации структуры материала и ее интенсивности от степени агрессивности внешних воздействий, позволит проводить оценку ресурса эксплуатируемых конструкций и прогнозировать срок достижения нефункционального состояния.

### References

1. Rudensky A.V. Algorithm for calculating variations in the characteristics of asphalt concrete pavements in non-stationary operating conditions. *Trudy Giprodornii*. 1981. No. 33, pp. 62–69. (In Russian).
2. Rudensky A.V. Fatigue of asphalt concrete is one of the most important criteria for the operational durability of asphalt concrete pavements. *Trudy Rosdornii*. 1998. No. 9, pp. 37–42. (In Russian).
3. Lukashevich V.N., Pogorely A.V. Increasing the service life of road surfaces due to dispersed reinforcement and two-stage technology for the preparation of asphalt concrete mixtures. *Vestnik of the TSUACE*. 2001. No. 2, p. 45. (In Russian).
4. Lukashevich V.N. Improving the technology of asphalt concrete mixtures to increase the service life of road surfaces. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 1999. No. 11, pp. 5–7. (In Russian).
5. Lukashevich V.N. Investigation of the processes of structure formation of asphalt concrete mixtures prepared using two-stage technology. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2000. No. 2–3, p. 25. (In Russian).
6. Zavyalov M.A. Termodinamicheskaya teoriya zhiznennogo tsikla dorozhnogo asfal'tobetonogo

6. Завьялов М.А. Термодинамическая теория жизненного цикла дорожного асфальтобетонного покрытия: Монография. Омск: СибАДИ, 2007. 283 с.
7. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Связь вариации энтропии с функциональным возрастом дорожной одежды // *Транспортное строительство*. 2006. № 4. С. 20–21.
8. Завьялов М.А., Завьялов А.М. Зависимость межремонтных сроков службы асфальтобетонного покрытия от вариации энтропии в процессе строительства // *Известия вузов. Строительство*. 2004. № 9 (549). С. 70–73.
9. Котлярский Э.В. Структурно-механические свойства асфальтобетонных смесей и асфальтобетона // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2008. № 4. С. 4–8.
10. Котлярский Э.В., Гридчин А.М., Лесовик Р.В. Факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации дорожных асфальтобетонных покрытий. Белгород: БГТУ им. Шухова, 2012. 187 с.
11. Ядыкина В.В. Влияние активных поверхностных центров кремнеземсодержащих минеральных компонентов на взаимодействие с битумом // *Известия вузов. Строительство*. 2003. № 9. С. 75–79.
12. Ядыкина В.В. Взаимосвязь донорно-акцепторных свойств поверхности минеральных материалов с их реакционной способностью при формировании органо-минеральных композитов // *Известия вузов. Строительство*. 2004. № 4. С. 46–50.
13. Ядыкина В.В., Гричаников В.А. Влияние активных центров поверхности кремнеземсодержащих фаз на взаимодействие с цементом // *Цемент и его применение*. 2004. № 2. С. 14–15.
14. Генцлер И.В., Карапетян А.С. Модифицирование поверхности минерального заполнителя асфальтобетона // *Известия вузов. Строительство*. 2001. № 1. С. 36–39.
15. Кузнецов Д.А., Ядыкина В.В. Водо- и морозостойкость асфальтобетона на щебне и отсеве дробления кварцитопесчаника // *Известия вузов. Строительство*. 2003. № 3. С. 83–86.
16. Траутвайн А.И., Ядыкина В.В., Гридчин А.М. Повышение реакционной способности наполнителей в результате помола // *Строительные материалы*. 2010. № 12. С. 82–85.
17. Высоцкая М.А. Влияние количества извести в минеральном порошке на свойства асфальтобетона // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2003. № 5. С. 240–243.
18. Высоцкая М.А., Ядыкина В.В., Кузнецов Д.А. Известь в асфальтобетоне – такая простая и сложная // *Строительные материалы*. 2006. № 3. С. 56–58.
19. Битуев А.В., Босхолов К.А. Кремнеземсодержащие минеральные порошки для асфальтобетона // *Вестник ТГАСУ*. 2007. № 3 (16). С. 210–212.
20. Ядыкина В.В., Высоцкий А.В. Влияние кислых железосодержащих минеральных материалов на коррозионную устойчивость асфальтобетона // *Коррозия: материалы, защита*. 2004. № 6. С. 43.
21. Романов С.И., Остроухов С.Б., Грамматиков Г.А., Лескин А.И. Свойства карбидной извести и ее pokrytiya [Thermodynamic theory of the life cycle of asphalt concrete pavement]. Monograph. Omsk. SibADI. 2007. 283 p.
7. Zavyalov M.A., Zavyalov A.M. Relationship between entropy variation and the functional age of pavement. *Transportnoye stroitel'stvo*. 2006. No. 4, pp. 20–21. (In Russian).
8. Zavyalov M.A., Zavyalov A.M. Dependence of overhaul service life of asphalt concrete pavement on entropy variation during construction. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2004. No. 9 (549), pp. 70–73. (In Russian).
9. Kotlyarsky E.V. Structural and mechanical properties of asphalt mixtures and asphalt concrete. *Vestnik of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2008. No. 4, pp. 4–8. (In Russian).
10. Kotlyarsky E.V., Gridchin A.M., Lesovik R.V. Faktory, sposobstvuyushchiye razrusheniyu struktury asfal'tobetona v protsesse ekspluatatsii dorozhnykh asfal'tobetonnykh pokrytiy [Factors contributing to the destruction of the structure of asphalt concrete during the operation of road asphalt concrete pavements]. Belgorod: BSTU named after V.G. Shukhov. 2012. 187 p.
11. Yadykina V.V. Influence of active surface centers of silica-containing mineral components on interaction with bitumen. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2003. No. 9, pp. 75–79. (In Russian).
12. Yadykina V.V. The relationship of donor-acceptor properties of the surface of mineral materials with their reactivity in the formation of organo-mineral composites. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2004. No. 4, pp. 46–50. (In Russian).
13. Yadykina V.V., Grichanikov V.A. Influence of active centers of the surface of silica-containing phases on interaction with cement. *Tsement i ego primeneniye*. 2004. No. 2, pp. 14–15. (In Russian).
14. Gentsler I.V., Karapetyan A.S. Modification of the surface of the mineral aggregate of asphalt concrete. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2001. No. 1, pp. 36–39. (In Russian).
15. Kuznetsov D.A., Yadykina V.V. Water and frost resistance of asphalt concrete on crushed stone and screening of quartzite sandstone crushing. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2003. No. 3, pp. 83–86. (In Russian).
16. Trautvain A.I., Yadykina V.V., Gridchin A.M. Increasing the reactivity of fillers as a result of grinding. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 12, pp. 82–85. (In Russian).
17. Vysotskaya M.A. Influence of the amount of lime in mineral powder on the properties of asphalt concrete. *Vestnik of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2003. No. 5, pp. 240–243. (In Russian).
18. Vysotskaya M.A., Yadykina V.V., Kuznetsov D.A. Lime in asphalt concrete – so simple and complex. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 3, pp. 56–58. (In Russian).
19. Bituev A.V., Boskholov K.A. Silica-containing mineral powders for asphalt concrete. *Vestnik of the TSUACE*. 2007. No. 3 (16), pp. 210–212. (In Russian).
20. Yadykina V.V., Vysotsky A.V. Influence of acidic iron-containing mineral materials on the corrosion

- взаимодействия с битумом // *Вестник ВолгГАСУ. Сер. Естественные науки*. 2006. № 5. С. 116–119.
22. Ядыкина В.В., Куцына Н.П. Применение волоконистых отходов промышленности в производстве щебеночно-мастичных асфальтобетонов // *Строительные материалы*. 2007. № 5. С. 28–29.
  23. Ядыкина В.В., Куцына Н.П., Высоцкая М.А., Траутвайн А.И. Щебеночно-мастичный асфальтобетон на основе техногенного сырья // *Известия вузов. Строительство*. 2007. № 9 (585). С. 43–46.
  24. Гридчин А.М., Коротаев А.П., Ядыкина В.В., Кузнецов Д.А., Высоцкая М.А. Дорожные композиты на основе дисперсного вспученного перлита // *Строительные материалы*. 2009. № 5. С. 42–44.
  25. Гридчин А.М., Ядыкина В.В., Высоцкая М.А., Коротаев А.П. Асфальтовяжущее на основе пористого минерального порошка // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2014. № 3 (182). С. 15–16.
  26. Галдина В.Д., Надькто Г.И., Подрез Г.А. Физико-механические и деформативные свойства асфальтобетонов на пористом заполнителе // *Вестник СибАДИ*. 2009. Вып. 2 (12). С. 39–43.
  27. Солдатов А.А., Борисенко Ю.Г. Структуры поверхности пористых порошков на основе отсевов дробления керамзита и их адсорбционная активность // *Строительные материалы*. 2011. № 6. С. 36–38.
  28. Агейкин В.Н., Свинтицких Л.Е., Шабанова Т.Н., Ключов А.А. Исследование влияния вспученного вермикулитового песка на свойства битумных композиций и асфальтобетона // *Строительные материалы*. 2003. № 7. С. 40–43.
  29. Свинтицких Л.Е., Шабанова Т.Н., Ключов А.А., Агейкин В.Н. Влияние дисперсности вспученного вермикулита на свойства битумного вяжущего и асфальтобетона // *Строительные материалы*. 2004. № 9. С. 32–33.
  30. Ядыкина В.В., Лукаш Е.А. Изменение поверхностных свойств наполнителей и цементных композитов под воздействием ультрафиолетового облучения // *Строительные материалы*. 2007. № 8. С. 50–51.
  31. Ядыкина В.В., Лукаш Е.А. Повышение качества асфальтобетона методом УФ-активации минеральных порошков из техногенного сырья Курской магнитной аномалии // *Известия вузов. Строительство*. 2007. № 12 (588). С. 44–48.
  32. Разинкова О.А., Малкандуев Ю.А., Маришев М.Х., Слонов А.Л. Пути использования отвальных кеков гидрометаллургии в производстве строительных материалов и изделий // *Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура*. 2010. № 19 (38). С. 64–68.
  33. Хафизов Э.Р. Влияние вязкости битума и концентрации термоэластопласта на физико-механические показатели битума: *Сборник научных трудов*. Казань, 2001. С. 86–89.
  34. Чернов С.А. Исследование устойчивости к старению комплексно-модифицированных холодных асфальтобетонных смесей // *Строительство и реконструкция*. 2011. № 2 (34). С. 110–115.
  - resistance of asphalt concrete. *Korroziya: materialy, zashchita*. 2004. No. 6, p. 43. (In Russian).
  21. Romanov S.I., Ostroukhov S.B., Grammatikov G.A., Leskin A.I. Properties of carbide lime and its interaction with bitumen. *Vestnik of the VolgSUACE*. 2006. No. 5, pp. 116–119. (In Russian).
  22. Yadykina V.V., Kutsyna N.P. The use of fibrous industrial waste in the production of crushed stone-mastic asphalt concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 5, pp. 28–29. (In Russian).
  23. Yadykina V.V., Kutsyna N.P., Vysotskaya M.A., Trautvain A.I. Crushed-stone-mastic asphalt concrete based on technogenic raw materials. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2007. No. 9 (585), pp. 43–46. (In Russian).
  24. Gridchin A.M., Korotaev A.P., Yadykina V.V., Kuznetsov D.A., Vysotskaya M.A. Road composites based on dispersed expanded perlite. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 5, pp. 42–44. (In Russian).
  25. Gridchin A.M., Yadykina V.V., Vysotskaya M.A., Korotaev A.P. Asphalt binder based on porous mineral powder. *Stroitel'nye Materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. 2014. No. 3 (182), pp. 15–16. (In Russian).
  26. Galdina V.D., Nadykto G.I., Podrez G.A. Physical-mechanical and deformative properties of asphalt concrete on porous aggregate. *Vestnik of the SibADI*. 2009. Iss. 2 (12), pp. 39–43. (In Russian).
  27. Soldatov A.A., Borisenko Yu.G. Structures of the surface of porous powders based on screenings of expanded clay crushing and their adsorption activity. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 6, pp. 36–38. (In Russian).
  28. Ageikin V.N., Svintitskikh L.E., Shabanova T.N., Klyusov A.A. Study of the effect of expanded vermiculite sand on the properties of bituminous compositions and asphalt concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2003. No. 7, pp. 40–43. (In Russian).
  29. Svintitskikh L.E., Shabanova T.N., Klyusov A.A., Ageikin V.N. Influence of dispersity of expanded vermiculite on the properties of bituminous binder and asphalt concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 9, pp. 32–33. (In Russian).
  30. Yadykina V.V., Lukash E.A. Changes in the surface properties of fillers and cement composites under the influence of ultraviolet irradiation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2007. No. 8, pp. 50–51. (In Russian).
  31. Yadykina V.V., Lukash E.A. Improving the quality of asphalt concrete by UV-activation of mineral powders from technogenic raw materials of the Kursk magnetic anomaly. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2007. No. 12 (588), pp. 44–48. (In Russian).
  32. Razinkova O.A., Malkanduev Yu.A., Marishev M.Kh., Slonov A.L. Ways of using dump cakes of hydrometallurgy in the production of building materials and products. *Vestnik of the VolgSUACE*. 2010. No. 19 (38), pp. 64–68. (In Russian).
  33. Khafizov E.R. Influence of bitumen viscosity and thermoplastic elastomer concentration on the physical and mechanical properties of bitumen. *Collection of*

35. Чернов С.А., Мардиросова И.В. Комплексное модифицированное вяжущее для холодных асфальтобетонных смесей // *Дороги и мосты*. 2010. № 1 (23). С. 228–238.
36. Дараган Н.С., Ильин С.В. Взаимосвязь качества асфальтобетона с адгезионно-когезионными свойствами битума. В сборнике: *Новые технологии, конструкции и материалы в строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог. Материалы Всероссийской научно-технической конференции*. Краснодар, 2002. С. 133–136.
37. Балабанов В.Б., Коновалов Н.П., Самбаров Н.Н. Изменение свойств полимербитумных вяжущих при длительном хранении // *Строительные материалы*. 2004. № 8. С. 45–47.
38. Черсков Р.М. Применение каучуко-полиолефинового модификатора (КПМ) как способ повышения сдвиго- и трещиностойкости асфальтобетонов // *Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура*. 2009. № 13 (32). С. 100–104.
39. Строкин А.С., Калгин Ю.И. Полимерное поверхностно-активное вещество «Мобит» для повышения деформативно-прочностных характеристик асфальтобетона каркасной структуры и долговечности дорожных покрытий // *Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура*. 2008. № 11 (30). С. 52–56.
40. Ядыкина В.В., Гридчин А.М., Высоцкая М.А., Якимович И.В. Эффективность применения адгезионной добавки ДАД-1 // *Строительные материалы*. 2009. № 7. С. 14–17.
41. Котляревский А.А., Королев С.А., Вовко В.В., Акчурин Т.К. Оценка эффективности ремонта и строительства автомобильных дорог на примере технологии литого асфальтобетона // *Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура*. 2006. № 6. С. 125–127.
42. Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Хакимуллин Ю.Н., Хозин В.Г. Модифицированные битумные вяжущие строительного назначения // *Строительные материалы*. 2009. № 8. С. 50–51.
43. Аюпов Д.А., Мурафа А.В., Хакимуллин Ю.Н. Модификация дорожных битумов радиационными регенератами бутиловых резин // *Строительные материалы*. 2009. № 12. С. 44–45.
44. Иванова Т.Л., Прокопец В.С. Механоактивированный резиновый порошок для асфальтобетонов // *Строительные материалы*. 2008. № 8. С. 82–85.
45. Иванова Т.Л., Прокопец В.С. Математическая модель эффективности механоактивационных процессов в строительных материалах // *Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века*. 2005. № 8. С. 71–73.
46. Чан Н.Х., Мардиросова И.В., Балабанов О.А. Комплексно-модифицированный асфальтобетон повышенной стойкости к воздействиям жаркого и влажного климата // *Известия вузов. Строительство*. 2011. № 7 (631). С. 54–61.
47. Горбатовский А.А., Дронов С.В., Иванов А.А. Оптимальная температура смешивания компонентов при изготовлении полимерно-битумных композиций // *Строительные материалы*. 2011. № 1. С. 10–13.
- scientific papers*. Kazan. KazGASA. 2001, pp. 86–89. (In Russian).
34. Chernov S.A. Investigation of the resistance to aging of complex-modified cold asphalt concrete mixes. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2011. No. 2 (34), pp. 110–115. (In Russian).
35. Chernov S.A., Mardirosova I.V. Complex modified binder for cold asphalt mixes. *Dorogi i mosty*. 2010. No. 1 (23), pp. 228–238. (In Russian).
36. Daragan N.S., Ilyin S.V. The relationship between the quality of asphalt concrete and the adhesive-cohesive properties of bitumen. *In the collection: New technologies, structures and materials in the construction, reconstruction and repair of highways. Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference*. Krasnodar. 2002, pp. 133–136. (In Russian).
37. Balabanov V.B., Konovalov N.P., Sambarov N.N. Changes in the properties of polymer bitumen binders during long-term storage. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2004. No. 8, pp. 45–47. (In Russian).
38. Cherskov R.M. The use of rubber-polyolefin modifier as a way to improve the shear and crack resistance of asphalt concrete. *Vestnik of the VolgSUACE*. 2009. No. 13 (32), pp. 100–104. (In Russian).
39. Strokin A.S., Kalgin Yu.I. Polymer surfactant “Mobit” to improve the deformation-strength characteristics of asphalt concrete frame structure and durability of road surfaces. *Vestnik of the VolgSUACE*. 2008. No. 11 (30), pp. 52–56. (In Russian).
40. Yadykina V.V., Gridchin A.M., Vysotskaya M.A., Yakimovich I.V. Efficiency of application of the adhesive additive DAD-1. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2009. No. 7, pp. 14–17. (In Russian).
41. Kotlyarevsky A.A., Korolev S.A., Vovko V.V., Akchurin T.K. Evaluation of the effectiveness of repair and construction, highways on the example of cast asphalt concrete technology *Vestnik of the VolgSUACE*. 2006. No. 6, pp. 125–127. (In Russian).
42. Ayupov D.A., Murafa A.V., Khakimullin Yu.N., Khozin V.G. Modified bituminous binders for construction purposes. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2009. No. 8, pp. 50–51. (In Russian).
43. Ayupov D.A., Murafa A.V., Khakimullin Yu.N. Modification of road bitumen by radiation regenerates of butyl rubbers. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2009. No. 12, pp. 44–45. (In Russian).
44. Ivanova T.L., Prokopets V.S. Mechanically activated rubber powder for asphalt concrete. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2008. No. 8, pp. 82–85. (In Russian).
45. Ivanova T.L., Prokopets V.S. Mathematical model of the efficiency of mechanoactivation processes in building materials. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye, tekhnologii XXI veka*. 2005. No. 8, pp. 71–73. (In Russian).
46. Chan N.Kh., Mardirosova I.V., Balabanov O.A. Complex-modified asphalt concrete of increased resistance to the effects of a hot and humid climate. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2011. No. 7 (631), pp. 54–61. (In Russian).

48. Патент РФ 2160237. *Способ регенерации асфальтобетона* / Илиополов С.К., Максименко В.А., Углова Е.В., Мардиросова И.В., Шитиков С.В., Кучеров В.А. Заявл. 27.05.1999. Опубл. 10.12.2000.
49. Илиополов С.К., Котов В.Л., Мардиросова И.В. Использование старого асфальтобетонного лома в литых смесях. *Сборник материалов международной научно-практической конференции «Строительство-2002»*. Ч. 1. Ростов н/Д, 2002. С. 11–12.
50. Петрович П.П., Щелкунов В.В., Фадеев М.В., Дмитричев А.В., Лупанов А.П., Лупанов В.А. Применение гранулята в укатываемом бетоне. *Тезисы докладов Международного семинара «Перспективы и эффективность применения цементобетона в дорожном строительстве»*. МАДИ–ГТУ. М., 2002. С. 49–53.
51. Евтеева С.М. Регенерированный асфальт с дисперсным сланцевым битумом // *Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура*. 2008. № 11 (30). С. 91–96.
52. Васильев Ю.Э., Юмашев В.М., Субботин И.В. Механохимическая активация битума // *Промышленное и гражданское строительство*. 2010. № 2. С. 38–39.
53. Пронин С.А. Определение изменений дисперсности механоактивированного битума и водостойкости образцов асфальтобетона на его основе // *Вестник ВолгГАСУ. Сер. Строительство и архитектура*. 2002. Вып. 2 (5). С. 245–248.
54. Романов С.И., Пронин С.А. Выбор режима низкотемпературной механоактивации битума // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2002. № 3. С. 15–16.
55. Doroshev V.F., Petcheniy B.G., Skorikov S.V. Nuevos metodos de reciclaje de los asfaltos envejecidos y carpetas asfalticas. 2-as jornadas internationals del asfalto. Bucaramanga, Colombia. 2000, pp. 97–102.
56. Печеный Б.Г., Тыртышов Ю.П., Дорошев В.Ф., Санабрия Л.Э. Старение и трещинообразование в асфальтобетонных покрытиях в условиях России и Колумбии. В кн.: *Научные направления СевКавГТУ*. Ставрополь, 2001. С. 226–231.
57. Николаева Л.А., Копылов В.Е., Буренина О.Н., Попов С.Н., Портнягина В.В. Использование модифицированных асфальтобетонов для развития транспортной инфраструктуры горнодобывающих предприятий Якутии // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014. № 9. С. 398–404.
58. Копылов В.Е., Буренина О.Н. Минеральное сырье Республики Саха (Якутия) для производства асфальтобетонов // *Интернет-журнал Науковедение*. 2016. Т. 8. № 1 (32). С. 42.
59. Буренина О.Н., Николаева Л.А., Копылов В.Е. Разработка модифицированных асфальтобетонных смесей для строительства автомобильных дорог в условиях севера // *Дороги и мосты*. 2013. № 1 (29). С. 205–211.
60. Лебедев М.С., Строкова В.В., Жерновский И.В., Потапова И.Ю. Изменение свойств минеральных порошков из алюмосиликатного сырья под влиянием термической модификации // *Строительные материалы*. 2012. № 9. С. 68–71.
47. Gorbatovsky A.A., Dronov S.V., Ivanov A.A. Optimal mixing temperature of components in the manufacture of polymer-bitumen compositions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 1, pp. 10–13. (In Russian).
48. Patent RF 2160237. *Sposob regeneratsii asfal'tobetona* [Asphalt concrete regeneration method]. Iliopolov S.K., Maksimenko V.A., Uglova E.V., Mardirosova I.V., Shitikov S.V., Kucherov V.A. Declared 27.05.1999. Published 10.12.2000. (In Russian).
49. Iliopolov S.K., Kotov V.L., Mardirosova I.V. Use of old asphalt concrete scrap in cast mixtures. *Collection of materials from the international scientific and practical conference "Construction-2002"*. Part 1. Rostov-on-Don. 2002, pp. 11–12. (In Russian).
50. Petrovich P.P., Shchelkunov V.V., Fadeev M.V., Dmitrichev A.V., Lupanov A.P., Lupanov V.A. Application of granulate in rolled concrete. *Abstracts of the reports of the International Seminar "Prospects and Efficiency of Using Cement Concrete in Road Construction"*. MADI–STU. Moscow. 2002, pp. 49–53. (In Russian).
51. Evteeva S.M. Reclaimed asphalt with dispersed shale bitumen. *Vestnik of the VolgSUACE*. 2008. No. 11 (30), pp. 91–96. (In Russian).
52. Vasiliev Yu.E., Yumashev V.M., Subbotin I.V. Mechanochemical activation of bitumen. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2010. No. 2, pp. 38–39. (In Russian).
53. Pronin S.A. Determination of changes in the dispersion of mechanically activated bitumen and water resistance of asphalt concrete samples based on it. *Vestnik of the VolgSUACE*. 2002. Iss. 2 (5), pp. 245–248. (In Russian).
54. Romanov S.I., Pronin S.A. Selection of the mode of low-temperature mechanical activation of bitumen. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*. 2002. No. 3, pp. 15–16. (In Russian).
55. Doroshev V.F., Petcheniy B.G., Skorikov S.V. Nuevos metodos de reciclaje de los asfaltos envejecidos y carpetas asfalticas. 2-as jornadas internationals del asfalto. Bucaramanga, Colombia. 2000, pp. 97–102. (In Spanish).
56. Pecheniy B.G., Tyrtyshev Yu.P., Doroshev V.F., Sanabria L.E. Aging and cracking in asphalt concrete pavements in Russia and Colombia. In the book: *Scientific directions of SevKavSTU*. Stavropol. 2001, pp. 226–231. (In Russian).
57. Nikolaeva L.A., Kopylov V.E., Burenina O.N., Popov S.N., Portnyagina V.V. The use of modified asphalt concrete for the development of the transport infrastructure of mining enterprises in Yakutia. *Gornyye informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014. No. 9, pp. 398–404. (In Russian).
58. Kopylov V.E., Burenina O.N. Mineral raw materials of the Republic of Sakha (Yakutia) for the production of asphalt concrete. *Internet-zhurnal Naukovedeniye*. 2016. Vol. 8. No. 1 (32), p. 42. (In Russian).
59. Burenina O.N., Nikolaeva L.A., Kopylov V.E. Development of modified asphalt concrete mixtures for the construction of highways in the north. *Dorogi i mosty*. 2013. No. 1 (29), pp. 205–211. (In Russian).
60. Lebedev M.S., Strokova V.V., Zhernovsky I.V., Potapova I.Yu. Changes in the properties of mineral

61. Лебедев М.С., Строкова В.В., Потапова И.Ю., Котлярский Э.В. Влияние добавок низкокальциевой золы-уноса ТЭС на характеристики дорожного битумного вяжущего // *Строительные материалы*. 2014. № 11. С. 8–11.
62. Высоцкая М.А., Фёдоров М.Ю., Кузнецов Д.А. Адсорбционная и структурирующая активность перлита как наполнителя для асфальтобетона // *Известия вузов. Строительство*. 2012. № 7–8 (643–644). С. 21–26.
63. Высоцкая М.А., Кузнецов Д.А., Фёдоров М.Ю. Оценка качества битумо-минеральных композиций с применением пористых наполнителей // *Дороги и мосты*. 2012. № 1 (27). С. 240–252.
64. Высоцкая М.А., Фёдоров М.Ю. Разработка наномодифицированного наполнителя для асфальтобетонных смесей // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2013. № 6. С. 61–65.
65. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Разработка наномодификаторов и исследование их влияния на свойства битумных вяжущих веществ // *Вестник МГСУ*. 2013. № 10. С. 131–139.
66. Иноземцев С.С., Поздняков М.К., Королев Е.В. Исследование адсорбционно-сольватного слоя битума на поверхности минерального порошка // *Вестник МГСУ*. 2012. № 11. С. 159–167.
67. Королев Е.В., Тарасов Р.В., Макарова Л.В., Иноземцев С.С., Смирнов В.А. Моделирование битумной композиции со структурными единицами нанометрических размеров // *Региональная архитектура и строительство*. 2012. № 3. С. 26–32.
68. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Эксплуатационные свойства наномодифицированных щебеночно-мастичных асфальтобетонов // *Вестник МГСУ*. 2015. № 3. С. 29–39.
69. Шестаков Н.И., Урханова Л.А., Буянтуев С.Л., Семенов А.П., Смирнягина Н.Н. Асфальтобетон с использованием углеродных наномодификаторов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2015. № 6. С. 21–24.
70. Урханова Л.А., Шестаков Н.И., Могнонов Д.М., Буянтуев С.Л., Аюрова О.Ж. Влияние нанодисперсных добавок на физико-механические и гидрофизические свойства асфальтобетона // *Вопросы материаловедения*. 2015. № 2 (82). С. 54–59.
71. Урханова Л.А., Шестаков Н.И., Буянтуев С.Л., Доржиева Е.В. Использование углеродных наноматериалов для получения эффективного дорожно-строительного композита // *Вестник ВСГУТУ*. 2014. № 6 (51). С. 67–72.
72. Высоцкая М.А., Русина С.Ю. О перспективах использования нанотрубок при приготовлении полимерно-битумных вяжущих // *Дороги и мосты*. 2014. № 2 (32). С. 171–187.
73. Шеховцова С.Ю., Высоцкая М.А. Наноразмерный модификатор как инструмент повышения колееустойчивости асфальтобетона от пластических деформаций // *Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура*. 2018. № 51 (70). С. 120–129.
74. Алексеенко В.В., Житов Р.Г., Кижняев В.Н., Митюгин А.В. Новые технологии получения powders from aluminosilicate raw materials under the influence of thermal modification. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2012. No. 9, pp. 68–71. (In Russian).
61. Lebedev M.S., Strokova V.V., Potapova I.Yu., Kotlyarsky E.V. Influence of additives of low-calcium fly ash from thermal power plants on the characteristics of road bituminous binder. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 11, pp. 8–11. (In Russian).
62. Vysotskaya M.A., Fedorov M.Yu., Kuznetsov D.A. Adsorption and structuring activity of perlite as a filler for asphalt concrete. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2012. No. 7–8 (643–644), pp. 21–26. (In Russian).
63. Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.A., Fedorov M.Yu. Evaluation of the quality of bitumen-mineral composites using porous fillers. *Dorogi i mosty*. 2012. No. 1 (27), pp. 240–252. (In Russian).
64. Vysotskaya M.A., Fedorov M.Yu. Development of a nanomodified filler for asphalt concrete mixtures. *Vestnik of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2013. No. 6, pp. 61–65. (In Russian).
65. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Development of nanomodifiers and study of their influence on the properties of bituminous binders. *Vestnik of the MSUCE*. 2013. No. 10, pp. 131–139. (In Russian).
66. Inozemtsev S.S., Pozdnyakov M.K., Korolev E.V. Investigation of the adsorption-solvation layer of bitumen on the surface of mineral powder. *Vestnik of the MSUCE*. 2012. No. 11, pp. 159–167. (In Russian).
67. Korolev E.V., Tarasov R.V., Makarova L.V., Inozemtsev S.S., Smirnov V.A. Modeling of bituminous composition with structural units of nanometric dimensions. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2012. No. 3, pp. 26–32. (In Russian).
68. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Operational properties of nanomodified crushed stone-mastic asphalt concrete. *Vestnik of the MSUCE*. 2015. No. 3, pp. 29–39. (In Russian).
69. Shestakov N.I., Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Semenov A.P., Smirnyagina N.N. Asphalt concrete with the use of carbon nanomodifiers. *Vestnik of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2015. No. 6, pp. 21–24. (In Russian).
70. Urkhanova L.A., Shestakov N.I., Mognonov D.M., Buyantuev S.L., Ayurova O.Zh. Influence of nanodispersed additives on the physical-mechanical and hydrophysical properties of asphalt concrete. *Voprosy materialovedeniya*. 2015. No. 2 (82), pp. 54–59. (In Russian).
71. Urkhanova L.A., Shestakov N.I., Buyantuev S.L., Dorzhieva E.V. The use of carbon nanomaterials to obtain an effective road-building composite. *Vestnik of the ESSUTM*. 2014. No. 6 (51), pp. 67–72. (In Russian).
72. Vysotskaya M.A., Rusina S.Yu. On the prospects for the use of nanotubes in the preparation of polymer-bitumen binders. *Dorogi i mosty*. 2014. No. 2 (32), pp. 171–187. (In Russian).
73. Shekhovtsova S.Yu., Vysotskaya M.A. Nanoscale modifier as a tool to improve the rutting resistance of

- битумно-резиновых композиционных вяжущих для дорожного строительства // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2010. № 1. С. 25.
75. Житов Р.Г., Кижняев В.Н., Алексеенко В.В., Смирнов А.И. Битумно-резиновые композиционные связующие для производства асфальтобетонов // *Журнал прикладной химии*. 2011. Т. 84. № 11. С. 1898–1902.
  76. Соломатин Д.В., Кузнецова О.П., Зверева У.Г., Рочев В.Я., Бекешев В.Г., Прут Э.В. Механизм образования тонкодисперсных резиновых порошков на основе тройных этилен-пропилен-диеновых вулканизатов // *Химическая физика*. 2016. Т. 35. № 7. С. 60–70.
  77. Соломатин Д.В., Кузнецова О.П., Зверева У.Г., Прут Э.В. Механические и реологические свойства композиций на основе изотактического полипропилена и резинового порошка // *Физико-химия полимеров: синтез, свойства и применение*. 2015. № 21. С. 236–241.
  78. Христофорова А.А., Филиппов С.Э., Лебедев А.В., Гоголев И.Н., Соколова М.Д., Заровняев Б.Н. Перспективы применения резиновой крошки в составе дорожных покрытий глубоких карьеров // *Политематический сетевой электронный научный журнал КубГАУ*. 2011. № 74. С. 137–147.
  79. Христофорова А.А., Соколова М.Д. Резино-битумные композиции для дорожного строительства в районах с холодным климатом // *Вестник машиностроения*. 2009. № 7. С. 89–92.
  80. Христофорова А.А., Соколова М.Д. Механоактивационный способ обработки измельченных вулканизатов // *Химия в интересах устойчивого развития*. 2009. Т. 17. № 4. С. 435–438.
  81. Асадуллина З.У., Яковлев В.В. Вовлечение отходов кровельных материалов в производство битума // *Безопасность жизнедеятельности*. 2012. № 11 (143). С. 53–56.
  82. Асадуллина З.У., Яковлев В.В. Подбор рецептуры битумного вяжущего с добавкой кровельной крошки и особенности технологии приготовления асфальтобетонных смесей // *Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело»*. 2013. № 1. С. 383–390.
  83. Гладких В.А., Королев Е.В. Снижение эмиссии сероводорода и диоксида серы из серобитумных материалов // *Интернет-вестник ВолгГАСУ*. 2014. № 2 (33). С. 3.
  84. Ле Х.Т., Гладких В.А., Королев Е.В. Эффективность различных нейтрализаторов эмиссии токсичных газов в технологии сероасфальтобетона // *Строительство и реконструкция*. 2020. № 2 (88). С. 143–150.
  85. Королев Е.В., Гришина А.Н., Гладких В.А., Ле Т.Х. Модель формирования дополнительного объема порового пространства в сероасфальтобетонах // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 7. С. 16–21.
  86. Ле Х.Т., Гладких В.А., Королев Е.В., Гришина А.Н. Водостойкость сероасфальтобетона. Результаты исследования и особенности определения // *Строительные материалы*. 2021. № 3. asphalt concrete from plastic deformations. *Vestnik of the VolgSUACE*. 2018. No. 51 (70), pp. 120–129. (In Russian).
  74. Alekseenko V.V., Zhitov R.G., Kizhnyaev V.N., Mityugin A.V. New technologies for producing bitumen-rubber composite binders for road construction. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*. 2010. No. 1. P. 25. (In Russian).
  75. Zhitov R.G., Kizhnyaev V.N., Alekseenko V.V., Smirnov A.I. Bitumen-rubber composite binders for the production of asphalt concrete. *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2011. V. 84. No. 11, pp. 1898–1902. (In Russian).
  76. Solomatin D.V., Kuznetsova O.P., Zvereva U.G., Rochev V.Ya., Bekeshev V.G., Prut E.V. The mechanism of formation of fine rubber powders based on triple ethylene-propylene-diene vulcanizates. *Khimicheskaya fizika*. 2016. Vol. 35. No. 7, pp. 60–70. (In Russian).
  77. Solomatin D.V., Kuznetsova O.P., Zvereva U.G., Prut E.V. Mechanical and rheological properties of compositions based on isotactic polypropylene and rubber powder. *Fiziko-khimiya polimerov: sintez, svoystva i primeneniye*. 2015. No. 21, pp. 236–241. (In Russian).
  78. Khristoforova A.A., Filippov S.E., Lebedev A.V., Gogolev I.N., Sokolova M.D., Zarovnyayev B.N. Prospects for the use of crumb rubber in the composition of road surfaces of deep quarries. *Polythematic network electronic scientific journal of the KubSCU*. 2011. No. 74, pp. 137–147. (In Russian).
  79. Khristoforova A.A., Sokolova M.D. Rubber-bitumen compositions for road construction in areas with a cold climate. *Vestnik mashinostroeniya*. 2009. No. 7, pp. 89–92. (In Russian).
  80. Khristoforova A.A., Sokolova M.D. Mechanical activation method for processing crushed vulcanizates. *Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya*. 2009. Vol. 17. No. 4, pp. 435–438. (In Russian).
  81. Asadullina Z.U., Yakovlev V.V. Involvement of waste roofing materials in the production of bitumen. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2012. No. 11 (143), pp. 53–56. (In Russian).
  82. Asadullina Z.U., Yakovlev V.V. Selection of the bituminous binder formulation with the addition of roofing chips and features of the technology for the preparation of asphalt concrete mixtures. *Elektronnyy nauchnyy zhurnal "Neftegazovoye delo"*. 2013. No. 1, pp. 383–390. (In Russian).
  83. Gladkikh V.A., Korolev E.V. Reducing the emission of hydrogen sulfide and sulfur dioxide from sulfur-bitumen materials. *Internet-vestnik of the VolgSUSCE*. 2014. No. 2 (33). P. 3. (In Russian).
  84. Le Kh.T., Gladkikh V.A., Korolev E.V. Efficiency of various toxic gas emission neutralizers in sulfur asphalt concrete technology. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2020. No. 2 (88), pp. 143–150. (In Russian).
  85. Korolev E.V., Grishina A.N., Gladkikh V.A., Le T.Kh. Model of formation of an additional volume of pore space in sulfur asphalt concrete. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2021. No. 7, pp. 16–21. (In Russian).

- С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-39-44>
87. Соломенцев А.Б., Баранов И.А. Структура дорожного битума и его взаимодействие со стабилизирующими волокнистыми добавками для щебеночно-мастичного асфальтобетона // *Строительство и реконструкция*. 2013. № 4 (48). С. 75–83.
  88. Марков А.Ю., Безродных А.А., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Дмитриева Т.В., Степаненко М.А. Прогнозирование прочности портландцемента в присутствии топливных зол // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2020. № 3. С. 26–33.
  89. Марков А.Ю., Строкова В.В., Маркова И.Ю. Оценка свойств топливных зол как компонентов композиционных материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 77–83. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83>
  90. Лесовик Р.В., Агеева М.С., Казлитина О.В., Сопин Д.М., Митрохин А.А. К вопросу об оптимизации структуры высокопрочного фибробетона за счет использования нанодисперсного модификатора // *Вестник ВСГУТУ*. 2017. № 4 (67). С. 64–70.
  91. Черкашин Ю.Н., Лесовик Р.В., Сопин Д.С. Высококачественный бетон с использованием сырьевых ресурсов КМА // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2009. № 4. С. 21–24.
  92. Захезин А.Е., Черных Т.Н., Трофимов Б.Я., Крамар Л.Я. Влияние редиспергируемых порошков на свойства цементных строительных растворов // *Строительные материалы*. 2004. № 10. С. 6–7.
  93. Чан Т.М., Коровяков В.Ф. Самоуплотняющиеся бетонные смеси для дорожного строительства // *Вестник МГСУ*. 2012. № 3. С. 131–137.
  94. Королев Е.В., Баженов Ю.М., Альбакасов А.И. Радиационно-защитные и химически стойкие серные строительные материалы. Пенза; Оренбург: ИПК ОГУ, 2010. 364 с.
  95. Дровалева О.В. Лабораторные режимы усталостных испытаний асфальтобетона с учетом эксплуатационных условий работы материала в покрытии // *Вестник ТГАСУ*. 2009. № 1 (22). С. 159–168.
  96. Дровалева О.В. Оценка усталостной долговечности асфальтобетона в условиях воздействия циклических нагрузок при интенсивном скоростном транспортном потоке // *Известия вузов. Строительство*. 2009. № 11–12 (611–612). С. 65–71.
  97. Траутвайн А.И., Акимов А.Е., Денисов В.П., Лашин М.В. Особенности метода объемного проектирования асфальтобетона по технологии Superpave // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2019. № 3. С. 8–14.
  98. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Агрессивность эксплуатационных условий дорожно-климатических зон России // *Наука и техника в дорожной отрасли*. 2019. № 3. С. 22–26.
  86. Le H.T., Gladkikh V.A., Korolev E.V., Grishina A.N. Moisture resistance of sulfur-extended asphalt concrete. Results of the study and features of definition. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 3, pp. 39–44. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-789-3-39-44>
  87. Solomentsev A.B., Baranov I.A. The structure of road bitumen and its interaction with stabilizing fibrous additives for crushed-stone-mastic asphalt concrete. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2013. No. 4 (48), pp. 75–83. (In Russian).
  88. Markov A.Yu., Bezrodnykh A.A., Markova I.Yu., Strokova V.V., Dmitrieva T.V., Stepanenko M.A. Forecasting the strength of Portland cement in the presence of fuel ash. *Vestnik of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2020. No. 3, pp. 26–33. (In Russian).
  89. Markov A.Yu., Strokova V.V., Markova I.Yu. Evaluation of properties of fuel ashes as components of composite materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 4, pp. 77–83. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-77-83> (In Russian).
  90. Lesovik R.V., Ageeva M.S., Kazlitina O.V., Sopin D.M., Mitrokhin A.A. On the issue of optimizing the structure of high-strength fiber-reinforced concrete through the use of a nanodispersed modifier. *Vestnik of the ESSUTM*. 2017. No. 4 (67), pp. 64–70. (In Russian).
  91. Cherkashin Yu.N., Lesovik R.V., Sopin D.S. High-quality concrete using raw material resources of the KMA. *Vestnik of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2009. No. 4, pp. 21–24. (In Russian).
  92. Zakhezin A.E., Chernykh T.N., Trofimov B.Ya., Kramar L.Ya. Influence of redispersible powders on the properties of cement mortars. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 10, pp. 6–7. (In Russian).
  93. Chan T.M., Korovyakov V.F. Self-compacting concrete mixes for road construction. *Vestnik of the MSUCE*. 2012. No. 3, pp. 131–137. (In Russian).
  94. Korolev E.V., Bazhenov Yu.M., Albakasov A.I. Radiatsionno-zashchitnyye i khimicheski stoykiye sernyye stroitel'nyye materialy [Radiation-protective and chemically resistant sulfur building materials]. Penza, Orenburg: IPK OGU. 2010. 364 p.
  95. Drovaleva O.V. Laboratory modes of fatigue testing of asphalt concrete, taking into account the operating conditions of the material in the coating. *Vestnik of the TSUACE*. 2009. No. 1 (22), pp. 159–168. (In Russian).
  96. Drovaleva O.V. Evaluation of the fatigue life of asphalt concrete under the influence of cyclic loads under intensive high-speed traffic flow. *Izvestiya of higher educational institutions. Construction*. 2009. No. 11–12 (611–612), pp. 65–71. (In Russian).
  97. Trautvain A.I., Akimov A.E., Denisov V.P., Lashin M.V. Features of the method of volumetric design of asphalt concrete using Superpave technology. *Vestnik of the BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 3, pp. 8–14. (In Russian).
  98. Inozemtsev S.S., Korolev E.V. Aggressiveness of operational conditions of road-climatic zones in Russia. *Nauka i tekhnika v dorozhnoy otrasli*. 2019. No. 3, pp. 22–26. (In Russian).

А.Н. БОДЯКОВ, ст. преподаватель (savaa72@mail.ru),  
И.Ю. МАРКОВА, канд. техн. наук (irishka-31.90@mail.ru),  
В.В. СТРОКОВА, д-р техн. наук (vvstrokova@gmail.com),  
Д.О. БОНДАРЕНКО, канд. техн. наук (di\_bondarenko@mail.ru),  
Е.Н. ГУБАРЕВА, канд. техн. наук (43448504@mail.ru),  
А.И. БУКОВЦОВА, канд. техн. наук (9507131581@mail.ru)

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

## Анализ нормируемых свойств шлакового щебня в результате кристаллохимической стабилизации

Дефицит каменных материалов для дорожного строительства требует поиска альтернативных вариантов, применение которых обеспечит надлежащее качество дорожных одежд. Шлаки металлургического производства представляют собой ценное сырье как для строительной отрасли в целом, так и для дорожного строительства в частности благодаря своим свойствам. Однако они характеризуются неоднородностью состава от партии к партии и, как следствие, изменяющимися во времени физико-механическими характеристиками. Применение различных методов стабилизации данного вида техногенного сырья позволяет получать материалы с заданным набором свойств. В работе рассмотрено влияние кристаллохимической стабилизации шлака в процессе слива на комплекс нормируемых показателей конечного материала – шлакового щебня. Стабилизация печного шлака во время слива позволила улучшить: марку по прочности с 800 до 1200, марку по истираемости с ИIV до III, устойчивость структуры с УС2 до УС1, морозостойкость до F50. Физико-механические свойства полученного каменного материала позволяют применять его для устройства слоев оснований, а также в составе композиционных материалов для устройства покрытий в конструкциях дорожных одежд.

**Ключевые слова:** отвальный шлак, стабилизированный шлак, шлаковый щебень, дорожное строительство, утилизация отходов производства.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-19-00796, <https://rscf.ru/project/23-19-00796/> с использованием оборудования Центра высоких технологий на базе БГТУ им. В.Г. Шухова.

