

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ<sup>®</sup>

№ 9



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г. WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU СЕНТЯБРЬ 2023 г. (817)



龍騰（控股）集團  
DRAGON & STRONG GROUP

Первая ведущая машиностроительная компания  
в Китае по производству оборудования



Штаб-квартира Dragon & Strong Group в г. Шаосин, Китай



Производственная база, выпускающая оборудование  
для производства керамического кирпича в г. Тяньзинь, Китай

- Производство оборудования для керамического кирпича и плитки
- Модернизация существующих заводов
- Поставка запасных и быстроизнашивающихся частей, постпродажное обслуживание
- Итальянские технологии, европейское качество, лучшая цена



Комбинированный  
вакуумный экструдер D&S



Вальцы D&S –  
LPS 1400x1200



Туннельная печь D&S  
с внутренней шириной 9 м



Более 100 современных заводов  
по производству пустотелых блоков  
и кирпича компания построила в Китае

## Dragon & Strong Group – Ваш надежный партнер!



Контактная информация:

Рамиль Фаезов – представитель компании в России и в странах СНГ  
Моб. +7 995 383 0775

Электронная почта. r.faezoff@gmail.com

Гао Лихун – председатель группы

Моб. +86 138 2070 2286

Электронная почта: glh@dragonstrong.cn

**ПОЛИПЛАСТ**  
**25** ЛЕТ

# **ВЕТОН** **CONF 2023**

**XII международная научно-техническая  
конференция по технологиям бетонов**

6 октября 2023

Цифровое Деловое Пространство  
Москва

[beton-conf@polyplast-nm.ru](mailto:beton-conf@polyplast-nm.ru)

[www.beton-conf.ru](http://www.beton-conf.ru)

8-800-200-08-28

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®

## № 9

Основан в 1955 г.

(817) Сентябрь 2023 г.

Тел.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

### Экологическая безопасность

И.А. БАШМАКОВ, Е.Н. ПОТАПОВА, К.Б. БОРИСОВ, О.В. ЛЕБЕДЕВ, Т.В. ГУСЕВА

Декарбонизация цементной отрасли и развитие систем экологического и энергетического менеджмента ..... 4

### Керамические строительные материалы

Г.И. СТОРОЖЕНКО, И.М. СЕБЕЛЕВ, Т.Е. ШОЕВА, Т.В. САПЕЛКИНА

Перспективы производства стенового клинкера в Сибирском федеральном округе ..... 13

В.А. ГУРЬЕВА, В.В. ДУБИНЕЦКИЙ

Керамический кирпич полусухого прессования на основе композиции алюмосиликатного сырья  
и минерального продукта отходов бурения ..... 18

«Dragon & Strong Group» (Китай) (Информация) ..... 23

Конференция КЕРАМТЭКС заходит на третий десятилетний виток: полет нормальный! (Информация) ..... 24

Выставка КЕРАМИКА КИТАЯ-2023 (Информация) ..... 30

Р.Б. ОРЛОВИЧ, С.С. ЗИМИН

Резервы несущей способности каменных распорных конструкций ..... 32

### Материалы для дорожного строительства

Д.В. МЕДВЕДЕВ, Ю.И. КАЛГИН, Е.Н. СИМЧУК, С.А. МИТРОФАНОВА

Определение долговременной прочности геосинтетических материалов  
на основании расчета комплексного показателя долговечности ..... 38

Ю.В. ШТЕФАН, Б.А. БОНДАРЕВ, Р.Э. АГАМОВ, П.В. МОНАСТЫРЕВ

Влияние эксплуатации машин и механизмов на риски при возведении и обслуживании  
лесовозной автомобильной дороги ..... 48

А.Ф. ГАЛКИН, Н.А. ПЛОТНИКОВ

Выбор строительных материалов для теплоизоляционного слоя дорожной одежды ..... 57

Д.В. ГЕРАСИМОВ

Прогнозирование гранулометрического состава гранулированной асфальтобетонной смеси ..... 65

### Результаты научных исследований

23-я Международная конференция Baltmix с успехом прошла в Мурманске (Информация) ..... 72

В.А. РАХМАНОВ, В.И. МЕЛИХОВ, А.В. ЮНКЕВИЧ, С.Н. КЕКИНА

Негорючий полистиролбетон — новое поколение теплоизоляционно-конструкционных материалов ..... 77

А.А. КУЛИКОВА, Н.О. КОПАНИЦА, М.А. ДМИТРИЕВА, О.В. ДЕМЬЯНЕНКО, А.Г. ПЕТРОВ

Влияние бинарных модифицирующих добавок на процессы гидратации цементных систем ..... 83

Л.И. КУЗЬМИНА, Ю.В. ОСИПОВ

Фильтрация суспензии в пористом материале ..... 89

И.В. СТЕПИНА, Ю.Г. ЖЕГЛОВА

Квалиметрия древесного композита по кинетическим параметрам модифицирования ..... 94

Авторы опубликованных материалов несут ответственность за достоверность приведенных сведений, точность данных по цитируемой литературе и за использование в статьях данных, не подлежащих открытой публикации. Редакция может опубликовать статьи в порядке обсуждения, не разделяя точку зрения автора. Перепечатка и воспроизведение статей, рекламных и иллюстративных материалов возможны лишь с письменного разрешения главного редактора. Редакция не несет ответственности за содержание рекламы и объявлений.

**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®** **№ 9**  
 Founded in 1955 (817) Septembert 2023

Tel.: (499) 976-22-08, (499) 976-20-36 mail@rifsm.ru; www.rifsm.ru; www.journal-cm.ru

### **Environmental safety**

I.A. BASHMAKOV, E.N. POTAPOVA, K.B. BORISOV, O.V. LEBEDEV, T.V. GUSEVA  
**Cement Sector Decarbonization and Development of Environmental and Energy Management Systems . . . . . 4**

### **Ceramic building materials**

G.I. STOROZHENKO, I.M. SEBELEV, T.E. SHOEVA, T.V. SAPELKINA  
**Prospects for the Production of Wall Clinker in the Siberian Federal District . . . . . 13**

V.A. GUR'EVA, V.V. DUBINETSKIY  
**Ceramic Brick of Semi-dry Pressing Based on a Composition of Aluminosilicate Raw Materials  
 and the Mineral Product of Drilling Waste . . . . . 18**

**«Dragon & Strong Group» (China) (Information) . . . . . 23**

**The KERAMTEX conference enters its third ten-year round: the flight is normal! (Information) . . . . . 24**

**Exhibition CERAMICS of CHINA-2023 (Information) . . . . . 30**

R.B. ORLOVICH, S.S. ZIMIN  
**Bearing Capacity Reserves of Stone Spacer Structures . . . . . 32**

### **Materials for road construction**

D.V. MEDVEDEV, Yu.I. KALGIN, E.N. SIMCHUK, S.A. MITROFANOVA  
**Determination of the Long-Term Strength of Geosynthetic Materials on the Basis  
 of the Complex Durability Index Calculation . . . . . 38**

Yu.V. SHTEPHAN, B.A. BONDAREV, R.E. AGAMOV, P.V. MONASTYREV  
**The Impact of the Operation of Machines and Mechanisms on the Risks in the Construction  
 and Maintenance of a Logging Road . . . . . 48**

A.F. GALKIN, N.A. PLOTNIKOV  
**Selection of Building Materials for a Thermal Insulation Layer of a Road . . . . . 57**

D.V. GERASIMOV  
**Prediction of Granulometric Composition of Granulated Asphalt Concrete Mixture . . . . . 65**

### **Results of scientific research**

**The 23<sup>rd</sup> International Baltimix Conference Was Successfully Held in Murmansk (Information) . . . . . 72**

V.A. RAKHMANOV, V.I. MELIKHOV, A.V. YUNKEVICH, S.N. KEKINA  
**Non-Combustible Polystyrene Concrete — a New Generation of Heat-Insulating and Structural Materials . . . . . 77**

A.A. KULIKOVA, N.O. KOPANITSA, M.A. DMITRIEVA, O.V. DEMYANENKO, A.G. PETROV  
**Influence of Binary Modifying Additives on the Processes of Hydration of Cement Systems . . . . . 83**

L.I. KUZMINA, Yu.V. OSIPOV  
**Filtration of Suspension in a Porous Material . . . . . 89**

I.V. STEPINA, Y.G. ZHEGLOVA  
**Qualimetry of Wood Composite by Kinetic Modification Parameters . . . . . 94**

The authors of published materials are responsible for the accuracy of the submitted information, the accuracy of the data from the cited literature and for using in articles data which are not open to the public. The Editorial Staff can publish the articles as a matter for discussion, not sharing the point of view of the author. Reprinting and reproduction of articles, promotional and illustrative materials are possible only with the written permission of the editor-in-chief. The Editorial Staff is not responsible for the content of advertisements and announcements.