**Для цитирования:** Бодяков А.Н., Маркова И.Ю., Строкова В.В., Бондаренко Д.О., Губарева Е.Н., Буковцова А.И. Анализ нормируемых свойств шлакового щебня в результате кристаллохимической стабилизации // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 20–25. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-20-25>

A.N. BODYAKOV, Senior Lecturer (savaa72@mail.ru), I.Y. MARKOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (irishka-31.90@mail.ru), V.V. STROKOVA, Doctor of Sciences (Engineering) (vvstrokova@gmail.com), D.O. BONDARENKO, Candidate of Sciences (Engineering) (di\_bondarenko@mail.ru), E.N. GUBAREVA, Candidate of Sciences (Engineering) (43448504@mail.ru), A.I. BUKOVTSOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (9507131581@mail.ru) Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

### Analysis of Standardized Properties of Slag Crushed Stone Resulting From Crystal-Chemical Stabilization

The shortage of high-quality stone materials for road construction requires the search for alternative materials, the use of which will ensure the proper quality of road pavements. Metallurgical slags are a valuable raw material for the construction industry in general and for road construction in particular due to its properties. However, they are characterized by heterogeneity of composition in different batches and, as a result, physical and mechanical characteristics that change over time. The use of various methods for stabilizing that kind of technogenic raw materials makes it possible to obtain stone raw materials with specified properties. The paper considers the effect of crystal-chemical stabilization of slag in the process of draining on the complex of standardized indicators of the final material – slag rubble. Stabilization of furnace slag during draining made it possible to improve the following standardized indicators: compressive strength grades from 800 to 1200, abrasion grades from IV to II, structural stability of slag against decay from StS2 to StS1, frost resistance to F50. The physical and mechanical properties of the resulting stone material make it possible to use it for the construction of base layers and as part of composite materials for the construction of coatings in road pavement structures.

**Keywords:** dump slag, stabilized slag, slag crushed stone, strength, abrasion, frost resistance, structural stability.

The study was carried out at the expense of a grant from the Russian Scientific Foundation No. 23-19-00796, <https://rscf.ru/project/23-19-00796/> using the equipment of the Center for High Technologies on the basis of BSTU named after V.G. Shukhova.

**For citation:** Bodyakov A.N., Markova I.Yu., Strokov V.V., Bondarenko D.O., Gubareva E.N., Bukovtsova A.I. Analysis of standardized properties of slag crushed stone resulting from crystal-chemical stabilization. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 20–25. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-20-25>

В современном дорожном строительстве каменные материалы играют важную роль, так как они обеспечивают прочность и долговечность дорожных покрытий, объемы потребления которых достигают более 300 млн м<sup>3</sup>/г. Высокий спрос на сырье для по-

лучения дорожно-строительных материалов обусловлен реализацией стратегических программ, национальных проектов и возникшей в последние годы необходимостью восстановления инфраструктурных объектов в приграничных зонах СВО, включающих

разветвленную сеть автомобильных дорог. Так, в 2023 г. в рамках реализации федерального проекта «Региональная и местная дорожная сеть» в Белгородской области консолидированный бюджет на модернизацию и развитие транспортной сети, включающий средства федерального бюджета, составил более 3 млрд р., что позволило на момент публикации работы обеспечить укладку 900584,31 м<sup>2</sup> дорожных покрытий. При этом, отмечается дефицит качественных каменных материалов, который связан с рядом причин. Во-первых, это истощение запасов каменных карьеров, что приводит к увеличению затрат на добычу и транспортировку сырья и, как следствие, стоимости дорожно-строительных композиций. Во-вторых, экологические требования и законодательные ограничения (запрет на добычу из-за соображений экологической безопасности), которые также влияют на доступность каменных материалов. В свою очередь, возможность замены потребителями традиционного минерального сырья, такого как песок и щебень, другими продуктами затруднена из-за отсутствия материалов, обладающих комплексом требуемых базовых свойств. Совокупность перечисленных факторов способствует поиску возможных путей решения обозначенной проблемы.

Зачастую в качестве альтернативных сырьевых ресурсов для получения дорожно-строительных материалов рассматривают отходы различных производств, оказывающих негативное воздействие на экосферу и в то же время обладающих высоким потенциалом в строительной отрасли [1, 2]. Так, среди многотоннажного перспективного техногенного сырья металлургические шлаки занимают одну из лидирующих позиций. На территории Российской Федерации ежегодно образуется около 30 млн т/г. отвальных металлургических шлаков.

Шлаки, являющиеся побочными продуктами металлургического производства, представляют собой ценное сырье для строительной отрасли благодаря своим физико-механическим и физико-химическим свойствам [3–6]. Они обладают низкой стоимостью и хорошей адгезией к различным видам вяжущих, но характеризуются неоднородностью состава от пар-

тии к партии и, как следствие, изменяющимися во времени физико-механическими свойствами. Кроме того, иногда в составе шлаковых материалов отмечается наличие тяжелых металлов. Это существенно затрудняет использование шлаков в строительной индустрии. Для решения обозначенных проблем требуется проведение комплексных исследований по изучению базовых характеристик металлургических шлаков и совершенствованию технологий их обработки с целью обеспечения заданных характеристик.

Известно [7–10], что в зависимости от соотношения основных и кислотных оксидов металлургические шлаки подразделяются на три категории: основные, кислотные и промежуточные. Окислительная способность шлака возрастает с увеличением его основности. К основным относятся шлаки с высоким содержанием основных оксидов, таких как CaO, MgO и FeO; к кислотным – шлаки, в которых доминируют SiO<sub>2</sub> и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; амфотерные – которые могут вести себя и как кислотные и как основные. Металлургические шлаки по своей способности к кристаллизации из расплавленного состояния находятся между силикатными стеклами и металлами. Как в случае с другими силикатами, различают кристаллизацию из расплава и из стекла. Большой интерес для шлакопереработки представляет способность шлаков к кристаллизации из расплава, вернее кинетика их кристаллизации, так как некоторые шлаки при охлаждении самопроизвольно распадаются. Для установления особенностей их переработки важно выявить условия распада, а также эффективные методы стабилизации их структуры. Распад шлаков начинается в процессе их охлаждения и завершается в отвалах в течение 2–3 мес, иногда этот процесс может длиться до нескольких лет. Шлаки, пролежавшие в отвалах длительное время и не имеющие признаков распада, принято считать устойчивыми. При хранении отходов происходят процессы, изменяющие свойства исходной отвальной массы, химический, минеральный и гранулометрический составы, прочность, плотность и др.

Шлаки по своим физико-химическим свойствам очень близки к изверженным горным породам, кото-

Таблица 1  
Table 1

Химический состав шлака  
Chemical composition of slag

Проба	Содержание оксидов, %												
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	TiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	SrO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
ОШ (0–20)	37,7	24,34	9,83	21,31	4,89	0,63	0,28	0,12	0,2	0,26	0,08	0,07	0,18
ОШ (20–60)	40,49	28,66	17,15	7,71	3,73	1,1	0,32	0,2	0,12	0,12	0,08	0,07	0,06
ОШ (0–600)	40,67	27,43	15,4	11,57	3,04	0,78	0,28	0,15	0,17	0,1	0,08	0,04	0,2
СШ	37,59	29,8	18,09	10,52	2,23	0,78	0,22	0,08	0,14	0,05	0,08	0,08	0,22

Примечание. ОШ – отвальный шлак; СШ – стабилизированный шлак.

Таблица 2  
Table 2

Физико-механические свойства щебня  
Physical and mechanical properties of crushed stone

Проба	$\rho_n$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{сж}$ , МПа	Устойчивость к распаду щебня (потеря массы при испытании, %)		
			Для сульфидного и железистого распада	Для силикатного и известкового распадов	Марка
ОШ 0–20	1384	2,72 (А)	1,44	2,53	УС 2
ОШ 20–60	1310	2,82 (А)	1,01	2,79	
ОШ 0–600	–	3,08 (А)	1,56	3,22	
СШ 0–60	1360	0,25 (НА)	0,06	0,09	УС1
Норма по ГОСТ	Не норм.	ОШ 2,5–5 СШ < 1	ОШ 3–5 СШ < 3		

рые применяются для получения строительных материалов. Традиционно шлаковый щебень получают дроблением устойчивых отвалных металлургических шлаков или специальной обработкой огненно-жидких шлаковых расплавов (литой шлаковый щебень). Для производства щебня в основном применяют отвалы шлаки сталеплавильного производства (подходящие для переработки в щебень), а также другие шлаки, в том числе цветной металлургии. При использовании шлаков в качестве каменных материалов для дорожного строительства необходимо уделять особое внимание таким характеристикам, как: прочность, дробимость, морозостойкость и устойчивость структуры.

В настоящее время в действующей нормативной документации, регламентирующей использование шлаков в строительстве, выделяют: ГОСТ 5578–2019 «Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия»; ГОСТ 3344–83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия» (с Изменениями № 1); ГОСТ 32826–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и песок шлаковые. Технические требования» (с Поправкой, с Изменением № 1) – разработан с соблюдением и применяется в зоне действия требований Технического регламента ТР ТС 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог», утвержденного решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 13 июня 2012 г. № 81.

Для проведения экспериментальных исследований в работе применялся отвалный шлак в исходном виде (контроль), который является побочным продуктом Оскольского электрометаллургического комбината (ОЭМК) им. А.А. Угарова. Он подвержен кристаллохимической стабилизации с использованием пыли ДСП (дуговых сталеплавильных печей) в промышленных условиях [11–14].

Таблица 3  
Table 3

Определение марки по прочности шлакового щебня  
Determination of strength of slag crushed stone

Проба	Фракция, мм	Марка по прочности	Потеря массы при испытании на прочность	
			Фактические значения, %	Норма по ГОСТ 3344–83, %
ОШ 0–600	5–10	600	36,25	35–45
	10–20		38,32	
	20–40	300	47,99	45–55
ОШ 0–20	5–10	800	26,3	25–35
	10–20		27,52	
ОШ 20–60	20–40	800	33,8	
	40–60		34,56	
СШ	5–10	1200	13,87	до 15
	10–20		14,02	
	20–40		14,81	
	40–60	1000	15,38	15–25

Таблица 4  
Table 4

Определение истираемости шлакового щебня  
Determination of abrasion of slag crushed stone

Проба	Фракция, мм	Марка по истираемости	Потеря массы при испытании на прочность	
			Фактические значения, %	Норма по ГОСТ 3344–83, %
ОШ 0–600	5–10	ИIV	52,26	45–60
	10–20		58,22	
	20–40		58,72	
ОШ 0–20	5–10		47,22	
	10–20		52,13	
ОШ 20–60	20–40		54,27	
СШ	5–10	ИIII	13,72	до 15
	10–20		14,13	
	20–40		14,85	

Комплекс показателей для проведения испытаний исследуемых материалов определялся в соответствии с ГОСТ 3344–83.

Пробы отвалного шлака отбирались в соответствии с ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические

Таблица 5  
Table 5Определение морозостойкости шлака  
Determination of slag frost resistance

Проба	Фракция, мм	Потеря массы при испытании на морозостойкость		
		Норма по ГОСТ 3344–83, %	Фактически	Марка по морозостойкости
ОШ 0–20; 20–60; 0–600	5–10	10	34,2	–
	10–20		35,5	
	20–40		40,1	
СШ	0–60	5	4,31	F50

условия» (с Изменениями № 1–4)» и ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» (с Изменениями № 1, 2).

Отобранные пробы отвального шлакового щебня соответствовали трем различным фракциям согласно номенклатуре выпускаемой продукции предприятия: 0–600 мм, 0–20 мм и 20–60 мм. Фракция 0–600 мм образуется после вылеживания шлака в отвалах и является исходным сырьем для получения фракций 20–60 и 0–20 мм. Фракция 0–20 мм образуется после прохода через дробильно-сортировочный комплекс и получения фракции 20–60 мм.

Стабилизированный шлак отбирался после охлаждения и представлял кусковой материал размером до 500 мм. Стабилизация осуществлялась при выплавке стали в электросталеплавильном цехе с использованием в качестве стабилизатора пыли дуговых сталеплавильных печей (ДСП). Так как отобранные фракции не соответствуют стандартным фракциям по ГОСТ 3344–83, после отбора проб щебень разделяли на стандартные фракции 5–10, 10–20, 20–40, 40–60 мм для дальнейшего определения физико-механических характеристик.

Определение химического состава шлаков осуществлялось с использованием рентгеновского дифрактометра «ARL X'TRA. Thermo Fisher Scientific».

Оценка физико-механических свойств производилась с использованием методик и оборудования согласно ГОСТ 8269.0–97, ГОСТ 3344–83 и ГОСТ 30108–94.

К основным химическим составляющим всех рассматриваемых проб шлаков (табл. 1) следует отнести: оксид кальция (37–41%), кремния ( $\text{SiO}_2$ , около 24–29%), железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , 10–18%), алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 3–5%) и магнезия ( $\text{MgO}$ , 8–22%). Обращает на себя внимание лишь отвальный шлак фракции 0–20. Содержание оксида железа практически в два раза снижено, а оксида магнезия – более чем в два раза превышено, что, вероятно, связано с размерностью включений, содержащих указанные оксиды. Стабилизированный шлак не имеет существенных отличий по химическому составу от отвального шлака, что свидетельствует о стабильности его состава и характерно для процессов кристаллохимической стабилизации, когда трансформируется лишь кристаллическая структура.

Анализ физико-механических характеристик отвального и стабилизированного шлакового щебня показал следующее. Насыпная плотность щебеночных смесей (табл. 2) отвального шлака 0–20 и 20–60 мм составляет 1310 и 1384  $\text{кг/м}^3$  соответственно. Этот показатель колеблется в зависимости от зернового состава смесей, и чем крупнее зерна каменного материала, тем ниже значение насыпной плотности. Насыпная плотность щебня из стабилизированного шлака находится в том же диапазоне значений, что свидетельствует о характерной для шлака плотности упаковки зерен материала.

Определение активности (табл. 2) шлаков по значению предела прочности образцов-цилиндров, изготовленных из шлакового теста максимальной плотности (2,33  $\text{г/см}^3$ ) при подобранном количестве воды (влажность – 13%), показало, что к активным относятся все пробы отвального шлака. Стабилизированный шлак характеризуется низкой прочностью при сжатии, что свидетельствует об отсутствии активности. Высокие прочностные и дефор-

Таблица 6  
Table 6Удельная эффективная активность естественных радионуклидов  
Effective activity of natural radionuclides

№	Определяемые показатели	Результаты испытаний $\pm \Delta$			Норма по ГОСТ 30108–94
		ОШ 0–20; 20–60	ОШ 0–600	СШ	
1	Удельная активность $R_a$ – 226, Бк/кг	51±9	53±9	45±8	Не норм.
2	Удельная активность калия – 40, Бк/кг	< 45	< 33	< 44	
3	Удельная активность тория – 232, Бк/кг	21±4	17±4	17±4	
4	Эффективная удельная активность ( $A_{\text{эфф}}$ ) природных радионуклидов, Бк/кг	79±11	75±11	67±10	<740

мативные характеристики стабилизированного шлака наблюдаются сразу после стабилизации и не меняются с течением времени в отличие от отвального шлака.

Устойчивость к распадам щебня (табл. 2) показала, что отвальные шлаки всех фракций (0–20, 20–60, 0–600 мм) имеют среднеустойчивую структуру УС2. При этом стабилизированный шлак отличается устойчивой структурой УС1.

Анализ данных табл. 3 показывает, что марка по прочности отвального шлака составляет от 300 до 800 в зависимости от фракции и исходного сырья. Средневзвешенная марка по прочности отвального шлака составляет 800. Наименьшую марку имеет щебень фракции 20–40, полученный из смеси 0–600, это объясняется тем, что в кусковом материале процесс карбонизации протекает значительно менее интенсивно из-за меньшей площади поверхности контакта с воздухом. Добиться повышения марки по прочности дробленого шлака возможно после выдерживания на открытом воздухе для завершения процессов карбонизации.

Марка щебня из стабилизированного шлака составляет от 1000 до 1200. Средневзвешенная марка по прочности стабилизированного шлака составляет 1200. Указанные прочностные показатели обеспечиваются сразу после охлаждения шлака. Это позволяет использовать шлак сразу после завершения технологического процесса, в связи с чем отпадает необходимость продолжительного вылеживания шлака в отвалах.

Марка по истираемости (табл. 4) отвального шлакового щебня различных фракций не превысила ИV, в то время как марка по истираемости стабилизированного шлака ИП. Это позволяет сделать

вывод о большей устойчивости к механическому и ударному износу структуры стабилизированного шлака.

При определении марки по морозостойкости (табл. 5) установлено, что пробы шлакового щебня, не подверженного стабилизации, не соответствуют даже минимальным требованиям для марки F15. В свою очередь, усредненная проба стабилизированного шлака соответствует марке по морозостойкости F50.

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов (табл. 6) для фракций 0–20, 20–60 и 0–600 мм, а также стабилизированного шлака соответствует нормативным требованиям для строительства дорог и аэродромов и может применяться без ограничений.

Таким образом, анализ совокупности нормируемых параметров проб отвального шлакового щебня и щебня из стабилизированного шлака позволил установить, что в результате стабилизации улучшаются физико-механические свойства получаемого материала. Так, стабилизация печного шлака во время слива позволила улучшить нормируемые показатели шлакового щебня: марку по прочности с 800 до 1200, марку по истираемости с ИV до ИП, устойчивость структуры с УС2 до УС1, морозостойкость до F50. Улучшенные характеристики позволяют расширить области применения шлакового щебня в дорожном строительстве. Физико-механические свойства полученного каменного материала позволяют применять его для устройства слоев оснований, а также в составе композиционных материалов для устройства покрытий в конструкциях дорожных одежд. При этом наибольшая эффективность применения материала будет обеспечиваться с наименьшим плечом транспортировки груза.

#### Список литературы

1. Агамов Р.Э., Гончарова М.А., Мраев А.В. Сталеплавильные шлаки как эффективное сырье в дорожном строительстве // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 56–60. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>
2. Бабков В.В., Недосеко И.В., Глазачев А.О., Сеницин Д.А., Парфенова А.А., Каюмова Э.И. Композиционные материалы для дорожного строительства на основе отходов химической и металлургической промышленности // *Строительные материалы*. 2023. № 1–2. С. 88–94. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-88-94>
3. Кудрин В.А. Металлургические шлаки – новый материал. Использование // *Материаловедение*. 2015. № 1. С. 11–14.
4. Юдина Л.В., Юдин А. Металлургические и топливные шлаки в строительстве. Ижевск: Удмуртия. 1995, 160 с.

#### References

1. Agamov R.E., Goncharova M.A., Mraev A.V. Steelmaking slags as an effective raw material in road construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 56–60. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>
2. Babkov V.V., Nedoseko I.V., Glazachev A.O., Sinitsin D.A., Parfenova A.A., Kayumova E.I. Composite materials for road construction based on waste from the chemical and metallurgical industries. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 1–2, pp. 88–94. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-88-94>
3. Kudrin V.A. Metallurgical slag is a new material. Use. *Materialovedeniye*. 2015. No. 1, pp. 11–14. (In Russian).
4. Yudina L.V., Yudin A. Metallurgicheskiye i toplivnyye shlaki v stroitel'stve [Metallurgical and fuel slags in construction]. Izhevsk: Udmurtia. 1995. 160 p.
5. Rakhimov R.Z. Ecology, metallurgy, mineral binders and building materials industry. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 26–31.

5. Рахимов Р.З. Экология, металлургия, минеральные вяжущие вещества и промышленность строительных материалов // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-26-3>
6. Гончарова М.А., Бондарев Б.А., Корнеев А.Д. Кристаллические металлургические шлаки в дорожном строительстве // *Строительные материалы*. 2009. № 11. С. 23–25.
7. Валуев Д.В., Гизатулин Р.А. Технологии переработки металлургических отходов: Учебное пособие. Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2013. 191 с.
8. Булатов К.В., Газалеева Г.И. Перспективы развития технологий переработки отходов черной металлургии. *Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: Труды V Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021»*. Екатеринбург, 2021. С. 21–33. DOI: [10.34923/technogen-ural.2021.60.16.003](https://doi.org/10.34923/technogen-ural.2021.60.16.003)
9. Юсупходжаев А.А., Валиев Х.Р., Худояров С.Р. Переработка вторичных техногенных образований в черной металлургии. Ташкент: ТашГТУ, 2014. 138 с.
10. Пугин К.Г., Вайсман Я.И., Юшков Б.С., Максимович Н.Г. Снижение экологической нагрузки при обращении со шлаками черной металлургии. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2008. 315 с.
11. Bodyakov A.N., Meshkova K.V., Dukhovny G.S. Stabilization of metallurgical slug from arc steel-making furnaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. No. 1. pp. 012082. DOI: [10.1088/1757-899X/945/1/012082](https://doi.org/10.1088/1757-899X/945/1/012082)
12. Патент РФ 2752914 *Состав и способ стабилизации распадающихся металлургических шлаков / Духовный Г.С., Евтушенко Е.И., Рубанов Ю.К., Бодяков А.Н., Деев В.В., Бондаренко С.Н.* Заявл. 29.07.2020. Опубл. 11.08.2021. Бюл. № 23.
13. Bondarenko S.N., Bodyakov A.N., Lebedev M.S. Metallurgical waste recycling for transport construction. *Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction*, 2021. pp. 79–84. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68984-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68984-1_12)
14. Бодяков А.Н., Маркова И.Ю., Логвиненко А.А., Боцман Л.Н., Огурцова Ю.Н. Свойства металлургического шлака, стабилизированного в промышленных условиях // *Региональная архитектура и строительство*. 2023. № 2 (55). С. 44–51. DOI: [10.54734/20722958\\_2023\\_2\\_44](https://doi.org/10.54734/20722958_2023_2_44) (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-26-31>
6. Goncharova M.A., Bondarev B.A., Korneev A.D. Crystalline metallurgical slags in road construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2009. No. 11, pp. 23–25. (In Russian).
7. Valuev D.V., Gizatulin R.A. *Tekhnologii pererabotki metallurgicheskikh otkhodov: uchebnoye posobiye* [Technologies for processing metallurgical waste: a textbook]. Tomsk: National Research Tomsk Polytechnic University. 2013. 191 p.
8. Bulatov K.V., Gazaleeva G.I. Prospects for the development of technologies for processing waste from ferrous metallurgy. *Fundamental research and applied development of processes for processing and utilization of technogenic formations: proceedings of the V Congress with international participation and the Conference of Young Scientists «TECHNOGEN-2021»*. Ekaterinburg. 2021, pp. 21–33. DOI: [10.34923/technogen-ural.2021.60.16.003](https://doi.org/10.34923/technogen-ural.2021.60.16.003)
9. Yusupkhodzhaev A.A., Valiev Kh.R., Khudoyarov S.R. *Pererabotka vtorichnykh tekhnogennykh obrazovaniy v chernoy metallurgii*. [Processing of secondary technogenic formations in ferrous metallurgy]. Tashkent: Tashkent State Technical University. 2014. 138 p.
10. Pugin K.G., Vaisman Ya.I., Yushkov B.S., Maksimovich N.G. *Snizheniye ekologicheskoy nagruzki pri obrashchenii so shlakami chernoy metallurgii* [Reducing the environmental load when handling ferrous metallurgy slags]. Perm: Perm National Research Polytechnic University. 2008. 315 p.
11. Bodyakov A.N., Meshkova K.V., Dukhovny G.S. Stabilization of metallurgical slug from arc steel-making furnaces. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 945. No. 1, pp. 012082. DOI: [10.1088/1757-899X/945/1/012082](https://doi.org/10.1088/1757-899X/945/1/012082)
12. Patent RF 2752914 *Sostav i sposob stabilizatsii raspadayushchikhsya metallurgicheskikh shlakov* [Composition and method of stabilization of decaying metallurgical slags]. Dukhovny G.S., Evtushenko E.I., Rubanov Yu.K., Bodyakov A.N., Deev V.V., Bondarenko S.N. Appl. 07/29/2020. Publ. 08/11/2021. Bull. No. 23.
13. Bondarenko S.N., Bodyakov A.N., Lebedev M.S. Metallurgical waste recycling for transport construction. *Proceedings of the International Conference Industrial and Civil Construction*. 2021. pp. 79–84. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-68984-1\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-68984-1_12)
14. Bodyakov A.N., Markova I.Yu., Logvinenko A.A., Botsman L.N., Ogurtsova Yu.N. Properties of metallurgical slag stabilized in industrial conditions. *Regional'naya arkhitektura i stroitel'stvo*. 2023. No. 2 (55), pp. 44–51. (In Russian). DOI: [10.54734/20722958\\_2023\\_2\\_44](https://doi.org/10.54734/20722958_2023_2_44)

В.С. АВАНЕСОВ, канд. техн. наук, доцент кафедры механики грунтов и геотехники (avanesov.v@yandex.ru),  
К.О. ТУРСУНБАЕВА, магистр кафедры механики грунтов и геотехники (k.tursunbaeva@yandex.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Влияние параметров армированного основания на изменение компонентов напряженно-деформированного состояния преобразованного основания

Выбор устройства основания является определяющим вопросом для обеспечения безопасности и надежности при строительстве зданий и сооружений различного уровня ответственности. Главными преимуществами устройства искусственных оснований являются как их эксплуатационные качества, так и сравнительно невысокая стоимость устройства. При этом, если здание не может быть устроено на фундаменте на естественном основании, одним из наиболее рациональных способов является применение армированного основания. В работе представлена постановка и решение задачи прогнозирования изменения напряженно-деформированного состояния (НДС) в системе «армирующие элементы – окружающий грунт» на примере 21-этажного здания высотой 65,7 м. Проведено численное моделирование применения армирующих элементов различной длины, жесткости и геометрии расположения, а также моделирование традиционных методов устройства основания – применение плитного и свайного фундаментов. Расчеты показывают, что армирующие элементы обладают большой вариативностью и могут эффективно применяться в тех случаях, когда устройство плитного фундамента не может быть выполнено из-за обеспечения требуемых осадок здания. Кроме того, показывается, какая геометрия армирующих элементов наиболее рационально может быть применена с точки зрения получаемых осадок основания и усилий в таких элементах.

**Ключевые слова:** свайный фундамент, плитный фундамент, армированное основание, напряженно-деформированное состояние, продольные усилия.

**Для цитирования:** Аванесов В.С., Турсунбаева К.О. Влияние параметров армированного основания на изменение компонентов напряженно-деформированного состояния преобразованного основания // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 26–31.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-26-31>

V.S. AVANESOV, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics (avanesov.v@yandex.ru),  
K.O. TURSUNBAEVA, Master of the Department of Soil Mechanics and Geotechnics (k.tursunbaeva@yandex.ru)  
National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Influence of Parameters of the Reinforced Base on the Change of Components of the Stress-Strain State of the Transformed Base

The choice of the foundation type is a crucial issue for ensuring safety and reliability in the construction of buildings and structures of various levels of responsibility. The main advantages of the construction of man-made bases are both their operational properties and the cost-effectiveness of the construction. At the same time, in case of exceeding settlements the reinforcement of soil base allows to reduce them. The paper presents the formulation and solution of the problem of behaviour of the stress-strain state (SSS) in the system «reinforcing elements – surrounding soil» on the example of a 21-storey building with a height of 65.7 m. Finite-element modelling related to the application of reinforcement elements of various parameters such as length, stiffness and geometry, as well as conventional methods of foundation construction such as slab or pile foundation. Analysis demonstrates that reinforcement elements have significant variability and could be effectively used in cases where the installation of a slab foundation settlements exceeding ultimate values. In addition, it shows which geometry of reinforcement elements is relevant to rational application in terms of settlements and forces in such elements.

**Keywords:** pile foundation, slab foundation, reinforced base, stress-strain state, longitudinal forces.

**For citation:** Avanesov V.S., Tursunbaeva K.Yu. Influence of parameters of the reinforced base on the change of components of the stress-strain state of the transformed base. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 26–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-26-31>

Одной из наиболее актуальных задач геотехнического строительства является вопрос обеспечения допустимых осадок зданий и сооружений. В последние годы среди методов устройства основания выделяется армирование грунтов, выполняемое как в виде погружения в грунтовый массив предварительно изготовленных элементов, так и в виде устраиваемых в грунтовом основании вертикальных элементов в условиях строительной площадки [1]. Отличительной особенностью данного метода преобразования свойств грунтов основания является передача нагрузки на верти-

кальные элементы через грунт, как правило песчаную подушку с заданным коэффициентом уплотнения [2, 3]. При таком подходе снижение деформативности основания главным образом достигается увеличением жесткости армированного основания [4]. В настоящее время в нормативные документы введены положения [5], описывающие разновидность таких элементов, применение при устройстве оснований, а также требования, предъявляемые к самим материалам конструкций элементов [6]. При этом поведение преобразованной среды прогнозируется с помощью

моделирования напряженно-деформированного состояния (НДС) численными методами [7] либо с помощью натуральных испытаний. Расчетные методы позволяют предоставить предварительную оценку изменения прочностных и деформационных свойств основания, при этом не описывающие такие явления, как консолидация грунтовой среды, действие горизонтальных распорных напряжений и т. д. [8, 9].

В представленной работе рассматривается изменение НДС системы «элементы армирования – грунтовое основание» на примере 21-этажного здания высотой 65,7 м в зависимости от различных параметров армирования, таких как геометрические параметры, жесткость элементов, расположение в плане. Грамотный подбор этих параметров и их влияние на НДС являются определяющей задачей в проектной практике [10].

**Описание задачи**

В рамках поставленной задачи рассматривается устройство армированного основания преимущественно из железобетонных элементов для 21-этажного здания высотой 65,7 м. Пространственная жесткость самого здания обеспечивается наличием стеновой системы, диафрагм жесткости и монолитных дисков плит перекрытий (рис. 1).

Инженерно-геологическое строение площадки представлено техногенными грунтами (t-QIV), современными аллювиальными отложениями (a-QIV), верхнеюрскими отложениями оксфордского яруса (J3ox), элювиальными образования по верхнекаменноугольным отложениям (e(C)), неверовской (C3nvг), воскресенской (C3vs), суворовской (C3sv) подсветами, которые характеризуются главным образом су-

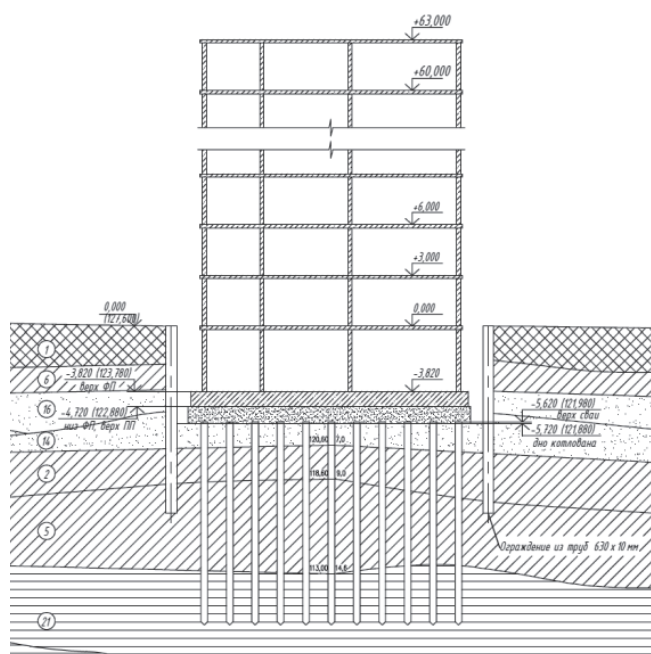


Рис. 1. Инженерно-геологический разрез, схема расположения элементов армирования  
 Fig. 1. Soil conditions, reinforcement element system

Таблица 1  
 Table 1

Физико-механические свойства грунтов основания  
 Physical and mechanical properties of foundation soils

ИГЭ	Разновидность грунта	Плотность $\rho_{гр}$ , г/см <sup>3</sup>	Удельное сцепление $c_{гр}$ , кПа	Угол внутреннего трения $\varphi_{гр}^0$	Модуль деформации $E_{г}$ , МПа
1	Техногенные грунты слежавшиеся влажные	1,96	45	24	5
2	Глины тугопластичные	1,78	31	17	16
5	Суглинки мягкопластичные	2,03	24	18	10
6	Суглинки тугопластичные	2,04	31	20	17
14	Пески средней крупности, плотные, влажные и водонасыщенные	1,96	1	39	47
20	Глины мергелистые твердые	2,11	81	20	108
21	Глины мергелистые твердые	2,10	125	21	243

глинками различной консистенции и твердыми глинами. Физико-механические свойства грунтов, лежащих основание, представлены в табл. 1.

Целью поставленной задачи является изучение влияния на НДС системы «элементы армирования – грунтовое основание» изменений параметров армированного основания: элементы различной длины от 6 до 12 м, жесткости – железобетонные и щебеночные элементы, расположения в плане относительно высотной части здания – в пределах контура здания и за пределами на расстояние 0,1В (где В – ширина фундамента).

Для решения задачи была выполнена серия расчетов конечно-элементной модели как в двухмерной, так и в трехмерной постановках [11]. При задании модели нижняя граница расчетной модели принималась по границе сжимаемой толщи, боковые грани моделировались таким образом, чтобы исключить влияние граничных условий на результат [12]. Конечно-элементная модель в пространственной

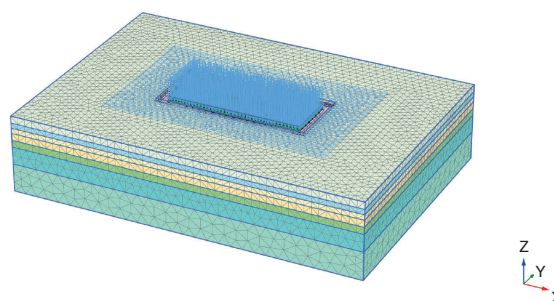
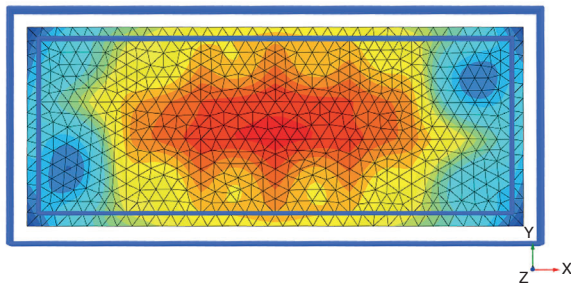


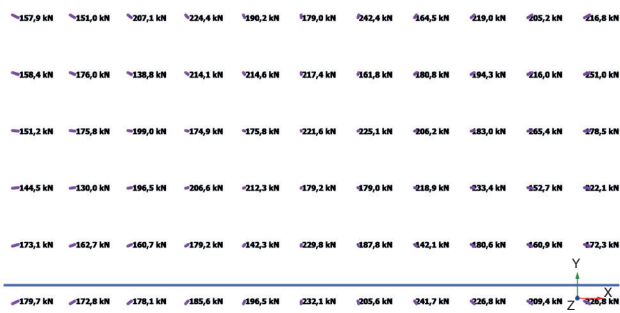
Рис. 2. Расчетная схема в трехмерной постановке  
 Fig. 2. Design diagram in three-dimensional scheme



**Total displacements  $u_z$**   
 Maximum value = -0,01557 m (Element 2919 at Node 203)  
 Maximum value = -0,02472 m (Element 2443 at Node 310)

**Рис. 3.** Осадка плитного фундамента на основании, армированном железобетонными сваями L=12 м; S=2,5 см

**Fig. 3.** Settlement of a slab foundation on a base reinforced with reinforced concrete piles L=12 m; S=2.5 cm



**Axial forces N (scaled up  $0,157 \cdot 10^{-21}$  times)**  
 Maximum value = -127,9 kN (Element 43 at Node 160163)  
 Maximum value = -897,9 kN (Element 135 at Node 160354)

**Рис. 4.** Распределение продольных усилий в железобетонных армирующих элементах от края к центру основания

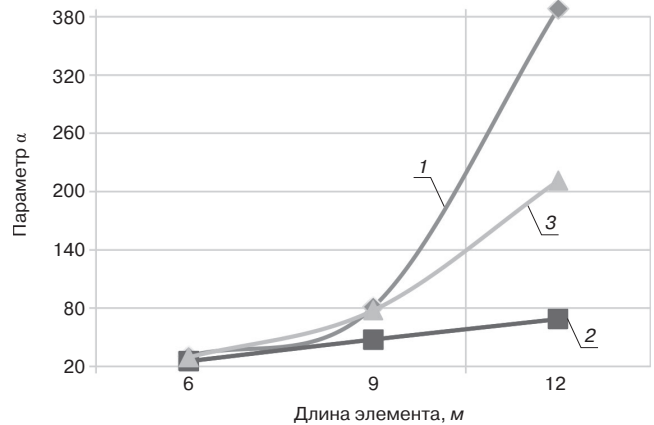
**Fig. 4.** Distribution of longitudinal forces in reinforced concrete reinforcing elements from the edge to the center of the base

модели включает в себя фундаментную плиту заданной жесткости ( $\delta_{пр}=0,65м$ ), напластование грунтов основания, откопку котлована и устройство элементов армирования [13]. Моделью среды, описывающей поведение грунтового массива в условиях рассматриваемой задачи, была выбрана модель упрочняющегося грунта (Hardening Soil), способная адекватно отображать изменение НДС при разгрузке природных напряжений от откопки котлована [14]. Вертикальные элементы армирования задаются в виде элементов Embedded beam.

**Решение задачи**

Результаты решения численной задачи приведены на рис. 3 и 4. На них показаны изополя осадок и распределение усилий в случае применения армированного основания в виде железобетонных свай длиной 12 м.

Серия расчетов из табл. 2 показывает, что с увеличением длины армирующих элементов (далее – АЭ) осадка основания закономерно снижается, приближаясь к значениям, сопоставимым с осадками на свайном основании. В свою очередь, использование щебеночных оснований с пониженными жесткостными характеристиками влечет за собой повышение деформативности основания.



**Рис. 5.** График зависимости коэффициента параметра  $\alpha$  – отношение объема используемых материалов вертикальных элементов к получаемой осадке при различных вариантах устройства основания: 1 – свайный фундамент; 2 – армирование щебеночными сваями; 3 – армирование железобетонными сваями

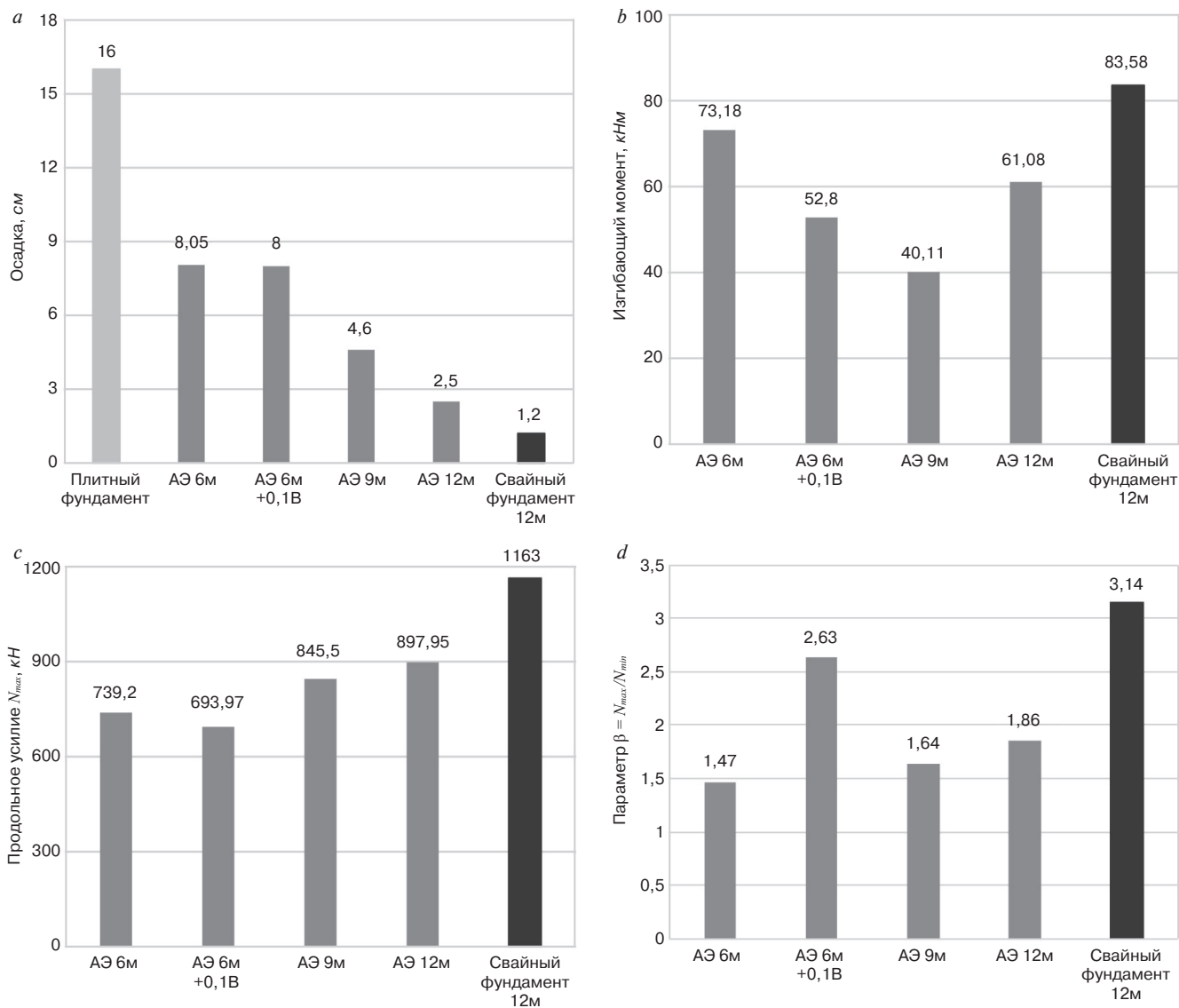
**Fig. 5.** Graph of the dependence of the parameter coefficient  $\alpha$  – the ratio of the volume of materials used for vertical elements to the resulting settlement for various options for foundation construction: 1 – pile foundation; 2 – reinforcement with crushed stone piles; 3 – reinforcement with reinforced concrete piles

**Таблица 2**  
**Table 2**

**Таблица осадок основания и усилий при различных типах устройства основания в плоской постановке**  
**Table of foundation settlement and forces for various types of foundation device in a two-dimensional scheme**

Тип основания	Осадка $s$ , см	M, кНм	$N_{мин}$ , кН	$N_{макс}$ , кН	Q, кН	
1. Плитный фундамент	-	16,5	-	-	-	
2.1. Армирование железобетонными сваями	6 м	9,7	15,2	228,9	309,7	12,7
	6 м+0,1 В	9,8	15,4	34,2	313,6	14,2
	7 м	8,3	16,1	234,4	329,5	13,7
	8 м	6,8	18,8	257,9	350	16,7
	9 м	5,5	18,7	288,9	377,2	19,8
	10 м	3,7	16,4	317,5	427,2	20,8
	11 м	3,2	18,1	343,3	446,1	20,8
2.2. Армирование щебеночными сваями (сниженной жесткости)	6 м	11,22	1,9	181,1	231,9	4
	9 м	8,96	1,8	187,5	240,5	3,3
	12 м	8,3	1,8	189,4	242,4	3,8
3. Свайный фундамент	6 м	9,31	49	335,9	488,8	38,3
	9 м	5,27	64,8	377,8	451,1	35,6
	12 м	1,47	70,7	384,2	535	37,7

Для сопоставления эффективности применения рассматриваемых вариантов был введен параметр  $\alpha$ , характеризующий отношение объема используемых материалов вертикальных элементов к получаемой осадке. Таким образом, наибольшее значение  $\alpha$  означает более рациональное использование материалов в основании. При одинаковом объеме применяемых материалов максимальное значение параметра  $\alpha$  по-



**Рис. 6.** Сравнение результатов расчета в трехмерной постановке при различных типах устройства основания: *a* – значения осадок основания; *b* – изгибающие моменты в вертикальных элементах; *c* – максимальные продольные усилия в вертикальных элементах; *d* – параметр  $\beta = N_{max}/N_{min}$   
**Fig. 6.** Comparison of calculation results in a three-dimensional scheme for different types of foundation construction: *a* – values of foundation settlement; *b* – bending moments in vertical elements; *c* – maximum longitudinal forces in vertical elements; *d* – parameter  $\beta = N_{max}/N_{min}$

казывает свайный фундамент (рис. 5). Развитие в плане расположение АЭ – на расстоянии 0,1 В также не оказывает влияния на снижение осадок и не повышает эффективность решения.

Кроме того, установлено, что в свайных фундаментах усилия в сваях –  $N, M, Q$  значительно превышают усилия в армирующих элементах при одинаковой длине и расположении.

Изменение НДС системы «АЭ – грунтовое основание» также рассматривалось в трехмерной постановке (рис. 6).

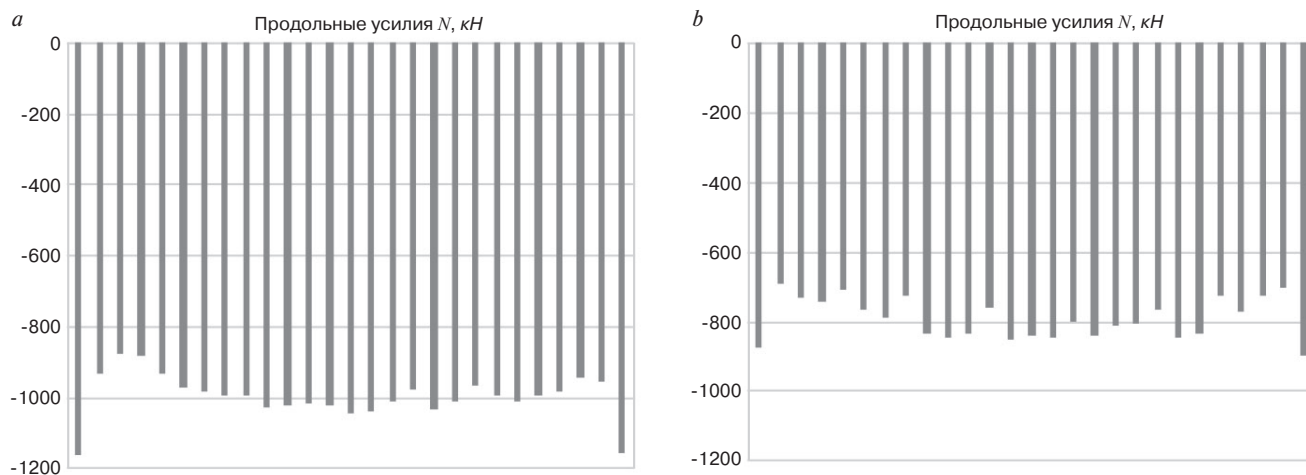
Численные расчеты в трехмерной постановке показывают, что наибольшее снижение осадок соответствует свайному фундаменту, при этом усилия в сваях значительно превышают в АЭ. Большой интерес представляет собой вопрос неравномерности распределения усилий в вертикальных АЭ в сравнении со свайным фундаментом [15].

В целях определения неравномерности распределения продольных усилий  $N$  в сваях и армирующих элементах введем параметр  $\beta$  – отношение максимального значения продольных усилий к минимальному.

Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том, что распределение усилий по оголовкам (по максимальному значению) для АЭ более равномерное, чем для свай, это позволяет применять унифицированную систему устройства фундаментов [16], не прибегая к использованию элементов различной длины, поперечного сечения и армирования (рис. 7). Этот фактор является важным ввиду необходимости проверки материала армирования по требованиям двух групп предельных состояний.

### Заключение

1. Поставлена и решена задача о применении армирующих элементов в различном исполнении в



**Рис. 7.** Распределение продольных усилий  $N$  в сваях длиной 12 м в составе:  $a$  – свайного фундамента;  $b$  – армированного основания  
**Fig. 7.** Distribution of longitudinal forces  $N$  in piles 12 m long consisting of:  $a$  – pile foundation;  $b$  – reinforced base

сравнении с традиционными решениями – плитным и свайным фундаментом. Полученные решения позволяют оценить изменения системы «армирующие элементы – окружающий грунт».

2. Показано, что задача о распределении усилий и перемещений может быть решена как в двухмерной, так и в трехмерной постановках.

3. Установлено, что применение армирующих элементов эффективно снижает осадки зданий в сравнении с плитным фундаментом от двух до пяти раз. При этом размещение армирующих элементов

обладает большой вариативностью в зависимости от длины, жесткости и расположения элементов, что также влияет на конечную осадку здания.

4. Применение армирующих элементов позволяет одновременно оставаться в поле допустимых осадок и унифицированно применять материал самих элементов.

Отмечено, что в отличие от свайных фундаментов разница между наибольшим и наименьшим усилиями в вертикальных элементах армирования не превышает 86% при условии размещении таких элементов в пределах контура здания.

### Список литературы

1. Тер-Мартirosян З.Г. Механика грунтов. М.: АСВ, 2009. 550 с.
2. Тер-Мартirosян З.Г., Струнин П.В. Усиление слабых грунтов в основании фундаментных плит с использованием технологии струйной цементации грунтов // *Вестник МГСУ*. 2010. № 4. С. 310–315.
3. Джоунс Д.К. Сооружения из армированного грунта. М.: Стройиздат, 1989. 280 с.
4. Попов А.О. Расчет конечной осадки глинистых оснований, армированных вертикальными элементами // *Инженерно-строительный журнал*. 2015. № 4. С.19–27. DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.56.3>
5. Ильичев В.А., Мангушев Р.А. Справочник геотехника. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М.: АСВ, 2016. 1031 с.
6. Мариничев М.Б., Ткачев И.Г., Шлее Ю. Практическая реализация метода вертикального армирования неоднородного основания для компенсации неравномерной деформируемости грунтового массива и снижения сейсмических воздействий на надземное сооружение // *Научный журнал КубГАУ*, № 94 (10), 2013. 15 с. <http://ej.kubagro.ru/2013/10/pdf/51.pdf> (дата обращения 26.12.2021).

### References

1. Ter-Martirosyan Z.G. Mekhanika gruntov [Soil mechanics]. Moscow: ASV, 2009. 550 p.
2. Ter-Martirosyan Z.G., Strunin P.V. Strengthening of weak soils in the bottom of base plates using the technology of jet grouting of soils. *Vestnik of the MSUCE*. 2010. No. 4, pp. 310–315. (In Russian).
3. Jones D.K. Sooruzheniya iz armirovannogo grunta [Construction of reinforced soil]. Moscow: Stroyizdat. 1989. 280 p.
4. Popov A.O. Settlement calculation of clay bed reinforced with vertical elements. *Magazine of Civil Engineering*. 2015. No.4, pp. 19–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.5862/MCE.56.3>
5. Il'ichev V.A., Mangushev R.A. Spravochnik geotekhnika. Osnovaniya, fundamenty i podzemnye sooruzheniya [Handbook of geotechnics. Foundations and underground structures]. Moscow: ASV. 2016. 1031 p.
6. Marinichev M.B., Tkachev I.G., Schlee J. Practical reinforcement for non-homogeneous bases as a method to reduce non-uniform deformability of subsoil and compensate seismic loads to upper structure. *Nauchnyi zhurnal KubGAU*. 2013. No. 94 (10), 2013, 15 p. <http://ej.kubagro.ru/2013/10/pdf/51.pdf> (Date of access 26.12.2021) (In Russian).

7. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О. Взаимодействие нефилтующей щебеночной сваи (колонны) с окружающим консолидирующим грунтом и ростверком в составе свайно-плитного фундамента // *Жилищное строительство*. 2019. № 4. С. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-4-19-23>
8. Мирсаяпов И.Т., Попов А.О. Напряженно-деформированное состояние армированных грунтовых массивов // *Инженерная геология*. 2008. № 1. С. 40–82.
9. Мирсаяпов И.Т., Попов А.О. Оценка прочности и деформативности армированных грунтовых оснований // *Геотехника*. 2010. № 4. С. 58–67.
10. Кашеварова Г.Г., Хусайнов И.И., Маковецкий О.А. Опыт применения струйной цементации для устройства подземных частей комплексов // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета Сер. Строительство и архитектура*. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 258–263.
11. Мангушев А.Г., Готман А.Л., Знаменский В.В., Пономарев А.Б. Сваи и свайные фундаменты. Конструкции, проектирование и технологии. М.: АСВ, 2015. 320 с.
12. Тер-Мартirosян З.Г., Тер-Мартirosян А.З., Анжело Г.О. Взаимодействие щебеночной сваи с окружающим грунтом и ростверком // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2019. № 3. С. 2–6.
13. Разводовский Д.Е., Скориков А.В. Проблемы и возможные пути развития нормативной литературы в области проектирования свайных фундаментов // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2020. № 3 (26). С. 74–85. DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3\(26\)-74-85](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3(26)-74-85)
14. Мирный А.Ю., Тер-Мартirosян А.З. Области применения современных механических моделей грунтов // *Геотехника*. 2017. № 1. С. 20–26.
15. Болдырев Г.Г., Меркульев Е.В., Кубецкий В.Л. Комплекс для испытаний грунтов при обследовании фундаментов // *Геотехника*. 2014. № 3. С. 32–39.
16. Чунюк Д.Ю. Обеспечение безопасности и снижение рисков в геотехническом строительстве // *Вестник МГСУ*. 2008. № 2. С. 107–111.
7. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Anzhelo G.O. The interaction of non-filtering crushed stone pile (column) with the surrounding consolidating soil and plate in the pile-slab foundation. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 4, pp. 19–23. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-4-19-23>
8. Mirsayapov I.T., Popov A.O. Stress-strain state of reinforced soil massifs. *Inzhenernaya geologiya*. 2008. No. 1, pp. 40–82. (In Russian).
9. Mirsayapov I.T., Popov A.O. Estimation of stability and deformability of reinforced ground bases. *Geotekhnika*. 2010. No. 4, pp. 58–67. (In Russian).
10. Kashevarova G.G., Khusainov I.I., Makovetskiy O.A. The experience of using jet grouting for arrangement of sunstructures. *Vestnik of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture*. 2013. Iss. 31 (50). P. 2, pp. 258–263. (In Russian).
11. Mangushev A.G., Gotman A.L., Znamenskii V.V., Ponomarev A.B. Svai i svainye fundamenty. Konstruktsii, proektirovaniye i tekhnologii [Piles and pile foundations. Structures, design and technology]. Moscow: ASV. 2015. 320 p.
12. Ter-Martirosyan Z.G., Ter-Martirosyan A.Z., Anzhelo G.O. Interaction of the crushed stone pile with the surrounding soil and the substructure. *Osnovaniya, fundamenti i mekhanika gruntov*. 2019. No. 3, pp. 2–6. (In Russian).
13. Razvodovskii D.E., Skorikov A.V. Problems and possible ways of developing regulatory literature in the field of pile foundation design. *Vestnik NITs «Stroitel'stvo»*. 2020. No. 3 (26), pp. 74–85. (In Russian). DOI: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3\(26\)-74-85](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3(26)-74-85)
14. Mirnyi A.Yu., Ter-Martirosyan A.Z. Areas of application of modern mechanical models of soils. *Geotekhnika*. 2017. No. 1, pp. 20–26. (In Russian).
15. Boldyrev G.G., Merkul'ev E.V., Kubetskii V.L. Soil testing complex for foundation inspections. *Geotekhnika*. 2014. No. 3, pp. 32–39. (In Russian).
16. Chunyuk D.Yu. Ensuring safety and risk reduction in geotechnical construction. *Vestnik MGSU*. 2008. No. 2, pp. 107–111. (In Russian).

**Как живет и трудится редакция издательства «Стройматериалы»,  
как делаются наши журналы,  
что нового и интересного в отрасли — расскажем и покажем!**

**Объединение профессионалов гарантирует успех!**

**Оставайтесь с нами!**

**Присоединяйтесь к нашему Телеграм-каналу:**

**[https://t.me/journal\\_cm](https://t.me/journal_cm)**



Н.К. РОЗЕНТАЛЬ, д-р техн. наук, проф. (rosental08@mail.ru)

АО «НИЦ «Строительство» (109428, г. Москва, Рязанский пр., 6)

## Влияние жаркого влажного климата на коррозию железобетона

Расширение экономического сотрудничества со странами, находящимися в районах с жарким влажным климатом, и строительство железобетонных зданий и сооружений в прибрежных зонах незамерзающих морей ставит задачу – оценить влияние климата на коррозионное состояние железобетонных конструкций, в первую очередь карбонизации бетона и аэрозоля морской воды, содержащего хлориды. В настоящей работе не рассматривается влияние низкой отрицательной температуры. Обобщены данные о карбонизации бетона в условиях повышенной инсоляции и действия аэрозоля морских солей, в основном на примере жаркого влажного климата Кубы, для дальнейшего развития исследований, а в последующем для разработки норм защиты от коррозии и карбонизации бетона и стальной арматуры в районах с тропическим климатом. На основе результатов обследования состояния железобетонных конструкций и сооружений, изготовленных и возведенных на Кубе, а также результатов наблюдений приведены результаты анализа агрессивных факторов природной среды Республики Куба, влияющих на коррозию железобетонных конструкций, результаты исследований карбонизации бетона и воздействия аэрозоля морских солей. При проектировании и строительстве отечественными организациями сооружений на морском побережье в странах с жарким влажным климатом следует учитывать агрессивное воздействие аэрозоля морской воды и ускоренной карбонизации бетона, снижающее долговечность железобетонных конструкций.

**Ключевые слова:** коррозия железобетона, жаркий влажный климат, хлориды, карбонизация бетона, коррозия стальной арматуры, меры защиты от коррозии.

Автор выражает благодарность Х. Суаснабару – руководителю отдела коррозии Технического центра по строительству и материалам Республика Куба (общее руководство исследованиями) и инженеру отдела А. Мартину (выполнение химических и электрохимических испытаний) за помощь при выполнении работ.

**Для цитирования:** Розенталь Н.К. Влияние жаркого влажного климата на коррозию железобетона // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-32-37>

N.K. ROZENTAL, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (rosental08@mail.ru)  
JSC «Research Centre of Construction» (6 Ryazansky Prospect, Moscow, 109428, Russian Federation)

### The Effect of a Hot Humid Climate on Corrosion of Reinforced Concrete

The expansion of economic cooperation with countries located in areas with hot, humid climates and the construction of reinforced concrete buildings and structures in coastal zones of non-freezing seas poses the task of assessing the impact of climate on the corrosive state of reinforced concrete structures, primarily carbonation of concrete and seawater aerosol containing chlorides. The effect of low negative temperature is not considered in this work. The data on the carbonation of concrete under conditions of increased insolation and the action of sea salt aerosol are summarized, mainly using the example of the hot humid climate of Cuba for further development of research, and subsequently the development of standards for protection against corrosion and carbonation of concrete and steel reinforcement in areas with a tropical climate. Based on the results of a survey of the condition of reinforced concrete structures and structures manufactured and erected in Cuba, as well as the results of observations, the results of an analysis of aggressive environmental factors of the Republic of Cuba affecting the corrosion of reinforced concrete structures, the results of studies of concrete carbonation and the effects of sea salt aerosol are presented. When designing and building structures on the seashore by domestic organizations in countries with hot, humid climates, the aggressive effects of seawater aerosol and accelerated carbonation of concrete, which reduce the durability of reinforced concrete structures, should be taken into account.

**Keywords:** corrosion of reinforced concrete, hot humid climate, chlorides, carbonation of concrete, corrosion of steel reinforcement, corrosion protection measures.

The author expresses his gratitude to H. To Suasnabar, Head of the Corrosion Department of the Technical Center for Construction and Materials of the Republic of Cuba (general research management), and to the engineer of the department A. Martin (performing chemical and electrochemical tests) for assistance in carrying out the work.

**For citation:** Rozental N.K. The effect of a hot humid climate on corrosion of reinforced concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 32–37. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-32-37>

В настоящее время российские проектные и строительные организации все более активно участвуют в строительстве различных сооружений за рубежом. Расширяется строительство в странах с жарким и влажным климатом, в том числе на берегах морей. В прибрежных зонах в странах с жарким климатом среда эксплуатации железобетонных

конструкций имеет определенные отличия от сред, характерных для большинства территорий России [1–3]. Нагревание поверхности железобетонных конструкций солнечной радиацией, осаждение на их поверхности хлоридов из состава аэрозоля морских солей влияют на скорость коррозионного повреждения железобетонных конструк-

ций. Действующие в настоящее время в России нормативные документы по защите от коррозии железобетонных конструкций не учитывают указанных агрессивных воздействий [4–8]. В статье изложены результаты обследования коррозионного состояния конструкций, находившихся в эксплуатации в приморской зоне районов с жарким влажным климатом. В основном речь идет о приморских зонах на Кубе.

Другой особенностью Кубы, как и других стран, где нет крупных рек и имеются пригодные для разработки лишь карбонатные породы, является отсутствие кварцевых песков. Используются пески с неудовлетворительным гранулометрическим составом, получаемые при дроблении карбонатных пород, или мелкие морские пески ненадлежащего гранулометрического состава и содержащие морские соли. В процессе работы получен большой объем экспериментальных исследований, который в данной статье не может быть полностью размещен.

### Природные условия

Климатические условия Кубы характеризуются наличием сезона дождей с мая по октябрь и сухого периода в остальную часть года. Средняя температура января составляет 22,5°C и августа 27,8°C. Минимальная температура не понижается ниже 5°C, максимальная – не ниже 40°C. Количество осадков за год 1000–1200 мм. В некоторых районах Кубы до 5 тыс. ч/г относительная влажность воздуха превосходит 80%, в районе Гаваны в среднем за год составляет 78%, среднее количество осадков 1130 мм в год. У берега моря ночью выпадает обильная роса. К утру на горизонтальных бетонных поверхностях образуются лужи конденсата.

Во время морских штормов генерируется аэрозоль морских солей. Основным агрессивным компонентом для железобетонных конструкций в составе аэрозоля являются хлориды. Перемещение аэрозоля ветром изучалось на Кубе (Корво П.Ф. Атмосферная коррозия углеродистой стали Ст3 во влажном тропическом климате Кубы // *Защита металлов*. 1982. № 4. С. 583–588). Концентрация хлоридов в воздухе максимальна в полосе шириной около 100 м, считая от уреза воды. С удалением от моря концентрация аэрозоля в воздухе уменьшается. Содержание солей в воздухе на расстоянии 150 м от берега достигает 1500 мг хлорид-ионов на 1 м<sup>2</sup> в сутки. За сутки на расстоянии 2 км от берега на 1 м<sup>2</sup> поверхности выпадает до 140 мг хлорид-ионов. В испытаниях коррозия незащищенной стали Ст3 за полгода в среднем составляет 250 г/м<sup>2</sup>.

Выпадение хлоридов в зависимости от расстояния (от 4 до 95 км) от океанского побережья изучали в Новой Зеландии (Ballanoe I.A., Duncan I. R. Wind – borne transport and deposition of sea-salt in New-Zealand. *N. Z. J. Technol.* 1975. No. 4, pp. 239–244). Количество осаждавшихся хлоридов на расстоянии до 8–10 км от берега сильно различалось в разные

месяцы и на различном расстоянии от берега моря (до 2200–17280 мг на 1 м<sup>2</sup> в сутки). Агрессивное действие аэрозоля морских солей и брызг во время штормов проявляется и в портовых сооружениях России на Черном море, например в Новороссийске.

При обследовании железобетонных опор линии электропередачи обнаружено влияние сильных ветров в приморских зонах на скорость карбонизации бетона (Алексеев С.Н., Гусейнов А.М., Розенталь Н.К. Долговечность железобетонных конструкций в условиях ветрового воздействия // *Сб. тр. АзНИИСМиС*. Баку, 1968. Вып. 33. С. 20). Например, на западном берегу Каспийского моря с постоянно дующими сильными ветрами и жарким климатом установлено, что с подветренной и противоположной сторон бетон конструкций карбонизирован на большую глубину, чем с других сторон. Предполагается, что при порывах ветра происходит более интенсивный обмен воздуха в порах наружного слоя бетона, это ускоряет карбонизацию бетона.

В условиях жаркого климата облучение солнцем, нагрев поверхности забетонированной конструкции и быстрое испарение воды могут привести к образованию трещин. Расчет скорости испарения влаги может быть сделан по монограммам, приведенным в «Указаниях по выдерживанию бетона» АСJ 308-81 Американского института бетона. Образование трещин начинается при скорости испарения влаги 0,49 кг/(м<sup>2</sup>·ч). В целях предотвращения образования трещин в этих условиях рекомендуется использовать для приготовления бетонной смеси увлажненные заполнители, защищать поверхность бетона от прямого воздействия ветра и солнечной радиации, снижать температуру бетона. В некоторых случаях трещины образуются в отформованных конструкциях даже при изготовлении в цехе, если в помещении имеются сильные сквозняки, вызывающие высушивание не набравшего прочность бетона. В. Новокшонов (Novokshonow W. Cracking in hot climates. *Concrete International*. 1986. V. 8, pp. 27–33) сообщает о растрескивании на отдельные блоки забетонированной волноотбойной стенки толщиной 40 см на берегу моря. При проведении бетонных работ в Саудовской Аравии и Египте он рекомендует для уменьшения образования трещин применять сульфатостойкие цементы и не рекомендует высокие дозировки суперпластификаторов. Предпочтительны водоредуцирующие добавки с эффектом замедления твердения. Отмечает ускоренное снижение активности цемента.

### Карбонизация бетона в условиях жаркого влажного климата

Условия эксплуатации железобетонных конструкций в районах с влажным тропическим климатом отличаются постоянно повышенной температурой и влажностью воздуха, сильным нагреванием поверхности бетона солнечным облучением,

**Таблица 1**  
**Table 1**

**Результаты прогнозирования возраста конструкции к моменту полной карбонизации защитного слоя**  
**The results of forecasting the age of the structure by the time of complete carbonation of the protective layer**

Тип конструкции	Возраст, лет	Средняя глубина карбонизации, мм	Прогнозируемый срок, лет, карбонизации защитного слоя толщиной		
			15 мм	20 мм	25 мм
Колонны, плиты, панели	16	15	14	25	39
	2	5	18	22	50
	2	7	9	16	25
	14	3	>50	>50	>50
	10	4	>50	>50	>50
	10	2	>50	>50	>50
	10	1	>50	>50	>50
	5	6	31	>50	>50
	9,5	1,5–4	>50	>50	>50
14	10–15	14–32	25>50	>50	
Колонны, столбы, опоры ЛЭП	4	6–12	6–25	11–14	17>50
	1	2,5–4	14–36	25>50	39>50
	1	3,5	18	33	>50
	8–10	4	>50	>50	>50
	8–10	1	>50	>50	>50
	7	2	>50	>50	>50
	16–17	5	>50	>50	>50
	9,5	1	>50	>50	>50
Балки	5	6	31	>50	>50
	5	3–7	33>50	41>50	>50
	9,5	4	>50	>50	>50
Железобетонные трубы	4	2	>50	>50	>50
	4	2,5	>50	>50	>50
Монолитный бетон	10	4	>50	>50	>50
	12–13	5	>50	>50	>50

периодическим воздействием интенсивных тропических дождей. Исследования в НИИЖБ. выполненные с контролем объема поглощенного углекислого газа, показали, что при изменении относительной влажности воздуха от 75 до 35% скорость поглощения углекислого газа бетоном уменьшается в два раза, а при изменении температуры от 22 до -8°C уменьшается в пять раз. В отличие от районов с умеренным и холодным климатом, где карбонизация бетона в периоды с низкой температурой замедляется или прекращается вовсе, карбонизация в тропической зоне протекает в течение всего года. Скорость карбонизации бетона зависит от влажности и температуры, что, в свою очередь, зависит от

массивности конструкции. Характерной особенностью приготовления бетона на Кубе является использование дробленых карбонатных песков, зерна которых имеют остроугольную форму и малое количество мелких фракций. Бетон на таких песках требует повышенного расхода воды и цемента для получения требуемой удобоукладываемости бетонной смеси. Тепловлажностная обработка бетона не применялась.

Обследованию подвергались железобетонные элементы, изготовленные в разные годы и находящиеся под открытым небом в береговой полосе на расстоянии около 4 км от берега моря. Глубину карбонизации определяли с помощью раствора фенолфталеина в этиловом спирте. Ожидаемое время карбонизации  $t_2$  защитного слоя толщиной  $x_2$  рассчитывали по формуле:

$$t_2 = t_1 (x_2^2 : x_1^2),$$

где  $t_1$  – возраст конструкции на момент обследования;  $t_2$  – возраст конструкции к моменту карбонизации слоя бетона на толщину защитного слоя. Результаты расчета приведены в табл. 1.

Средняя влажность бетона в обследованных конструкциях равнялась  $3,1 \pm 0,84\%$ . В некоторых конструкциях защитный слой может быть карбонизирован за 10–15 лет. К таким конструкциям относятся многпустотные плиты, стеновые панели специальной серии, пространственные конструкции, столбы оград, колонны легких одноэтажных домов. В некоторых случаях крупные зерна карбонатного заполнителя оказались проницаемы для углекислого газа, глубина карбонизации около них повышенная.

Отмечено, что с южной стороны конструкции, обращенной к солнцу, глубина карбонизации бетона примерно в два раза больше, чем на северной теневой стороне. Периодический нагрев поверхности солнцем уменьшает влажность бетона и делает его более проницаемым для углекислого газа. Имеют значение условия и качество уплотнения бетона.

В условиях ускоренной карбонизации защитного слоя бетона и воздействия морской воды и аэрозоля развивается коррозия стальной арматуры.

#### **Действие морской воды и аэрозоля морских солей**

Проникновение хлоридов в бетон в условиях воздействия на него брызг и аэрозоля морской воды исследовалось на северном побережье Кубы. При изготовлении бетонных образцов использовались портландцемент, пуццолановый портландцемент и карбонатный заполнитель. Водоцементное отношение равнялось 0,4 и 0,54. Образцы-кубы размерами 100×100×100 мм и армированные призмы 70×70×140 мм с пятью гранями, изолированными двухслойным лакокрасочным покрытием и одной неизолированной рабочей гранью, установлены на стенде в 10 м от берега моря. Неизолированная

Таблица 2  
Table 2

Содержание хлоридов в бетоне от массы цемента  
после двух лет испытаний  
Chloride content in concrete from the weight of cement  
after two years of testing

Вид цемента	В/Ц	Максимальное содержание Cl, %	Содержание Cl, %, на глубине		Глубина, мм, на которой количество хлоридов равно 0,4% от массы цемента
			25 мм	35 мм	
Портландцемент	0,4	0,95	0,32	0,15	22
То же	0,54	1,24	0,45	0,17	27
Пуццолановый цемент	0,4	0,62	0,31	0	22
То же	0,54	1,05	0,30	0	22

грань располагалась вертикально и была обращена в сторону моря. Периодически для оценки состояния стальной арматуры выполнялись электрохимические исследования. Для химического анализа на хлориды отбирали с помощью фрезерного станка слои толщиной 2 мм. Результаты анализов приведены в табл. 2.

Наибольшее количество хлоридов находилось на глубине 10 мм от поверхности бетона, тогда как во внешнем слое количество хлоридов было меньшим, что вызвано как смывом хлоридов с поверхности бетона дождями, так и вследствие испарения воды преимущественно в тонком наружном слое. Меньшее количество хлоридов содержалось в бетоне на пуццолановом цементе. Полагая, что процесс диффузии развивается по закону корня квадратного из времени, можно подсчитать, что на глубине 50 мм критическое содержание хлоридов 0,4% от массы цемента можно ожидать через 7–10 лет.

Таким образом, в условиях систематического воздействия брызг морской воды и аэрозоля бетон не показал достаточного защитного действия. Однако следует помнить, что в эксперименте не учтено снижение проницаемости бетона вследствие продолжающейся гидратации цемента при длительных сроках эксплуатации железобетонных конструкций.

Проникновение хлоридов в бетон железобетонных конструкций морских сооружений и сооружений, находящихся на небольшом расстоянии от берега моря (обрызгивание во время штормов), определяли по результатам обследования шести портовых сооружений на Кубе, возведенных в различные годы. Из них три сооружения находятся на южном берегу (города Гавана, Матансас, Нуэвитас) и три на северном берегу (Сьенфуэгос,

Мансанильо, Сантьяго-де-Куба). Кроме того, обследован ряд сооружений, находящихся на расстоянии до 800 м от берега моря в зоне действия аэрозоля морских солей. Естественно, в зоне различных сооружений агрессивность среды была неодинаковой, различными были материалы для приготовления бетона и составы бетона. Пробы бетона отбирали из конструкций различных типов: свай, балок, плит, колонн и др. Часть из них подвергалась непосредственному воздействию морской воды, другая – действию аэрозоля. Срок эксплуатации отдельных сооружений был различным – от 1 до 62 лет. В процессе обследования определяли глубину карбонизации защитного слоя бетона, глубину проникновения хлоридов, влажность бетона и прочность неразрушающим методом с помощью молотка Шмидта.

Прочность бетона приводили к прочности цилиндрических образцов диаметром 15 см и высотой 30 см. Кроме того, на отобранных образцах бетона определяли распределение хлоридов по глубине, для чего с помощью фрезерного станка снимали слои толщиной 2 мм, в отдельных случаях до 20 слоев. Полученный порошок анализировали на содержание хлорид-ионов. Определяли также влажность и водопоглощение бетона. Глубину проникновения хлоридов в бетон определяли колориметрически с помощью 1n раствора нитрата серебра, наносимого на скол бетона. О наличии хлоридов свидетельствовало образование белой соли хлорида серебра.

Результаты определения глубины проникновения хлоридов в бетон приведены к возрасту 50 лет. Ускоренное проникновение хлоридов в бетон наблюдалось, если сооружение находилось на расстоянии менее 10 м от берега моря. На расстоянии 10–15 м глубина проникновения хлоридов не превышала 30 мм. В конструкциях, расположенных на расстоянии 300–800 м от берега моря, хлориды колориметрической пробой в бетоне не обнаруживались. В трех случаях в конструкциях, расположенных на расстоянии 300–800 м от моря, хлориды проникли на глубину 105–140 мм.

В зависимости от условий среды и качества бетона хлориды проникают на глубину 20 мм за 1–30 лет, на глубину 50 мм за 1–40 лет. При периодическом увлажнении морской водой бетон умеренной плотности быстро насыщается хлоридами. Например, после 20 лет эксплуатации в бетонных плитах пирса хлориды обнаружены на глубине 50 мм и более. С удалением от берега моря содержание хлоридов в бетоне резко понижается. В железобетонных конструкциях зданий различного назначения в г. Сьенфуэгосе на расстоянии 300 и 800 м от берега моря после 9–13 лет эксплуатации хлориды в бетоне не обнаружены. В плотном бетоне свай в приливно-отливной зоне за 28 лет хлориды проникли на глубину 50–55 мм.

В обследованных зданиях и сооружениях, расположенных в непосредственной близости от моря,

после эксплуатации от 1 до 62 лет хлориды проникли в бетон на глубину до 50–80 мм.

Сравнением данных химического анализа и глубины проникновения хлоридов в бетон с помощью раствора азотнокислого серебра на сколе установлено, что колориметрическим способом хлориды определяются при их содержании в бетоне 0,1–0,2% от массы бетона. Это количество примерно соответствует критическому содержанию, выше которого начинается коррозия арматуры.

Рассчитанные по результатам химического анализа коэффициенты диффузии хлоридов в бетон находились в интервале от  $8,63 \times 10^{-8}$  до  $1,83 \times 10^{-10}$  см<sup>2</sup>/с при этом средняя влажность бетона равна 3,23%.

Испытания армированных образцов из бетона с В/Ц от 0,24 (с суперпластификатором) до 0,6 после трех лет экспозиции в 10 м от моря (воздействие аэрозоля и брызг морской воды) показали следующее. Все образцы, даже при толщине защитного слоя, имели удовлетворительные электрохимические показатели, в том числе электрохимические потенциалы, токи при потенциале +300 мВ, значения потенциала через 1 мин после отключения поляризирующего тока, хотя во всех случаях наблюдалось некоторое смещение показателей в сторону ухудшения. Несколько увеличались коэффициенты вариации названных показателей. Возросло катодное ограничение, что свидетельствовало о снижении диффузии кислорода (уплотнении бетона). Химическим анализом установлено увеличение количества хлоридов в слоях бетона со стороны моря. Наименьшее количество хлоридов обнаружено в бетоне с суперпластификатором (В/Ц=0,24). Рассчитанные значения коэффициента диффузии хлоридов равнялись  $1,85 \times 10^{-8}$  со стороны моря и  $0,6 \times 10^{-8}$  с противоположной стороны. Токи коррозии за период с 6 мес до 3 лет возросли в отдельных случаях в несколько раз, однако остались в области значений, характерных для пассивной стали.

В образцах, установленных от берега в 100 и 200 м, количество хлоридов в бетоне было незначительным, неспособным вызвать коррозию арматуры.

Таким образом, применение суперпластификатора позволяет за счет снижения В/Ц до 0,3 и более существенно снизить проницаемость для хлоридов. Дальнейшие испытания, выполненные в НИИЖБ, показали, что применение в качестве добавок сочетания суперпластификатора и микрокремнезема позволяет понизить диффузионную проницаемость бетона на 2–3 порядка величин и обеспечить защиту от коррозии стальной арматуры. Заметно снижают диффузионную проницаемость бетона минеральные добавки, содержащие кремнезем, — туфы, золы и некоторые другие в сочетании с суперпластификатором (Алексеев С.Н., Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость железобетонных конструкций в агрессивной промышленной среде. М.: Стройиздат, 1976).

### Действие микроорганизмов и грибов

Коррозия железобетонных конструкций под воздействием микроорганизмов изучается в России в течение ряда лет. К настоящему времени неплохо изучена коррозия бетона при воздействии тионовых бактерий в водоочистных сооружениях. Существенные повреждения выявлены в коллекторах сточных вод. Исследован ряд трубопроводов, транспортирующих сточные воды. Сущность коррозионного процесса состоит в следующем. В осадке, образующемся в трубопроводах в условиях дефицита кислорода, развиваются анаэробные бактерии, выделяющие сероводород, который поступает в газовую среду трубопровода; на влажном своде трубы сероводород аэробными тионовыми бактериями обращается в серную кислоту, которая разрушает бетон. Процесс разрушения бетона развивается вплоть до обрушения трубопровода. В настоящее время в России проблема защиты от коррозии решается заменой железобетонных труб на трубы из полимеров, стойких к воздействию серной кислоты. На Кубе аналогичные исследования нам неизвестны, но, учитывая жаркий климат, указанные разрушения неизбежны. На Кубе значительные образования лишайниками наблюдались на асбестоцементных стенах предприятия пищевой промышленности. Гифы лишайников выделяют кислоты, способные разрушать материалы на основе портландцемента.

Обследования подводных частей свай морских причалов, проведенные на Кубе болгарскими специалистами, показали разрушение бетона от совместного воздействия морской воды и морских организмов на глубину до 3 см за 20–30 лет эксплуатации сооружения. Наблюдалось разрушение бетона на свай моллюском *Pelecypoda*. Известны также два типа перфорантов *Litofaga Bisalcata* и *Rupellaria Turpica*. Обычно *Litofaga* поселяется на натуральном известняковом камне (Розенталь Н.К. Коррозионная стойкость цементных бетонов низкой и особо низкой проницаемости. М.: ФГУП ЦПП, 2006. 520 с.; Gomoz O. Informacion sobre organismos citofagos. Academia de Ciencias de Cuba. Instituto de Oceanologios, Habana. 1987). Эти организмы развиваются и на бетоне, изготовленном на карбонатном заполнителе, характерном для строительной практики Кубы. С помощью водолазов выполнены обследования свай морского причала на глубине 2 и 5 м. Обнаружены моллюски-перфоранты *Litofaga Bisalcata* и *Rupellaria Turpica*. Моллюски поселяются на камне в стадии личинок, в такой форме внедряются в известняк; вырастая, проникают на большую глубину, постепенно увеличивая диаметр канала. В образцах, отобранных из свай причала, построенного в 1913 г., обнаружены повреждения в виде круглого канала диаметром до 1 см и длиной до 10 см. Расстояние между отдельными каналами было 2–5 см. Повреждения наблюдаются на бетоне с заполнителем из мягких карбонатных пород. Сведения

о повреждении бетона на кварцевом песке и крупном заполнителе из твердых изверженных пород – отсутствуют.

### Выводы

1. В статье рассмотрены особенности климата Кубы, которые влияют на коррозионное состояние железобетонных конструкций. Негативное влияние оказывают нагревание поверхности солнечным излучением, высокая влажность и температура воздуха, генерируемый в зоне прибоя аэрозоль морских солей, в первую очередь хлоридов.

2. Обследованы различные типы железобетонных конструкций с определением глубины карбонизации бетона. Показано, что наиболее глубокая

карбонизация бетона наблюдается на поверхностях, облучаемых солнцем.

3. Испытаниями армированных бетонных образцов на расстоянии 10 м от моря и вдали от моря с химическим анализом послойно отобранных проб бетона показано агрессивное действие аэрозоля и обрызгивания морской водой. Наиболее стойкими являлись образцы с минимальной проницаемостью, которая была обеспечена применением суперпластификатора со снижением водоцементного отношения.

4. Приведены результаты обследования железобетонных конструкций в шести портах Гаваны. Показано повреждающее воздействие моллюсков-камнеточцев, которое проявлялось при использовании крупного заполнителя из карбонатных пород.

### Список литературы

1. Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Баев С.М. Определение коррозионной стойкости торкрет-бетона как защитного покрытия бетонных и железобетонных конструкций // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 69–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-69-72
2. Усачёв И.Н., Розенталь Н.К. Полувековой опыт эксплуатации железобетонных конструкций Кислоубской ПЭС в Баренцевом море // *Строительные материалы*. 2022. № 10. С. 68–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-68-72>
3. Розенталь Н.К. Проницаемость и коррозионная стойкость бетонов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2013. № 1. С. 35–37.
4. Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Изменение № 1 к СП 72.13330.2016 «СНИП 3.04.03–85 Защита строительных конструкций и сооружений от коррозии» // *БСТ*. 2019. № 7 (1019). С. 12–13.
5. Ивашенко Ю.В., Тронча Л.А., Рябухин А.К. Разработка эффективного решения защитного сооружения в сложных условиях строительства // *Научное обеспечение агропромышленного комплекса: Сборник статей по материалам IX Всероссийской конференции молодых ученых*. Краснодар, 2016. С. 793–794.
6. Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Разработка пособия к своду правил 28.13330.2017 «СНИП 2.03.11–85 Защита строительных конструкций от коррозии» // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2018. № 4 (19). С. 93–103.
7. Усачев И.Н., Розенталь Н.К. Пионерная российская приливная электростанция – памятник науки и техники России // *Энергетик*. 2019. № 2. С. 19–25.
8. Усачев И.Н. Опыт создания и полувековой эксплуатации Кислоубской приливной электростанции – основа освоения Арктики и Северного морского пути // *Гидротехника*. 2021. № 4. С. 73–75.

### References

1. Stepanova V.F., Rozental N.K., Chekhny G.V., Baev S.M. Determination of corrosion resistance of shotcrete as a protective coating of concrete and reinforced concrete structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 69–72. (In Russian). DOI: 10.31659/0585-430X-2018-762-8-69-72
2. Usachev I.N., Rosental N.K. Half a century of experience in the operation of reinforced concrete structures of the Kislaya Guba tidal power station in the Barents sea. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 10, pp. 68–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-807-10-68-72>
3. Rozental N.K. Permeability and corrosion resistance of concrete. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2013. No. 1, pp. 35–37. (In Russian).
4. Stepanova V.F., Rosental N.K., Chehny G.V. Change No. 1 to SP 72.13330.2016 «SNIP 3.04.03–85 Protection of building structures and structures from corrosion». *BST*. 2019. No. 7, pp. 12–13. (In Russian).
5. Ivashchenko Yu.V., Troncha L.A., Ryabukhin A.K. Development of an effective solution of a protective structure in difficult construction conditions. *Scientific provision of the agro-industrial complex Collection of articles on the materials of the IX All-Russian Conference of Young Scientists*. Krasnodar. 2016, pp. 793–794. (In Russian).
6. Stepanova V.F., Rosental N.K., Chehny G.V. Development of the manual to the code of Rules 28.13330.2017 «Protection of building structures from corrosion». *Vestnik NITSStroitel'stvo*. 2018. No. 4 (19), pp. 93–103. (In Russian).
7. Usachev I.N., Rosenthal N.K. Pioneer Russian tidal power plant – a monument of science and technology of Russia. *Energetik*. 2019. No. 2, pp. 19–25. (In Russian).
8. Usachev I.N. The experience of creation and half-century operation of the Kislogubskaya tidal power plant – the basis for the development of the Arctic and the Northern Sea Route. *Gidrotehnika*. 2021. No. 4, pp. 73–75. (In Russian).

А.О. АДАМЦЕВИЧ, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, директор (AdamtsevichAO@mgsu.ru),  
А.П. ПУСТОВГАР, канд. техн. наук, доцент, научный руководитель (PustovgarAP@mgsu.ru),  
Л.А. АДАМЦЕВИЧ, канд. техн. наук, зав. НИЛ ЭЭиУС (AdamtsevichLA@mgsu.ru),  
Д.В. КРАМЕРОВ, зав. НИЛ СКРИБ (KramerovDV@mgsu.ru),  
П.Ю. ВОРОБЬЕВ, младший научный сотрудник НИЛ ЭЭиУС (VorobevPYU@mgsu.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,  
НИИ строительных материалов и технологий (129337, Москва, Ярославское ш., 26)

## Исследование особенностей работы бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства

Рассматривается наиболее распространенный на сегодняшний день подход к применению технологии аддитивного строительного производства, предусматривающий печать контура зданий и сооружений с созданием несъемной бетонной опалубки для возведения несущих и ограждающих конструкций. Исследуются особенности работы несъемной опалубки под действием бокового давления бетонной смеси. Приводятся результаты реализованного на базе НИИ СМиТ НИУ МГСУ этапа экспериментальных исследований, в рамках которого изучались прочностные характеристики образцов, отобранных из однослойных бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства, а также несущая способность фрагментов несъемной опалубки прямоугольной и замкнутой цилиндрической формы под воздействием моделируемого давления подвижной бетонной смеси. В ходе работы изучено влияние на прочность и несущую способность формообразующих элементов несъемной опалубки таких параметров, как ширина и высота печатного слоя, а также наличие холодных швов между отдельными слоями напечатанной конструкции. Выполнение работы направлено на ускорение внедрения передовых технологий в строительстве в части создания научно-технического задела для развития аддитивного строительного производства и развития отечественной нормативно-технической базы в области строительной 3D-печати.

**Ключевые слова:** аддитивное строительное производство; 3D-печать бетоном, 3DCP, надежность, гидростатическое давление, анизотропия свойств, прочность межслоевого сцепления, параметры печати.

Работа выполнена в рамках государственного задания, утвержденного Минстроем России от 29 декабря 2022 г. № 069-00003-23-00 на 2023 г. и на плановый период 2024 и 2025 гг.

**Для цитирования:** Адамцевич А.О., Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А., Крамеров Д.В., Воробьев П.Ю. Исследование особенностей работы бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 38–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-38-46>

A.O. ADAMTSEVICH, Candidate of Sciences (Engineering), Senior Researcher, Director (AdamtsevichAO@mgsu.ru),  
A.P. PUSTOVGAR, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor, Scientific Director (PustovgarAP@mgsu.ru),  
L.A. ADAMTSEVICH, Candidate of Sciences (Engineering), Head of Research Laboratory of Energy Efficiency, Ecology and Sustainable Construction (AdamtsevichLA@mgsu.ru),  
D.V. KRAMEROV, Head of Research Laboratory of Building Composites, Mortars and Concrete, (KramerovDV@mgsu.ru),  
P.Yu. VOROBEV, Junior Researcher, Research Laboratory of Energy Efficiency, Ecology and Sustainable Construction (VorobevPYU@mgsu.ru)  
National Research Moscow State University of Civil Engineering, Research Institute of Construction Materials and Technologies  
(26, Yaroslavl'skoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Investigation of the Working Features of Concrete Structures Manufactured Using Technologies of Additive Building Manufacturing

The most common approach to the application of additive manufacturing technology today, which provides for printing the contour of buildings and structures with the creation of non-removable concrete formwork for the construction of load-bearing and enclosing structures. The features of the operation of a non-removable formwork under the action of lateral pressure of a concrete mixture are investigated. The results of the experimental research stage implemented on the basis of the SMITH Research Institute of the Moscow State University of Civil Engineering are presented, in which the strength characteristics of samples selected from single-layer concrete structures made using additive manufacturing technology, as well as the bearing capacity of fragments of non-removable formwork of rectangular and closed cylindrical shape under the influence of simulated pressure of a concrete mixture were studied. In the course of the work, the influence of parameters such as the width and height of the printed layer, as well as the presence of cold seams between individual layers of the printed structure on the strength and bearing capacity of the forming elements of the permanent formwork was studied. The work execution is aimed at accelerating the introduction of advanced technologies in construction in terms of creating scientific and technical groundwork for the development of additive construction production and the development of the domestic regulatory and technical base in the field of construction 3D printing.

**Keywords:** additive construction production; 3D printing with concrete, 3 DCP, reliability, hydrostatic pressure, anisotropy of properties, interlayer bonding strength, printing parameters.

The work was carried out within the framework of the state task approved by the Ministry of Construction of the Russian Federation dated December 29, 2022 No. 069-00003-23-00 for 2023 and for the planning period 2024 and 2025.

**For citation:** Adamtsevich A.O., Pustovgar A.P., Adamtsevich L.A., Kramerov D.V., Vorobev P.Yu. Investigation of the working features of concrete structures manufactured using technologies of additive building manufacturing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 38–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-38-46>

Аддитивное строительное производство (строительная 3D-печать бетоном, технология 3DCP – в международной терминологии) является перспективным способом автоматизированного возведения зданий и сооружений из бетона, который призван сократить долю ручного труда на строительной площадке, ускорить производство строительно-монтажных работ и обеспечить сокращение материалоемкости строительства [1–9].

Наиболее распространенным на сегодняшний день подходом применения аддитивных технологий в строительстве является печать несъемной бетонной опалубки для вертикальных несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений, которые затем заполняются подвижной бетонной смесью требуемой плотности либо сыпучими наполнителями, выполняющими функцию теплоизоляции [10, 11].

Возведение несъемной опалубки при помощи строительного 3D-принтера позволяет исключить расходы на инвентарную опалубку и производственные процессы ее ручного монтажа и демонтажа, а также сократить объем отходов строительного производства, создаваемых на этапе производства опалубочных работ. Использование несъемной опалубки, изготовленной по технологии аддитивного строительного производства, позволяет создавать конструкции сложной архитектурной формы и придавать уникальный архитектурный облик возводимым зданиям и сооружениям, что в отличие от традиционных способов бетонирования с применением инвентарной опалубки не приводит к удорожанию строительства. Кроме этого, отказ от печати полнотелых бетонных конструкций в пользу применения строительной 3D-печати для возведения лишь внешнего контура строительных конструкций обеспечивает дополнительный экономический эффект благодаря оптимизации затрат на строительные материалы, так как при таком подходе более дорогие модифицированные строительные смеси для аддитивного строительного производства составляют лишь небольшую долю объема возводимой конструкции, которая может в дальнейшем заполняться более дешевыми строительными материалами.