**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)

**RUDAKOV 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)

И.А. БАШМАКОВ<sup>1</sup>, д-р экон. наук, лауреат Нобелевской премии (cenef@co.ru);

Е.Н. ПОТАПОВА<sup>2</sup>, д-р техн. наук, профессор (potapova.e.n@muctr.ru);

К.Б. БОРИСОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (cenef@co.ru),

О.В. ЛЕБЕДЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (cenef@co.ru);

Т.В. ГУСЕВА<sup>3</sup>, д-р техн. наук, профессор (tatiana.v.guseva@gmail.com)

<sup>1</sup> ООО «Центр энергоэффективности – XXI век» (117418, г. Москва, ул. Новочеремушкинская, 61)

<sup>2</sup> Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева (125047, г. Москва, Миусская пл., 9)

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт «Центр экологической промышленной политики» (141006, Московская обл., г. Мытищи, Олимпийский пр-т, 42)

## Декарбонизация цементной отрасли и развитие систем экологического и энергетического менеджмента

В статье обсуждены перспективы декарбонизации технологических процессов и продукции цементной отрасли. Приведен анализ международных тенденций и подчеркнуто усиление роли цены на углекислый газ в региональных и национальных системах стимулирования декарбонизации экономики. Представлены методы декарбонизации, рекомендованные «Инициативой по устойчивому развитию цементной промышленности» и Международным энергетическим агентством. Описан состав исходных данных, необходимых для расчета удельных выбросов парниковых газов в цементной отрасли. Подчеркнута роль бенчмаркинга в установлении целевых показателей углеродоемкости цемента и цементного клинкера и представлен перечень основных международных и национальных систем бенчмаркинга. Проанализированы удельные выбросы парниковых газов в производстве цемента в различных странах мира. Отмечено, что в Российской Федерации бенчмаркинг углеродоемкости проводится в рамках актуализации отраслевых информационно-технических справочников по наилучшим доступным технологиям, при разработке которых сформирована система сбора и анализа данных, характеризующих технологические процессы, потребление ресурсов и основные эмиссии, характерные для промышленных предприятий. При этом применение (внедрение) наилучших доступных технологий, направленных на повышение ресурсной эффективности производства, позволяет снизить эмиссии не только загрязняющих веществ, но и парниковых газов. В результате бенчмаркинга в Российской Федерации устанавливаются индикативные отраслевые показатели выбросов парниковых газов двух уровней: верхний имеет ограничительный характер, а нижний призван стимулировать предприятия отрасли к разработке и реализации «зеленых» проектов, направленных на глубокую декарбонизацию технологических процессов и производимой продукции. Ожидается, что для предприятий, реализующих такие проекты, будут доступны инструменты государственной поддержки. Представлены подходы к расчету индикативных показателей. Сделан вывод, что результаты бенчмаркинга (в том числе индикативные показатели выбросов парниковых газов) создают систему координат для обоснования целей и задач совершенствования систем экологического и энергетического менеджмента промышленных предприятий, а также для разработки проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития, претендующих на получение льготных кредитов или доступ к государственным экономическим мерам поддержки промышленности.

**Ключевые слова:** цемент, углеродоемкость, индикативные показатели, декарбонизация, расчет выбросов парниковых газов, наилучшие доступные технологии, информационно-технические справочники, системы менеджмента, экономические методы стимулирования промышленности.

**Для цитирования:** 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>

I.A. BASHMAKOV<sup>1</sup>, Doctor of Science (Economy), Noble Prize Laureate (cenef@co.ru);

E.N. POTAPOVA<sup>2</sup>, Doctor of Science (Engineering), Professor (55pen@mail.ru);

K.B. BORISOV<sup>1</sup>, Candidate of Science (Engineering) (cenef@co.ru),

O.V. LEBEDEV<sup>1</sup>, Candidate of Science (Engineering) (cenef@co.ru)

T.V. GUSEVA<sup>3</sup>, Doctor of Science (Engineering), Professor (tatiana.v.guseva@gmail.com)

<sup>1</sup> LLC Company "Center for Energy Efficiency – XXI" (61, Novocheremushkinskaya Street, Moscow, 117418, Russian Federation)

<sup>2</sup> Dmitry Mendeleev University of Chemical Technology of Russia (9, Miusskaya Square, Moscow, 125047, Russian Federation)

<sup>3</sup> Federal State Autonomous Institution «Research Institute «Environmental Industrial Policy Center» (42, Olimpiiskii Prospect, Mytishchi, Moscow region, 141006, Russian Federation)

### Cement Sector Decarbonization and Development of Environmental and Energy Management Systems

The article discusses the prospects for decarbonization of technological processes and products of the cement industry. An analysis of international trends is given and the strengthening of the role of carbon prices in regional and national systems of stimulating the decarbonization of the economy is emphasized. Decarbonization methods recommended by "the Cement Sustainability Initiative" and the International Energy Agency are presented. The set of the initial data required for the calculation of specific greenhouse gas emissions in the cement industry is described. The role of benchmarking in setting targets for the carbon intensity of cement and cement clinker is emphasized and a list of the main international and national benchmarking systems is presented. The specific emissions of greenhouse gases in the production of cement in various countries of the world are analyzed. It is noted that in the Russian Federation carbon intensity benchmarking is carried out as part of the updating of sectoral Reference Documents on the Best Available Techniques, during the development of which a system has been formed for collecting and analyzing data characterizing technological processes, resource consumption and the main emissions characteristic for industrial installations.