При этом одной из проблем перехода к массовому практическому использованию технологии аддитивного производства остается недостаточная изученность особенностей работы тонкостенных бетонных конструкций, изготовленных методом послойной экструзии, под действием различных видов нагрузок, включая гидростатическое давление бетонной смеси, что затрудняет проектирование и расчет несъемной опалубки, выполненной по технологии аддитивного строительного производства.

Для преодоления указанного барьера на базе НИИ СМиТ НИУ МГСУ проводятся экспериментальные исследования, обеспечивающие сбор, накопление и анализ эмпирических данных об особенностях прочностных свойств и несущей способности

элементов несъемной опалубки, изготовленной с применением технологии аддитивного строительного производства, а также изучение и систематизацию факторов, оказывающих влияние на конечные эксплуатационные свойства таких конструкций.

### Материалы и методы

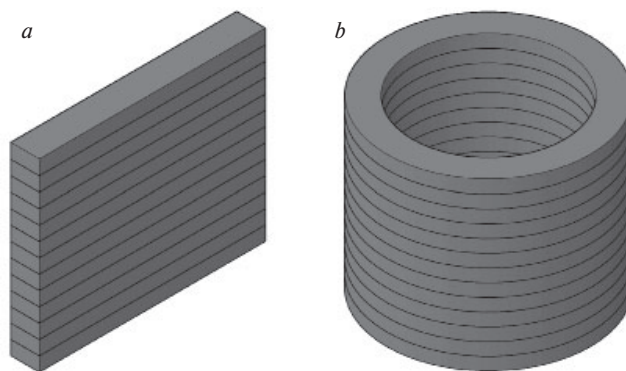
С учетом технологических особенностей производства опалубочных конструкций из бетона методом аддитивного строительного производства основными областями применения таких решений является опалубка стен, а также опалубка колонн и пилонов. Технология изготовления указанных элементов предполагает, как правило, вертикальную ориентацию (плоскость укладки слоев печати параллельна основанию).

При использовании напечатанной на строительном 3D-принтере бетонной опалубки ее несущая способность обеспечивается:

- физико-механическими характеристиками материала для аддитивного строительного производства, из которого изготавливается конструкция;
- герметичностью формообразующих поверхностей, а также прочностью, жесткостью и геометрической неизменяемостью формы и размеров опалубочной конструкции при воздействии давления бетонной смеси в процессе бетонирования.

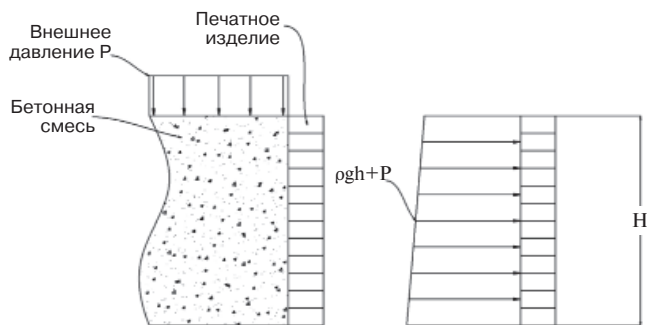
С учетом анализа распространенных форм вертикальных элементов и характера работы печатных элементов в конструкции опалубки в рамках проводимого исследования были выбраны элементы двух основных разновидностей: прямолинейная стенка и элемент колодца цилиндрической формы (рис. 1).

В общем случае при укладке бетонной смеси в опалубку на ее формообразующие элементы воздействует давление с эпюрой треугольного вида. Однако в рамках проводимого исследования в целях уменьшения высоты испытываемых образцов к поверхности бетонной смеси прикладывалась дополнительная равномерно распределенная нагрузка, которая увеличивалась с постоянной скоростью до момента



**Рис. 1.** Схематичные изображения исследуемых элементов: прямолинейная стенка габаритами 500×300 мм (а) и колодец цилиндрической формы (б) с высотой и внутренним диаметром 300 мм

**Fig. 1.** Schematic images of the elements under study: a straight wall with dimensions of 500×300 mm (a) and a cylindrical well with a height and internal diameter of 300 mm



**Рис. 2.** Схема работы формообразующего элемента несъемной опалубки под воздействием бокового давления и дополнительной нагрузки (слева) и эпюра нагрузки по высоте конструкции (справа):  $\rho$  – плотность бетонной смеси;  $g$  – ускорение свободного падения;  $h$  – переменная высота;  $H$  – полная высота заливки смеси;  $P$  – внешнее (дополнительное) давление на поверхность смеси

**Fig. 2.** Scheme of operation of the formative element of permanent formwork under the influence of pressure and additional load (left) and diagram of the load along the height of the structure (right):  $\rho$  – density of the concrete mixture;  $g$  – acceleration of free fall;  $h$  – variable height;  $H$  – total pouring height concrete mixture;  $P$  – external (additional) pressure on the surface of the mixture

потери опалубкой герметичности и/или несущей способности. Таким образом моделировалось увеличение давления столба бетонной смеси на формообразующий элемент опалубки в нижней зоне треугольной эпюры давления при увеличении высоты бетонирования, а эпюра бокового давления из треугольной принимала форму трапеции, близкой к прямоугольнику (рис. 2).

Для определения несущей способности формообразующих элементов несъемной опалубки в виде фрагментов прямолинейных конструкций была изготовлена оснастка, позволяющая испытывать формообразующие элементы длиной до 500 мм и высотой до 300 мм.

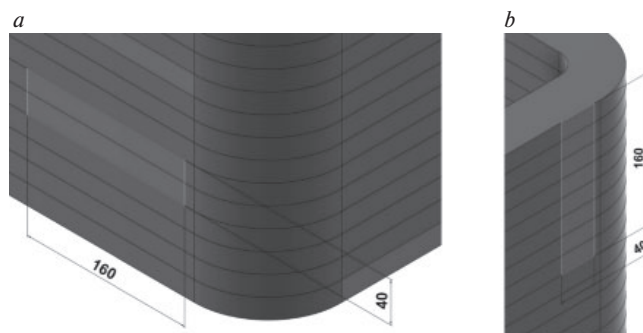
Перечень характеристик и параметров, определяемых в рамках настоящего исследования:

- плотность;
- прочность при сжатии и растяжение при изгибе контрольных образцов материала, изготовленных методом формования, и образцов, отобранных из напечатанных конструкций;
- несущая способность и герметичность формообразующих элементов под воздействием моделируемого давления бетонной смеси.

Изготовление образцов-фрагментов несъемной бетонной опалубки с применением технологии аддитивного строительного производства осуществлялось при помощи портального строительного 3D-принтера «АМТ» S-6045M, имеющего зону печати 3500×3100×1000 мм. Экструзия материала в процессе печати всех изделий выполнялась при помощи штатной печатающей головки строительного 3D-принтера со шнековой подачей из накопительного бункера.

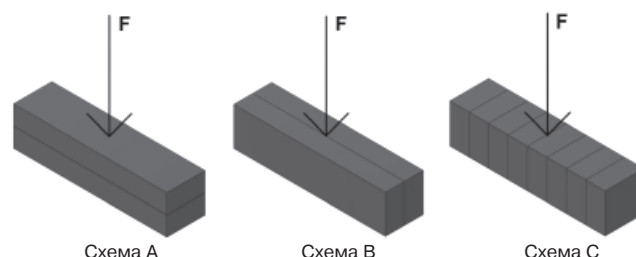
#### Подготовка образцов и проведение испытаний

Для определения прочности при сжатии и на растяжение при изгибе методом аддитивного строительного производства изготавливались изделия в



**Рис. 3.** Схемы выпиливания образцов: вдоль направления печати (а) и перпендикулярно направлению печати (b)

**Fig. 3.** Sample cutting patterns: along the printing direction (a) and perpendicular to the printing direction (b)



**Рис. 4.** Направления приложения нагрузки при определении прочности при сжатии и растяжении при изгибе: сверху – схема А, вдоль – схема В и поперек – схема С печатного слоя

**Fig. 4.** Directions of load application when determining compressive and tensile strength in bending: from above – Scheme A, along – Scheme B, and across – Scheme C, printed layer



**Рис. 5.** Изделия в форме колодцев с высотой печатного слоя 1 см (2 шт.) и высотой печатного слоя 2 см (2 шт.), изготовленные для выпиливания образцов 160×40×40 мм

**Fig. 5.** Well-shaped products with a printed layer height of 1 cm (2 pcs.) and a printed layer height of 2 cm (2 pcs.), made for cutting samples 160×40×40 mm

форме колодца квадратной формы с шириной печатного слоя 5 см, из которых затем при помощи камнерезного станка выпиливались образцы-призмы размером примерно 160×40×40 мм. Образцы выпиливались в двух различных направлениях: горизонтальном (вдоль направления печати) и вертикальном (перпендикулярно направлению печати) (рис. 3). Выпиленные образцы дополнительно шлифовались в целях приближения к заданным размерам и обеспечения плоскопараллельности опорных граней в процессе проведения испытаний на сжатие.

Горизонтальных образцов было выпилено в два раза больше, чем вертикальных, в целях получения в

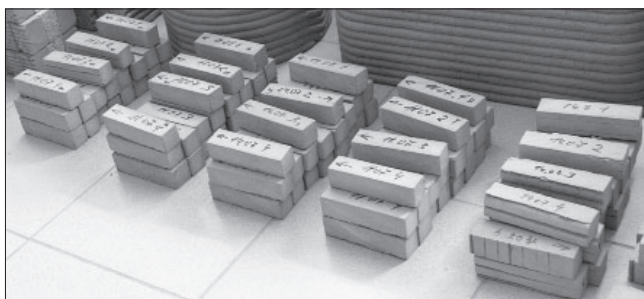


Рис. 6. Образцы размером 160×40×40 мм, выпиленные из напечатанных изделий

Fig. 6. Samples measuring 160×40×40 mm, cut from printed products



Рис. 7. Изделие для выпиливания образцов прямоугольных стенок в форме квадратного колодца с высотой печатного слоя 2 см, изготовленное в процессе непрерывной печати (слева), и первая треть аналогичного изделия с имитацией «холодного» шва (справа)

Fig. 7. A product for cutting samples of rectangular walls in the shape of a square well with a printed layer height of 2 cm, manufactured in a continuous printing process (left) and the first third of a similar product with an imitation of a "cold" seam (right)

общей сложности трех различных серий образцов для проведения испытаний с приложением нагрузки в трех различных направлениях: сверху, вдоль и поперек печатного слоя (рис. 4). Кроме того, все образцы для данного вида испытаний были изготовлены двумя способами: при высоте печатного слоя 1 и 2 см.

На рис. 5 представлены фактически изготовленные изделия в форме колодцев для выпиливания образцов, необходимых для определения прочности при сжатии и растяжении при изгибе (рис. 6). Для проведения испытаний отбирались только те образцы, на которых не наблюдалось визуальных дефектов после выпиливания.

Для определения прочности (несущей способности) единичного прямоугольного формообразующего элемента под воздействием бокового давления бетонной смеси изготавливались колодцы квадратной формы, из которых затем выпиливалась одна серия из четырех прямоугольных образцов-стенок. Изделия печатались также двух видов: с высотой слоя 1 и 2 см. Часть колодцев при этом изготавливалась с имитацией холодного шва: в этом случае выполнялась печать до одной трети общей высоты изделия, после чего делалась пауза в процессе печати не менее чем на 6 ч (рис. 7). Перед возобновлением печати контактная поверхность ранее напечатанной части изделия смачивалась водой при помощи ручного распылителя.

Для определения прочности опалубки замкнутой цилиндрической формы были напечатаны две серии образцов-цилиндров высотой 30 см (рис. 8). Одна



Рис. 8. Процесс изготовления серии из четырех образцов опалубки замкнутой цилиндрической формы

Fig. 8. The process of manufacturing a series of four samples of closed cylindrical formwork

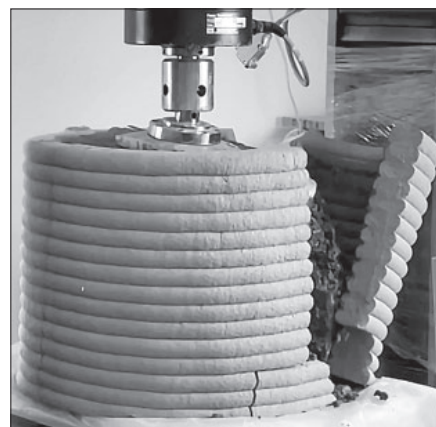
серия была изготовлена с применением того же сопла экструдера, который применялся для печати всех прочих изделий, изготавливаемых в рамках проводимого исследования. Вторая серия была изготовлена с применением сопла уменьшенного диаметра, в результате чего толщина печатного слоя была снижена с 5 до 3,5 см.

Испытание фрагментов конструктивных элементов несъемной опалубки под действием гидростатического давления проводилось с использованием подвижной бетонной смеси (марка по подвижности П4) с высоким содержанием в составе добавки-замедлителя в целях исключения возможной потери подвижности и/или начала схватывания в процессе проведения испытания.

Подготовка к проведению испытания (рис. 9) для образцов единичных фрагментов прямолинейных стенок включала следующие этапы:

- подготовка оснастки и ее размещение в рабочей зоне испытательного пресса;
- установка в оснастку испытуемого образца фрагмента прямолинейной стенки и заполнение внутреннего пространства оснастки рабочим телом — подвижной бетонной смесью;
- установка вырезанной в размер открытого пространства оснастки деревянной крышки, а также металлического плунжера, к которому прикладывается нагрузка в процессе испытания.

Подготовка к проведению испытаний замкнутых формообразующих элементов несъемной опалубки цилиндрической формы выполнялась сходным об-

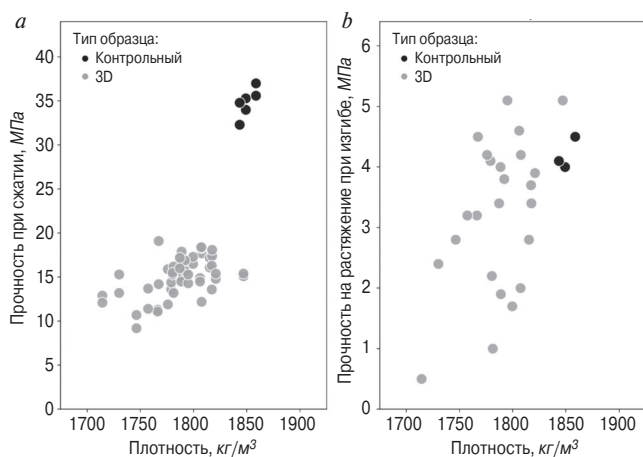


**Рис. 9.** Процесс подготовки к испытанию под действием давления бетонной смеси (на примере испытания единичного прямоугольного элемента)

**Fig. 9.** The process of preparing for testing under the influence of pressure of a concrete mixture (using the example of testing a single rectangular element)

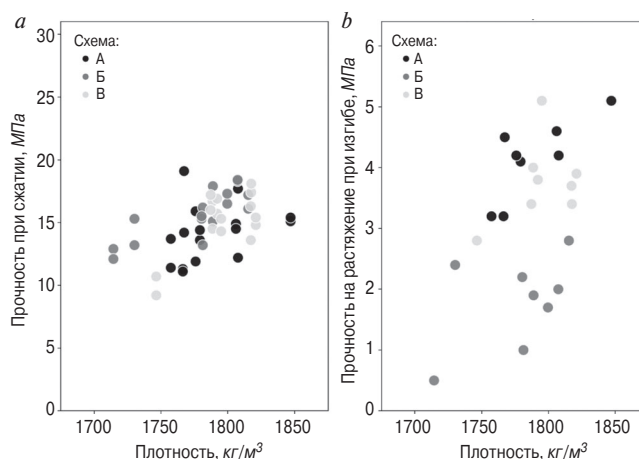
**Рис. 10.** Момент разрушения образца опалубки замкнутой цилиндрической формы под воздействием усиленного при помощи пресса гидростатического давления бетонной смеси

**Fig. 10.** The moment of destruction of a formwork sample of a closed cylindrical shape under the influence of hydrostatic pressure of the concrete mixture reinforced using a press



**Рис. 11.** Прочность образцов из материала для аддитивного строительного производства, изготовленных различным способом: *a* – сжатие; *b* – растяжение при изгибе

**Fig. 11.** Strength of additive manufacturing material samples produced in different ways: *a* – compression; *b* – stretching during bending



**Рис. 12.** Прочность образцов, отобранных из напечатанных конструкций в зависимости от схемы проведения испытания (рис. 4): *a* – сжатие; *b* – растяжение при изгибе

**Fig. 12.** Strength of samples taken from printed structures depending on the test scheme (Fig. 4): *a* – compression; *b* – stretching during bending

разом, однако для испытаний этих конструкций не использовалась оснастка, а бетонная смесь помещалась непосредственно в полость внутри цилиндрического фрагмента (рис. 10).

Скорость нагружения при испытании фрагментов несъемной бетонной опалубки, изготовленной по технологии аддитивного строительного производства, подбиралась таким образом, чтобы испытание длилось более 30 с.

### Результаты и обсуждение

Анализ результатов определения прочности при сжатии и растяжении при изгибе (рис. 11) образцов-призм размером 160×40×40 мм, вырезанных из конструкции прямолинейной стенки, изготовленной с применением технологии аддитивного строительного производства, а также образцов, изготовленных традиционным способом – методом формования по ГОСТ Р 58277–2018 «Смеси сухие строительные на

цементном вяжущем. Методы испытаний», показывает, что для образцов, отобранных из напечатанных конструкций, наблюдается значительно большая дисперсия единичных значений прочности при сжатии и растяжении при изгибе, а также плотности, чем для контрольных образцов. Кроме этого, средняя прочность и плотность образцов, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства, существенно ниже, чем в контрольной серии. Наиболее явно эта особенность проявляется в результатах определения прочности при сжатии, где средние значения для образцов, отобранных из напечатанных конструкций, оказались вдвое ниже, чем в контрольной серии.

Следует отметить, что в настоящей работе использовался состав материала для аддитивного строительного производства, идентичный составу, применяемому ранее при выполнении исследования [12]. Результаты текущей работы подтвердили

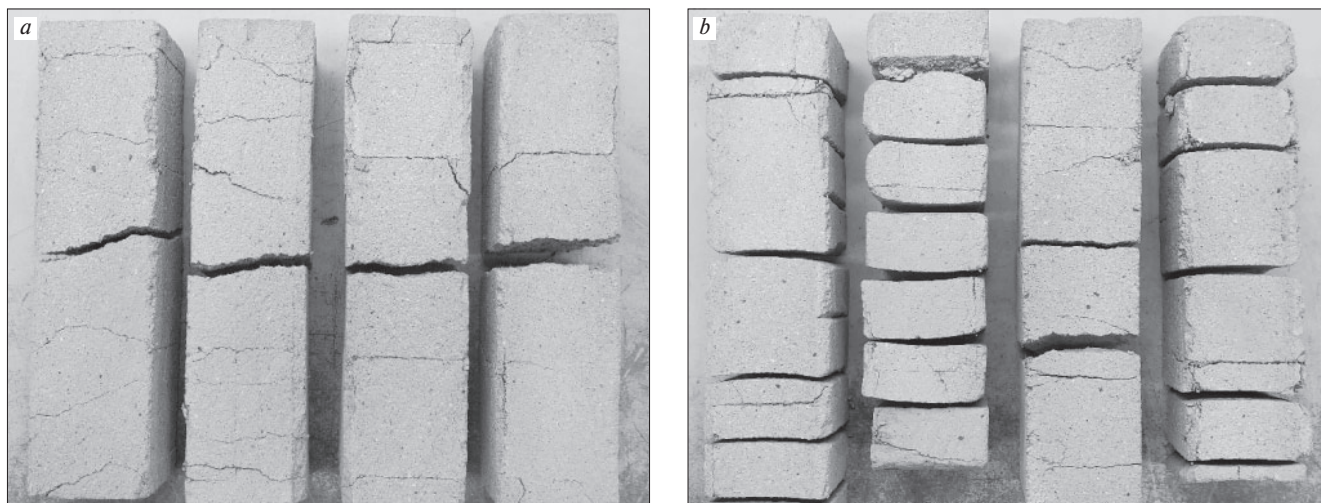


Рис. 13. Пример характера разрушения образцов после проведения испытаний на растяжение при изгибе и сжатии по ГОСТ Р 59097–2020 «Материалы для аддитивного строительного производства. Технические требования» по схеме А (а) и по схеме В (б)

Fig. 13. An example of the nature of destruction of samples after tensile tests during bending and compression in accordance with GOST R 59097–2020 «Materials for additive construction production. Technical requirements» according to scheme A (a) and according to scheme B (b)

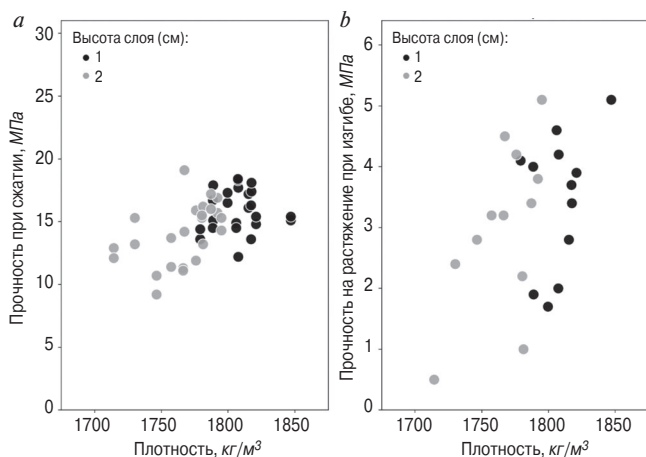


Рис. 14. Прочность образцов, отобранных из напечатанных конструкций с различной высотой печатного слоя: а – сжатие; б – растяжение при изгибе

Fig. 14. Strength of samples selected from printed structures with different heights of the printed layer: a – compression; b – stretching during bending

полученные ранее выводы о более значительной вариативности плотности и прочности образцов, отобранных из конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства, по сравнению с традиционным способом формования и уплотнения бетона в опалубке. Однако в текущей работе снижение прочности при сжатии исследуемых образцов, отобранных из напечатанных конструкций, по сравнению с контрольными образцами оказалось более значительным, чем в предыдущем исследовании. В связи с тем, что в предыдущей работе испытывались образцы цилиндрической формы, отобранные из конструкций методом алмазного выбуривания кернов, а в текущем исследовании образцы-призмы размером 40×40×160 мм выпиливались и дополнительно шлифовались, более существенное падение прочности при сжатии образцов, отобранных из конструкций, изготовленных с применением технологии аддитив-

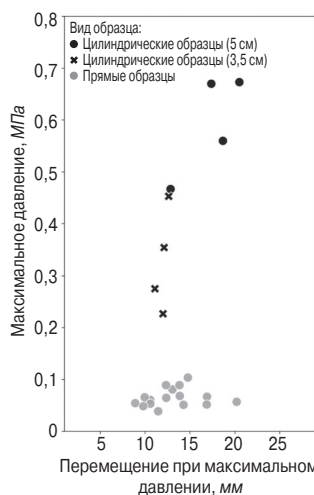


Рис. 15. Результаты оценки несущей способности формообразующих элементов различной формы под воздействием давления бетонной смеси

Fig. 15. Results of assessing the load-bearing capacity of formative elements of various shapes under the influence of pressure of concrete mixture

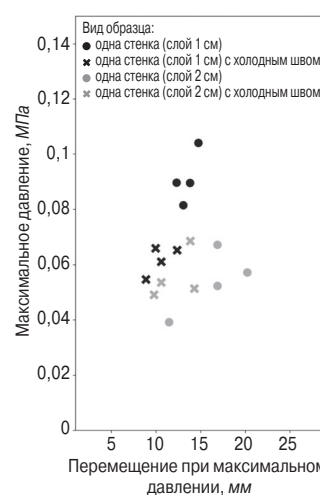
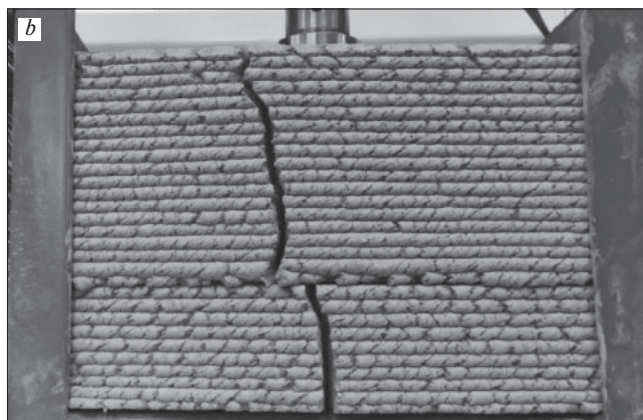
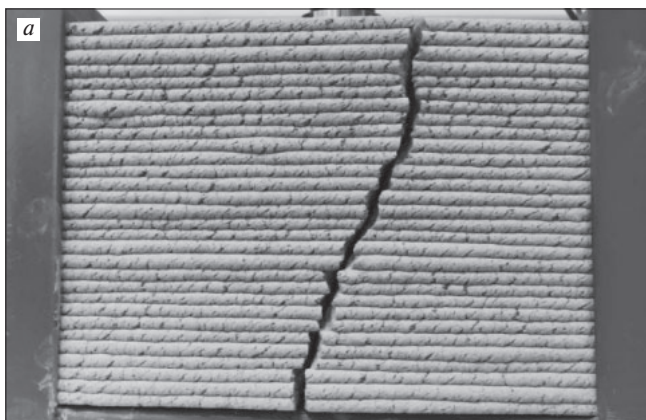


Рис. 16. Результаты оценки несущей способности прямолинейных формообразующих элементов под воздействием давления бетонной смеси

Fig. 16. Results of assessing the load-bearing capacity of rectilinear form-building elements under the influence of pressure of concrete mixture

ного строительного производства, свидетельствуют о высокой степени влияния способа отбора испытываемых образцов на получаемые значения ключевых физико-механических характеристик.

Известная и наиболее часто описываемая в различных работах [14–21] особенность снижения прочности бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства, в зоне соединения печатных слоев в сравнении с монолитным бетоном отражается на результатах определения прочности образцов на растяжение при изгибе (рис. 12) по схеме В (рис. 4), что подтверждает анизотропию свойств бетонных конструкций, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства.



**Рис. 17.** Характер разрушения прямоугольного элемента несъемной опалубки с высотой печатного слоя 1 см: без холодного шва (а) и с холодным швом (b)

**Fig. 17.** The nature of the destruction of a rectangular element of permanent formwork with a printed layer height of 1 cm: without a cold seam (a) and with a cold seam (b)



**Рис. 18.** Характер разрушения прямоугольного элемента несъемной опалубки с высотой печатного слоя 2 см: без холодного шва (а) и с холодным швом (b)

**Fig. 18.** The nature of destruction of a rectangular element of permanent formwork with a printed layer height of 2 cm: without a cold seam (a) and with a cold seam (b)

Следует отметить, что в отличие от прочности на растяжение при изгибе в проведенной серии испытаний данный фактор в значительно меньшей степени повлиял на полученные результаты прочности при сжатии, однако он также отразился на характере разрушения образцов (рис. 13).

Также в ходе исследования было установлено, что при печати конструкций с высотой слоя 1 см можно получить в среднем более высокие значения плотности отбираемых из конструкции образцов и меньший разброс значений прочности при сжатии, чем при использовании высоты слоя 2 см (рис. 14).

Боковое давление бетонной смеси, выдерживаемое формообразующими элементами несъемной опалубки, изготовленной с применением технологии аддитивного строительного производства, было рассчитано с учетом ранее представленной схемы (рис. 2) и фактической площади деревянной крышки, через которую передавалась нагрузка от испытательного пресса на поверхность бетонной смеси, загруженной внутрь опалубки каждого исследуемого в работе типоразмера. Полученное значение максимального давления (рис. 15, 16) соответствует моменту разру-

шения или потери несущей способности испытуемого элемента опалубки.

Полученные данные (рис. 15) свидетельствуют, что несъемная бетонная опалубка цилиндрической формы, изготовленная с применением технологии аддитивного строительного производства, способна обеспечить значительно более высокую несущую способность под воздействием давления бетонной смеси даже при меньших значениях ширины печатного слоя. Использование такой формы внешнего контура вертикальных конструкций способно обеспечить значительное увеличение высоты бетонирования при снижении материалоемкости процесса 3D-печати несъемной опалубки.

Результаты определения прочности единичного прямоугольного элемента показали, что печать стенок с высотой каждого слоя 1 см позволяет достичь более высокой несущей способности конструкции и воспроизводимости результатов испытаний, чем при печати слоями по 2 см. Возникновение холодных швов в процессе печати конструкций приводит к ухудшению несущей способности. Однако для слоя высотой 2 см этот эффект незаметен из-за изначаль-

но более низкой прочности и стабильности получаемых результатов.

Наличие холодного шва отражается на характере разрушения образцов. На фото прямоугольных элементов несъемной опалубки, разрушенных под воздействием моделируемого давления бетонной смеси, можно заметить, что при отсутствии холодного шва элемент разрушается с формированием сплошной трещины по всей высоте элемента, в то время как при наличии холодного шва каждая часть элемента до холодного шва и после него может разрушаться по отдельности (рис. 17, 18).

### Заключение

Использование технологии 3D-печати бетоном (3DCP в международной терминологии) для изготовления несъемной бетонной опалубки является одним из перспективных и быстро развивающихся подходов применения аддитивных технологий в строительстве. Использование технологии аддитивного строительного производства для изготовления несъемной опалубки, заполняемой в последующем бетоном различной плотности или сыпучими теплоизоляционными материалами, применяется на сегодняшний день большинством компаний-лидеров на мировом рынке строительной 3D-печати.

Проведенное экспериментальное исследование показало, что при печати вертикальной несъемной опалубки следует учитывать, что на фактическую несущую способность конструкции оказывает влияние не только выбранная расчетно-конструктивная схема, ширина сечения формообразующих элементов и физико-механические свойства применяемого материала для аддитивного строительного производства, но также режим печати, включая высоту печатного слоя и возможность возникновения холодных швов из-за технологических пауз в процессе печати.

При проектировании и расчете конструкций несъемной бетонной опалубки и других воспринимающих нагрузки элементов, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства, следует учитывать, что бетонные конструкции, изготовленные методом послойной экструзии, могут обладать меньшей плотностью и прочностью, чем конструкции, изготовленные из того же материала методом формования и последующего виброуплотнения, а также иметь большую вариативность и анизотропию прочностных характеристик.

При уменьшении высоты печатного слоя возможно получить большую плотность бетона в конструкции и меньший разброс физико-механических характеристик за счет лучшего уплотнения каждого слоя, однако неоптимальный подбор соотношения высоты к ширине слоя может приводить к возникновению надрывов по краям слоя и ухуд-

шать качество поверхности возводимой конструкции (рис. 5 и 17).

Изменение толщины сечения формообразующих элементов, изготовленных по технологии аддитивного строительного производства, влияет нелинейно на несущую способность (рис. 15), в отличие от более традиционных формообразующих элементов, изготовленных из изотропных материалов. Это может быть связано, в частности, с неравномерным уплотнением бетонной смеси по ширине печатного слоя в процессе экструзии, которое оказывает влияние на расчетные физико-механические свойства конструкции.

В случае проектирования конструкций несъемной опалубки, предусматривающих необходимость единовременного бетонирования на значительную высоту, следует отдавать предпочтение конструкциям замкнутой цилиндрической формы, так как они способны выдерживать значительно более высокое давление бетонной смеси в сравнении с прямолинейными элементами.

### Список литературы / References

1. Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А., Адамцевич А.О. Международный опыт исследований в области аддитивного строительного производства // *Жилищное строительство*. 2023. № 11. С. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-11-4-10>
1. Pustovgar A.P., Adamtsevich L.A., Adamtsevich A.O. International research experience in the field of additive construction manufacturing. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2023. No. 11, pp. 4–10. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2023-11-4-10>
2. Wangler T., Roussel N., Bos F.P., Salet T.A.M., Flatt R.J. Digital concrete: a review. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 123. 105780. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105780>
3. Bing Lu, Yiwei Weng, Mingyang Li, Ye Qian, Kah Fai Leong, Ming Jen Tan, Shunzhi Qian. A systematical review of 3D printable cementitious materials. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 207, pp. 477–490. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144>
4. Shakor Pshtiwan, Nejadi Shami, Paul Gavin, Malek Sardar. Review of emerging additive manufacturing technologies in 3D printing of cementitious materials in the construction industry. *Frontiers in Built Environment*. 2018. Vol. 4. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2018.00085>
5. Shaodan Hou, Zhenhua Duan, Jianzhuang Xiao, Jun Ye. A review of 3D printed concrete: Performance requirements, testing measurements and mix design. *Construction and Building Materials*. 2021. Vol. 273. 121745. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121745>

6. Lyu F., Zhao D., Hou X., Sun L., Zhang Q. Overview of the development of 3d-printing concrete: a review. *Applied Sciences*. 2021. No. 11. 9822 <https://doi.org/10.3390/app11219822>
7. Пустовгар А.П., Адамцевич А.О., Волков А.А. Технология и организация аддитивного строительства // *Промышленное и гражданское строительство*. 2018. № 9. С. 12–20.
7. Pustovgar A.P., Adamtsevich A.O., Volkov A.A. Technology and organization of additive construction. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2018. No. 9, pp. 12–20. (In Russian).
8. Славчева Г.С. Строительная 3D-печать сегодня: потенциал, проблемы и перспективы практической реализации // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 28–36. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
8. Slavcheva G.S. 3D-build printing today: potential, challenges and prospects for implementation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 5, pp. 28–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-28-36>
9. Рязанов А.Н., Шигапов Р.И., Синицин Д.А., Кинзябулатова Д.Ф., Недосеко И.В. Использование гипсовых композиций в технологиях строительной 3D-печати малоэтажных жилых зданий. Проблемы и перспективы // *Строительные материалы*. 2021. № 8. С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44>
9. Ryazanov A.N., Shigapov R.I., Sinitsin D.A., Kinzybulatova D.F., Nedoseko I.V. The use of gypsum compositions in the technologies of construction 3D printing of low-rise residential buildings. Problems and prospects. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 8, pp. 39–44. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-794-8-39-44>
10. Binrong Zhu, Behzad Nematollahi, Jinlong Pan, Yang Zhang, Zhenxin Zhou, Yamei Zhang. 3D concrete printing of permanent formwork for concrete column construction. *Cement and Concrete Composites*. 2021. Vol. 121. 104039. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104039>
11. Leung C., Qian C. Development of pseudo-ductile permanent formwork for durable concrete structures. *Materials and Structures*. 2010. Vol. 43 (7), pp. 993–1007. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9561-4>
12. Адамцевич А.О., Пустовгар А.П. Аддитивное строительное производство: исследование эффекта анизотропии прочностных характеристик бетона // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 18–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-18-24>
12. Adamtsevich A.O., Pustovgar A.P. Additive manufacturing in construction: the research of the anisotropy concrete strength effect. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 18–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-18-24>
13. Panda B., Mohamed N.A.N., Paul S.C., Singh G.V.P.B., Tan M.J., Šavija B., The effect of material fresh properties and process parameters on buildability and interlayer adhesion of 3D printed concrete. *Materials*. 2019. Vol. 12 (13). 2149. <https://doi.org/10.3390/ma12132149>
14. Wolfs R.J.M., Bos F.P., Salet T.A.M. Hardened properties of 3D printed concrete: The influence of process parameters on interlayer adhesion. *Cement and Concrete Research*. 2019. Vol. 119, pp. 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.02.017>
15. Nerella V.N., Hempel S., Mechtcherine V. Effects of layer-interface properties on mechanical performance of concrete elements produced by extrusion-based 3D-printing. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 205, pp. 586–601. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.235>
16. Tay Y.W.D., Ting G.H.A., Qian Y., Panda B., He L., Tan M.J. Time gap effect on bond strength of 3D-printed concrete. *Virtual and Physical Prototyping*. 2019. Vol. 14. Iss. 1, pp. 104–113. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1500420>
17. Rahul, A.V., Santhanam, M., Meena, H., Ghani, Z., Mechanical characterization of 3D printable concrete. *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 227. 116710. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116710>
18. Wang L., Tian Z., Ma G., Zhang M. Interlayer bonding improvement of 3D printed concrete with polymer modified mortar: Experiments and molecular dynamics studies. *Cement and Concrete Composites*. 2020. Vol. 110. 103571. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103571>
19. Hosseini E., Zakertabrizi M., Korayem A.H., Xu G. A novel method to enhance the interlayer bonding of 3D printing concrete: An experimental and computational investigation. *Cement and Concrete Composites*. 2019. Vol. 99, pp. 112–119. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.03.008>
20. Dressler I., Freund N., Lowke D. The effect of accelerator dosage on fresh concrete properties and on interlayer strength in shotcrete 3D printing. *Materials*. 2020. Vol. 13. Iss. 2. 374. <https://doi.org/10.3390/ma13020374>
21. Kloft H., Krauss et al. Influence of process parameters on the interlayer bond strength of concrete elements additive manufactured by Shotcrete 3D Printing (SC3DP). *Cement and Concrete Research*. 2020. Vol. 134. 106078. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106078>

# Build Fest 2023 — крупнейший фестиваль технологий и решений КНАУФ для строительства и отделки



23 ноября 2023 г. в Москве на площадке «Амбер Плаза» прошел фестиваль, организованный компанией КНАУФ для строителей, дизайнеров и всех, кто интересуется современными технологиями отделки и планировки помещений. Впервые с 2013 г. КНАУФ провел такое масштабное мероприятие в стиле знаменитых «Дней КНАУФ». На площади в 1600 м<sup>2</sup> было сформировано пространство, в центре которого расположен макет квартиры со всеми типовыми помещениями и возможно используемыми в них материалами и конструктивными решениями; вокруг — три площадки для выступлений и зона отдыха и общения. Программа выстраивалась таким образом, чтобы провести на фестивале как можно больше времени.

В рамках фестиваля одновременно проходили две тематические сессии — для строителей и дизайнеров. После общего приветствия гостей и участников программа мероприятий для строителей открылась темой «Вместе строим успешное будущее», для дизайнеров — «Инновационные архитектурные и дизайнерские решения». В зоне мастер-классов демонстрации начались с представления новинок: КНАУФ-Туллер, КНАУФ-Унихард, КНАУФ-Раслер, грунтовочных составов, красок, стеклохолста, гидроизоляции, комплектующих, монтажной пены и др.

В части программы для строителей было семь мероприятий: пять презентаций и две дискуссии. Программа, ориентированная на дизайнеров, состояла из десяти пунктов, среди них выступление **С. Колчина** (Le Atelier) на тему комфортного взаимодействия с заказчиком и прохождения всех этапов строительства, **Б. Уборевича-Боровского** (ub.design) об основах современных планировочных решений жилых пространств и других авторитетных экспертов. Вела дизайн-сессию **Л. Лаптева**, архитектор из Перми, проект квартиры которой выиграл в региональном конкурсе «Комфортный дом с КНАУФ».

Build Fest 2023 привлек настоящих звезд рынка частного строительства: **Р. Бойко**, специализирующегося на производстве работ по внутренней отделке зданий; **С. Гапченко** — эксперта в области малярных работ; лидеров профессиональных сообществ мастеров Урала и Краснодара **Л. Кизиридиса** и **В. Белоруса**.

На фестивале впервые собрались представители всех бизнес-направлений КНАУФ в России: гипсовое (КНАУФ ГИПС), тепло- и звукоизоляционное на основе минерального волокна и пенополистирола (КНАУФ Инсулейшн и КНАУФ Индастриз), потолочные и стеновые решения Knauf Ceiling Solutions. Также КНАУФ пригласил партнеров из мира декоративных красок, освещения, мебели и подбора специалистов в области ремонта: Oikos, Technolight, O'Prime и Avito.

Участники деловой программы обсудили, как КНАУФ взаимодействует с мастерами для совместного развития, современное состояние рынка ремонтных работ и особый запрос на звукоизоляционные решения, говорили также о практике приемки квартир, трендах рынка индивидуального жилищного строительства.





В «Зоне инноваций» прошла «тихая презентация» – в одной из систем для влажных помещений была смонтирована обшивка из **новых особо влагостойких гипсокартонных листов «Акварин»**. КНАУФ-лист Акварин – это самый влагостойкий лист в линейке КНАУФ. Благодаря использованию гидрофобных добавок в материале сердечника достигаются минимальные показатели объемного и поверхностного водопоглощения, из-за чего «Акварин» обладает повышенной стойкостью к деформациям от эксплуатации при повышенной влажности; он лучше влагостойкого гипсокартона противостоит протечкам, резким перепадам температуры и влажности.

Руководитель отдела продукт-менеджмента «КНАУФ ГИПС» **Д. Цюрупа** объяснил, почему компания всегда настаивает на сохранении комплектности своих систем. КНАУФ может гарантировать отличный результат, только если потребитель работает с полным комплектом материалов без замен от других производителей. В своем выступлении он также рассказал о переменах в продуктовой линейке компании за последний год, а изменилось многое: появились новые продукты и системы, в том числе инновационные, замещающие уникальные импортные. При чем при локализации и импортозамещении качество материалов КНАУФ не только не стало хуже, но и наоборот, появились новые ценные потребительские свойства.

На площадке фестиваля у гостей была возможность встретить высшее руководство КНАУФ по работе с рынком и продуктом, задать вопросы и обсудить предложения. Эксперты КНАУФ отвечали на вопросы, давали пояснения и подробно представляли размещенные в зоне инноваций наглядные макеты: звукоизоляционные решения, ударопрочные, решения

с максимальной нагрузкой по весу, решения для влажных помещений и для ИЖС.

В ходе дизайн-сессии специалисты КНАУФ рассказали о потолочных решениях Knauf Ceiling Solutions, показали, как системы КНАУФ могут служить универсальным языком коммуникации дизайнера с мастером, рассмотрели основные ошибки при проектировании освещения и обсудили, как их избежать. Кроме того, архитектором Борисом Уборевичем-Боровским был проведен разбор планировок, присланных на суд мастера дизайнерами.



Как сообщила в ходе беседы руководитель стратегического маркетинга по развитию рынка частного заказчика **М. Комарова**, основными целями фестиваля явились укрепление связи с потребителями продукции КНАУФ, выстраивание тесного сотрудничества с мастерами и частными заказчиками, построение эффективного прямого диалога между мастерами и заказчиками.

По мнению руководителя профессионального сообщества «Мастера Краснодар» В. Белоруса, мероприятия, которые организует компания КНАУФ, – это отличная возможность обменяться опытом и узнать что-то новое. На них представлена «выжимка» современных технологий по сухому строительству и в целом по ремонтно-строительной отрасли, а присутствие специалистов из разных сфер, разных городов России, позволяет обменяться опытом и узнать что-то новое.



УДК 691.3:539.2

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-49-54>

Д.А. ЛЯШЕНКО, аспирант (dmitiry.lyashenko@yandex.ru),  
В.А. ПЕРФИЛОВ, д-р техн. наук (vladimirperfilov@mail.ru),  
М.Е. НИКОЛАЕВ, канд. техн. наук (mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru),  
С.В. ЛУКЬЯНИЦА, канд. техн. наук (smist2012-2013@yandex.ru),  
Р.А. БУРХАНОВА, канд. техн. наук (smist2012-2013@yandex.ru)

Волгоградский государственный технический университет, Институт архитектуры и строительства  
(400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1)

## Повышение прочности мелкозернистого бетона с применением углеродных нанотрубок и механоактивации смеси

Представлены результаты исследований по определению влияния введения комплексной добавки углеродных нанотрубок и пластификатора в состав мелкозернистого бетона. Произведены две серии испытаний образцов-балочек, определены прочностные характеристики исследуемых составов. Проведено сравнение двух методов введения нанодобавок в бетоны: при помощи ультразвукового диспергатора и линейно-индукционного аппарата волнового воздействия (ЛИА) путем анализа двух серий испытаний различного состава. Установлено, что введение нанотрубок с помощью ЛИА обеспечивает минимально большее увеличение предела прочности при сжатии за счет активации цементного вяжущего путем домола. Однако максимальное увеличение прочности достигается в равной степени для каждого из методов введения.

**Ключевые слова:** углеродные нанотрубки, ультразвуковой диспергатор, линейно-индукционный аппарат вихревого слоя, наномодифицированный бетон.