At the same time, the use (implementation) of best available technologies aimed at increasing the production resource efficiency makes it possible to reduce emissions of not only conventional pollutants, but also greenhouse gases. As a result of benchmarking in the Russian Federation, indicative sectoral parameters of specific greenhouse gas emissions of two levels are set: the upper level has a restrictive character while the lower one is designed to stimulate industrial enterprises to develop and implement green projects aimed at deep decarbonization of technological processes and products. Expected that state support instruments will be available for enterprises implementing such projects. Approaches to the calculation of indicative parameters are presented. It is concluded that the results of benchmarking (including indicative parameters) form a system of coordinates to substantiate aims and objectives of enhancing environmental and energy management systems of industrial enterprises, as well as for working out sustainable development (including green) projects in industry seeking preferential loans or governmental economic support measures.

**Keywords:** cement, carbon intensity, indicative parameters, decarbonization, calculation of greenhouse gas emissions, best available techniques, reference documents, management systems, economic methods of stimulating industry.

**For citation:** 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>

Формирование ответственного производства и потребления, разработка и внедрение новых технологий, сокращение негативного воздействия на окружающую среду и снижение выбросов парниковых газов — это цели устойчивого развития, имеющие первоочередное значение для развития промышленности [1, 2]. В России достижение этих целей осуществляется в рамках реализации экологической промышленной политики — политики повышения ресурсной эффективности [3]. В 2021 г. Правительством Российской Федерации была поставлена задача декарбонизации промышленности и разработана «Стратегия социально-экономического развития с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 г.». В этом документе значительное внимание уделено наилучшим доступным технологиям (далее — НДТ), внедрение которых способствует повышению экологической, ресурсной эффективности и снижению углеродоемкости производства [4].

С 2014 г. внимание заинтересованных сторон к концепции НДТ неуклонно возрастает: НДТ представляют собой движущую силу эколого-технологической модернизации промышленности [5]. Сведения о наилучших доступных технологиях, их описание и количественные характеристики систематизированы в информационно-технических справочниках (ИТС). ИТС создают технологические портреты отраслей и формируют основу для постановки целей и задач повышения экологической и ресурсной эффективности, а также снижения углеродоемкости производства на основе соответствующих отраслевых показателей [6]. Отметим, что индикативные (ориентировочные) показатели выбросов парниковых газов стали включаться в отраслевые ИТС в 2022 г.; так же как показатели эмиссий загрязняющих веществ и показатели ресурсной эффективности, они определяются в результате проведения процедуры сравнительного анализа (бенчмаркинга) показателей, достигнутых предприятиями отрасли [7]. Особенность индикативных показателей состоит в том, что устанавливаются два уровня — верхний и нижний. Верхний носит ограничительный характер, и предприятия отрасли должны стремиться сократить выбросы парниковых газов, чтобы не превышать его. Нижний уровень индикативного показателя (уровень лидеров), напротив, направлен на стимулирование глубокой декарбонизации [8]. Подходы отраслевого бенчмаркинга выбросов парниковых газов в различных странах и регионах

используются для установления национальных и региональных целевых показателей снижения выбросов в наиболее ресурсоемких отраслях. Результаты бенчмаркинга принимаются во внимание при установлении требований к предприятиям, претендующим на получение бесплатных квот в системах торговли выбросами парниковых газов [9, 10], а также при разработке критериев отбора «зеленых», прежде всего низкоуглеродных, проектов [11].

С другой стороны, результаты бенчмаркинга создают систему координат для обоснования целей и задач совершенствования систем экологического и энергетического менеджмента, так как целевые показатели становятся «оцифрованными» (в Российской Федерации — установленными в отраслевых ИТС НДТ) [11, 12].

#### Перспективы декарбонизации цементной отрасли и системы бенчмаркинга и отчетности о выбросах парниковых газов

Промышленность неметаллических высокотемпературных материалов является одной из наиболее углеродоемких отраслей экономики. Организация «Инициатива по устойчивому развитию цементной промышленности» (Cement Sustainability Initiative, CSI) совместно с Международным энергетическим агентством (International Energy Agency, IEA, МЭА) установила в качестве целевого показателя, который должен быть достигнут к 2050 г., значение удельных выбросов парниковых газов, равное 370 кг CO<sub>2</sub>-экв. на 1 кг портландцемента.