**Для цитирования:** Ляшенко Д.А., Перфилов В.А., Николаев М.Е., Лукьяница С.В., Бурханова Р.А. Повышение прочности мелкозернистого бетона с применением углеродных нанотрубок и механоактивации смеси // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 49–54. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-49-54>

D.A. LYASHENKO, Graduate Student (dmitiry.lyashenko@yandex.ru),  
V.A. PERFILOV, Doctor of Sciences (Engineering) (vladimirperfilov@mail.ru),  
M.E. NIKOLAEV, Candidate of Sciences (Engineering) (mr.maks.nikolaev.1994@mail.ru),  
S.V. LUKIANITSA, Candidate of Sciences (Engineering) (smist2012-2013@yandex.ru),  
R.A. BURKHANOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (smist2012-2013@yandex.ru)  
Volgograd State Technical University, Institute of Architecture and Construction (1, Akademicheskaya Street, Volgograd, 400074, Russian Federation)

### Increasing the Strength of Fine-Grained Concrete with the Use of Carbon Nanotubes and Mechanical Activation of the Mixture

The results of studies to determine the effect of introducing a complex additive of carbon nanotubes and plasticizer into the composition of fine-grained concrete are presented. Two series of tests of beam samples were performed, and the strength characteristics of the studied compositions were determined. Two methods of introducing nano-additives into concretes were compared: using an ultrasonic dispersant and a linear induction wave action apparatus (LIA) by analyzing two series of tests of different compositions. It was established that the introduction of nanotubes using LIA provides a minimally greater increase in the compressive strength due to the activation of the cement binder by means of regrinding. However, the maximum increase in strength is achieved equally for each of the injection methods.

**Keywords:** carbon nanotubes, ultrasonic dispersant, linear induction vortex layer apparatus, nano-modified concrete.

**For citation:** Lyashenko D.A., Perfilov V.A., Nikolaev M.E., Lukianitsa S.V., Burkhanova R.A. Increasing the strength of fine-grained concrete with the use of carbon nanotubes and mechanical activation of the mixture. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 49–54. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-49-54>

Модифицирование структуры бетона наночастицами является одним из наиболее перспективных направлений материаловедения XXI в., направленным на повышение качества разрабатываемых материалов [1–6 и др.]. Нанодобавки представляют собой частицы размером от 1 до 1000 нм, что соответствует дисперсности коллоидных систем. Это могут быть как минеральные частицы, представляющие собой агрегаты, состоящие из цепочек размером 10–20 молекул, так и органические, в виде углеводородных цепочек с малой молекулярной массой (мономеры) [7–9].

В настоящее время существует множество разработок наномодифицированных бетонов. Одним из важных аспектов данной технологии является метод введения наноразмерных добавок. Зачастую такие добавки ввиду своей размерности вводятся в очень малых количествах (до 0,001% по массе вяжущего) [10, 11], в связи с этим простое размешивание всех компонентов смеси не обеспечивает равномерного распределения наноразмерных частиц по всему объему смеси.

Задачами современного материаловедения является разработка материалов и способов их получения,

имеющих достаточную долговечность композитной структуры, а также получение материалов с заданными эксплуатационными характеристиками. При этом приоритетным направлением считается максимальная простота технологии производства и экономия дорогостоящих сырьевых материалов. Одним из способов, удовлетворяющих этим требованиям, является использование высокоактивных микро- и нанодобавок.

Свойства наномодифицированных материалов обусловлены особенностью строения отдельных частиц, а также их совместной работы, которая, в свою очередь, зависит от характера взаимодействий между наночастицами [12]. Причинами улучшения характеристик таких материалов является уменьшение размеров структурных элементов. Таким образом изменяя размеры и форму наночастиц, можно придавать новые, различные физические свойства модифицированным материалам. Исходя из этого, нанотехнологии могут служить инструментом обеспечения прогресса в различных производственных и промышленных областях, в том числе и в строительном комплексе [13].

В настоящее время можно выделить три технологии введения нанодобавок в состав бетонной смеси.

1. *Применение аппаратов вихревого слоя (АВС).* АВС – это устройство, генерирующее вращение за счет электромагнитного поля. В электромагнитное поле помещается рабочая смесь и ферромагнитные (мельющие) тела с заданными параметрами. В границах магнитного поля мельющие тела формируют взвешенный слой, по виду похожий на вихрь, – вихревой слой. Обрабатываемая смесь проходит через вихревой слой, где происходит активное вращение и, как следствие, размешивание и равномерное распределение частиц цементного вяжущего и вводимых наноразмерных добавок. Есть множество исследований, посвященных данной технологии. Следует отметить, что активация в АВС может проходить как для сухого вяжущего, так и для цементной суспензии (цемент – вода) [14–16].

2. *Применение гидродинамических кавитаторов.* Такие устройства применяются для размешивания и диспергирования суспензий и эмульсий. Работа таких установок основана на явлении эжекции струйным течением. При прохождении потока жидкости через кольцевую щель происходит унос пассивной среды с внешней стороны, что компенсируется притоком из окружающего пространства; из центральной части пассивная среда уносится без ее компенсации. Таким образом в центральной части потока будет образовываться вакуум. В силу разности давлений с внешней и внутренней стороны стенки струи смыкаются и создают куполообразный объем с низким давлением внутри. При достижении определенного значения этого давления происходит нарушение оболочки и выравнивание давлений. Далее повторяется цикл образования вакуума и выравнивание давлений. За счет протекания этих процессов и проис-

ходит размешивание рабочей суспензии в кавитаторах [17, 18].

3. *Ультразвуковое диспергирование.* Эта технология заключается в равномерном распределении нерастворимых добавок в воде затворения за счет воздействия ультразвука. Помимо использования нерастворимых частиц, ультразвуковая обработка является эффективным способом размешивания растворимых добавок, к примеру, различных пластификаторов, так как при такой обработке происходит высокочастотное перемешивание, что способствует размельчению твердых частиц и размешиванию всего объема жидкости. При ультразвуковом диспергировании в получаемых суспензиях обеспечивается значительно большее рассеивание частиц по всему объему, чем при использовании традиционного механического измельчения [19].

Для данной технологии применяется различного рода ультразвуковое оборудование: ультразвуковые ванны, ультразвуковые диспергаторы. Наиболее эффективными являются диспергаторы, так как они обеспечивают наибольшую частоту ультразвука (свыше 26 кГц). Рабочей частью диспергаторов является керамическая трубка-излучатель, которая распространяет ультразвук в рабочую среду. Воздействие на физико-химические процессы в жидкости, таким образом, происходит за счет кавитации акустических течений.

Проведенные лабораторные исследования были направлены на изучение влияния дозировок комплексной добавки пластификатора СП-3 и углеродных нанотрубок (УНТ) «Таунит-М» на прочностные характеристики мелкозернистого бетона.

В данной работе рассматривалось два способа введения углеродных нанотрубок:

– применение ультразвукового диспергатора (УЗД). Применение технологии ультразвукового диспергирования рассмотрено во множестве работ [20, 21 и др.]. Согласно литературным данным, она является одной из наиболее часто используемых для введения наноразмерных добавок;

– применение линейно-индукционного аппарата (ЛИА) вихревого слоя. ЛИА позволяет размешивать сыпучие вещества, а также производить активацию вяжущих веществ путем домала мельющими ферромагнитными телами, которые приводит в движение магнитное поле.

### Материалы

В исследуемых составах применялись компоненты: цементное вяжущее «Евроцемент» М500; песок в соотношении Ц:П – 1:3; пластификатор СП-3; углеродные нанотрубки «Таунит-М».

Для сравнения эффективности методов введения УНТ были проведены две серии испытаний для различных составов мелкозернистого бетона, а именно серии испытаний 11 составов с применением УНТ в концентрации от 0,0001 до 0,001% по массе вяжущего для технологии ультразвукового диспергирования

(УЗГ) и механической активации, а также контрольный состав С-1 без применения УНТ.

Таким образом, применялось два метода приготовления смеси.

Технология с применением ультразвукового диспергирования имела следующую последовательность. В заранее определенное количество воды затворения добавлялось требуемое количество УНТ и пластификатора СП-3, после чего в полученный состав погружалась керамическая трубка ультразвукового диспергатора и происходила обработка ультразвуком с рабочей частотой колебания 20 кГц в течение 5 мин. Затем полученная суспензия добавлялась в заранее смешанную цементно-песчаную смесь и размешивалась до требуемой консистенции для дальнейшего формования образцов.

Введение нанодобавок при помощи ЛИА проводилось по следующей технологии. В камеру ЛИА засыпалось заранее взвешенное цементное вяжущее, требуемое количество УНТ, а также мелющие тела в виде мелких цилиндрических отрезков стали в количестве 6% от массы вяжущего. После загрузки компонентов происходила активация смеси в течение двух минут. Далее технология имела стандартный вид: смешивание сухих компонентов, затем введение воды затворения и формовка.

Составы и прочностные показатели исследуемых смесей мелкозернистого бетона  
Compositions and strength properties of the studied mixtures of fine-grained concrete

Состав	УНТ, % от массы цемента	ЛИА		УЗД	
		$R_{сж}$ , МПа	$R_{изг}$ , МПа	$R_{сж}$ , МПа	$R_{изг}$ , МПа
1	–	46,2	6,1	41,8	5,8
2	0,0001	50,1	6,6	46,2	6,2
3	0,0002	50,6	6,9	45,5	6,4
4	0,0003	52,2	6,6	47,7	6,2
5	0,0004	53,6	7,1	46,9	6,4
6	0,0005	53,1	7,4	48,9	6,8
7	0,0006	52,8	6,8	47,4	6,6
8	0,0007	53	7,3	47,8	6,5
9	0,0008	53,4	7,4	48,1	6,7
10	0,0009	54,7	7,2	48,5	6,8
11	0,001	54,9	7,7	49,6	6,8

Для проведения исследования влияния введения УНТ на характеристики мелкозернистого бетона было произведено две серии испытаний образцов-балочек для разных технологий введения нанодобавки.

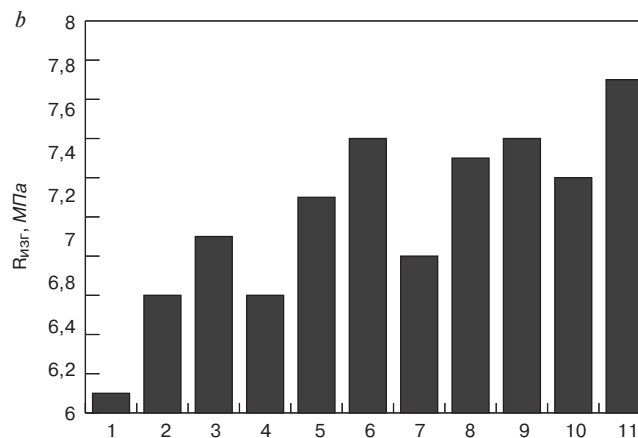
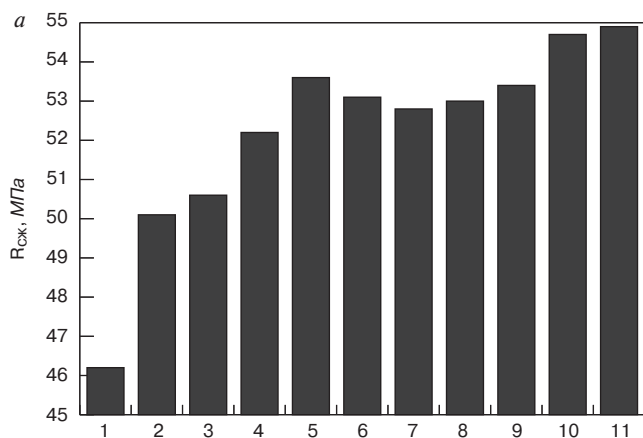


Рис. 1. Показатели пределов прочности для образцов с применением ЛИА: а – при сжатии; б – при изгибе  
Fig. 1. Indicators of ultimate strength for samples using linear induction apparatus: a – compression; b – bending

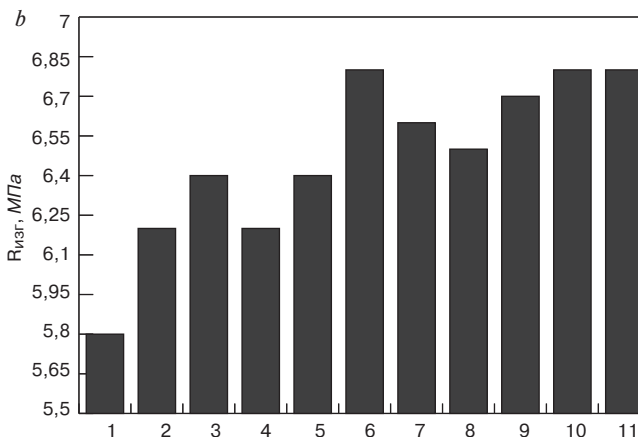
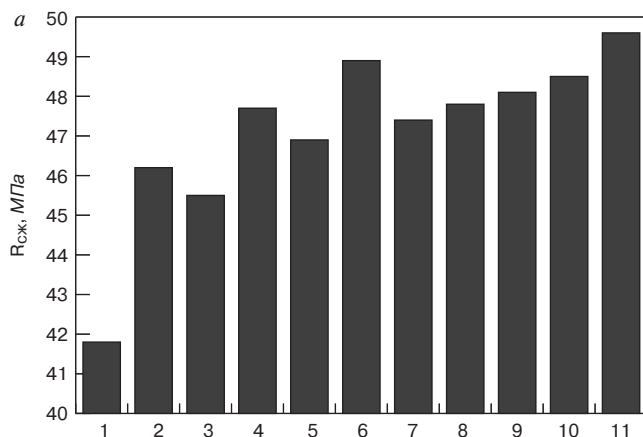
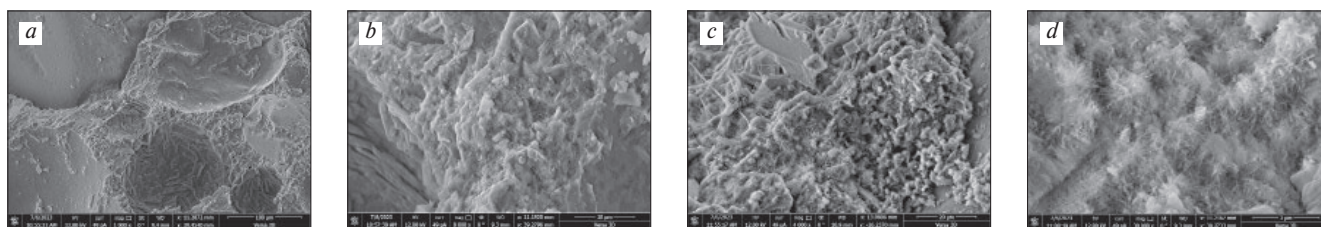


Рис. 2. Показатели пределов прочности для образцов с применением УЗД: а – при сжатии; б – при изгибе  
Fig. 2. Indicators of tensile strength for samples using ultrasonic sound: a – compression; b – bending



**Рис. 3.** Структура мелкозернистого бетона: *a* – без применения УНТ; *c* с применением УНТ в количестве % по массе цемента: *b* – 0,0002%; *c* – 0,0005%; *d* – 0,001%

**Fig. 3.** Structure of fine-grained concrete: *a* – without the use of CNTs; using CNTs in an amount of % by weight of cement: *b* – 0.0002%; *c* – 0.0005%; *d* – 0.001%

Составы образцов: цемент:песок – 1:3; суперпластификатор СП-3 – 0,8% по массе цемента; В/Ц – 0,42; УНТ в пределах от 0,0001 до 0,001% по массе вяжущего (см. таблицу).

Были приготовлены образцы размером 40×40×160 мм. Определение прочностных характеристик образцов проводилось в возрасте 28 сут путем стандартных испытаний согласно ГОСТ 310.4–81 «Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии». Прочность образцов определялась на прессе В-3.4.3. Полученные данные представлены на рис. 1 и 2.

При использовании магнитно-индукционного аппарата минимальное повышение прочности при сжатии и изгибе составило 7,8%. Максимальное увеличение прочностных характеристик было обнаружено для состава 11, где прочность при сжатии и изгибе возросла на 16,2 и 15,2% соответственно.

При использовании технологии ультразвукового диспергирования минимальное повышение прочностных характеристик составило 9,5% при сжатии и 12% при изгибе. Наибольшее увеличение прочности, как и в первом случае, было обнаружено для состава с максимальным количеством УНТ; так, прочность при сжатии и изгибе возросла на 15,7 и 14,5%.

Для проведения анализа структурообразования наномодифицированного бетона были подготовлены образцы для исследования на электронном двухлучевом микроскопе «Versa 3d»; кратность микроскопа ×150000, что позволяет провести анализ структуры на наноуровне в соответствии с размерами добавки. Ниже приведены микрофотографии с различной кратностью увеличения.

Наномодифицированная структура бетона (рис. 3) характеризуется наличием участков с включением углеродных нанотрубок. Увеличение концентрации нанодобавки приводит к модифицированию большего количества участков материала. Нанотрубки действуют как армирующий материал и выступают в роли дополнительных центров кристаллизации. В связи с этим, как подтверждают многочисленные исследования, происходит уменьшение пористости материала при образовании гелеобразных продуктов гидратации цемента. Углеродные наномодификаторы оказывают структурообразующее воздействие на матрицу материала с образованием дополнительного количества гидросиликатов.

Углеродные нанотрубки, выявленные на микрофотографиях, имеют стабильное значение диаметра по всей длине волокон, а также полую структуру, что обеспечивает стабильные условия для роста цементного камня как на наружной поверхности, так и на внутренней. Благодаря этому происходит образование более крупных кристаллов, что, в свою очередь, положительно сказывается на уплотнении структуры модифицированного материала. Минералы вместе с нанотрубками производят дискретное армирование цементной матрицы, что позволяет объединить новообразование в единую структуру.

### Выводы

В результате произведенных исследований обнаружен положительный эффект введения углеродных нанотрубок на прочность мелкозернистого бетона. Повышение прочностных характеристик происходило в равной степени для каждой из рассмотренных технологий приготовления. При увеличении количества нанодобавки наблюдается повышение прочности, которое имеет ступенчатый характер относительно увеличения концентрации УНТ в составе бетона.

Образцы, приготовленные при использовании ЛИА, имели большее минимальное повышение прочности. Это можно объяснить двойным эффектом вихревого воздействия, а именно размешивания и активации цементного вяжущего.

Исследования с использованием электронного микроскопа показывают наличие модифицированных участков мелкозернистого бетона с углеродными нанотрубками. Введенные нанотрубки действуют как дополнительные центры кристаллизации, что приводит к упрочнению матрицы и повышению трещиностойкости. Однако наномодифицирующая добавка распределяется не по всему объему смеси, в связи с этим следует принимать во внимание дополнительные меры по распределению компонентов смеси. Использование смесителей различных типов может оказать положительное влияние на диспергирование УНТ.

Таким образом, применение добавки УНТ совместно с пластификатором СП-3 с помощью двух методов введения способствовало повышению предела прочности при сжатии. Обе технологии показали увеличение прочности свыше 14%.

## Список литературы

1. Потапов В.В., Туманов А.В., Закуражнов М.С., Сердан А.А., Кашутин А.Н., Шалаев К.С. Повышение прочности бетона введением наночастиц SiO<sub>2</sub> // *Физика и химия стекла*. 2013. Т. 39. № 4. С. 611–617.
2. Потапов В.В., Горев Д.С. Повышение морозостойкости бетона, модифицированного гидротермальными наночастицами SiO<sub>2</sub> // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2021. № S19. С. 278–287.
3. Жданок С.А., Леонович С.Н., Полонина Е.Н. Синергетическое влияние наночастиц SiO<sub>2</sub> и углеродных нанотрубок на свойства бетона // *Доклады Национальной академии наук Беларуси*. 2022. Т. 66. № 1. С. 109–112.
4. Толмачев С.Н., Беличенко Е.А. Особенности влияния углеродных наночастиц на реологические свойства цементного теста и технологические свойства мелкозернистых бетонов // *Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал*. 2014. Т. 6. № 5. С. 13–29.
5. Баженов Ю.М., Королев Е.В., Лукутцова Н.П., Завалишин С.И., Чудакова О.А. Высококачественные декоративные мелкозернистые бетоны, модифицированные наночастицами диоксида титана // *Вестник МГСУ*. 2012. № 6. С. 73–78.
6. Потапов В.В., Туманов А.В., Горбач В.А., Кашутин А.Н., Шалаев К.С. Получение комплексной добавки на основе нанодисперсного диоксида кремния для повышения прочности бетона // *Химическая технология*. 2013. Т. 14. № 7. С. 394–401.
7. Абдрахманова Л.А. Наномодификаторы для строительных материалов на основе линейных и сетчатых полимеров // *Строительные материалы*. 2011. № 7. С. 61–63.
8. Li Z., Ding S., Yu X., B. Han, J. Ou. Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: a review // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 111, pp. 115–137. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.05.019
9. Ramezani M., Dehghani A., Sherif M.-M. Carbon nanotube reinforced cementitious composites: A comprehensive review // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 315. 125100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125100
10. Токарев Ю.В., Волков М.А., Агеев А.В., Кузьмина Н.В., Грахов В.П., Яковлев Г.И., Хазеев Д.Р. Оценка эффективности применения водной дисперсии углеродных наночастиц в ангидритовом вяжущем // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 24–37. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-24-35>

## References

1. Potapov V.V., Tumanov A.V., Zakurazhnov M.S., Serdan A.A., Kashutin A.N., Shalaev K.S. Increasing the strength of concrete by introducing SiO<sub>2</sub> nanoparticles. *Fizika i khimiya stekla*. 2013. Vol. 39. No. 4, pp. 611–617. (In Russian).
2. Potapov V.V., Gorev D.S. Increasing the frost resistance of concrete modified with hydrothermal nanoparticles SiO<sub>2</sub>. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tehnicheskiy zhurnal)*. 2021. No. S19, pp. 278–287. (In Russian).
3. Zhdanok S.A., Leonovich S.N., Polonina E.N. Synergistic influence of SiO<sub>2</sub> nanoparticles and carbon nanotubes on the properties of concrete. *Reports of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2022. Vol. 66. No. 1, pp. 109–112. (In Russian).
4. Tolmachev S.N., Belichenko E.A. Features of the influence of carbon nanoparticles on the rheological properties of cement paste and technological properties of fine-grained concrete. *Nanotekhnologii v stroitel'stve: scientific online journal*. 2014. Vol. 6. No. 5, pp. 13–29. (In Russian).
5. Bazhenov Yu.M., Korolev E.V., Lukutsova N.P., Zavalishin S.I., Chudakova O.A. High-quality decorative fine-grained concrete modified with titanium dioxide nanoparticles. *Vestnik of MSUCE*. 2012. No. 6, pp. 73–78. (In Russian).
6. Potapov V.V., Tumanov A.V., Gorbach V.A., Kashutin A.N., Shalaev K.S. Preparation of a complex additive based on nanodispersed silicon dioxide to increase the strength of concrete. *Khimicheskaya tekhnologiya*. 2013. Vol. 14. No. 7, pp. 394–401. (In Russian).
7. Abdrakhmanova L.A. Nanomodifiers for building materials based on linear and network polymers. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2011. No. 7, pp. 61–63. (In Russian).
8. Li Z., Ding S., Yu X., B. Han, J. Ou. Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: a review. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018. Vol. 111, pp. 115–137. DOI: 10.1016/j.compositesa.2018.05.019
9. Ramezani M., Dehghani A., Sherif M.-M. Carbon nanotube reinforced cementitious composites: A comprehensive review. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 315. 125100. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125100
10. Tokarev Yu.V., Volkov M.A., Ageev A.V., Kuzmina N.V., Grakhov V.P., Yakovlev G.I., Khazeev D.R. Estimation of efficiency of applying aqueous dispersion of carbon particles in anhydrite binder. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2020. No. 1–2, pp. 24–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-24-35>

11. Яковлев Г.И., Грахов В.П., Гордина А.Ф., Шайбадуллина А.В., Саидова З.С., Никитина С.В., Бегунова Е.В., Эльрефаи А.Э.М.М. Влияние дисперсий технического углерода на свойства мелкозернистого бетона // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С.89–92. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-89-92>
11. Yakovlev G.I., Grakhov V.P., Gordina A.F., Shaibadullina A.V., Saidova Z.S., Nikitina S.V., Begunova E.V., Elrefai A.E.M.M. Effect of dispersions of technical carbon on properties of fine concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 89–92. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-89-92>
12. Assed N. Haddad, Jorge F. de Morais, Ana Catarina J. Evangelista. Variation of concrete strength with the insertion of carbon nanotubes // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 818, pp. 124–131. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.818.124
12. Assed N. Haddad, Jorge F. de Morais, Ana Catarina J. Evangelista. Variation of concrete strength with the insertion of carbon nanotubes. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 818, pp. 124–131. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.818.124
13. Яковлев Г.И., Дрохитка Р., Первушин Г.Н., Грахов В.П., Саидова З.С., Гордина А.Ф., Шайбадуллина А.В., Пудов И.А., Эльрефаи А.Э.М.М. Мелкозернистый бетон, модифицированный суспензией хризотилловых нановолокон // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 4–10. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-4-10>
13. Yakovlev G.I., Drochytka R., Pervushin G.N., Grakhov V.P., Saidova Z.S., Gordina A.F., Shaybadullina A.V., Pudov I.A., Elrefai A.E.M.M. Fine-grained concrete modified with a suspension of chrysotile nanofibers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 4–10. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-4-10>
14. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R. Mechanical activation in the production of lime-sand mixtures // *Magazine of civil engineering*. 2020. № 6 (98). С. 9804. DOI: 10.18720/MCE.98.4
14. Ibragimov R.A., Korolev E.V., Deberdeev T.R. Mechanical activation in the production of lime-sand mixtures. *Magazine of civil engineering*. 2020. No. 6 (98), pp. 9804. DOI: 10.18720/MCE.98.4
15. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Прочность композиций на основе модифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 1. С. 35–41.
15. Ibragimov R.A., Korolev E.V. Strength of composites based on modified Portland cement activated in a vortex layer apparatus. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2021. No. 1, pp. 35–41. (In Russian).
16. Селиверстов Г.В., Мотевиц С.А., Вобликова Ю.О. Особенности аппаратов вихревого слоя // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2022. № 9. С. 614–618.
16. Seliverstov G.V., Motevich S.A., Voblikova Yu.O. Features of vortex layer devices. *Izvestiya of Tula State University. Technical science*. 2022. No. 9, pp. 614–618. (In Russian).
17. Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В., Жуиков А.В. Современное состояние использования кавитационных технологий (краткий обзор) // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. 2022. Т. 333. № 9. С. 209–218.
17. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagina L.V., Zhuikov A.V. Current state of use of cavitation technologies (brief review). *Izvestiya of Tomsk Polytechnic University. Georesources Engineering*. 2022. Vol. 333. No. 9, pp. 209–218. (In Russian).
18. Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В., Жуиков А.В., Гришаев Д.А. Синтез-анализ использования кавитационных технологий // *Журнал Сибирского федерального университета. Сер. Техника и технологии*. 2022. Т. 15. № 7. С. 774–801.
18. Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagina L.V., Zhuikov A.V., Grishaev D.A. Synthesis-analysis of the use of cavitation technologies. *Journal of the Siberian Federal University. Series: Equipment and technology*. 2022. Vol. 15. No. 7, pp. 774–801. (In Russian).
19. Хела Р., Боднарлова Л., Яролим Т., Лабай М. Возможность диспергирования углеродных нанотрубок с помощью ультразвука // *Строительные материалы*. 2017. № 1–2. С. 4–9. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-4-9>
19. Hela R., Bodnarova L., Jarolim T., Labaj M. Carbon nanotubes dispersion, concentration, and amount of ultrasound energy required. *Stroitel'nye Materialy* [Construction materials]. 2017. No. 1–2, pp. 4–9. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2017-745-1-2-4-9>
20. Mainak Ghosal Ghosal, Arun Kumar Chakraborty. Application of nanomaterials on cement mortar and concrete: a study // *International Journal of Structural Engineering*. 2019. Vol. X. No. 1, pp. 7–15.
20. Mainak Ghosal Ghosal, Arun Kumar Chakraborty. Application of nanomaterials on cement mortar and concrete: a study. *International Journal of Structural Engineering*. 2019. Vol. X. No. 1, pp. 7–15.
21. Ashwini R.M., Potharaju M., Srinivas V. Compressive and flexural strength of concrete with different nanomaterials: a critical review // *Journal of Nanomaterials*. 2023. No. 9, pp. 1–15 DOI: 10.1155/2023/1004597
21. Ashwini R.M., Potharaju M., Srinivas V. Compressive and flexural strength of concrete with different nanomaterials: a critical review. *Journal of Nanomaterials*. 2023. No. 9, pp. 1–15 DOI: 10.1155/2023/1004597

А.В. МАНЬКО, канд. техн. наук (MankoAV@mgsu.ru),  
О.В. КОПТЕВА, старший преподаватель (KoptevaOV@mgsu.ru)

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Метод редевелопмента подземных объектов горной промышленности

Горная промышленность – это совокупность индустриальных отраслей, занимающихся разведкой, добычей, первичной обработкой и получением первоначального полуфабриката элементов, относящихся к полезным ископаемым. Месторождения бывают рудные, нерудные и россыпные. Разработка данных месторождений производится открытым и закрытым способами. После окончания подземных работ остаются пустующие шахтные поля, которые на поверхности обозначаются как зоны отчуждения. Проблема зон обрушения, под которыми находятся отработанные шахтные поля горной промышленности, стоит особо остро уже не первое десятилетие. Данные выработки располагаются не только под индустриальными зонами населенных пунктов, но и под жилыми и общественными зонами и вызывают необратимую трансформацию природной среды, которая приводит к катастрофическим последствиям. Трансформация подземного пространства – главная задача редевелопмента индустриальных территорий такого рода. В отработанных шахтах можно возводить подземные сооружения иного назначения. В связи с тем, что эти сооружения будут обслуживаться и работать и изменение в горном массиве вторичных полей напряжений не будет иметь таких катастрофических последствий, как при устройстве зон отчуждения – обрушения. К тому же повторное использование отработанных выработок экономически более выгодно, поскольку проходка будет минимальна. В данной работе рассмотрены только подземные комплексы горной промышленности и возможность их повторного использования.

**Ключевые слова:** редевелопмент, подземное строительство, горные выработки, индустриальные территории, повторное использование, подземное сооружение.

**Для цитирования:** Манько А.В., Коптева О.В. Метод редевелопмента подземных объектов горной промышленности // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-55-60>

A.V. MANKO, Candidate Sciences (Engineering), associate professor (MankoAV@mgsu.ru), O.V. KOPTOVA, Senior lecturer (KoptevaOV@mgsu.ru) National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl'skoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Method of Redevelopment of Underground Mining Facilities

Mining is a set of industrial branches engaged in exploration, extraction, primary processing and obtaining the initial semi-finished product of elements related to minerals. Deposits are ore, non-metallic and alluvial. These deposits are mined by open pit and closed pit methods. After the end of underground operations, empty mine fields remain, which on the surface are labeled as exclusion zones. The problem of cave-in zones, under which the waste mine fields of the mining industry are located, has been particularly acute for decades. These mines are located not only under the industrial zones of populated areas, but also under residential and public areas and cause irreversible transformation of the natural environment, which leads to catastrophic consequences. Transformation of underground space is the main task of redevelopment of industrial areas of this kind. It is possible to build underground structures for other purposes in worked-out mines. Due to the fact that these structures will be maintained and operated, the change in the secondary stress fields in the mountain massif will not have such catastrophic consequences as in the case of alienation-collapse zones. Besides, the reuse of worked-out workings is economically more favorable due to the fact that sinking will be minimal. In this paper only underground mining complexes and the possibility of their reuse will be considered.

**Keywords:** redevelopment, underground construction, mine workings, industrial areas, reuse, underground construction.

**For citation:** Manko A.V., Kopteva O.V. Method of redevelopment of underground mining facilities *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 55–60. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-55-60>

Горная, или горнодобывающая промышленность – это отраслевой комплекс, направленный на разведку, разработку (добычу), обогащение и первичную обработку полезных ископаемых. Горная промышленность делится на следующие группы: топливобывающую, горнорудную, горно-химическую, промышленную (неметаллические руды и строительные материалы) и гидроминеральную. В свою очередь, каждая группа делится на комплексы по разработке: надземную и подземную. Одна из основных проблем – это экологичность подземного пространства. Не во всех шахтах человеку безопасно находиться и поэтому необходимо ранжировать горные выработки по степени воздействия на человека. Вторая основная проблема – проявление вторичных полей напряжений и, как следствие, деформации

конструкций обделок и различные инженерно-геодинамические процессы, такие как горный удар, вывал и т. д. Также имеются и другие проблемы, но в рамках данного научного исследования будут рассмотрены только различные проявления физики Земли, которые влияют на массив скальных пород: вторичные поля напряжений, деформации, трещинообразование и т. п. Эти проявления следует учитывать при проведении редевелопмента с устройством подземных сооружений различного типа в шахтных полях массива скальных пород. Редевелопмент весьма эффективен еще и с той точки зрения, что уже не требуется производить большой объем горных работ по возведению подземного сооружения промышленного и гражданского назначения, так как эта работа уже выполнена.

**Редевелопмент индустриальных территорий**

Редевелопмент индустриальных территорий – это перепрофилирование, приспособление или полная переделка каких-либо объектов или сооружений промышленности для иного назначения, иначе говоря, это «эффективное перепрофилирование», которое означает, что любое изменение функционального назначения здания или сооружения имеет под собой научно обоснованную базу. Также имеет экономическую эффективность этого проекта не только для инвесторов, но и для жителей и гостей данного региона [1–3].

Во всем мире и в нашей стране последние три десятилетия идет активная работа по повторному использованию индустриальных объектов. Это значительно дешевле, чем демонтировать промышленные здания и возводить на их месте новые [4]. Здания реконструируются, модернизируется производство, и промышленный объект продолжает свою работу. Но это не всегда оправданно, и не только экономически.

Исторически сложилось, что промышленные объекты строились по окраинам городов. Если объект был небольшим, то он мог располагаться среди различных жилых построек или ремесленных лавочек [5]. А если это был большой завод или группа заводов, то их возводили компактно на так называемых индустриальных территориях на границе города или на его окраине. При этом рядом, как правило, возводили жилые постройки для рабочих. Примером могут служить фабричные центры династий Морозовых и Зиминых, Русско-французского анонимного акционерного общества, расположенные в городах: Павловский Посад, Дрезна, Орехово-Зуево [6–8].

С течением времени город развивался, строился, увеличивался по площади, и в настоящий момент большинство таких индустриальных площадок оказались в так называемых исторических районах города, а порой даже в его центре. С точки зрения стоимости квадратного метра площади такие территории очень привлекательны. Кроме того, перенос промышленного объекта из центра города на его существующую окраину или за черту города благотворно повлияет на его экологию [9]. Поэтому индустриальные объекты покупаются девелоперами, чтобы впоследствии их демонтировать и построить на данной территории офисы, торговые центры или жилые дома.

За рубежом дают вторую жизнь промышленным объектам на индустриальных территориях. Это необходимо для минимизации финансовых вложений, для сохранения сложившейся исторической застройки и для сохранения самих зданий [10, 11]. В России также в последнее время стараются по мере возможности сохранить историческую застройку индустриальных территорий одновременно с перепрофилированием зданий и сооружений. Наиболее успешными примерами реновации могут служить [12–15 и др.]:

– завод «Манометр» в Москве (в настоящее время Центр дизайна «ARTPLAY»);

– Московский винный комбинат (Центр современного искусства ВИНЗАВОД);

– Московский молокозавод № 1 им. М. Горького (офисный центр);

– портовый район Доксендс в Лондоне, Великобритания (второй финансовый центр Лондона);

– ткацкая мануфактура в Лодзи, Польша (торгово-развлекательный центр, отель и музей);

– соляная шахта Величка, Польша (туристический центр, лечебно-профилактический курорт) и многие другие объекты.

В представленных примерах особое место принадлежит редевелопменту соляной шахты в Величке, которая после закрытия стала рекреационным центром и фактически положила начало редевелопменту не только наземных индустриальных объектов, но и подземных.

Особое место занимает редевелопмент объектов горной промышленности – это повторное использование подземных выработок для добычи полезного ископаемого из целиков, кровли и низа выработок с устройством бетонных несущих элементов. Одним из современных примеров может служить доработка Джезказганского месторождения в Казахстане [16]. В качестве увеличения объема добычи медной руды было предложено оставшиеся целики, которые используют для поддержания кровли выработок шахтных полей, разработать и заменить железобетонными столбами, которые будут поддерживать от обрушения вышележащие горные породы. При этом сформировавшиеся после первичной проходки вторичные поля напряжений будут вновь изменены, что может привести к новому проявлению горного удара в виде трещин, вывалов и т. д. Но это не совсем редевелопмент, а повторная разработка, так как функциональное предназначение выработок неясно. Но это только начало доработки, перепрофилирования и редевелопмента шахтных полей в подземные сооружения.

**Повторное использование и редевелопмент подземных объектов горной промышленности**

В настоящий момент различают следующие отрасли горной промышленности:

– минерального энергетического сырья (нефть, газ, уголь, торф, сланец, уран, геотермия);

– руд черных и легирующих металлов (железная руда, марганец, хром, вольфрам, молибден, ванадий);

– руд цветных металлов (алюминий, медь, никель, олово, свинец, цинк, сурьма);

– горно-химическая промышленность (апатиты, каменная соль-галит, калийная соль, нефелин, селитра, серный колчедан, бор, фосфаты);

– нерудного индустриального сырья и строительных материалов (графит, асбест, гипс, глина, гранит, доломит, известняк, кварц, каолинит/монтмориллонит, мергель, мел, полевой шпат);

– драгоценных и поделочных камней (алмазная промышленность);

– гидроминеральная (минеральные подземные воды).

Повторное использование отработанных шахтных полей и их редевелопмент – не новое изобретение [17, 18].

Еще в конце XX в. в России разрабатывался проект повторного использования подземных горных выработок Курской магнитной аномалии (КМА) для объектов гидротехнической и атомной энергетики [19, 20]. Данные шахтные поля находятся в районе города Губкин, в них добывали гематитовые руды, основу которых составляет минерал гематит ( $Fe_2O_3$ ) – хрупкий, достаточно твердый (5,5–6,5 по Моосу), без спайности с различными мелкими включениями (кварц и т. д.). Бывшие выработки шахтных полей представляют собой выработки корытообразного сечения, которые увеличивают по площади поперечного сечения до размеров примерно  $20 \times 20$  м. Все это требуется для создания необходимого объема низового бассейна подземной гидроаккумулирующей электростанции (ПГАЭС), которыми являются шахтные поля. Но проект по строительству Курской ПГАЭС не был реализован по ряду экономических причин.

Во Франции в 1990 г. была закрыта угольная шахта Oignies, которая существовала с 1842 г. с перерывом в 1918–1919 г., когда она была разрушена. В результате закрытия шахты коммуна пришла в упадок, поскольку иной работы в округе не было. В 2005 г. начался конкурс на редевелопмент, и победитель предложил проект редевелопмента – культурный и туристический центр [21, 22].

Также в качестве примера редевелопмента подземных объектов горной промышленности можно рассмотреть Соль-Илецкое месторождение каменной соли в Оренбургской области [21]. По принципу соляной шахты в Величке в отработанных выработках Соль-Илецкого месторождения предполагается возведение курорта для больных респираторными заболеваниями. Данный оздоровительный центр позволит оказывать медицинские услуги в лечебных соляных камерах на первом горизонте, отметка – 130 м [24].

Рудник № 2 Соль-Илецкого месторождения после затопления отработанного рудника № 1 был сдан в эксплуатацию в 1964 г., и в данный момент отрабатывается горизонт 332 м, работы ведутся с применением проходческо-очистных комбайнов камерными выработками с целиками в 25 м из каменной соли между ними. Габариты камер составляют: высота 30 м; пролет 29 м; длина 150–320 м. Камеры располагаются в меридиональном направлении, т. е. не соосно с камерами затопленного рудника № 1. И это не единичные примеры использования отработанных выработок горной промышленности для устройства подземных курортов [25].

В США и Германии отработанные горные выработки используются в качестве хранилища: газа, отходов атомной промышленности, металлургии, стратегические запасы и др. [26]. Также в США отработанные шахтные поля используются для выращивания растений.

Работы по повторному использованию шахтных полей или их редевелопменту изменят сложившееся напряженно-деформированное состояние массива скальных пород, что приведет к проявлению вторичных полей напряжений, которые, в свою очередь, могут повлиять на различные геомеханические проявления. Одни из самых опасных из них – горный удар, вывал и тому подобные проявления, связанные с разгрузкой массива.

#### **Математическое моделирование горных выработок редевелопмента**

В качестве примера редевелопмента подземных выработок горной промышленности рассмотрим шахтные поля железной руды Курской магнитной аномалии (далее – КМА). В данном случае речь идет о строительстве подземной гидроаккумулирующей станции, которая использует отработанные шахтные поля как низовое хранилище.

В геологическом плане массив сложен различными известняками, филлитовыми сланцами с жилами железистых кварцитов и джеспилита. Массив расчленен нарушениями разрывного характера; нарушения заполнены глинистым материалом, частично щебнем, раскрытие от 5–10 см, фильтрации нет. Горные породы имеют горнотехническую характеристику: мощность залежи железных руд составляет 20 м; сланцы с коэффициентом крепости 5–14, устойчивые; руды с коэффициентом крепости 5–10. Мощность чехла сланцев составляет 800 м; Восточной залежи железистых кварцитов – от 100 до 200 м, Юго-Восточной залежи от 150 до 200 м. Железистые кварциты обводнены, коэффициент фильтрации 0,1–2 м/сут. Мощность черных или серых известняков от 50 до 600 м; черных пиритовых известняков – до 850 м; оолитовых известняков – 500 м. Мощность залежи джеспилита составляет 800 м.

Для создания нижнего бассейна необходимо заменить рудные целики между будущими камерами на железобетонные стены. Это даст возможность дополнительно получить прибыль от полезных ископаемых, которые до этого держали кровлю выработок. После их замены железобетонными стенами кровлю будут держать стены. Также необходимо возвести бетонную обделку камер, чтобы избежать ненужной фильтрации воды по трещинам.

Размер камер составляет  $20 \times 20$  м. Размер рудных целиков – 8 м. Их разработку можно вести механизированным способом с помощью экскаватора с гидромолотом. Этот способ разработки является наиболее целесообразным, чем буровзрывные работы (БВР) на основании того, что без БВР улучшается вентиляционная обстановка в выработке из-за отсутствия пыли, возникающей после взрыва и самих взрывных газов. Параллельно с разработкой целиков при некотором отставании ведется армирование и бетонирование стен.

Математическое моделирование ведется программой Z\_Soil, реализующей метод конечных эле-

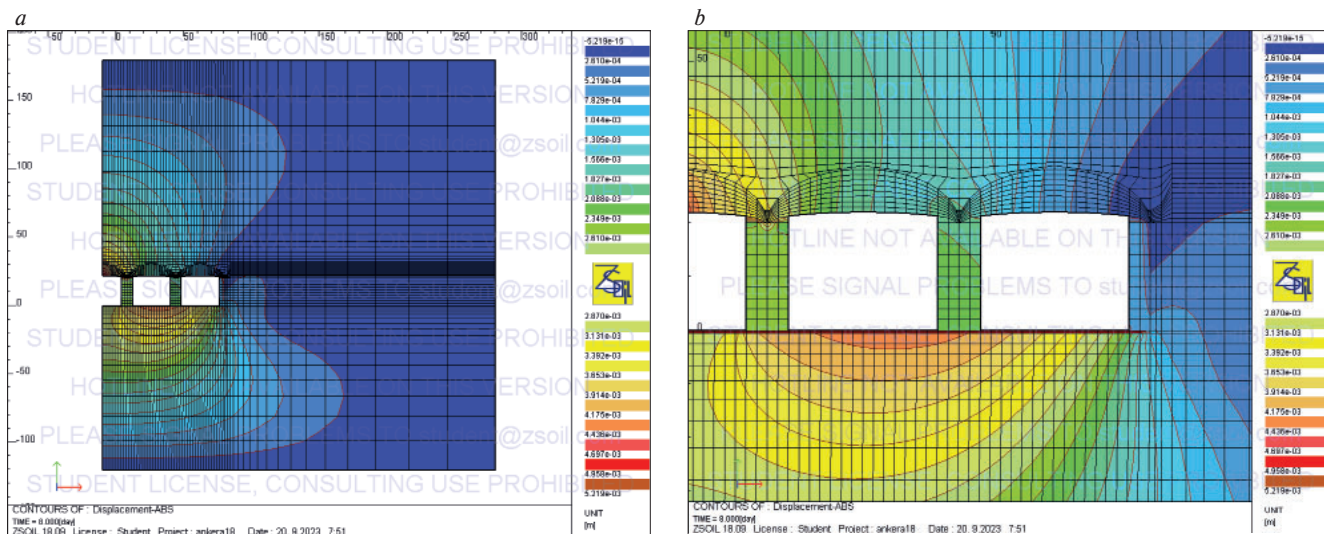


Рис. 1. Результаты моделирования в массиве и конструкции стены целика: *a* – абсолютные перемещения, м; *b* – перемещения в центральной части расчетной схемы, м

Fig. 1. Simulation results in the array and the design of the pillar walls: *a* – absolute displacements, m; *b* – displacements in the central part of the calculation scheme, m

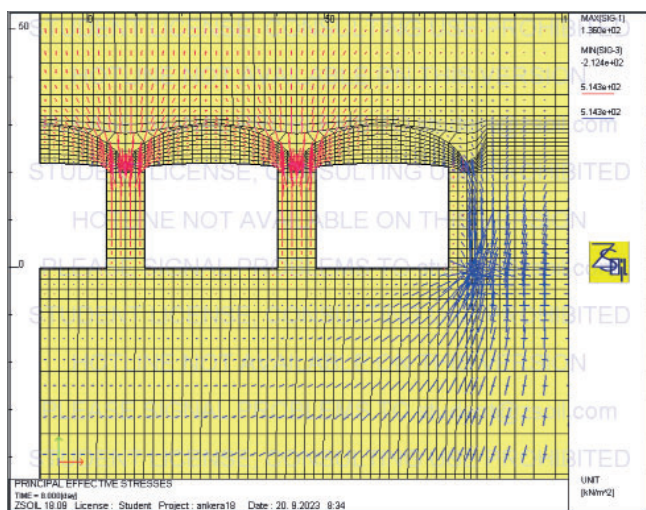


Рис. 2. Напряженное состояние массива и конструкций после установки анкеров

Fig. 2. The stressed state of the array and structures after the anchors are installed

ментов. На первом этапе моделируется природное напряженно-деформированное состояние (НДС) массива в тот период, когда осуществлялась проходка выработок шахтного поля. После получения вторичных напряжений моделируется замена целиков. Для более экономного решения был подобран размер бетонной стены, составивший 4 м. Результаты деформированного состояния после проведения окончательного моделирования представлены на рис. 1.

Список литературы

1. Лapidус А.А., Топчий Д.В., Ефремова В.Е., Кузин Е.А. Редевелопмент промышленных территорий // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*. 2019. Т. 17. № 4. С. 56–61.

Анализ проведенного математического моделирования показал, что максимальные перемещения в массиве составили 5 мм, а в конструкции железобетонных стен-целиков – 2,3 мм. Но при анализе напряженного состояния массива и конструкций были выявлены большие растягивающие напряжения: по оси X – 39 кН/м<sup>2</sup>; по оси Y – 122 кН/м<sup>2</sup>. Эти напряжения были во всех камерах, кроме крайних к основному массиву. Такое напряженное состояние превышает предельно допустимое для данных горных пород, в связи с этим было принято решение во всех камерах шахтного поля, кроме крайних, дополнительно установить анкеры длиной 6 м с шагом 1 м. Это позволило выровнять значения напряжений растягивающих и сжимающих по обоим осям. Полученные результаты представлены на рис. 2.

Выводы

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что для многих индустриальных объектов требуется проведение редевелопмента в целях использования данного сооружения в дальнейшем. То же относится ко многим отработанным выработкам горной промышленности. В таких выработках можно в результате редевелопмента возводить как промышленные, так и гражданские сооружения. В случае с отработанными шахтными полями КМА возможно возведение подземных сооружений даже с получением прибыли от вторичной разработки полезных ископаемых.

References

1. Lapidus A.A., Topchiy D.V., Efremova V.E., Kuzin E.A. Redevelopment of industrial territories. *Vestnik of Magnitogorsk State Technical University named after G.I. Nosov*. 2019. Vol. 17. No. 4, pp. 56–61. (In Russian).

2. Баснукаев М.Ш., Шлафман А.И. Редевелопмент индустриальных территорий. СПб.: Культ-ИнформПресс, 2013. 134 с.
3. Власова М.Ф., Леонова Л.Б. Редевелопмент индустриальных зон крупных городов для создания комфортной городской среды в России // *Экономика строительства*. 2021. № 5 (71). С. 15–26.
4. Березина М.В. Исследование целесообразности вариантов ремонта и усиления железобетонных конструкций промышленного здания. *Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России. Материалы V Всероссийской студенческой конференции*. Йошкар-Ола, 2019. Т. 5. С. 10–12.
5. Kukina I.V. On the role of separating territories in the logical structure of a modern city // *Журнал Сибирского федерального университета. Гуманитарные науки*. 2012. Вып. 5. № 5. С. 647–661.
6. Малая Е.В., Переvednova Г.В. Сохранение исторического наследия в процессе реновации предприятий (на примере текстильных предприятий г. Орехово-Зуево). *Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ: Материалы международной научно-практической конференции*. М.: МАРХИ, 2018. Т. 2. С. 473–475.
7. Серегина А.А. Тенденции формирования центров исторических поселений на базе индустриального наследия на примере городов Подмосковья (Павловский Посад, Орехово-Зуево, Дрезна). *Наука, образование и экспериментальное проектирование. Труды МАРХИ: Материалы международной научно-практической конференции*. М.: МАРХИ, 2019. С. 134–136.
8. Ульянова Г.Н. Текстильные фабриканты Зимины и их семейные фирмы: производство и торговля. 1810–1918 годы // *Экономическая история: Ежегодник*. 2021. Т. 2020. С. 170–203.
9. Старицына И.А., Старицына Н.А. Экологические проблемы уральских горнорудных городов на примере Свердловской области // *Экологический вестник России*. 2018. № 2. С. 51–55.
10. Collaton E., Bartsch Ch. Industrial site reuse and urban redevelopment – an overview // *A Journal of Policy Development and Research*. 1996. Vol. 2. No. 3, pp. 17–61.
11. Lai Y., Chen K., et al. Transformation of industrial land in urban renewal in Shenzhen, China // *Land*. 2020. No. 9. 371. DOI: 10.3390/land9100371
12. Попова Д.Д. Этапы социализации индустриального наследия в Москве // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 8. С. 1090–1104. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1090-1104
13. Дмитриева А.Д., Инскирвели Н. Реновация промышленных зон в современных условиях городов России // *Весенние дни науки: Сборник докладов Международной конференции студентов и молодых ученых*. Екатеринбург, 2021. С. 781–786.
14. Petrishev V.P., Dubrovskaya S.A., Noreika S.Y. et al. About a problem of post-industrialisation of salt-mining European towns. *Euro-eco Hannover 2014. International*
2. Basnukaev M.Sh., Shlafman A.I. Redevelopment industrial'nykh territoriy [Redevelopment of industrial territories]. SPb.: KultInformPress. 2013. 134 p.
3. Vlasova M.F., Leonova L.B. Redevelopment of industrial zones of large cities to create a comfortable urban environment in Russia. *Ekonomika stroitel'stva*. 2021. No. 5 (71), pp. 15–26. (In Russian).
4. Berezina M.V. Study of the feasibility of options for repairing and strengthening reinforced concrete structures of an industrial building. *Engineering personnel are the future of Russia's innovative economy. Materials of the V All-Russian Student Conference*. Yoshkar-Ola. 2019. Vol. 5, pp. 10–12. (In Russian).
5. Kukina I.V. On the role of separating territories in the logical structure of a modern city. *Journal of Siberian Federal University. Humanities and Social Sciences*. 2012. Vol. 5. No. 5, pp. 647–661.
6. Malaya E.V., Perevednova G.V. Preservation of historical heritage in the process of renovation of enterprises (on the example of textile enterprises in Orekhovo-Zuyevo). *Science, education and experimental design. Proceedings of the MAU (MARCHI): Materials of the international scientific and practical conference*. Moscow. MAU. 2018. Vol. 2, pp. 473–475. (In Russian).
7. Seregina A.A. Trends in the formation of centers of historical settlements based on industrial heritage on the example of the cities of the Moscow region (Pavlovsky Posad, Orekhovo-Zuyevo, Drezna). *Science, education and experimental design. Proceedings of the MAU (MARCHI): Materials of the international scientific and practical conference*. Moscow. MAU. 2019, pp. 134–136. (In Russian).
8. Ulyanova G.N. Textile manufacturers Zimin and their family firms: production and trade. 1810–1918. *Ekonomicheskaya istoriya (Yearbook)*. 2021. T. 2020, pp. 170–203. (In Russian).
9. Staritsyna I.A., Staritsyna N.A. Environmental problems of the Ural mining towns on the example of the Sverdlovsk region. *Ekologicheskii vestnik Rossii*. 2018. No. 2, pp. 51–55. (In Russian).
10. Collaton E., Bartsch Ch. Industrial site reuse and urban redevelopment – an overview. *A Journal of Policy Development and Research*. 1996. Vol. 2. No. 3, pp. 17–61.
11. Lai Y., Chen K., et al. Transformation of industrial land in urban renewal in Shenzhen, China. *Land*. 2020. No. 9. 371. DOI: 10.3390/land9100371
12. Popova D.D. Stages of socialization of industrial heritage in Moscow. *Vestnik MSUCE*. 2020. Vol. 15. No. 8, pp. 1090–1104. (In Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2020.8.1090-1104
13. Dmitrieva A.D., Inskirveli N. Renovation of industrial zones in modern conditions of Russian cities. *Spring days of science: collection of reports of the International Conference of Students and Young Scientists*. Yekaterinburg. 2021, pp. 781–786. (In Russian).
14. Petrishev V.P., Dubrovskaya S.A., Noreika S.Y. et al. About a problem of post-industrialisation of salt-mining European towns. *Euro-eco Hannover 2014. International*

- symposium Programm Abstracts: Internationaler Kongress Fachmesse «Okologische, Technologische und Rechtliche Aspekte der Lebensversorgung». 27–28 November 2014, pp. 133–134.*
15. Бабкин Р.А. Производственные зоны: потенциал реорганизации и роль в пространственном развитии города (на примере Москвы). *Старая и Новая Москва: тенденции и проблемы развития. Сборник научных статей, представленных в виде докладов на конференциях в рамках выполнения проекта Московского городского отделения Русского географического общества «Неизвестное рядом: пять лет Новой Москве»*. М., 2018. С. 37–57.
  16. Жараспаев М.А. Результаты опытно-промышленных работ по повторной разработке на месторождении Жаман-Айбат (Республика Казахстан) // *Интерактивная наука*. 2017. № 11. С. 127–132. DOI: <https://doi.org/10.21661/r-116633>
  17. Корчак А.В. Повторное использование техногенного подземного пространства угольных шахт // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 1998. № 6. С. 22–27.
  18. Collaton E., Bartsch Ch. Industrial site reuse and urban redevelopment – an overview // *A Journal of Policy Development and Research*. 1996. Vol. 2. No. 3, pp. 17–61.
  19. Казикаев Д.М., Коротких Т.В. Особенности диверсификации производства при комбинированной разработке месторождений полезных ископаемых // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2007. № 6. С. 208–213.
  20. Кокосадзе А.Э., Чесноков С.А., Фридкин В.М. Особенности инженерных сооружений подземной энергетики // *Известия Тульского государственного университета. Науки о земле*. 2013. № 3. С. 55–72.
  21. Langer P. «POST-MINING REALITY» in Western Europe: selected collieries in Belgium and France following discontinuation of coal mining. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 471. Iss. 11. DOI: [10.1088/1757-899X/471/11/112003](https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/11/112003)
  22. From a mine to a cultural complex. *Internet journal about design and architecture BERLOGOS*. Website. 2023. URL: <http://berlogos.com/work/iz-shahty-v-kulturnyj-kompleks/> (Date of access 25.09.23).
  23. Богданов Я.А., Соколова С.Е., Манько А.В. Выбор оптимального типа крепи камеры в массиве каменной соли на руднике г. Соль-Илецк // *Инженерный вестник Дона*. 2023. № 5 (101). С. 607–615.
  24. Долотов Ю.А. Применение подземной галотерапии в Европе и странах СНГ // *Спелеология и спелеология*. 2012. № 3. С. 270–275.
  25. Вишневская Н.Л. Спелеотерапия в оздоровлении промышленных рабочих // *Успехи современного естествознания*. 2007. № 10. С. 126–127.
  26. Прохоренко С.Н. Повторное использование горных выработок после прекращения добычи полезного ископаемого // *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*. 2003. № 7. С. 81–83.
  15. Babkin R.A. Industrial zones: potential for reorganization and role in the spatial development of the city (using the example of Moscow). *Old and New Moscow: trends and problems of development. A collection of scientific articles presented in the form of reports at conferences within the framework of the project of the Moscow city branch of the Russian Geographical Society “The Unknown is Nearby: Five Years of New Moscow”*. Moscow. 2018, pp. 37–57. (In Russian).
  16. Zharaspaev M.A. Results of pilot industrial work on re-development at the Zhaman-Aybat field (Republic of Kazakhstan). *Interaktivnaya nauka*. 2017. No. 11, pp. 127–132. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21661/r-116633>
  17. Korchak A.V. Reuse of technogenic underground space of coal mines // *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (scientific and technical journal)*. 1998. No. 6, pp. 22–27. (In Russian).
  18. Collaton E., Bartsch Ch. Industrial site reuse and urban redevelopment – an overview. *A Journal of Policy Development and Research*. 1996. Vol. 2. No. 3, pp. 17–61.
  19. Kazikaev D.M., Korotkov T.V. Features of production diversification in the combined development of mineral deposits. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (scientific and technical journal)*. 2007. No. 6, pp. 208–213. (In Russian).
  20. Kokosadze A.E., Chesnokov S.A., Fridkin V.M. Features of engineering structures of underground power engineering. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Nauki o zemle*. 2013. No. 3, pp. 55–72. (In Russian).
  21. Langer P. “POST-MINING REALITY” in Western Europe: selected collieries in Belgium and France following discontinuation of coal mining. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 471. Iss. 11. DOI: [10.1088/1757-899X/471/11/112003](https://doi.org/10.1088/1757-899X/471/11/112003)
  22. From a mine to a cultural complex. *Internet journal about design and architecture BERLOGOS*. Website. 2023. URL: <http://berlogos.com/work/iz-shahty-v-kulturnyj-kompleks/> (Date of access 25.09.23). (In Russian).
  23. Bogdanov Ya.A., Sokolova S.E., Manko A.V. Selection of the optimal type of chamber support in the rock salt massif at the Sol-Iletsk mine. *Inzhenernyi vestnik Dona*. 2023. No. 5 (101), pp. 607–615. (In Russian).
  24. Dolotov Yu.A. Underground halotherapy in Europe and CIS. *Speleologiya i spelestologiya*. 2012. No. 3, pp. 270–275. (In Russian).
  25. Vishnevskaya N.L. Speleotherapy in the recovery of industrial workers. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2007. No. 10, pp. 126–127. (In Russian).
  26. Prokhorenko S.N. Reuse of mine workings after the cessation of mineral extraction. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten' (scientific and technical journal)*. 2003. No. 7, pp. 81–83. (In Russian).

УДК 622.245.422.2

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-61-69>

М.С. САЙДУМОВ<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук (saidumov\_m@mail.ru);  
 С.-А.Ю. МУРТАЗАЕВ<sup>1,3</sup>, д-р техн. наук (s.murtazaev@mail.ru);  
 Д.А. МЕЖИДОВ<sup>1</sup>, аспирант (miezhidov8938@mail.ru)

<sup>1</sup> Грозненский государственный нефтяной технический университет им. академика М.Д. Миллионщикова (364021, г. Грозный, пр. Исаева, 100)

<sup>2</sup> Академия наук Чеченской Республики (364043, г. Грозный, Старопромывловское ш., 34)

<sup>3</sup> Комплексный научно-исследовательский институт им. Х.И. Ибрагимова Российской академии наук (364051, г. Грозный, Старопромывловское ш., 21а)

## Теоретические и практические аспекты вторичного использования отходов гидролизных производств в композиционных строительных материалах (обзор)

Раскрыты теоретические и практические аспекты развития актуальных технологических решений по повышению эффективности вторичного использования отходов гидролизных производств в композиционных строительных материалах. На основании методов сравнительного анализа представлены результаты отечественного и зарубежного опыта применения гидролизного лигнина в практике строительного материаловедения, выявлены технологические особенности его применения в технологии бетона и других строительных композитов с учетом влияния последовательности введения сырьевых компонентов на основные свойства получаемых рецептур. Раскрыт масштаб производственной деятельности цементной индустрии с представлением динамики развития и оценки вклада данной отрасли в эмиссию углекислого газа в атмосферу.

**Ключевые слова:** окружающая среда, экология, цементная промышленность, техногенное сырье, утилизация, низкоуглеродные технологии, вторичные материалы, зеленые композиты, углеродный след, экологический и экономический эффекты.

Работа выполнена в рамках госзадания ГГНТУ им. академика М.Д. Миллионщикова FZNU-2023-0001 «Оценка эмиссионного потенциала парниковых газов промышленных предприятий и разработка комплекса секвестрационных мер (на примере предприятий ТЭК и ЖКХ Чеченской Республики)».

**Для цитирования:** Сайдумов М.С., Муртазаев С.-А.Ю., Межидов Д.А. Теоретические и практические аспекты вторичного использования отходов гидролизных производств в композиционных строительных материалах (обзор) // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 61–69. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-61-69>

M.S. SAIDUMOV<sup>1,2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (saidumov\_m@mail.ru);

S.-A.Yu. MURTAZAEV<sup>1,3</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (s.murtazaev@mail.ru);

D.A. MEZHIDOV<sup>1</sup>, Postgraduate Student (miezhidov8938@mail.ru)

<sup>1</sup> Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshtchikov (100, Isayev Avenue, Grozny, 364051, Chechen Republic, Russian Federation)

<sup>2</sup> Academy of Sciences of the Chechen Republic (34, Staropromyslovskoe Shosse, Grozny, 364043, Russian Federation)

<sup>3</sup> Complex Research Institute named after Kh.I. Ibragimov, Russian Academy of Sciences (21, Staropromyslovskoe Shosse, Grozny, 364051, Russian Federation)

### Theoretical and Practical Aspects of the Secondary Use of Hydrolysis Productions Waste in Composite Building Materials (Review)

The theoretical and practical aspects of the development of relevant technological solutions to improve the efficiency of the secondary use of waste from hydrolysis industries in composite building materials are disclosed. Based on the methods of comparative analysis, the results of domestic and foreign experience in the use of hydrolysis lignin in the practice of building materials science are presented, technological features of its application in the technology of concrete and other building composites are revealed, taking into account the influence of the sequence of introduction of raw materials components on the basic properties of the formulations obtained. The scale of production activities of the cement industry is disclosed with a presentation of the dynamics of development and assessment of the contribution of this industry to the emission of carbon dioxide into the atmosphere.

**Keywords:** environment, ecology, cement industry, man-made raw materials, utilization, low-carbon technologies, recycled materials, green composites, carbon footprint, environmental and economic effects.

The work was carried out within the framework of the state task of the Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshtchikov FZNU-2023-0001 "Assessment of the emission potential of greenhouse gases of industrial enterprises and the development of a set of sequestration measures".

**For citation:** Saidumov M.S., Murtazaev S.-A.Yu., Mezhidov D.A. Theoretical and practical aspects of the secondary use of hydrolysis productions waste in composite building materials (review). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 61–69. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-61-69>

В настоящее время вопросы экологической безопасности, связанные, в частности, со снижением углеродного следа, изучением динамики изменения климата и перехода на инновационные низкоуглеродные технологии, выходят на первый план во всем мире [1–7]. Большое внимание уделяется разработке новых технологических решений, направленных на достижение углеродного баланса в природе для защиты системы «человек – среда обитания» [8–11]. Одним из ключевых факторов, наиболее сильно загрязняющих экологическую систему, являются трудноутилизируемые побочные продукты промышленного производства, которые в процессе разложения в отвалах, помимо видимого катастрофического урона природе, способствуют еще и выбросу в атмосферу значительных объемов климатически активных газов [9, 12–14]. К таким продуктам относятся многотоннажные отходы целлюлозных и гидролизных заводов, в частности так называемый лигнин, являющийся трехфазной и очень нестабильной системой из твердых органических веществ, газообразных компонентов и воды, который, попадая в природу, загрязняет не только почву, но и водный и воздушный бассейны. Как отмечают ученые, лигнин по эффективности поглощения углерода и возобновляемости такого явления уступает только целлюлозе. В промышленных условиях его получают в виде побочного продукта, образующегося при изготовлении целлюлозной (бумажной) пульпы, и в ряде некоторых смежных химических производств. Из различных источников известно, что ежегодные мировые запасы по накоплению лигнина составляют около 70 млн т. А запасы их в отвалах катастрофические, в одной только России объемы лигнинсодержащих отходов в отвалах составляют до 200 млн т [15–18]. Естественно, для решения такой актуальной проблемы отечественными и зарубежными учеными проведены соответствующие поисковые изыскания. Однако анализ показал, что большинство из них проведены с позиции их эффективной утилизации, а мероприятия по снижению углеродного следа представлены слабо. В этой связи очевидна актуальность разработки новых технологических решений по утилизации лигнинсодержащих побочных продуктов, позволяющих минимизировать их вклад в эмиссию углекислого газа в атмосферу путем их вторичного использования в практике строительного материаловедения.

Решение поставленной задачи актуально вдвойне, так как, с одной стороны, лигнинсодержащие отходы считаются достаточно нестабильными и сложноутилизируемыми веществами и разработка технологии их применения будет способствовать улучшению экологической обстановки на местах их накопления, а с другой – лигниновые вещества достаточно эффективно проявляют свойства связующего и вполне могут стать альтернативой традиционно применяемым вяжущим – цементу, извести, гипсу, битуму и т. д. Из различных источников из-

вестно, что лигнин эффективно применяют для получения так называемых биоасфальтов (Нидерланды) с целью снижения углеродных выбросов от применения традиционных асфальтобетонов на битумных связующих.

Как отмечается в [8], в среднем объемы выбросов CO<sub>2</sub> на предприятиях цементной промышленности в мире составляют более 3 млрд т при ежегодной мощности мирового производства более 4 млрд т цемента. При пересчете на 1 т цемента получается около 850 кг газов и более 20 кг пыли. Тот же показатель для извести составляет около 530 кг/т газа и около 5 кг пыли, а для гипса такие выбросы ничтожно малы в сравнении с цементом и известью. При изготовлении продукции на их основе эти показатели заметно возрастают из-за тепловлажностной или автоклавной обработки цементных и силикатных бетонов.

В связи с этим проведение анализа отечественного и зарубежного опыта получения дорожно-строительных композиционных материалов с низким

**Таблица 1**  
**Table 1**  
**Основные показатели качества гидролизованного лигнина, использованного в исследованиях [18]**  
**Main quality indicators of hydrolyzed lignin used in studies [18]**

Наименование показателя	Значение показателя	
Влажность, %	45–50	
Содержание золы, %	6,5	
Групповой состав, %	Лигнин	67
	Трудногидролизуемые полисахариды	30,3
	Легкогидролизуемые полисахариды	1,3
	Редуцирующие вещества	3,6
	Вещества, экстрагируемые спиртово-бензольной смесью	8,7
Кислотность (в пересчете на H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), %	0,24	
Содержание веществ гуминового комплекса, %	от 5 до 19	
Элементный состав лигнина, %	C <sup>r</sup>	55–58
	H <sup>r</sup>	5,5–6
	S <sup>r</sup>	0,6
	O <sup>r</sup>	35
	N <sup>r</sup>	1
Состав золы, %	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1
	SiO <sub>2</sub>	93,4
	CaO	1,5
	Na <sub>2</sub> O	0,3
	K <sub>2</sub> O	0,3
	MgO	0,3
	TiO <sub>2</sub>	0,1
Водопоглощение, мас. %	65	
Фракция, мм	6–8	

Таблица 2  
Table 2

**Рецептуры асфальтобетонных смесей мелкозернистой структуры типа Б,  
2-й марки для II дорожно-климатической зоны [21]**  
**Formulations of asphalt concrete mixtures of fine-grained structure type B, Grade 2 for the II road climate zone [21]**

Номер образца	Состав, мас. %					Битум БНД 90/130, мас. % (сверх 100)
	Гранитный щебень 20–10 мм	Гранитный щебень 10–5 мм	Песок	Гидролизный лигнин	Минеральный порошок*	
1	42 (одинаково во всех составах)	45 (одинаково во всех составах)	9	4	–	6,5 (одинаково во всех составах)
2			6,5	6,5	–	
3**			9	4	–	
4			9	–	4	
5**			6,5	6,5	–	
6			6,5	–	6,5	
7**			3	10	–	
8			3	–	10	
9**			1	12	–	
10			1	–	12	

\* В качестве минерального наполнителя в указанных составах применялся тонкомолотый порошок из известняка.

\*\* В образцах 3, 5, 7, 9 с использованием жидкой композиции из адгезионной добавки Wetfix BE обрабатывался лигнин. Среда насыщения – над-смоляная жидкость пиролиза древесины.

углеродным следом на основе вторичного сырья и альтернативных видов вяжущих, оказывающих наименьшее негативное воздействие на окружающую среду, становится весьма актуальным.

Вопросы использования гидролизного лигнина (табл. 1) авторы [15, 18] рассматривают как основу для изготовления стеновых блоков. Полученные данные свидетельствуют о том, что добавление лигнина в цементно-песчаный раствор приводит к уменьшению прочности композита. Но при этом показана возможность изготовления стеновых материалов с классом по прочности при сжатии В5–В7,5 и маркой по средней плотности D1900–D2000.

Согласно предложенной технологии процесс приготовления цементно-песчаной смеси заключается в том, что на первом этапе из лигнина отсеивают крупные частицы органики и металла (при их наличии) с использованием методов магнитной сепарации; далее очищенная суспензия высушивается при температуре  $105 \pm 5^\circ\text{C}$ . Из полученной таким образом сырьевой смеси отбирают пробу, измельчают ее до размеров песчаной фракции и дозируют в строительную растворную смесь.

В ходе проведения исследования [19] удалось получить легкий бетон с использованием гидролизного лигнина с плотностью  $1400\text{--}1450 \text{ кг/м}^3$  и классом по прочности при сжатии В40. При введении в состав гидролизного лигнина в количестве 30–50% от массы цемента показатели прочности увеличились на 17%. Перед добавлением в бетонную смесь лигнин подвергался механоактивации в роторно-вихревой мельнице. Также автором в данной работе рассмотрено взаимодействие механоактивированного гидролизного лигнина с другим модификатором – водорастворимым карбамид-мономером. Установлено,

что комплексное действие этих двух модификаторов дает эффект пластификации, так как карбамид полимеризуется. Кроме того, автор констатирует, что гидролизный лигнин, как хороший микронаполнитель для цементного камня, способствует увеличению его прочности, когезии и водостойкости при расходе до 40% от массы цемента.

Помимо механической, может проводиться и химическая активация гидролизного лигнина. Так, авторами [20] проводилась активация лигнина с использованием гидроксида и силиката калия. Опытные образцы, изготовленные из вяжущего, полученного таким образом, и впоследствии прошедшие тепловлажностную обработку при  $90\text{--}110^\circ\text{C}$ , имели прочность при сжатии 15 МПа. Самый лучший результат показал образец, модифицированный гидроксидом калия (КОН): коэффициент водостойкости составил 0,45, а прочность при сжатии – 15,7 МПа при плотности  $1240 \text{ кг/м}^3$ .

Имеется опыт использования лигнина как компонента при получении теплоизоляционных материалов [16]. Авторами разработан композиционный теплоизоляционный материал на основе лигнина, который можно использовать в сэндвич-панелях. В данном материале гидролизный лигнин выступает в роли наполнителя, помимо него использовалась карбамидоформальдегидная смола в качестве вяжущего и антипирен «Амидофосфат КМ». Коэффициент теплопроводности полученного композита составил  $0,06 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ .

Гидролизный лигнин может успешно использоваться и при получении асфальтобетонных смесей. Так, в исследовании [21] лигнин использовался как замена минеральному порошку. Перед добавлением гидролизного лигнина в исследуемые составы сырье

**Таблица 3**  
**Table 3**

**Физико-механические показатели контрольных образцов асфальтобетона, полученных на основе известняковой муки (порошка) и гидролизованного лигнина взамен минерального наполнителя [21]**  
**Physical and mechanical parameters of control samples of asphalt concrete obtained on the basis of limestone flour (powder) and hydrolyzed lignin instead of mineral filler [21]**

№ состава (см. табл. 2)	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Набухание, % по объему	Водонасыщение, % по объему	Прочность при сжатии $R$ , МПа, при температуре			Коэффициент водостойкости	
				0°C, $R_0$	20°C, $R_{20}$	50°C, $R_{50}$	$K_B$	$K_{B,дл}$
1	2,26	0,53	3,08	8,7	4,1	1,9	0,96	0,87
2	2,25	0,89	3,56	8,9	4,3	2,3	0,97	0,89
3	2,27	0,52	3	8,4	4,5	2,6	1,12	0,88
4	2,41	0,26	3,26	9,8	4	1,8	0,95	0,86
5	2,25	0,88	4,02	9,1	4,7	2,6	0,99	0,85
6	2,4	0,18	2,86	9,9	4,4	2,2	0,96	0,87
7	2,26	0,88	5,37	8,8	4,4	2,5	0,87	0,67
8	2,41	0,28	3,28	9,3	4,3	2,3	0,88	0,79
9	2,18	1,12	6,46	7,9	3,9	2,2	0,79	0,36
10	2,42	0,25	3	7,5	3,6	1,8	0,86	0,62

обрабатывали жидкой композицией из адгезионной добавки (табл. 2).

Авторами на основании полученных результатов утверждается, что прочная структура асфальтобетонного композита из коагуляционно-конденсационных связей, образуемых на базе твердых лигниносодержащих полимеров, в процессе приготовления и уплотнения асфальтобетонных смесей обеспечивает достаточно стабильные параметры качества исследуемых композитов (табл. 3).

Анализ полученных данных свидетельствует (табл. 3), что все образцы на основе лигнина соответствуют действующим нормативам и при этом исходные образцы с использованием лигнина немного превышают по показателям образцы на основе известнякового наполнителя. Составы с 4–6,5% содержанием обработанного адгезионной добавкой лигнина (№ 3, 5, 7 и 9) показали лучшие результаты прочности при сжатии при 20 и 50°C, заметно отличаются и гидрофизические показатели, включая коэффициенты кратковременной (1 сут) и длительной (14 сут) водостойкости.

Было установлено, что при введении в состав наполнителей в виде известнякового порошка или гидролизованного лигнина в количестве до 10–12% происходит снижение прочности и коэффициента водостойкости. У составов с присутствием лигнина снижение этих параметров протекает более интенсивно. Такое поведение смесей авторами обосновывается тем, что при введении в смесь такого комплексного наполнителя с содержанием лигнина часть последнего вступает во взаимодействие с вяжущим, при этом интенсивность такого зависит от температуры битума. Исходя из этого рекомендована дозировка лигнина в количестве 4–6,5%.

Применение лигнина находят и в керамической промышленности. В [22] рассмотрена возможность

получения эффективных керамических изделий на основе гидролизованного лигнина для наружных ограждающих конструкций. На предмет определения теплопроводности, усадки и водопоглощения исследовались шесть составов с содержанием глины 80–90%, лигнина 5–20% и опилок 5–20%. Полученные результаты исследований теплопроводности показали, что в зависимости от содержания лигнина (10%) коэффициент теплопроводности составляет 0,62 Вт/(м·°C), а при 20% – 0,48 Вт/(м·°C), что заметно уступает показателям образца с использованием опилок. Здесь же авторами установлены два момента воздействия лигнина: во-первых, присутствие лигнина в комплексе выгорающей добавки способствует уменьшению огневой усадки до 3–4% в сравнении с контрольными образцами; во-вторых, при его введении в ряде случаев заметно возрастает воздушная усадка (до 6–8%).

Водопоглощение керамических образцов с содержанием лигнина колебалось в диапазоне от 14,5 до 28%, что предполагает их применение для ограждающих стен при наличии наружной отделки. Резюмируя проведенные исследования [22], нужно подчеркнуть, что на основе гидролизованного лигнина, где последний выступает в роли выгорающей добавки совместно с опилками с соотношением 50:50% (лигнин:опилки) при общей их дозировке не более 20% от формовочной массы, получают эффективные керамические материалы стенового назначения с улучшенными общефизическими (плотность, пористость) и теплофизическими (теплопроводность) показателями.

Исследованиями [23] предложена лигнополимерсиликатная композиция, позволяющая повысить стойкость бетона к его органической коррозии. Авторами впервые представлены научные результаты, подтверждающие положительный эффект от применения наполнителя из обезвоженного лигнина в рецептурах полимерсиликатных составов на

основе  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  и  $(\text{C}_4\text{H}_6)_m \cdot (\text{C}_9\text{H}_{10})_n$ , заключающийся в улучшении антикоррозионных показателей бетонных композитов в сравнении с традиционно применяемыми защитными средствами на силикатной основе.

Модель создания эффективной структуры цементного камня путем соединения в единый монолит глинистой матрицы и высококальциевой золы, где в межзерновом пространстве формируется слоистая упаковка силикатов, предлагает автор работы [24], утверждающий, что система «зола–глина–вода», играющая важную структурообразующую роль в процессе пластификации, водоудержания и твердения смеси, обеспечивает деконцентрацию продуктов гидратации золы и их электролитически непрерывный контакт с поверхностью заполнителя бетона. В работе также представлены результаты экспериментальных исследований по повышению эффективности предлагаемых композиций с использованием лигнина.

Как показывает зарубежный опыт применения лигнина [25, 26], его применяют не только в материалах для возведения зданий, но и для строительства дорожных покрытий. Это в первую очередь так называемый биоасфальт (<https://www.gautamzen.co.uk/bioasphalt-the-way-forward/>) – дорожные покрытия на основе переработки растительного сырья. Самые эффективные с точки зрения снижения углеродного следа, утилизации техногенного сырья и т. д. – это дорожные композиты на основе лигнина и их производные вместе с различными микрозаполнителями, вводимыми в состав композиции для управления отдельными свойствами. Такие дорожные покрытия решают несколько проблем, в том числе утилизации углерода.

Разнообразные строительные материалы из биомассы (древесной, травяной, водорослевой и пр.) также интересны с точки зрения снижения углеродного следа и депонирования углерода. Тенденция развития исследований в этой отрасли показывает, что это направление станет очень перспективным и востребованным в ближайшие годы.

Так, ученые [25] на основании исследования жизненного цикла биоасфальта, полученного с использованием модифицированного биоугля, доказывают, что его применение не только повышает эффективность использования биомассы в дорожно-строительных композициях, но и улучшает защиту окружающей среды от вредных выбросов в атмосферу.

Известно, что лигнин как один из наиболее распространенных возобновляемых природных биополимеров обладает свойствами: малый вес, безвредность для окружающей среды и его антиоксидантная, противомикробная и биоразлагаемая природа наряду с нейтральностью по отношению к  $\text{CO}_2$  и армирующей способностью. Это делает его идеальным сырьевым компонентом для получения новых полимерных композиционных материалов полифункционального назначения. Традиционное связующее в асфальте –

битум – в настоящее время в ряде европейских стран заменяется так называемым крафт-лигнином, характеризующимся большим содержанием фенольных гидроксильных групп. Как известно, при получении традиционной асфальтобетонной смеси применяется «горячая технология», способствующая большому выделению различных газов, в том числе  $\text{CO}_2$ , в атмосферу, что является нежелательной для развития низкоуглеродной экономики. Считается, что 10% выбросов парниковых газов в транспортном секторе вызваны строительством асфальтобетонных дорог [26]. При этом лигнин требует меньше энергии, чем традиционная температура смешивания асфальта, что обеспечивает минимальные выбросы  $\text{CO}_2$ .

На получение биоасфальта на основе лигнина получены авторские свидетельства (Patent WO2019092278A1 «Lignin-based bio-asphalt» <https://patents.google.com/patent/WO2019092278A1/en>), и некоторые составы уже внедрены, что свидетельствует об эффективности их применения в практике дорожного строительства. Приготовление асфальтовой композиции, включающей смешивание битума с наполнителем, добавление лигнинового препарата и растительного масла к полученной смеси, предполагает одновременное введение последних двух компонентов.

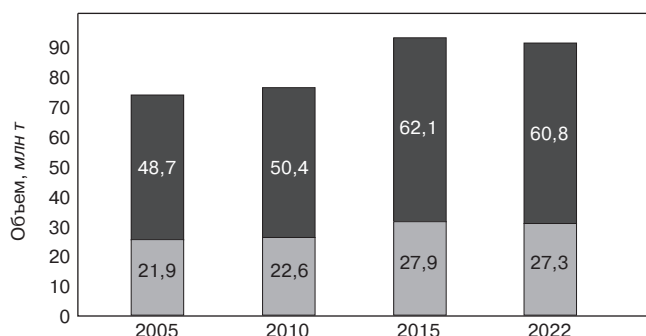
Зарубежные компании (из Голландии, Нидерландов), в частности Roelofs, Avantium, впервые в мире построили тестовый участок дороги из биоасфальта с применением растительного лигнина вместо традиционного нефтебитума. Автор работы «Лигнин лидирует – первая в мире лигниновая биоасфальтовая дорога, множество применений лигнина и многое другое» (Lignin leads the way – World’s first lignin bio-asphalt road, lignin’s array of applications and more <https://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2021/06/06/lignin-leads-the-way-worlds-first-lignin-bio-asphalt-road-lignins-array-of-applications-and-more/>) Helena Tavares Kennedy отмечает, что результаты исследований нидерландских ученых полного жизненного цикла нового биоасфальта, уложенного в Нидерландах в объеме до 8 млн т, показывают, что сокращение выбросов в атмосферу составляет примерно 200 тыс. т  $\text{CO}_2/\text{г}$ .

Поиском более эффективных и альтернативных видов вяжущих систем с низким негативным воздействием на окружающую среду, высокими показателями качества и их исследованиями, а также разработками новых композиционных материалов полифункционального назначения на их основе занимаются и российские научные школы [8, 12, 27]. Данное направление исследований актуально с точки зрения того, что цементную промышленность считают во всем мире одним из семнадцати наиболее сильно загрязняющих атмосферу производств. Сравнительные результаты исследований экологического аспекта разных видов вяжущих в мире дополнительно свидетельствуют, что данная промышленность связана с большими выбросами в окружающую среду в виде пыли и газа (табл. 4).

Таблица 4  
Table 4

Сравнительные результаты исследований экологического аспекта разных видов вяжущих веществ в мире  
Comparative results of studies of the ecological aspect of different types of binders in the world

Вяжущее	Объем производства в мире, млн т	Энергоемкость, кг усл. топлива		Экология			
		Производство 1 т цемента, кг усл. топлива	Всего млн т усл. топлива	CO <sub>2</sub>		Пыль	
				кг/т	Всего, млн т	кг/т	Всего, млн т
Портландцемент	4200	150	555	850	3145	21	77,7
Известь	390	204	79,5	528	206	5	1,9
Гипс	112	47	5,264	-	-	-	-
Итого:	4702	-	615,7	-	3351	-	79,6



Динамика роста производства цемента в России и вредных выбросов в атмосферу за последние годы: ■ – объем выбросов пыли и газа; ■ – объем выпускаемого цемента  
Dynamics of cement production growth in Russia and harmful emissions into the atmosphere in recent years: ■ – volume of dust and gas emissions; ■ – volume of cement produced

Если сравнить темпы производства цемента в России за последние годы, то наблюдается значительная динамика роста его выпуска (см. рисунок).

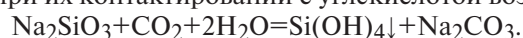
Динамика роста объема цемента в мире интенсифицируется крупными развивающимися странами. Лидерами по объемам производства цемента выступают Китай, Индия, Вьетнам, США и Египет. Более половины мирового производства цемента осуществляет Китай, который ежегодно выпускает более 2,38 млрд т вяжущего. Безусловно, такое производство, демонстрирующее положительные тенденции развития жилищно-строительного вопроса во всем мире, сопровождается катастрофическими выбросами климатически активных газов в атмосферу. Известно, что при производстве 1 т цемента выделяется более 0,72 т углекислого газа, 0,37 т из которого приходится на обжиг клинкера во вращающихся печах. И таким образом, на мировую цементную промышленность приходится более 5–7% парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу (Отчет о НИР (промежут.) «Изучение состояния вопроса получения строительных композитов с использованием некондиционного природного и вторичного сырья» / Комплексный НИИ РАН; руководитель С.-А.Ю. Муртазаев; соглашение о предоставлении субсидии от 02.12.2019 г. № 075-15-2019-1860; № государственной регистрации АААА-А19-119123190024-1. Грозный: 2019. 370 с. Отв. исполн. М.Ш. Саламанова, С.А. Алиев, М.С. Сайдумов и др.).

Учитывая тот факт, что по всему миру наблюдается увеличение производства бетона и строительного раствора на основе традиционного цемента, особо актуальной становится задача поиска новых видов вяжущих, способствующих снижению такого техногенного прессинга на окружающую среду, но и одновременно не уступающих по своим технологическим, физико-механическим и эксплуатационным характеристикам. Безусловно, к таким видам материалов относятся бесклинкерные вяжущие и их аналоги. Так, авторы научной работы [27] на основе щелочного затворителя разработали и исследовали новые виды вяжущих систем для бетонных композитов и строительных растворов, позволяющих частично или полностью отказаться от традиционно применяемых клинкерных цементов.

Широкие исследования в поиске эффективных рецептур бесклинкерных щелочных цементов и строительных композитов на их основе проведены отечественными и зарубежными учеными В.Д. Глуховским, Н.Н. Гончаровым, Т.М. Петровой, А.В. Мироненко, В.П. Ильиным, П.В. Кривенко, В.П. Кононовым, В.А. Матвиенко, С.П. Мухаметгалеевой, Н.Р. Рахимовой и др.

Некоторые исследователи сравнивают процесс твердения и структурообразования щелочных цементов с реакциями формирования структуры известково-кремнеземистых вяжущих. Щелочи реагируют с диоксидом кремния по следующей схеме: в процессе кристаллизации гидроксид натрия теряет влагу и образует кристаллогидраты, обволакивая зерна заполнителя, далее взаимодействует с углекислым газом по реакции:  $2\text{NaOH} + \text{CO}_2 = \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ , параллельно связывает диоксид кремния по реакции:  $2\text{NaOH} + n\text{SiO}_2 = \text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ , в результате чего формируется связка щелочных гидросиликатов натрия или калия.

Авторы работ [10, 19–21] констатируют, что большей реакционной активностью в исследуемых составах отличается щелочной затворитель, благодаря которому запускается процесс твердения вяжущих связок при их контактировании с углекислотой воздуха:



Из протекающих химических реакций следует, что поглощаемый CO<sub>2</sub> при формировании новооб-

разований на химическом уровне связывается в виде карбоната натрия, это делает данную технологию более эффективной, привлекательной в экологическом плане.

На улавливание  $\text{CO}_2$  и его «депонирование» в строительных композиционных материалах направлен ряд исследований ведущих ученых мира. Примером по внедрению технологии «захоронения» климатически активных газов является компания Heirloom Carbon Technologies, которая передала предприятию Central Concrete уловленный из воздуха объем газа для надежной и долгосрочной консервации его в структуре бетона («В США запущен крупнейший объект по удалению  $\text{CO}_2$  из атмосферы, но эоактивисты недовольны его подходом к работе» <https://3dnews.ru/1095893/kompaniya-heirloom-otkrila-perviy-kommercheskiy-zavod-po-ulavlivaniyu-co2-iz-atmosferi-chto-vizvalo-trevogu-ekoaktivistov>). Технология «депонирования»  $\text{CO}_2$  в бетоне предусматривает разогрев известнякового заполнителя до температуры, при которой из него освобождается  $\text{CO}_2$ , содержащийся в естественном виде (процесс кальцинации). Углекислый газ захватывается и отправляется на хранение. Полученный оксид кальция обладает свойствами, позволяющими ему действовать как губка для атмосферного  $\text{CO}_2$ . Далее  $\text{CaO}$  распределяется на поддонах, где он поглощает  $\text{CO}_2$  из поступающего воздуха. Этот процесс приводит к образованию карбоната кальция ( $\text{CaCO}_3$ ), который представляет собой возвращение к исходному состо-

янию известняка. После насыщения  $\text{CaO}$  углекислым газом материал возвращается в печь, где цикл повторяется. Бетон на обогащенном углекислым газом заполнителе характеризуется меньшим расходом цемента и в ряде случаев после застывания прочнее обычного.

Таким образом, анализ работ отечественных и зарубежных ученых в области утилизации многотоннажных отходов, в том числе и побочных продуктов целлюлозных и гидролизных производств, а также изучение предлагаемых низкоуглеродных строительно-технологических решений подтверждают актуальность проведения поисковых научных исследований и разработки инновационных технологий получения строительных композиционных материалов, позволяющих существенно уменьшить углеродный след всего жизненного цикла нового материала и его сырья.

На основании проведенного анализа можно предположить, что основной проблемой исследователей на ближайшую перспективу станет снижение выделяющегося при производстве портландцемента углекислого газа, поиск альтернативных видов вяжущих, расширение способов утилизации побочных продуктов целлюлозных, гидролизных и других производств. В качестве альтернативы портландцементу в будущем может претендовать и гидролизный лигнин, а также вяжущие щелочной активации на основе высокодисперсных порошков различной природы и другие бесклинкерные или малоцементные системы.

#### Список литературы

1. Wynn M., Jones P. Industry approaches to the Sustainable Development Goals. *International Journal of Environmental Studies*. 2022. Vol. 79. Iss. 1, pp. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2021.1911101>
2. Tudor C., Sova R. Benchmarking GHG emissions: forecasting models for global climate policy. *Electronics*. 2021. Iss. 10(24). 3149. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10243149>
3. Cai B., Wang J., He J., Geng Y. Evaluating  $\text{CO}_2$  emission performance in China's cement industry: An enterprise perspective. *Applied Energy*. 2016. Vol. 166, pp. 191–200. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.006
4. Доброхотова М.В., Матушанский А.В. Применение концепции наилучших доступных технологий в целях технологической трансформации промышленности в условиях энергетического перехода // *Экономика устойчивого развития*. 2022. № 2 (50). С. 63–68.
5. Башмаков И.А., Скобелев Д.О., Борисов К.Б., Гусева Т.В. Системы бенчмаркинга по удельным выбросам парниковых газов в черной металлургии // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации*. 2021. Т. 77. № 9. С. 1071–1086. DOI: <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-9-1071-1086>

#### References

1. Wynn M., Jones P. Industry approaches to the Sustainable Development Goals. *International Journal of Environmental Studies*. 2022. Vol. 79. Iss. 1, pp. 13–18. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2021.1911101>
2. Tudor C., Sova R. Benchmarking GHG emissions: forecasting models for global climate policy. *Electronics*. 2021. Iss. 10 (24). 3149. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10243149>
3. Cai B., Wang J., He J., Geng Y. Evaluating  $\text{CO}_2$  emission performance in China's cement industry: An enterprise perspective. *Applied Energy*. 2016. Vol. 166, pp. 191–200. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.11.006
4. Dobrohotova M.V., Matushanskij A.V. Applying the best available techniques concept for the technological transformation of industry under the energy transition conditions. *Economica ystoychivogo razvitiya*. 2022. No. 2 (50), pp. 63–68. (In Russian).
5. Bashmakov I.A., Skobelev D.O., Borisov K.B., Guseva T.V. Benchmarking Systems for Greenhouse Gases Specific Emissions in Steel Industry. *Chernaya metallurgiya. Byulleten' nauchno-tehnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2021. Vol. 77. Iss. 9, pp. 1071–1086. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-9-1071-1086>

6. Башмаков И.А., Потапова Е.Н., Борисов К.Б., Лебедев О.В., Гусева Т.В. Декарбонизация цементной отрасли и развитие систем экологического и энергетического менеджмента // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 4–12. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-4-12>
7. Ширяев М.В., Яшин С.Н., Борисов С.А., Жогин А.О. Карбоновые полигоны как элемент формирования «зеленой экономики» в Российской Федерации // *Развитие и безопасность*. 2021. № 4 (12). С. 95–104.
8. Лесовик В.С., Фомина Е.В. К проблеме проектирования строительных композитов для защиты среды обитания человека. В сборнике: *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году*. М., 2022. С. 177–185.
9. Сайдумов М.С., Успанова А.С., Алиев С.А. Эколого-материаловедческие проблемы использования техногенных отходов в посткризисных районах. В сборнике: *Наука XXI века. Проблемы академической мобильности исследователя и методологии исследования. Материалы II Международной научно-практической конференции* / Под общ. ред. З.А. Демченко. 2013. С. 440–443.
10. Аласханов А.Х., Таймасханов Х.Э., Сайдумов М.С., Муртазаева Т.С.А. Современные подходы к разработке многокомпонентных вяжущих с использованием техногенного сырья // *Вестник ГГНТУ*. Технические науки. 2022. Т. 18. № 1 (27). С. 63–70.
11. Лесовик В.С., Фомина Е.В., Айзенштадт А.М. Некоторые аспекты техногенного метасоматоза в строительном материаловедении // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 100–106. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106>
12. Травуш В.И., Кузеванов Д.В., Каприелов С.С., Волков Ю.С. Бетон как экологический фактор снижения углеродного следа в среде обитания // *Бетон и железобетон*. 2022. № 3 (611). С. 10–14. DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-611-3-10-14>
13. Токарева С.А., Кабанова М.К. Утилизация крупнотоннажных отходов. Переработка, обезвреживание и получение полезной продукции // *Строительные материалы*. 2022. № 5. С. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-25-29>
14. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш., Аласханов А.Х., Муртазаева Т.С.-А. Перспективы использования отходов цементной промышленности для получения современных бетонных композитов // *Строительные материалы*. 2021. № 5. С. 55–62. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-55-62>
15. Конюхов В.Ю., Коновалов П.Н., Суслов К.В., Васильева К.С. Методы утилизации и основные направления применения лигнина // *Молодежный вестник ИРГТУ*. 2015. № 2. С. 20–27.
6. Bashmakov I.A., Potapova E.N., Borisov K.B., Lebedev O.V., Guseva T.V. Cement sector decarbonization and development of environmental and energy management systems. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 4–12. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-4-12>
7. Shiryaev M.V., Yashin S.N., Borisov S.A., Zhogin A.O. Carbon polygons as an element of the formation of a “green economy” in the Russian Federation. *Razvitiye i bezopasnost'*. 2021. No. 4 (12), pp. 95–104. (In Russian).
8. Lesovik V.S., Fomina E.V. On the problem of designing building composites to protect the human environment. In the collection: *Fundamental, exploratory and applied research of the RAASN on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2021*. Moscow. 2022, pp. 177–185. (In Russian).
9. Saidumov M.S., Uspanova A.S., Aliev S.A. Ecological and materials science problems of using technogenic waste in post-crisis areas. In the collection: *Science of the XXI century. Problems of academic mobility of a researcher and research methodology. Materials of the II International Scientific and Practical Conference*. Under the general editorship of Z.A. Demchenko. 2013, pp. 440–443. (In Russian).
10. Alaskhanov A.Kh., Taimashanov Kh.E., Saidumov M.S., Murtazaeva T.S.A. Modern approaches to the development of multicomponent binders using technogenic raw materials. *Vestnik of the GSOTU*. Technical science. 2022. Vol. 18. No. 1 (27), pp. 63–70. (In Russian).
11. Lesovik V.S., Fomina E.V., Ayzenshtadt A.M. Some aspects of technogenic metasomatosis in construction material science. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 100–106. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-100-106>
12. Travush V.I., Kuzevanov D.V., Kapriyelov S.S., Volkov Yu.S. Concrete as an ecological factor in reducing the “carbon footprint” in the living environment. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 2022. No. 3 (611), pp. 10–14. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-611-3-10-14>
13. Tokareva S.A., Kabanova M.K. Utilization of large-tonnage waste. Processing, neutralization and obtaining useful products. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 5, pp. 25–29. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-802-5-25-29>
14. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Alaskhanov A.Kh., Murtazaeva T.S.-A. Prospects for the use of cement industry waste for the production of modern concrete composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 5, pp. 55–62. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-791-5-55-62>

16. Леонович А.А., Захаров С.С. Разработка нового композиционного теплоизоляционного материала с использованием гидролизного лигнина // *ЛесПромИнформ*. 2015. № 4 (110).
17. Цветков М.В., Салганский Е.А. Лигнин: направления использования и способы утилизации (обзор) // *Журнал прикладной химии*. 2018. Т. 91. № 7. С. 988–997.
18. Волосатова К.А. Исследование возможности применения гидролизного лигнина в производстве стеновых блоков для малоэтажного строительства // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 3 (50). С. 125–134.
19. Плотникова Г.П. Композиционный строительный материал с использованием отходов лесохимии в составе // *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2021. Т. 11. № 3 (38). С. 452–461.
20. Береговой В.А., Егунов Д.А., Сорокин Д.С. Строительные материалы и вяжущие вещества на основе гидролизного лигнина // *Региональная архитектура и строительство*. 2017. № 3 (32). С. 75–79.
21. Киселёв В.П., Иванова Л.А., Шевченко В.А., Бугаенко М.Б., Кеменев Н.В. Лигнинсодержащие полимеры в асфальтобетонных смесях // *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2013. № 7 (78). С. 61–68.
22. Ибе Е.Е., Чекалова А.Ю., Шибеева Г.Н. Поризованная керамика на основе гидролизного лигнина // *Инженерный вестник Дона*. 2021. № 7 (79). С. 311–319.
23. Шурьшева Г.В. Лигнополимерсиликатная композиция для защиты бетона от органической коррозии: Дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2008. 141 с.
24. Селиванов Ю.В., Шильцина А.Д., Селиванов В.М. Составы и свойства керамических теплоизоляционных строительных материалов из масс низкотемпературного вспенивания на основе глинистого сырья // *Инженерно-строительный журнал*. 2012. № 3 (29). С. 35–40.
25. Xinxing Zhou, Taher Baghaee Moghaddam, Meizhu Chen, Shaopeng Wu. Life cycle assessment of biochar modified bioasphalt derived from biomass. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020. No. 8 (38), pp. 14568–14575. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05355>
26. Christian Moretti, Blanca Corona, Ric Hoefnagels. Kraft lignin as a bio-based ingredient for Dutch asphalts: an attributional LCA. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 806. P. 1. 150316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150316>
27. Муртазаев С.-А.Ю., Саламанова М.Ш. Исследование стойкости цементного камня на бесклинкерных вяжущих щелочной активации // *Вестник ГГНТУ. Технические науки*. 2022. Т. 18. № 2 (28). С. 98–107.
15. Konyukhov V.Yu., Konovalov P.N., Suslov K.V., Vasilyeva K.S. Methods of utilization and main directions of use of lignin. *Molodezhnyy vestnik of IrSTU*. 2015. No. 2, pp. 20–27. (In Russian).
16. Leonovich A.A., Zakharov S.S. Development of a new composite thermal insulation material using hydrolytic lignin. *LesPromInform*. 2015. No. 4 (110). (In Russian).
17. Tsvetkov M.V., Salgansky E.A. Lignin: directions of use and methods of disposal (review). *Zhurnal prikladnoy khimii*. 2018. Vol. 91. No. 7, pp. 988–997. (In Russian).
18. Volosatova K.A. Study of the possibility of using hydrolytic lignin in the production of wall blocks for low-rise construction. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2018. No. 3 (50), pp. 125–134. (In Russian).
19. Plotnikova G.P. Composite building material using wood chemical waste in its composition. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost'*. 2021. Vol. 11. No. 3 (38), pp. 452–461. (In Russian).
20. Beregovoi V.A., Egunov D.A., Sorokin D.S. Construction materials and binders based on hydrolytic lignin. *Regional'naja arhitektura i stroitel'stvo*. 2017. No. 3 (32), pp. 75–79. (In Russian).
21. Kiselev V.P., Ivanova L.A., Shevchenko V.A., Bugaenko M.B., Kemenev N.V. Lignin-containing polymers in asphalt concrete mixtures. *Vestnik IrSTU*. 2013. No. 7 (78), pp. 61–68. (In Russian).
22. Ibe E.E., Chekalova A.Yu., Shibaeva G.N. Porous ceramics based on hydrolytic lignin. *Inzhenernyy vestnik Dona*. 2021. No. 7 (79), pp. 311–319. (In Russian).
23. Shuryshcheva G.V. Lignopolymer silicate composition for protecting concrete from organogenic corrosion. *Cand. Diss. (Engineering)*. Krasnoyarsk. 2008. 141 p. (In Russian).
24. Selivanov Yu.V., Shiltsina A.D., Selivanov V.M. Compositions and properties of ceramic heat-insulating building materials from low-temperature foaming masses based on clay raw materials. *Magazine of Civil Engineering*. 2012. No. 3 (29), pp. 35–40. (In Russian).
25. Xinxing Zhou, Taher Baghaee Moghaddam, Meizhu Chen, Shaopeng Wu. Life cycle assessment of biochar modified bioasphalt derived from biomass. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*. 2020. No. 8 (38), pp. 14568–14575. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c05355>
26. Christian Moretti, Blanca Corona, Ric Hoefnagels. Kraft lignin as a bio-based ingredient for Dutch asphalts: an attributional LCA. *Science of the Total Environment*. 2022. Vol. 806. P. 1. 150316. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150316>
27. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh. Study of the durability of cement stone on non-clinker alkaline activated binders. *Vestnik of the GSOTU. Technical science*. 2022. Vol. 18. No. 2 (28), pp. 98–107. (In Russian).

К.Р. ХУЗИАХМЕТОВА<sup>1</sup>, аспирант (karina261996@mail.ru),  
А.М. ИСЛАМОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (iam16@yandex.ru),  
Л.А. АБДРАХМАНОВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук (laa@kgasu.ru),  
Р.К. НИЗАМОВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук (nizamov@kgasu.ru);  
Д.М. ВАЛИЕВА<sup>2</sup>, инженер (valdilmar2001@gmail.ru)

<sup>1</sup> Казанский государственный архитектурно-строительный университет (420043, г. Казань, ул. Зеленая, 1)

<sup>2</sup> ООО «НПФ «Рекон» (420095, г. Казань, ул. Васильченко, 7Б)

## Изучение полимерных матриц на основе смесей поливинилхлорида и привитых сополимеров

Разработка смесевых матриц является хорошо зарекомендовавшим себя и подходящим методом получения новых полимерных материалов. Сочетание двух различных типов полимеров позволяет получить новый и уникальный материал, обладающий свойствами обоих полимеров. Приведено сравнение полимерных матриц на основе поливинилхлорида (ПВХ) и различных привитых сополимеров с целью подбора оптимальных составов для дальнейшего наполнения. В качестве привитых сополимеров были выбраны отечественный акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС) и импортный акрилонитрил-стирол-акрилат (АСА). Несмотря на технологичность сополимеров, последующая экструзия наполненных композиций более целесообразна с матрицей ПВХ/АБС, поскольку будет снижено электропотребление при переработке. При этом матрица на основе смеси полимеров ПВХ/АСА обладает более высокими прочностными свойствами, однако в качестве ударопрочной матрицы лучший эффект оказывает ПВХ/АБС. В зависимости от содержания сополимера структура композиций на основе смесей полимеров может быть представлена микродисперсной или вязкой и слоистой, что будет определять основные физико-механические свойства. В целом для дальнейшего наполнения можно использовать обе матрицы, но при содержании сополимеров менее 50 м. ч.

**Ключевые слова:** поливинилхлорид, акрилонитрил-бутадиен-стирол, акрилонитрил-стирол-акрилат, сополимер, смеси полимеров, полимерная матрица, жесткие композиции, профилльно-погонажные изделия.

**Для цитирования:** Хузиахметова К.Р., Исламов А.М., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Валиева Д.М. Изучение полимерных матриц на основе смесей поливинилхлорида и привитых сополимеров // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 70–75. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-70-75>

K.R. KHUZIAKHMETOVA<sup>1</sup>, Graduate Student (karina261996@mail.ru), A.M. ISLAMOV<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (iam16@yandex.ru), L.A. ABDRAKHMANOVA<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (laa@kgasu.ru), R.K. NIZAMOV<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (nizamov@kgasu.ru); D.M. VALIEVA<sup>2</sup>, Engineer (valdilmar2001@gmail.ru)

<sup>1</sup> Kazan State University of Architecture and Engineering (1, Zelenaya Street, Kazan, 420043, Russian Federation)

<sup>2</sup> SPC «Rekon» (7B, Vasilchenko Street, Kazan, 420095, Russian Federation)

### Study of Polymer Matrices Based on Blends of Polyvinyl Chloride and Grafted Copolymers

The development of mixed matrices is a well-established and suitable method for obtaining new polymeric materials. The combination of two different types of polymers allows you to get a new and unique material that has the properties of both polymers. This paper compares polymer matrices based on polyvinyl chloride (PVC) and various graft copolymers in order to select the optimal compositions for further filling. Domestic acrylonitrile butadiene styrene (ABS) and imported acrylonitrile styrene acrylate (ASA) were chosen as graft copolymers. Despite the manufacturability of copolymers, the subsequent extrusion of filled compositions is more appropriate with a PVC/ABS matrix, since power consumption during processing will be reduced. At the same time, the matrix based on a mixture of PVC/ASA polymers has higher strength properties, but PVC/ABS has the best effect as an impact-resistant matrix. Depending on the content of the copolymer, the structure of compositions based on polymer mixtures can be microdispersed or viscous and layered, which will determine the main physical and mechanical properties. In general, both matrices can be used for further filling, but with a copolymer content of less than 50 phr.

**Keywords:** polyvinyl chloride, acrylonitrile-butadiene-styrene, acrylonitrile-styrene-acrylate, copolymer, polymer blends, polymer matrix, rigid compositions, profile and corrugated products.

**For citation:** Khuziakmetova K.R., Islamov A.M., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Valieva D.M. Study of polymer matrices based on blends of polyvinyl chloride and grafted copolymers. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 70–75. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-70-75>

С каждым годом наблюдается рост объемов производства и потребления полимерных композиционных материалов строительного назначения, о чем свидетельствуют аналитические материалы в коммерческих источниках, например Огрель Л. «Полимеры и изделия: межотраслевое противоречие» ([https://www.plastics.ru/upload/magazines/Plastics\\_1\\_2\\_2021/12/](https://www.plastics.ru/upload/magazines/Plastics_1_2_2021/12/)), Гусева Л. «Полимеры спасают экономику» (<https://www.plastics.ru/upload/>

magazines/Plastics\_4\_2021/10/), и научно-технических журналах [1]. В связи с доступностью сырья и комплексом положительных свойств поливинилхлорид (ПВХ) представляет наибольший коммерческий интерес среди остальных полимеров. Его уникальность обусловлена тем, что имеющийся в составе хлор обеспечивает широкую возможность к модификации и, как следствие, более обширную область эксплуатации изделий [2].

В материалах строительного назначения ключевым компонентом в полимерных составах на основе ПВХ являются наполнители, основная цель которых – это снижение себестоимости и придание специальных свойств базовому полимеру. Однако наполнение ПВХ в чистом виде невозможно. Это связано с тем, что специфика химического строения ПВХ определяет присущие ему недостатки – хрупкость при низкой температуре, высокая вязкость расплава и низкая термостабильность. Кроме того, сами наполнители способны ухудшить перерабатываемость, повысить водопоглощение и снизить прочность. Поэтому создание наполненных композитов является сложной задачей.

Как известно, влияние наполнителей зачастую оценивается относительно матрицы ПВХ [3–5]. Учитывая многокомпонентность составов, это является неверным решением. Кроме наполнителей в состав жесткого ПВХ всегда вводятся полимерные технологические добавки или эластомеры (в некоторых случаях оказывают эффект твердых пластификаторов) и модификаторы ударной прочности, образующие совместно с ПВХ матрицу в виде смеси полимеров.

Смесь полимеров – это обширный и неограниченный предмет интереса, требующий самого пристального внимания с теоретической и экспериментальной точек зрения. Из литературных источников было установлено, что смеси полимеров обладают лучшими свойствами по сравнению с полимерами, входящими в их состав по отдельности [6].

Обобщая информацию о смесях полимеров, авторы обзорной статьи [7] проанализировали актуальные и часто используемые на производствах мягких и жестких пластиковых изделий полимерные и эластомерные добавки, образующие смесь полимеров на основе ПВХ. Они отметили, что экструдированные жесткие ПВХ-композиции с акриловыми полимерами или сополимерами бутадиена со стиролом обладают высокой технологичностью и физико-механическими свойствами. Причем акриловые полимеры выполняют функцию технологических добавок, а сополимеры бутадиена со стиролом приходятся на модификаторы ударной прочности.

На сегодняшний день известны сополимеры, синтезированные по типу «ядро–оболочка», где оболочка образована из акриловых полимеров и бутадиен-стирольного ядра. Ярким представителем сополимеров «ядро–оболочка» является акрилонитрил-бутадиен-стирол (АБС). Полярная природа групп  $-C\equiv N$  в акрилонитрильном компоненте АБС, а также относительно низкая вязкость фазы стирол-акрилонитрила способствуют использованию АБС в смесях с другими термопластами [8]. Один из первых удачно зарекомендовавших себя коммерческих составов смеси полимеров ПВХ/АБС был запатентован американской компанией Borg Warner Corporation в 1959 г. [9].

Многочисленные исследования смесей полимеров на основе ПВХ сосредоточены на установлении

степени совместимости. Соответственно, в то время как некоторые авторы считают ПВХ/АБС совместимыми, другие указывают лишь на частичную смешиваемость с сополимерами АБС [10–14]. Однако различные представления относительной совместимости ПВХ с сополимерами АБС не повлияли на общее мнение о том, что в результате смешивания этих полимеров получают материалы с хорошей прочностью при растяжении, ударной вязкостью, улучшенной технологичностью, необходимой плотностью и высокой температурой тепловой деформации [8].

Однако и АБС не является идеальным модифицирующим компонентом, особенно при изготовлении изделий для наружного использования, поскольку под действием солнечного света ненасыщенные диеновые группы данного сополимера окисляются, вследствие чего материал становится хрупким и менее прочным. Поэтому в 1970-е гг. предложили альтернативное применение атмосферостойкого привитого сополимера, в котором ненасыщенные диеновые группы были заменены на насыщенные каучуки – это акрилонитрил-стирол-акрилат (АСА) [15].

В ряде исследований отмечена эффективность АСА в качестве модификатора ударной прочности для ПВХ [16], а в работе [17] показано, что наряду с прочностью также улучшается теплостойкость и термостабильность.

Учитывая интерес производителей пластиковых изделий к материалам с высоким комплексом эксплуатационных показателей, а также известные данные о технологичности смесей полимеров на основе ПВХ, авторы предлагают сравнить технологические и физико-механические свойства смесей полимеров ПВХ/АБС и ПВХ/АСА с учетом особенностей формирования их структуры в широком концентрационном диапазоне с целью подбора оптимальных составов для их дальнейшего наполнения.

В качестве компонентов для создания композиций на основе смеси полимеров были использованы:

– суспензионный поливинилхлорид марки ПВХ-С-6359-М;

– сополимер акрилонитрил-бутадиен-стирол марки АБС-20П с показателем текучести расплава при 220°C при нагрузке 10 кг – 5–12 г/10 мин (Россия, АО «Пластик»);

– сополимер акрилонитрил-стирол-акрилат марки KIBILAC PW-957 с показателем текучести расплава при 220°C при нагрузке 10 кг – 23 г/10 мин (Тайвань, CHI MEI CORPORATION).

Сополимеры вводили в количестве 20, 50 и 100 м. ч. на 100 м. ч. ПВХ. Также в состав данных композиций входили комплексный термостабилизатор и стабилизатор-смазка.

Приготовление смесей полимеров различных составов осуществлялось сухим смешением на лабораторном диссольтере с трехлопастной пропеллерной

насадкой серии ЛДУ-3 МПР при 700 об/мин в течение 4 мин.

Для исследования технологических свойств композиций были подготовлены пленочные образцы, которые перерабатывались путем термопластики на лабораторных вальцах ЛБ 200 100/100 Э. Температура валков в процессе переработки составляла 140–150°C.

Для исследования экструзионных параметров и физико-механических свойств были получены плоские профили. Переработка осуществлялась на лабораторном двухшнековом экструдере LabTech Scientific LTE 16-40 с фильерой прямоугольного сечения (22×2 мм). Экструзия проводилась при одинаковом температурном профиле (табл. 1) и скорости вращения шнеков 25 об/мин.

Технологические свойства смесей полимеров оценивались на пленочных образцах по термостабильности и показателю текучести расплава (ПТР), а параметры экструзионной переработки – по нагрузке двигателя, давлению в фильере и разбуханию экструдата (табл. 2).

Термостабильность определялась на измельченных пленочных образцах размером 2×2 мм по времени индукционного периода от начала погружения пробирки в термическую печь до изменения цвета индикатора в процессе выделения HCl при 180°C по ГОСТ 14041–91.

ПТР определялся на пленочных образцах массой 3 г при нагревании до 185°C и нагружении 21,6 кг по ГОСТ 11645–2021. Значение ПТР фиксировалось по массе образцов, вышедших из капилляра диаметром 2 мм.

Наличие сополимеров АБС и АСА приводит к увеличению термостабильности и ПТР. Изменение первого показателя может быть связано с тем, что при высокой температуре полиеновые структуры в ПВХ в процессе реакции стабилизируются с полистирольными радикалами сополимеров. При этом использование АБС способствует увеличению термостабильности в 1,3–2 раза, а АСА – в 2,3–2,5 раза.

Кроме того, более высокая текучесть самих сополимеров приводит к закономерному изменению ПТР, особенно это касается используемой марки АСА, которая рекомендуется для переработки методом литья. Тем самым при одних и тех же концентрациях сополимеров ПТР увеличивается в 1,5–2,6 раза при введении АБС, а при использовании АСА – в 2,9–4,5 раза.

Зачастую ПТР является определяющим свойством, опираясь на которое подбирается способ переработки полимеров в изделия. Как отмечено в [18], для экструзии оптимальным является ПТР в диапазоне от 0,3 до 3 г/10 мин; для менее ответственных изделий экструзионную переработку можно осуществлять при ПТР ~5 г/10 мин, а для литья под давлением – от 5 до 20 г/10 мин. При этом следует учитывать, что данные интервалы не являются обязательными, а в настоящее время технологи при выбо-

**Таблица 1**  
**Table 1**

**Температурный режим экструдирования**  
**Temperature conditions for extrusion**

№ зоны цилиндра	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Температура, °С	190	193	195	195	197	197	197	200	200	200

**Таблица 2**  
**Table 2**

**Технологические свойства композиций на основе смесей полимеров**  
**Technological properties of compositions based on polymer blends**

Концентрация сополимера, м. ч.	Термостабильность, мин	ПТР, г/10 мин	Загрузка двигателя, % от max	Давление в фильере, бар	Разбухание экструдата
0	71	2,1	46	13	1,59
АБС:					
20	93	3,2	33	16	1,44
50	117	4,6	35	15	1,49
100	141	5,4	35	15	1,4
АСА:					
20	160	6	51	6	1,71
50	169	8,8	47	7	1,72
100	178	9,4	48	9	1,6

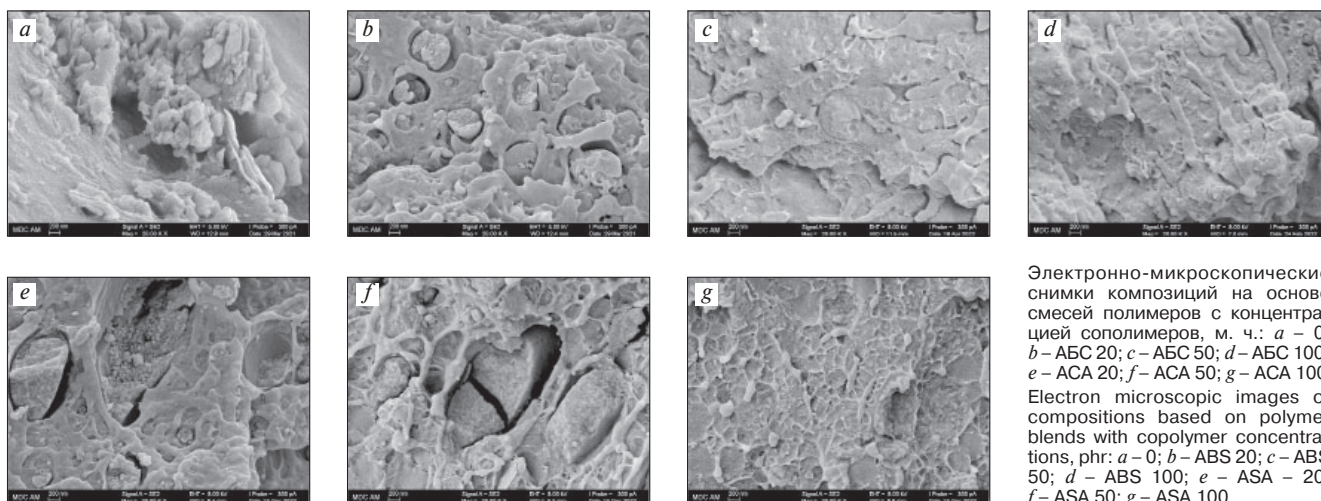
**Таблица 3**  
**Table 3**

**Физико-механические свойства композиций на основе смесей полимеров**  
**Physical and mechanical properties of composites based on polymer blends**

Концентрация сополимера, м. ч.	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Твердость, МПа	Ударная вязкость, кДж/м <sup>2</sup>
0	52	65	137	5,7
АБС:				
20	49	50	162	8,5
50	48	60	158	12,7
100	43	61	152	33,2
АСА:				
20	50	81	159	6,5
50	49	79	159	8
100	48	72	155	11,5

ре нового компонента опираются на рекомендации производителей.

ПТР для смесей полимеров на основе ПВХ с использованием сополимера АБС укладывается в интервал, рекомендуемый для экструзионной переработки. Это подтверждается снижением загрузки двигателя экструдера на 24–28%, что свидетельствует



Электронно-микроскопические снимки композиций на основе смесей полимеров с концентрацией сополимеров, м. ч.: *a* – 0; *b* – ABS 20; *c* – ABS 50; *d* – ABS 100; *e* – ASA 20; *f* – ASA 50; *g* – ASA 100  
 Electron microscopic images of compositions based on polymer blends with copolymer concentrations, phr: *a* – 0; *b* – ABS 20; *c* – ABS 50; *d* – ABS 100; *e* – ASA 20; *f* – ASA 50; *g* – ASA 100

о возможном сведении к минимуму потребляемой экструдером мощности при дальнейшем наполнении композиций. Кроме того, при увеличении давления в фильере на 15–23% наблюдается снижение разбухания экструдата на 9–12%. Следовательно, геометрические размеры пластиковых профилей будут приближены к размерам фильеры экструдера.

При этом введение сополимера АСА, наоборот, приводит к приросту загрузки двигателя экструдера на 4–11%. Вследствие значительного уменьшения вязкости расплава разбухание экструдата повышается 1–8%. В источнике [19] отмечалось, что это может зависеть от напряжения сдвига и молекулярно-массового распределения. Таким образом, в случае с сополимером АСА чем выше скорость сдвига, тем ниже давление в фильере (на 31–54%) и выше разбухание экструдата.

Физико-механические свойства оценивались по прочности при растяжении и изгибе, твердости и ударной вязкости (табл. 3).

Прочность при растяжении и изгибе определялась на разрывной машине РМ-250 по действующим ГОСТ 11262–2017 и ГОСТ 4648–2014. Испытание проводилось на пяти образцах при скорости перемещения траверсы 100 и 50 мм/мин соответственно.

Определение твердости по методу вдавливания шарика осуществлялось в соответствии с ГОСТ 4670–2015 на твердомере под действием нагрузки, равной 62,5 кгс.

Ударная вязкость по Шарпи определялась на маятниковом копре Gotech Testing Machine GT-7045-MDL с энергией маятника 5,5 Дж, скоростью движения в момент удара 3,46 м/с при температуре  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  по ГОСТ 4647–2015.

Смеси полимеров «термопласт–термопласт» редко отличаются повышенной прочностью при растяжении без добавления компатибилизаторов [20]. В данном случае прочность при растяжении с АБС приблизительно находится на одном уровне при содержании сополимера 20 и 50 м. ч., в то время как при использовании АСА интервал концентраций шире и

составляет 20–100 м. ч. Прочность при растяжении с сополимером АБС уменьшается на 6–17%, а с АСА – на 4–8%.

При этом сополимеры оказывают различное влияние на показатель прочности при изгибе. Так, при содержании 20 м. ч. АБС прочность при изгибе уменьшается на 23%, а при концентрации более 50 м. ч. – на 6–8% по сравнению с немодифицированным составом. Сополимер АСА совместно с ПВХ, наоборот, привел к приросту прочности при изгибе на 11–25%.

Наличие в сополимерах эластичного фрагмента должно сопровождаться снижением твердости пластиков. Однако совместно с жестким ПВХ сополимеры АБС и АСА, в которых также присутствует термопластичная фаза, повышают данный показатель на 11–18 и 13–16% соответственно. Кроме того, эластичное ядро сополимеров благодаря низкой температуре стеклования (для АБС  $-90^\circ\text{C}$ , для АСА  $-45^\circ\text{C}$ ), является определяющим при повышении ударной вязкости пластиков. Так, при содержании 20 м. ч. АБС ударная вязкость находится на уровне с 20 и 50 м. ч. АСА, а при 50 м. ч. АБС данный показатель близок к 100 м. ч. АСА. Таким образом, подтвердилось, что АБС является наиболее эффективным компонентом, повышающим удар: с сополимером АБС показатель увеличивается в 1,5–5,8 раза, а АСА – в 1,1–2 раза.

Вследствие активности сополимеров возможно изменение надмолекулярной организации структуры, т. е. может произойти изменение размеров, форм и распределения микрогетерогенных структурных единиц. Следует отметить, что обычно структуру композиций на основе смесей полимеров оценивают по поверхности излома после испытаний. Однако поверхность до и после разрушения может отличаться.

Для исследований структуры композиций были сняты срезы хрупкого скола экструдированных образцов на автоэмиссионном высокоразрешающем сканирующем электронном микроскопе Merlin компании CarlZeiss. Электронно-микроскопические сним-

ки композиций на основе смесей полимеров при увеличении 20000-крат показаны на рисунке.

На рисунке (а) показана структура композиции без сополимеров с дисперсными включениями стабилизаторов. Отчетливое фазовое разделение наблюдается у образцов с 20 м. ч. АБС (b) и 20, 50 м. ч. АСА (e, f). Структура представлена в виде дисперсных включений и полых очертаний вокруг них, связанных между собой микрофибриллами. Вероятно, микродисперсность является причиной незначительного уменьшения прочности при растяжении до 49–50 МПа, однако она находится на уровне с немодифицированной композицией, равной 52 МПа. Кроме того, по мере увеличения концентрации сополимеров размер частиц постепенно уменьшается, что, вероятно, приводит к повышению ПТР композиций.

Характерным для ударопрочных пластиков после испытания является наличие вязкой слоистой структуры [21]. Аналогичный характер поверхности также наблюдается у неиспытанных профилей (рисунок – с, d, g). Она особенно заметна для композиций с бо-

лее высокими значениями ударной вязкости – с 50 и 100 м. ч. АБС (12,7 и 33,2 кДж/м<sup>2</sup>); незначительное изменение в структуре проявляется на образцах со 100 м. ч. АСА (11,5 кДж/м<sup>2</sup>).

Таким образом, удалось установить, что для дальнейшего наполнения с точки зрения технологических и физико-механических свойств к наиболее приемлемым полимерным матрицам можно отнести ПВХ/АБС и ПВХ/АСА с содержанием сополимеров до 50 м. ч. Смеси полимеров со 100 м. ч. сополимеров не являются эффективными для наполнения, так как:

– увеличение ударной вязкости с АБС сопровождается падением прочности при растяжении. Это является нежелательным, поскольку дальнейшее наполнение смеси полимеров будет приводить к снижению данного показателя вследствие разной природы наполнителя и полимеров;

– экструзионная переработка композиций с высокотекучим АСА является трудоемкой, что для последующего наполнения является нецелесообразным, поскольку ряд наполнителей будет приводить к повышению вязкости расплава полимеров.

#### Список литературы

1. Исламов А.М. Диффузионная модификация эпоксидного полимера полиизоцианатом // *Вестник Технологического университета*. 2017. № 19. Т. 20. С. 51–53.
2. Абдрахманова Л.А. Вспененные композиционные материалы на основе поливинилхлорида // *Строительные материалы*. 2016. № 3. С. 82–84.
3. Хантимиров А.Г., Абдрахманова Л.А., Низамов Р.К., Хозин В.Г. Древесно-полимерные композиты на основе поливинилхлорида, усиленные базальтовой фиброй // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2022. № 3. Т. 61. С. 75–81. DOI: 10.52409/20731523\_2022\_3\_75
4. Низамов Р.К. Полифункциональные наполнители для поливинилхлоридных композиций строительного назначения // *Строительные материалы*. 2006. № 7. С. 68–70.
5. Низамов Р.К., Абдрахманова Л.А., Хозин В.Г. Строительные материалы на основе поливинилхлорида и полифункциональных техногенных отходов: Монография. Казань, КГАСУ, 2008. 181 с.
6. Khan I., Mansha M., Jafar Mazumder A. Polymer blends // *Functional Polymers. Polymers and Polymeric Compositesiryes: A Reference Series*. Dhahran: Springer, Cham, 2019, pp. 513–549. DOI: 10.1007/978-3-319-95987-0\_16
7. Лавров Н.А., Белухичев Е.В. Полимерные смеси на основе поливинилхлорида (обзор) // *Пластические массы*. 2020. № 3–4. С. 55–59. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-55-59
8. Utracki L.A. Commercial polymer blends. New York: Springer. 1998. 658 p.

#### References

1. Islamov A.M. Diffusion modification of epoxy polymer with polyisocyanate. *Vestnik Tekhnologicheskogo Universiteta*. 2017. No. 19. Vol. 20, pp. 51–53. (In Russian).
2. Abdrakhmanova L.A. Polyvinyl chloride-based foamed composites. *Stroitel'nye Materialy*. [Construction Materials]. 2016. No. 3, pp. 82–84. (In Russian).
3. Khantimirov A.G., Abdrakhmanova L.A., Nizamov R.K., Khozin V.G. Wood-polymer composites based on polyvinyl chloride reinforced with basalt fibre. *Izvestiya of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2022. No. 3. Vol. 61, pp. 75–81. (In Russian). DOI: 10.52409/20731523\_2022\_3\_75
4. Nizamov R.K. Polyfunctional fillers for polyvinylchloride composites for construction purposes. *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials]. 2006. No. 7, pp. 68–70. (In Russian).
5. Nizamov R.K., Abdrakhmanova L.A., Khozin V.G. Stroitel'nye materialy na osnove polivinilkhlorida i polifunksional'nykh tekhnogennykh otkhodov [Construction materials based on polyvinylchloride and polyfunctional technogenic wastes]. Kazan: KGASU. 2008. 181 p. (In Russian).
6. Khan I., Mansha M., Jafar Mazumder A. Polymer blends. *Functional Polymers. Polymers and Polymeric Compositesiryes: A Reference Series*. Dhahran: Springer, Cham, 2019, pp. 513–549. DOI: 10.1007/978-3-319-95987-0\_16
7. Lavrov N.A., Belukhichev E.V. Polyvinylchloride-based polymer blends (overview). *Plasticheskie Massy*. 2020. No. 3–4, pp. 55–59. (In Russian). DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-55-59

9. Патент GB841889A. Blend of polymeric products / Borg Warner Corp. Заявл. 08.04.1957. Опубл. 20.07.1960.
10. Матеевич А.В. Релаксационные свойства материалов на основе смесей поливинилхлорида и АБС-пластика // *Вестник МГСУ*. 2015. № 8. С. 118–129.
11. Sharma Y.N. Development and characterization of pvc/abs polyblends // *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. 1988. No. 2. Vol. 12. DOI: 10.1080/00914038808033931
12. Kulshreshtha A.K. Viscometric determination of compatibility in PVC/ABS polyblends-II. Reduced viscosity-concentration plots // *European Polymer Journal*. 1988. No. 1. Vol. 24. DOI: 10.1016/0014-3057(88)90122-X
13. Kulshreshtha A.K. Viscometric determination of compatibility in PVC/ABS polyblends. Part III. Choice of a common solvent and its effect on results // *European Polymer Journal*. 1988. No. 2. Vol. 24. DOI: 10.1016/0014-3057(88)90151-6
14. Kulshreshtha A.K. Viscometric determination of compatibility in PVC/ABS polyblends-I. Viscosity-composition plots // *European Polymer Journal*. 1988. No. 1. Vol. 4. DOI: 10.1016/0014-3057(88)90121-8
15. Бакнелл К.Б. Ударопрочные пластики / Пер. с англ. И.С. Лишанского. Л.: Химия, 1981. 328 с.
16. Zhang K., Hamza Bichi A., Yang J. Effect of acrylonitrile styrene acrylate on mechanical, thermal and three-body abrasion behaviors of eucalyptus fiber reinforced polyvinyl chloride composite // *Materials Research Express*. 2021. No. 2. Vol. 8. DOI: 10.1088/2053-1591/abe6db
17. Zhang Y., Xu Y., Song Y., Zheng Q. Study of poly(vinyl chloride)/acrylonitrile-styrene-acrylate blends for compatibility, toughness, thermal stability and UV irradiation resistance // *Journal of Applied Polymer Science*. 2013. No. 3. T. 130. DOI: 10.1002/app.39405
18. Ивановский С.К., Бахаева А.Н., Жерякова К.В., Ишкуватова А.Р. К вопросу переработки полимерных композиционных материалов // *Успехи современного естествознания*. 2014. № 12–5. С. 592–595.
19. Тадмор З. Теоретические основы переработки полимеров / Пер. с англ. З. Тадмор, К. Гогос. М.: Химия, 1984. 632 с.
20. Кулезнев В.Н. Смесии и сплавы полимеров. Конспект л. СПб.: Научные основы и технологии, 2013. 216 с.
21. Zhang X., Zhang J. Effect of temperature on the impact behavior of PVC/ASA binary blends with various ASA terpolymer contents // *Journal of Polymer Engineering*. 2019. No. 5. T. 39. DOI: 10.1515/polyeng-2018-0349
8. Utracki L.A. Commercial Polymer Blends. New York: Springer. 1998. 658 p.
9. Patent GB841889A. Blend of polymeric products / Borg Warner Corp. Declared 08.04.1957. Published 20.07.1960.
10. Matseevich A.V. Relaxation properties of materials based on polyvinyl chloride and ABS-plastic blends. *Vestnik MSUCE*. 2015. No. 8, pp. 118–129. (In Russian).
11. Sharma Y.N. Development and characterization of PVC/ABS polyblends. *International Journal of Polymeric Materials and Polymeric Biomaterials*. 1988. No. 2. Vol. 12. DOI: 10.1080/00914038808033931
12. Kulshreshtha A.K. Viscometric determination of compatibility in PVC/ABS polyblends-II. Reduced viscosity-concentration plots. *European Polymer Journal*. 1988. No. 1. Vol. 24. DOI: 10.1016/0014-3057(88)90122-X
13. Kulshreshtha A.K. Viscometric determination of compatibility in PVC/ABS polyblends. Part III. Choice of a common solvent and its effect on results. *European Polymer Journal*. 1988. No. 2. Vol. 24. DOI: 10.1016/0014-3057(88)90151-6
14. Kulshreshtha A.K. Viscometric determination of compatibility in PVC/ABS polyblends-I. Viscosity-composition plots. *European Polymer Journal*. 1988. No. 1. Vol. 24. DOI: 10.1016/0014-3057(88)90121-8
15. Baknell K.B. Udaroprochnye plastiki. Per. s angl. I.S. Lishanskogo [Impact-resistant plastics. Transl. from English I.S. Lishansky]. Leningrad: Khimiya, 1981. 328 p.
16. Zhang K., Hamza Bichi A., Yang J. Effect of acrylonitrile styrene acrylate on mechanical, thermal and three-body abrasion behaviors of eucalyptus fiber reinforced polyvinyl chloride composite. *Materials Research Express*. 2021. No. 2. Vol. 8. DOI: 10.1088/2053-1591/abe6db
17. Zhang Y., Xu Y., Song Y., Zheng Q. Study of poly(vinyl chloride)/acrylonitrile-styrene-acrylate blends for compatibility, toughness, thermal stability and UV irradiation resistance. *Journal of Applied Polymer Science*. 2013. No. 3. T. 130. DOI: 10.1002/app.39405
18. Ivanovskii S.K., Bakhaeva A.N., Zheryakova K.V., Ishkuvatova A.R. To the issue of processing of polymer composite materials. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya*. 2014. No. 12–5, pp. 592–595. (In Russian).
19. Tadmor Z. Teoreticheskie osnovy pererabotki polimerov. Per. s angl. Z. Tadmor, K. Gogos [Theoretical bases of polymer processing. Transl. from English. Z. Tadmor, K. Gogos]. Moscow: Khimiya, 1984. 632 p. (In Russian).
20. Kuleznev V.N. Polymer blends and alloys. *Konspekt I*. St. Petersburg: Nauchnye osnovy i tekhnologii, 2013. 216 p.
21. Zhang X., Zhang J. Effect of temperature on the impact behavior of PVC/ASA binary blends with various ASA terpolymer contents. *Journal of Polymer Engineering*. 2019. No. 5. T. 39. DOI: 10.1515/polyeng-2018-0349

В.В. ИЛЬИНА<sup>1</sup>, канд. техн. наук (ilina-victory@yandex.ru);В.В. СТРОКОВА<sup>2</sup>, д-р техн. наук (vvstrokova@gmail.com)<sup>1</sup> Санкт-Петербургский государственный институт кино и телевидения (191119, г. Санкт-Петербург, ул. Правды, 13)<sup>2</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова (308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46)

## Фотополимерные материалы в практике реставрационно-консервационных работ на объектах историко-культурной ценности

Проанализирована эволюция и представлены современные подходы к проведению реставрационных, консервационных и реконструкционных работ на объектах историко-культурной ценности с позиций границ допустимости использования неаутентичных материалов. Рассмотрены принципы выбора материалов для реставрационно-консервационных работ. Представлен анализ опыта использования фотополимерных материалов в создании защитных, декоративных и реконструирующих слоев и покрытий в целях сохранения или воссоздания объектов историко-культурного значения. Приведены результаты исследований по применению жидких фотополимерных композиций на основе акрилатов при реставрационно-консервационных работах. Показана перспективность использования фотополимерных материалов в практике реставрации и реконструкции и сформулированы направления дальнейших исследований.

**Ключевые слова:** фотополимерные материалы, реставрационно-консервационные работы, строительство, лакокрасочные материалы.

**Для цитирования:** Ильина В.В., Строкова В.В. Фотополимерные материалы в практике реставрационно-консервационных работ на объектах историко-культурной ценности // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 76–83.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-76-83>V.V. IL'INA<sup>1</sup>, Candidate of Science (Engineering) (ilina-victory@yandex.ru); V.V. STROKOVA<sup>2</sup>, doctor of technical science (vvstrokova@gmail.com)<sup>1</sup> Saint-Petersburg State University of Film and Television (13, Pravdy Street, Saint-Petersburg, 191119, Russian Federation)<sup>2</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov (46, Kostyukova Street, Belgorod, 308012, Russian Federation)

### Photopolymer Materials in the Practice of Restoration and Conservation Works on Objects of Historical and Cultural Value

The evolution is analyzed and modern approaches to carrying out restoration, conservation and reconstruction works at objects of historical and cultural value are presented from the standpoint of the limits of the permissibility of using non-authentic materials. The principles of choosing materials for restoration and conservation work are considered. An analysis of the experience of using photopolymer materials in the creation of protective, decorative or reconstructive layers and coatings in order to preserve or recreate objects of historical and cultural significance is presented. The results of studies on the use of liquid photopolymer compositions based on acrylates in restoration and conservation work are presented. The prospects of using photopolymer materials in the practice of restoration and reconstruction are shown, and directions for further research are formulated.

**Keywords:** photopolymer materials, restoration and conservation work, construction work, paintwork.

**For citation:** Il'ina V.V., STROKOVA V.V. Photopolymer materials in the practice of restoration and conservation works on objects of historical and cultural value. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 12, pp. 76–83. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-820-12-76-83>

С древнейших времен человек занимается строительством зданий и сооружений, приспосабливаясь к природным условиям и пытаясь совершенствовать свое существование. Менялись технологии строительства, менялись и материалы, точнее, расширялся их спектр. В настоящее время ассортимент строительных материалов чрезвычайно широк и насчитывает десятки тысяч наименований; на первый план вышли искусственные и синтетические материалы различного состава, структуры и назначения, придя на смену традиционным природным материалам. Среди материалов, появившихся на строительных площадках сравнительно недавно, со второй половины XX в., стоит упомянуть полимерные материалы (ПМ). Безусловно, ПМ пока не являются основным строительным материалом и в основном их используют как отделочный и конструкционно-отделочный материал, как гидро- и теплоизоляционный материал

или в качестве клеев, мастик и герметиков. Еще одна современная область применения — строительные изделия из ПМ: трубы и сантехнические изделия.

Одним из вариантов ПМ являются фотополимерные материалы (ФПМ), еще менее распространенные в современном строительстве в силу ряда причин, не последней из которых является их стоимость. Однако в практике проведения реставрационно-консервационных работ ФПМ в ряде случаев просто незаменимы. Их используют при необходимости докомпоновки элементов, имеющих дефекты геометрии объекта, для создания покрытий различного назначения на объектах с историко-культурной ценностью (объекты ИКЦ). Стоит обратить внимание, что ФПМ наиболее рациональны как материалы покрытия поверхностей объектов с приданием дополнительной функции (защиты от коррозии, биообращения, декорирования и др.). При этом их дополни-

тельным преимуществом является возможность применения по поверхностям, имеющим разную химическую природу: бетон, металл, дерево, стекло, природный камень, пластик и др. [1].

### Современные подходы к проведению реставрационно-консервационных работ на объектах ИКЦ

Реставрационно-консервационные работы, а в последнее время именно такой подход принят во всем мире при обращении с объектами ИКЦ, представляют, по сути, научно обоснованный реставрационный ремонт. Как бы мы ни подходили к этому процессу, а исторически приоритетным в России был научный подход к реставрации; эти мероприятия, по сути, представляют собой широкий спектр строительных работ той или иной степени сложности – каждый реставрационный проект требует индивидуального решения стоящих задач. Выбор алгоритма проведения работ, с одной стороны, определяет результат мониторинга технического состояния объекта, а с другой – необходимость сохранения особенностей объекта ИКЦ. Следует помнить при этом, что в задачи реставратора входит не «дописывание» истории, а лишь максимальное сохранение ее артефактов.

Распространено мнение, что реставрация – это полное воссоздание здания в его историческом виде. Однако сейчас целостная реставрация зданий, как это было, например, применено в послевоенное время (1944–1964) к разрушенному Петергофскому дворцу (Ленинградская область), встречается крайне редко и фактически является исключением из правил, нежели обычной практикой. На современном этапе суть реставрационно-консервационного процесса обычно заключается в раскрытии объекта с последующей инженерной консервацией – либо вообще без воссоздания утраченных элементов, либо с воссозданием современными материалами, диссоциирующими с историческими. Визуальное отличие сохраняемых и воссоздаваемых элементов является одним из принципов научного подхода к современной реставрации. Объясняют это необходимостью четкого разграничения исторического артефакта с современной «вставкой», чтобы исключить сомнения в присутствии фрагмента-новодела в облике исторического объекта.

Такая практика очень распространена за рубежом, и в качестве примера можно привести фрагментарную реставрацию Нового музея в Берлине (проект 1997–2009 гг.). Фактически находившийся в руинированном состоянии еще со времен Второй мировой войны объект возвели заново, используя аутентичный материал (старый кирпич, полностью аналогичный историческому, использовавшемуся при строительстве). Для разграничения исторического артефакта с фрагментами-новоделами отказались от воссоздания штукатурного слоя и ордерного декора, а в отделке внутренней структуры восстановленных частей использовали элементы, выполненные из цемента [2].

Отправной точкой при проведении реставрационно-консервационных работ на объектах ИКЦ всегда выступают границы допустимости использования неаутентичного материала, в приведенном примере – цемента. Условия работы с объектами ИКЦ однозначно трактуют недопустимость их деструкции с потерей историко-культурной ценности объекта.

Главным условием, которое определило применимость современного, неаутентичного материала (цемента), являлось его физико-химическая совместимость с историческим кирпичом. Ведь не секрет, что уже есть ряд примеров, когда неудачный подбор реставрационного материала приводил к быстрому разрушению исторического памятника. Например, недопустима «домазка» цементом по белому камню, поскольку это приводит к растрескиванию из-за значительной разности коэффициентов теплового расширения природного камня и цемента. В этом случае более логичным было бы использование известковых составов (например, в виде сухих строительных смесей на основе извести), имеющих химическое сродство основного материала состава с аутентичным камнем. Еще неудачные примеры подбора материала: в Нижнем Новгороде при реставрации крепостной стены применили «домазку» цементом, что привело к расслоению и разрушению. При реставрации в начале XX в. фасадов Казанского собора (г. Санкт-Петербург) часть элементов были восстановлены не в аутентичном камне, а в цементе и в гипсе – это привело к быстрому выкрашиванию новоделов [3].

Но еще более популярным подходом, фактически тенденцией современности в вопросах сохранения историко-культурного наследия, является проведение реновации [4]. Суть этого подхода к объектам ИКЦ заключается в изменении их функциональности. На объекте проводят ремонтно-реставрационные работы с сохранением остатков здания, чаще всего фасада, и параллельно с ними – строительно-дизайнерские работы по пристройке к объекту. Единственное ограничение отнюдь не по материалам – не допускается стилизация: стиль пристройки должен соответствовать текущему моменту. Так исключают «миметическую реконструкцию», которую рассматривают как ложную историческую фальсификацию, отменяющую следы времени.

При подборе новой функции учитывают, безусловно, и историко-культурную, и социально-культурную ценность объекта, и другие прозаические аспекты, обычно имеющие экономический подтекст: потребности в размещении местных учреждений (не обязательно учреждений культуры или искусства), свободные площади, транспортные коммуникации и прочие аспекты существующей застройки. Единственно оговаривается, что приспособления допустимы при сохранении «уважения к памятнику» (субъективная оценка проекта) и обеспечения физической сохранности его остатков (объективная оценка проекта по результатам его технического мониторинга) [3]. Вариантом такой реновации в г. Санкт-Петербурге

является здание Финляндского вокзала, когда в ходе работ был сохранен фасад исторического здания, к которому сейчас пристроен современный комплекс.

Интересным примером проведения реставрационно-строительных работ является фрагментарная реставрация фасада дома купцов Марковых в Нижнем Новгороде, утратившего на тот момент до 70% декоративного лепного декора деревянной надстройки (второго этажа здания). В рамках проведенных работ были заменены деревянные конструкции по главному фасаду, применен новый несущий железобетонный каркас и восстановлены по сохранившимся фрагментам утраченные элементы декора. Еще один реставрируемый объект там же, в Нижнем Новгороде [5], потребовал более сложных решений; в ходе работ была проведена реконструкция кованых деталей фасада, восстановлены профили цоколя здания и наличников окон, реставрированы мраморные плиты подоконников и лестниц, восстановлены утраченные элементы витражей и др.

Можно рассмотреть еще один пример комплексного использования материалов различной природы – в этот раз реставрационно-строительные работы проводили в Новосибирской области на объекте «Озеро Карачи». Сложность работ заключалась в значимой утрате отдельных частей зданий и сооружений архитектурного ансамбля здравницы, функционирующей с конца XIX в. (осн. в 1880 г.). Несмотря на то что функционал зданий не менялся, в ходе проведения работ были использованы преимущественно современные материалы. В первую очередь это коснулось внутренней отделки, так как требовалось обеспечить выполнение современных требований к объектам санаторно-курортного назначения. В частности, в качестве восстанавливающего материала были использованы бетонные блоки интегральной структуры (заполнитель из растительного сырья и топливного шлака, обработанный полимерсиликатным составом). Также были созданы защитные термонапыляемые покрытия из порошкового полиэтилена. В отделке использованы сухие строительные смеси повышенной трещиностойкости и защитно-пропиточные полимерсиликатные композиции [6].

Сухие строительные смеси широко используют в практике реставрационно-консервационных работ (как штукатурные, шпаклевочные, кладочные, клеевые и затирочные материалы и пр.). Они могут быть составлены на различных вяжущих (цемент, гипс, известь, комбинированные вяжущие, полимерные вяжущие и др.), выбор которых будет зависеть от природы реставрируемой поверхности. Удобство таких материалов заключается в возможности варьирования свойств введением модифицирующих добавок. Например, смеси на основе минеральных вяжущих можно успешно модифицировать водорастворимыми полимерами, решая задачу реотехнологических и физико-механических свойств смесей [7].

Независимо от выбранного подхода, будь то реновация, фрагментарная реставрация, консервация,

сейчас реставрационно-строительные работы практически всегда связаны не только с аутентичными материалами, но и с их современными аналогами, включая полимерные материалы и композиты на их основе. И здесь важнейшим условием удачного завершения проекта и последующего сохранения объектов ИКЦ является подбор материала, максимально индифферентного в отношении реставрируемого объекта (с точки зрения физико-химического воздействия на его природу).

#### **Выбор материалов для реставрационно-консервационных работ на объектах ИКЦ**

Как уже упоминалось, целостная реставрация зданий является редким исключением. Ранее приведенный пример воссоздания Петергофского дворца был реализован ценой невероятных трудовых и экономических затрат по поиску идентичного материала и воссозданию технологий его обработки, в том числе воссозданию некоторых к тому времени уже утраченных ремесел.

Относительно удобно работать со многими историческими зданиями в г. Санкт-Петербурге: для строительства Северной столицы активно использовали местный строительный материал – путиловский известняк, который начали добывать в 1712 г. по указу Петра I. Путиловский известняк использовали при отделке цокольных этажей, выполнении элементов зданий, при внутренней отделке как обычной городской застройки, так и дворцовых комплексов города (Летний дворец императора Петра I, дворец А.Д. Меншикова, Петропавловская крепость и др.). Реставрационно-консервационные работы на объектах застройки XVIII–XIX вв. реализуют с использованием материала с местного карьера, запасы которого не исчерпаны, и добыча Путиловского камня продолжается, тем более что сохранены регламенты исторической технологии добычи и обработки камня [8].

Безусловно, подбор идентичного материала можно осуществить и при работе с объектами деревянного зодчества, если это логически и экономически оправданно. Наиболее известный пример – реставрация дома Сазонова (объект деревянного зодчества в селе Асташово, Костромская область). Реставрацию объекта проводили методом полной раскладки, с заменой части бревен сруба на идентичные по виду древесины. В этом случае кроме идентичной древесины были воспроизведены и другие природные материалы, использованные при историческом строительстве: для изоляции фундамента использовали бересту, в качестве межвенцового утеплителя использовали мох (были воспроизведены старинные технологии строительства деревянного жилого дома XIX в.).

Воспроизводимы и другие природные материалы: гранит, мрамор, песчаник, места добычи которых известны, а технологии обработки описаны и доступны для реализации. Но иногда обеспечить использование идентичного материала невозможно, если, напри-

мер, материалы, использованные при первоначальном строительстве, уже невозможно найти или воспроизвести в соответствии с технологией их получения или обработки. В таком случае пытаются их имитировать доступными средствами, например создавая искусственные материалы, имитирующие исторические.

Кроме того, возможна реставрация поверхности природного камня (гранит, мрамор) с использованием «пластичного» искусственного камня. Технология достаточно простая. Сначала создают композитный материал на основе оптически прозрачной полимерной смолы (чаще всего акриловой или ненасыщенной полиэфирной, но возможны и другие варианты) с наполнителем (гранит, мрамор, ракушечник, известняк, песок, андезитовая мука). Материал наносят на поврежденную поверхность камня (трещины, сколы) тонким слоем, отверждают и шлифуют поверхность (при необходимости полируют). Если есть необходимость имитировать цвет исторического камня, композицию колорируют (вводят пигменты: крон желтый, тонкодисперсную сажу, охру, сурик железный, техническую окись хрома и пр.) [9, 10].

Использование в качестве связующего полимерной смолы необязательно, можно использовать цемент, гипс, жидкое стекло, известь — если допустимо их соседство с историческим материалом с точки зрения возможного физико-химического взаимодействия. Мировая практика реставрационного ремонта допускает применение композитов на базе извести и гипса — природных материалов, использование которых в строительстве исторически обосновано и востребовано до сих пор. Такие композиты в принципе рассматривают как материалы, идентичные историческим.

Воспроизводимы исторические материалы изначально искусственного происхождения: можно воспроизвести некоторые сплавы и стекла (по известным рецептурам), клеевые составы, штукатурки, некоторые краски. Но практически невозможно полностью воспроизвести исторический фарфор и керамику, а также материалы, технология изготовления которых либо утрачена, либо существенно изменена в связи с изменением средств их производства. В таких случаях прибегают либо к поиску современных материалов, идентичных историческим, либо получают эти материалы по сохранившимся или их заменяющим технологиям из современного сырья. Примером такой замены исторического материала можно привести изготовление искусственного оселкового мрамора для отделки поверхности из «мраморного теста». Сама технология многоступенчатая и предполагает подготовку и двухслойную грунтовку поверхности (водным раствором смеси портландцемента, гипса, песка и известкового теста в пропорциях, зависящих от поверхности реставрируемого объекта) и нанесение «мраморного теста», изготовление которого предусматривает несколько стадий. При правильном подборе сырья обеспечивается воспроизведение цвета и рисунка исторического мрамора [11].

Если рассматривать классификацию материалов по их применимости в практике реставрационно-консервационных работ, то здесь деление достаточно условно — один и тот же материал может быть востребован в практике работы с различными элементами объекта ИКЦ. Например, гидрофобизирующие материалы востребованы везде: и в практике реставрации декоративного оформления фасада (настенной живописи, витражей, мозаик), и при реставрации камня, бетона, железобетона, дерева, металла, керамики (керамической облицовочной плитки), стекла. Выбор материалов огромен и в основном определяется выбранной реставратором технологией.

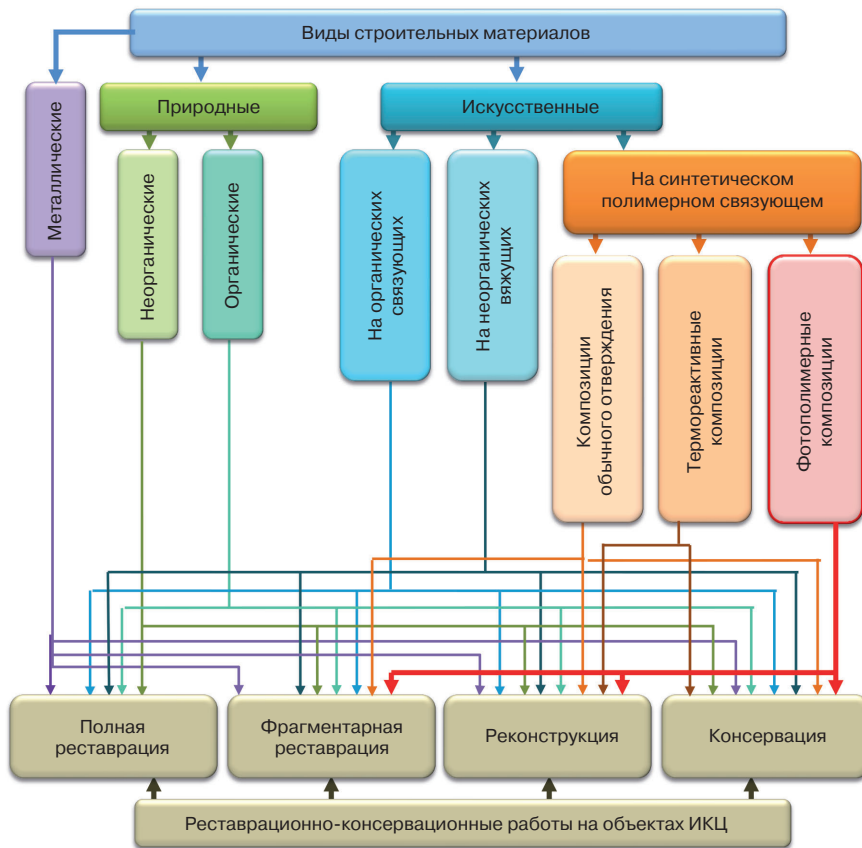
Однако часто приходится прибегать к использованию современных материалов, особенно если речь идет о реновации, где на современное строительство приходится большой объем проводимых работ.

#### **Фотополимерные материалы в создании защитных, декоративных и реконструирующих слоев и покрытий**

Как отмечалось ранее, выбор материала сугубо индивидуален для каждого проекта. Необходимо учитывать требования, предъявляемые к материалу (основные: долговечность, обратимость и совместимость с авторским материалом), экономическую составляющую и доступность материала. К реставрационным материалам предъявляют наиболее жесткие требования, к материалам для реновации объекта требования мягче, и основными из них являются соответствие фактуре авторского замысла, долговечность и экономическая доступность.

Из возможных перспективных материалов для практики реставрационно-консервационных работ на объектах ИКЦ стоит особо остановиться на искусственных ПМ и их частном случае — ФПМ материалах, характеризующихся рациональным соотношением цена/качество и большой долговечностью.

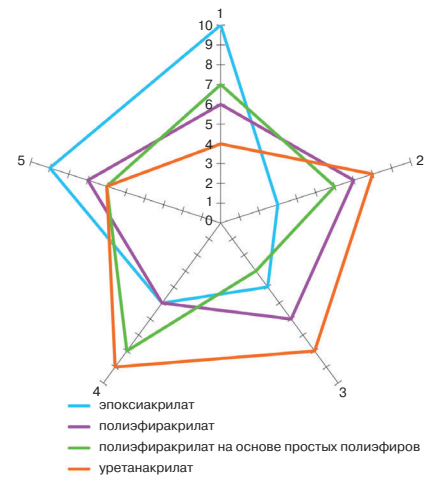
В основе технологий применения ФПМ лежит способность ряда соединений, входящих в его состав, вступать в реакцию полимеризации, инициируемой внешним излучением (чаще всего ультрафиолетового или инфракрасного спектра) с образованием нового материала с необходимыми свойствами, которые будут определять рецептура композиции ФПМ. Теория фотополимеризации предполагает обязательное наличие в рецептуре ФПМ соединений с ненасыщенными двойными связями (олигомеров, мономеров) и инициирующей реакцию полимеризации добавки — фотоинициатора или смеси фотоинициаторов (фотоинициирующей системы из двух и более соединений), способных расщепляться под действием света определенной длины волны на активные радикалы, непосредственно запускающие цепной процесс полимеризации. В результате спонтанно проходящая цепная полимеризация за секунды переводит реставрационный материал из жидкого состояния в твердое, точнее, поскольку речь идет о высокомолекулярных соединениях, в стеклообразное. Каждый ингредиент композиции ФПМ несет свою функцию, совокупно



**Рис. 1.** Перспективные области использования фотополимерных материалов при реставрационно-консервационных работах на объектах ИКЦ  
**Fig. 1.** Promising areas for the use of photopolymer materials in the restoration and conservation work at the valuable historical and cultural objects

определяя свойства всей системы. Самая значимая роль отводится олигомеру – основному ингредиенту композиции. Именно олигомер, его химическая природа и количество ненасыщенных углерод-углеродных связей в молекуле будут определять и скорость отверждения материала (его перехода в стеклообразное состояние, аналогичное состоянию твердого тела) и основные физико-механические характеристики реставрационного материала. Регулируя состав композиции, можно подобрать не только физико-механические характеристики (твердость, истираемость, прочность на удар, эластичность, адгезионную прочность (для покрытий), коррозионную стойкость и пр.), но и цветовую характеристику готового изделия, его химическую стойкость и биологические характеристики, например за счет использования в составе рецептур биодобавок [12–14]. Наиболее значимым преимуществом ФПМ является оперативность решения конкретной практической задачи: на формирование защитного, консервационного и/или реставрационного покрытия достаточно 0,5–2 мин. Таким образом, перспективность применения таких материалов при проведении реставрационно-консервационных работ на объектах историко-культурной ценности весьма высока (рис. 1).

Рынок ФПМ достаточно широк, и в практике реставрационно-консервационных работ часто ис-



**Рис. 2.** Свойства покрытий по 10-балльной шкале в зависимости от вида пленкообразователя: 1 – твердость покрытия; 2 – эластичность; 3 – прочность покрытия на истирание; 4 – абразивная стойкость; 5 – химическая стойкость

**Fig. 2.** Properties of coatings on a 10-point scale depending on the type of film-forming polymer: 1 – coating hardness; 2 – elasticity; 3 – coating strength for abrasion; 4 – abrasive resistance; 5 – chemical resistance

пользуют материалы, первоначально разрабатывавшиеся для других целей. Наиболее яркий пример – компаунды «СИЭЛ» (разработка АО «ГНИИХТЭОС»), применяемые и для волоконно-оптических систем, и для меди-

цинских целей, и еще в ряде областей [15]. При этом материал «СИЭЛ-УФ» из этой линейки кремнийорганических компаундов рекомендован к использованию в работе с объектами ИКЦ при необходимости выполнения утраченных фрагментов [16].

Применяемые сейчас ФПМ в основном и предназначены для решения проблем устранения механических дефектов или склейки фрагментов, что особо актуально для элементов объектов ИКЦ, выполненных из стекла или стеклоподобных материалов, в том числе витражей, майолик, элементов малой архитектуры и декора. Однако логично рассматривать ФПМ как материал реставрационно-консервационных работ более широко, например для создания защитных и защитно-декоративных покрытий [14–18].

Для этих целей оптимально подходят жидкие фотополимеризующиеся композиции, способные в режиме реального времени (минуты или доли минут) создавать покрытия, сопоставимые по твердости со стеклом, и обладающие необходимыми характеристиками, закладываемыми на стадии разработки их рецептуры [12]. Особенно следует помнить, что при работе с объектами ИКЦ существует набор ограничений на использование традиционных лакокрасочных материалов (ЛКМ), в основном органорастворимых. Фотополимерные ЛКМ (ФПМ-ЛКМ) органических растворителей в рецептуре не имеют, и это

делает их перспективным материалом для работы с объектами ИКЦ.

Рассмотрим конкретный пример – работу с артефактами, выполненными из мрамора. Для стабилизации каменного артефакта с сохранением следов времени (следов исторического старения камня, например пожелтения мрамора) часто используют технологию покрытия, например нанесение гидрофобизирующих кремнийорганических покрытий или консервационных слоев после очистки поверхности. Распространена и практика нанесения защитных покрытий при помощи лаков (исторически – природных, позднее – синтетических и комбинированных) – эта технология применима практически к защите поверхности любой природы. Однако применение лаков всегда связано с использованием органических растворителей (спирты, кетоны, производные углеводов) как для предварительной обработки артефакта, так и для придания ЛКМ малярной вязкости. Но здесь вступает в силу важное ограничение на реставрационный материал: использование агрессивных сред невозможно при работе с «мягкими» камнями (известняки), особенно с мрамором, и ФПМ-ЛКМ (фактически фотоотверждаемые лаки) оказываются вне конкуренции. ФПМ-ЛКМ способны создавать адгезионно-прочные покрытия с поверхностью любой природы (пластик, бетон, керамика, композитные материалы), при этом могут быть сформированы как прозрачные, так и колорированные покрытия [12–15]. Важным преимуществом ФПМ-ЛКМ является также высокая скорость формирования покрытия (1–2 мин).

В основе составления рецептур ФПМ-ЛКМ лежит «звезда свойств», наглядно демонстрирующая комплекс эксплуатационных характеристик покрытий из композиций, составленных на базе разных пленкообразователей (рис. 2).

Стоит отметить, что в рецептурах ФПМ-ЛКМ для создания покрытий приоритетно используют акрилаты, подбирая олигомерно-мономерные смеси в зависимости от конкретных задач. В частности, если стоит задача создания покрытия с функцией защиты от коррозии (например, по металлическим элементам декора или несущих конструкций), то в рецептуру композиции ФПМ-ЛКМ вводят антикоррозионные добавки: технический углерод, хроматы, фосфаты и пр. [19].

Что касается работы с элементами объектов ИКЦ, выполненных из природного камня, то проведенные исследования [14] показали, что технология фотоотверждения (УФ-отверждения) с использованием ФПМ-ЛКМ допустима и может быть эффективно реализуема для фрагментарного нанесения покрытий на элементы, подвергающиеся интенсивной нагрузке (полы, лестницы, балюстрады). В основу разработки базовой рецептуры прозрачного ФПМ-лака, обеспечивающего прочное, стойкое к истиранию покрытие по искусственному камню и гладкому бетону (по параметру адгезии не менее  $1 \text{ н/мм}^2$ ), был

положен принцип аддитивности свойств основных пленкообразователей. Были составлены рецептуры, где в качестве основного пленкообразователя использовали алифатический уретанакрилат (рис. 2), к которому подбирали набор активных мономеров разной функциональности для обеспечения необходимой вязкости системы.

При необходимости решения конкретной практической задачи базовую рецептуру можно дополнить специальными добавками для индивидуализации свойств покрытия, в том числе колорировать без существенной потери адгезионных свойств покрытия к поверхности и без изменения физико-механических свойств создаваемого покрытия [12]. Приготовление композиции предполагает использование стандартного лабораторного оборудования, поскольку представляет собой смешение последовательно загружаемых ингредиентов рецептуры в рабочей емкости при интенсивном перемешивании в стандартных условиях (комнатная температура). Готовую композицию можно использовать сразу после приготовления или хранить в течение длительного времени (без снижения реактивности – до 6 мес) при комнатной температуре и соблюдении условия хранения – сухое темное место и плотно закрытая тара, предотвращающая непосредственное воздействие света.

Методика нанесения ФПМ-лака предполагает предварительную очистку защищаемой поверхности любыми доступными средствами (водные растворы, растворы органических растворителей, механическая очистка с последующим обеспыливанием) и высушивание. ФПМ-лак может быть нанесен пневмораспылением, наливом с выравниванием ракелем или ручным методом кистью. Отверждение покрытия можно проводить любым мобильным источником УФ-излучения: время для формирования готового покрытия толщиной до 1 мм составляет не более 3 мин при использовании стандартной аппаратуры УФ-излучения (аналогичной по характеристике мощности излучения лампы ДРТ-400). Методика применима к процессам консервации, реставрации и реконструкции объектов ИКЦ.

Допустим вариант применения ФПМ-лаков и при работе с элементами объекта ИКЦ, выполненными из стекла или стеклоподобных материалов. Безусловно, учитывается, что создание необратимых покрытий из неаутентичного материала на историко-культурном объекте возможно только при отсутствии искажений визуального вида объекта и отсутствии негативного воздействия на исторический материал. Проведенные исследования [18] показали перспективность использования олигомерно-мономерной смеси на основе алифатического уретанакрилата. Использовали олигомер высокой функциональности ( $\varphi=6$ ) в смеси с триметилпропантриакрилатом и 2-феноксипропантриакрилатом. В разработанной композиции была использована фотоиницирующая смесь (2,4,6-триметилбензоилдифенилфосфиноксид с 1-гидроксициклогексилфенил-кетон), поскольку

ку речь идет об оперативной (полевой) консервации и удобстве применения мобильных LED-источников отверждения. Реактивность композиции толщиной 30 мкм составляет ~50 с.

Также интересным вариантом при проведении реставрационно-консервационных работ на объектах ИКЦ является использование ФПМ-ЛКМ, содержащих винилалкидные олигомеры, обладающие специфическими свойствами. В частности, проводились исследования [20] по их использованию в практике работы по консервации элементов объектов ИКЦ, выполненных из дерева. Однако область применения таких составов может быть распространена и на объекты другой природы: известно, что биодegradации подвержена не только древесина. В исследованиях было доказано, что такие композиции обладают биоцидной активностью, проявляющейся в снижении скорости развития мицелия и спорообразования на поверхности объектов. Были исследованы варианты винилалкидных олигомеров, полученных из различного сырья; возможности введения антикоррозионных и дополнительных биоцидных добавок и их влияние на свойства защищаемой поверхности. В совокупности были сделаны выводы о возможности и перспективности использования таких материалов в практике проведения реставрационно-консервационных работ.

#### Выводы

Подводя итоги, можно констатировать, что использование фотополимерных материалов обосновано и объективно уже востребовано в практике проведения реставрационно-консервационных работ на

объектах архитектурного наследия различного типа и степени сохранности.

Перспективным материалом для технологий покрытия как с целью фрагментарного декорирования поверхности, так и с защитной функцией (защита от коррозии, биодegradации, УФ-защита от световой деструкции, защита поверхности от саморазрушения при оперативной консервации и др.) являются жидкие ФПМ-ЛКМ. Важным преимуществом таких материалов является оперативность процесса – время полного формирования твердого покрытия составляет 0,5–3 мин в зависимости от толщины слоя, рецептуры и мощности источника засветки. Важно отметить, что композиции могут выпускаться как неколорированные, для формирования оптически прозрачных покрытий, так и колорированные (ФПМ-эмали), а также иметь различные наполнители, введение которых ограничено преимущественно размером (частицы нано- и микроразмерного масштабов).

Безусловно, такие материалы нельзя рассматривать как идентичные историческим, даже при наполнении аутентичными добавками. Перспективу их применения стоит искать преимущественно в практике либо частичной реставрации, либо реновации, либо консервации, когда это оправданно сложившейся ситуацией (например, полевая консервация археологического артефакта с закреплением поверхностного слоя), поскольку такие материалы являются необратимыми и не могут быть в дальнейшем удалены с исторического материала без нанесения ему дополнительного ущерба. Однако в ряде случаев их применение оправданно и перспективно.

#### Список литературы

1. Кондрашов Э.К., Козлова А.А. УФ-квантовые технологии формирования защитно-декоративных и функциональных полимерных покрытий. Ч. 3. Источники УФ-отверждения и применение УФ-отверждаемых покрытий // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2022. № 10. С. 35–41.
2. Шенков А.С., Антонова Н.Е. Об эстетических аспектах архитектурной интервенции в среду небольших исторических городов // *Academia. Архитектура и строительство*. 2022. № 3. С. 51–59.
3. Подьяпольский С.С., Бессонов Г.Б., Беляев Л.А., Постников Т.М. Реставрация памятников архитектуры. М.: Стройиздат, 2000. 288 с.
4. Точина В.П., Попов А.Д., Танкова Н.А. Принципы и методы реновации промышленных объектов в мировой практике // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 6. С. 78–82.
5. Шумилкин С.М., Шумилкин А.С. Реставрация жилых домов купцов Марковых в Нижнем Новгороде // *Жилищное строительство*. 2018. № 12. С. 41–44.
6. Хританков В.Ф., Пичугин А.П., Пименов Е.Г., Смирнова О.Е. Реконструкция архитектурного

#### References

1. Kondrashov E.K., Kozlova A.A. UV-quantum technologies for the formation of protective-decorative and functional polymer coatings. Part 3. Sources of UV-curing and application of UV-curable coatings. *Lakokrasochnye materialy i ikh primenenie*. 2022. No. 10, pp. 35–41. (In Russian).
2. Shchenkov A.S., Antonova N.E. On the aesthetic aspects of architectural intervention in the environment of small historical cities. *Academia. Architectura i Stroitel'stvo*. 2022. No. 3, pp. 51–59. (In Russian).
3. Podyapolsky S.S., Bessonov G.B., Belyaev L.A., Postnikov T.M. *Restavraciya pamyatnikov arhitektury [Restoration of architectural monuments]*. Moscow: Stroyizdat. 2000. 288 p.
4. Tochina V.P., Popov A.D., Tankova N.A. Principles and methods of renovation of industrial facilities in world practice. *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2019. No. 6, pp. 78–82. (In Russian).
5. Shumilkin S.M., Shumilkin A.S. Restoration of residential houses of merchants Markov in Nizhny Novgorod. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2018. No. 12, pp. 41–44. (In Russian).
6. Khritankov V.F., Pichugin A.P., Pimenov E.G., Smirnova O.E. Reconstruction of the architectural ensemble

- ансамбля курорта «Озеро Карачи» в Новосибирской области // *Жилищное строительство*. 2020. №4–5. С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-4-5-33-38>
7. Оноприенко Н.Н., Сальникова О.Н. К вопросу разработки отечественных реставрационных материалов для памятников архитектуры // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2023. № 3. С. 19–33.
  8. Булах А.Г. Каменное убранство Петербурга. СПб.: Центрполиграф, 2009. 214 с.
  9. Патент РФ 2460702 *Способ изготовления искусственного камня* / Бабалян В.В., Биндасов Г.В. Оpubл. 10.09.2012.
  10. Патент РФ 2071418 *Способ изготовления искусственного композиционного материала* / Волгушев А.Н., Шестеркина Н.Ф. Оpubл. 10.01.1997.
  11. Шанаев С.Я., Тихомиров С.В. Старые технологии и рецепты отделочных работ. М.: Спецпроект-реставрация, 1993. 51 с.
  12. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Айкашева О.С., Ильина В.В. Физико-химические основы составления рецептур жидких фотополимеризующихся композиций широкого спектра применения. Ч. 1. Влияние природы мономеров // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2020. № 5. С. 20–26.
  13. Бабкин О.Э., Ильина В.В., Бабкина Л.А., Сиrotинина М.В. Покрытия ультрафиолетового отверждения для функциональной защиты. *Журнал прикладной химии*. 2016. Т. 89. № 1. С. 83–89.
  14. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Ильина В.В., Айкашева О.С. Фотоотверждаемые лаки для архитектурного строительства и реставрации // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2021. № 11. С. 30–34.
  15. Краев И.Д., Попков О.В., Шульдешов Е.М. и др. Перспективы использования кремнийорганических полимеров при создании современных материалов и покрытий различных назначений // *Труды ВИАМ*. 2017. № 12 (60). С. 48–62.
  16. Федосеева Т.С., Белявская О.Н., Гордюшина В.И. и др. Реставрационные материалы. М.: ИНДРИК, 2016. 232 с.
  17. Рускол И.Ю., Алексеева Е.И., Скрипниченко Л.А. и др. Оптически прозрачные фотоотверждаемые кремнийорганические композиции // *Клеи. Герметики. Технологии*. 2017. № 12. С. 10–15.
  18. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Ильина В.В. Фотоотверждаемые лаки для дизайна и реставрации стекла // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2023. № 5. С. 47–52.
  19. Бабкин О.Э., Бабкина Л.А., Айкашева О.С., Ильина В.В., Власов М.Ю. Технология УФ-отверждения. Теория и практика // *Известия СПбГТИ(ТУ)*. 2022. № 62 (88). С. 6–11.
  20. Бабкин О.Э., Ильина В.В., Панькин Д.В., Бабкина Л.А., Седова И.В. Алкилированные винилтолуолом алкидные олигомеры в фотополимерных лакокрасочных композициях // *Лакокрасочные материалы и их применение*. 2016. № 11. С. 28–33.
  - ble of the resort «Lake Karachi» in the Novosibirsk Region. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2020. No. 4–5, pp. 33–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-4-5-33-38>
  7. Onoprienko N.N., Salnikova O.N. On the issue of development of domestic restoration materials for architectural monuments *Vestnik of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2023. No. 3, pp. 19–33. (In Russian).
  8. Bulakh A.G. Kamennoe ubranstvo Peterburga [Stone decoration of St. Petersburg]. St. Petersburg: Tsentrpoligraf. 2009. 214 p.
  9. Patent RF 2460702 *Sposob izgotovleniya iskusstvennogo kamnya* [Method for the manufacture of artificial stone]. Babalyan V.V., Bindasov G.V.; Publ. 09.10.2012.
  10. Patent RF 2071418 *Sposob izgotovleniya iskusstvennogo kompozitsionnogo materiala* [Method for manufacturing an artificial composite material]. Volgushev A.N., Shesterkina N.F.; Publ. 01.10.1997.
  11. Shanaev S.Ya., Tikhomirov S.V. Starye tehnologii i recepty otdelochnyh rabot [Old technologies and finishing recipes] Moscow: Spetsproekt restoration. 1993. 51 p.
  12. Babkin O.E., Babkina L.A., Aikashcheva O.S., Il'ina V.V. Physical and chemical bases of formulating liquid photopolymerizable compositions for a wide range of applications. Part 1. Influence of the nature of monomers. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2020. No. 5, pp. 20–26. (In Russian).
  13. Babkin O.E., Il'ina V.V., Babkina L.A., Sirotinina M.V. UV-Cured coatings for functional protection. *Russian journal of Applied Chemistry*. 2016. Vol. 89. Iss. 1, pp. 114–119. <https://doi.org/10.1134/S1070427216010183>
  14. Babkin O.E., Babkina L.A., Il'ina V.V., Aikashcheva O.S. Photo-cured varnishes for architectural construction and restoration. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*. 2021. No. 11. pp. 30–34. (In Russian).
  15. Kraev I.D., Popkov O.V., Shuldeshov E.M. et al. Prospects for the use of organosilicon polymers in the creation of modern materials and coatings for various purposes. *Trudy VIAM*. 2017. No. 12 (60). pp. 48–62. (In Russian).
  16. Fedoseeva T.S., Belyavskaya O.N., Gordyushina V.I. et al. Restavracionnyye materialy [Restoration materials]. Moscow: INDRIK, 2016. 232 p.
  17. Ruskol I.Yu., Alekseeva E.I., Skripnichenko L.A. et al. Optically transparent photocurable organosilicon compositions. *Klei. Germetiki. Tekhnologii*. 2017. No. 12, pp. 10–15. (In Russian).
  18. Babkin O.E., Babkina L.A., Il'ina V.V. Photocurable varnishes for glass design and restoration. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*. 2023. No. 5. pp. 47–52. (In Russian).
  19. Babkin O.E., Babkina L.A., Aykashcheva O.S., Il'ina V.V., Vlasov M.Yu. UV curing technology. Theory and practice. *Izvestiya SPbGTI(TU)*. 2022. No. 62 (88), pp. 6–11. (In Russian).
  20. Babkin O.E., Il'ina V.V., Pankin D.V., Babkina L.A., Sedova I.V. Alkyd oligomers alkylated with vinyltoluene in photopolymer paint and varnish compositions. *Lakokrasochnye materialy i ikh primeneniye*. 2016. No. 11, pp. 28–33. (In Russian).

# Как подготовить к публикации научно-техническую статью



Журнальная научно-техническая статья – это сочинение небольшого размера (до пяти журнальных страниц), что само по себе определяет границы изложения темы статьи.

Необходимыми элементами научно-технической статьи являются:

- постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными или практическими задачами;
- анализ последних достижений и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение ранее не решенных частей общей проблемы, которым посвящена статья;
- формулирование целей статьи (постановка задачи);
- изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных результатов;
- выводы из данного исследования и перспективы дальнейшего поиска в избранном направлении.

Научные статьи рецензируются специалистами. Учитывая открытость журнала «Жилищное строительство» для ученых и исследователей многих десятков научных учреждений и вузов России и СНГ, представители которых не все могут быть представлены в редакционном совете издания, желательно представлять одновременно со статьей отношение ученого совета организации, где проведена работа, к представляемому к публикации материалу в виде сопроводительного письма или рекомендации.

**Библиографические списки** цитируемой, использованной литературы должны подтверждать следование автора требованиям к содержанию научной статьи.

#### НЕ РЕКОМЕНДУЕТСЯ:

1. Включать ссылки на федеральные законы, подзаконные акты, ГОСТы, СНИПы и др. нормативную литературу. Упоминание нормативных документов, на которые опирается автор в испытаниях, расчетах или аргументации, лучше делать непосредственно по тексту статьи.

2. Ссылаться на учебные и учебно-методические пособия; статьи в материалах конференций и сборниках трудов, которым не присвоен ISBN и которые не попадают в ведущие библиотеки страны и не индексируются в соответствующих базах.

3. Ссылаться на диссертации и авторефераты диссертаций.

4. Самоцитирование, т. е. ссылки только на собственные публикации автора. Такая практика не только нарушает этические нормы, но и приводит к снижению количественных публикационных показателей автора.

#### ОБЯЗАТЕЛЬНО следует:

1. Ссылаться на статьи, опубликованные за последние 2–3 года в ведущих отраслевых научно-технических и научных изданиях, на которые опирается автор в построении аргументации или постановке задачи исследования.

2. Ссылаться на монографии, опубликованные за последние пять лет. Более давние источники также негативно влияют на показатели публикационной активности автора.

Несомненно, что возможны ссылки и на классические работы, однако не следует забывать, что наука всегда развивается поступательно вперед и незнание авторами последних достижений в области исследований может привести к дублированию результатов, ошибкам в постановке задачи исследования и интерпретации данных.

**ВНИМАНИЕ! С 1 января 2020 г. изменены требования к оформлению статей. Обязательно ознакомьтесь с требованиями на сайте издательства в разделе «Авторам»!**

Статьи, направляемые для опубликования, должны оформляться в соответствии с техническими требованиями изданий:

- текст статьи должен быть набран в редакторе Microsoft Word и сохранен в формате \*.doc или \*.rtf и не должен содержать иллюстраций;
- графический материал (графики, схемы, чертежи, диаграммы, логотипы и т. п.) должен быть выполнен в графическом редакторе Adobe Illustrator (не выше v.CS6) и сохранен в форматах \*.ai, \*.eps соответственно. Сканирование графического материала и импорт его в перечисленные выше редакторы недопустимо;
- иллюстративный материал (фотографии, коллажи и т. п.) необходимо сохранять в формате \*.tif, \*.psd, \*.jpg (качество «8 – максимальное») или \*.eps с разрешением не менее 300 dpi, размером не менее 115 мм по ширине, цветовая модель CMYK или Grayscale.

Материал, передаваемый в редакцию в электронном виде, должен сопровождаться: рекомендательным письмом руководителя предприятия (института); лицензионным договором о передаче права на публикацию; **распечаткой, лично подписанной авторами**; рефератом объемом не менее 100 слов на русском и английском языках; подтверждением, что статья предназначена для публикации в журнале «Строительные материалы», ранее нигде не публиковалась и в настоящее время не передана в другие издания; сведениями об авторах с указанием полностью фамилии, имени, отчества, ученой степени, должности, контактных телефонов, почтового и электронного адресов. Иллюстративный материал должен быть передан в виде оригиналов фотографий, негативов или слайдов, распечатки файлов.

В 2006 г. в журнале «Строительные материалы»<sup>®</sup> был опубликован ряд статей «Начинающему автору», ознакомиться с которыми можно на сайте журнала [https://journal-cm.ru/images/Начинающему\\_автору.pdf](https://journal-cm.ru/images/Начинающему_автору.pdf)

**Подробнее можно ознакомиться с требованиями на сайте издательства**  
<http://rifsm.ru/page/7/>

**или журнала** <http://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>

## Приглашаем принять участие!

### Темы семинара

- 🏠 Опыт реализации проектов строительства заводов для производства автоклавного газобетона.
- 🏠 Диверсификации заводов силикатного кирпича для производства автоклавного газобетона.
- 🏠 Обслуживание предприятий, работающих на импортном оборудовании.
- 🏠 Оборудование для производства фибробетона и железобетонных изделий различного значения.
- 🏠 Новые разработки для предприятий отрасли.
- 🏠 Госпрограммы для строительства новых и модернизации действующих производств.

### Программа

Деловая часть, посещение нового предприятия по производству автоклавного газобетона ООО «Профит-Блок», экскурсия на ПАО «КАМАЗ», ужин и неформальное общение.

### Участники

Представители отрасли производства автоклавного газобетона, силикатного кирпича и железобетонных изделий, представители компаний-застройщиков, финансовых и научных учреждений – участие в семинаре бесплатно.

Для представителей иных компаний участие согласовывается с оргкомитетом семинара и осуществляется на платной основе.

**Всем участникам семинара предоставляется 15% скидка на проживание в отеле проведения семинара «Open City» г. Набережные Челны**

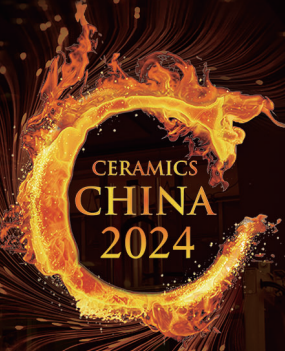
Для участия в семинаре и получения скидки на проживание необходимо пройти [электронную регистрацию](#) до 2 февраля 2024 г. включительно.

Контактное лицо Анастасия Смирнова  
+7-904-634-3888 [as@stroypalata.ru](mailto:as@stroypalata.ru)



**STEINBLOCK**





# The 38th edition of CERAMICS CHINA



## June 25th-28th, 2024 PWTC Expo, Pazhou, Guangzhou



Tel: 0086 20 8327 6369 / 8327 6389  
Facebook: @Ceramics China Unifair

Email: [ceramicschina@unifair.com](mailto:ceramicschina@unifair.com)  
Web: [www.ceramicschina.com.cn](http://www.ceramicschina.com.cn)