Для достижения установленного показателя рекомендуется использовать следующие методы сокращения выбросов CO<sub>2</sub>:

- выбор технологического процесса и режима работы, способствующих повышению эффективности энергопотребления на всех этапах производства;
- выбор топлива с низким отношением содержания углерода к калорийности, например природного газа и некоторых видов альтернативного топлива;
- увеличение использования альтернативного топлива на основе отходов (считающегося нейтральным в отношении выбросов CO<sub>2</sub>);
- выбор сырья с низким содержанием органических веществ;
- производство многокомпонентных цементов, что позволяет существенно снижать потребление топлива и выбросы CO<sub>2</sub> в расчете на тонну конечного продукта.

В мире существует несколько региональных и национальных систем бенчмаркинга и отчетности для оценки масштабов потребления энергии и выбросов парниковых газов в цементной промышленности [7]. Отметим, что бенчмаркинг – понятие, чаще всего используемое в маркетинговых исследованиях, и авторы приводят различные определения бенчмаркинга, зачастую связанные с его целями. Тем не менее во всех случаях речь идет о сопоставительном (сравнительном) анализе и установлении потребности в тех или иных изменениях, которые позволят организации получить определенные преимущества. В ходе бенчмаркинга осуществляют сопоставление достигнутых показателей с эталонными, для чего строят кривые бенчмаркинга, представляющие собой результаты ранжирования участников (как правило, организаций) по уровню сравниваемого признака [8]. В Российской Федерации принят национальный стандарт ГОСТ Р 113.00.11–2022 «Наилучшие доступные технологии. Порядок проведения бенчмаркинга удельных выбросов парниковых газов в отраслях промышленности».

Вернемся к системам бенчмаркинга выбросов парниковых газов и энергопотребления в цементной промышленности и перечислим основные из них:

- глобальная система бенчмаркинга Global Cement and Concrete Association, GCCA (Евросоюз; цемент и клинкер, данные по странам);

- система Pegasus (World Cement Association; рассматриваются клинкер и цемент, оцениваются удельные расходы энергии и удельные выбросы CO<sub>2</sub>);

- система бенчмаркинга в рамках Европейской системы торговли выбросами парниковых газов (рассматриваются два вида клинкера, оцениваются только удельные выбросы CO<sub>2</sub>);

- система бенчмаркинга BEST-Cement (США, Китай; оцениваются удельные выбросы CO<sub>2</sub> по маркам цемента);

- система бенчмаркинга энергопотребления Prioritizing Energy Efficiency Measures in the Cement Industry (Иран; охватывает цемент и клинкер, оценивается удельное энергопотребление);

- система бенчмаркинга Cement Manufacturers Association (СМА, Индия, охватывает цемент и клинкер только по удельным расходам энергии).

Бенчмаркинг цементных производств по уровню потребления энергии может использоваться для таких целей, как:

- определение показателей энергетической эффективности наилучших доступных технологий;

- расчет показателей углеродоемкости и оценка потенциала сокращения выбросов парниковых газов в отрасли;

- разработка и согласование отраслевых планов и дорожных карт повышения энергоэффективности и декарбонизации производства;

- формирование мер поддержки для расширения рыночных ниш наиболее эффективных технологий;

- оценка конкурентных позиций по отдельным показателям за счет сопоставления с аналогичными производствами; маркетинга низкоуглеродной продукции;

- выбор поставщиков низкоуглеродной продукции в рамках государственных и корпоративных закупок;

- определение критериев «зеленых» проектов при разработке национальных и межгосударственных таксономий.

Выбор продукта для бенчмаркинга: клинкер или цемент (цементсодержащие продукты) – зависит от целей бенчмаркинга. В пользу выбора клинкера имеются следующие аргументы [13]:

- производство клинкера является самым углеродоемким этапом технологической цепочки производства цемента;

- для клинкера можно устанавливать объективные показатели удельных выбросов CO<sub>2</sub> на уровне отдельной установки;

- при установлении показателей не требуются многочисленные корректирующие коэффициенты в зависимости от видов и составов цемента и вмененные коэффициенты выбросов от используемого с разных установок клинкера.

Задача создания российской системы бенчмаркинга по удельным выбросам парниковых газов

**Таблица 1**  
**Table 1**

**Бенчмарки прямых выбросов парниковых газов, установленные в рамках Европейской системы торговли квотами**  
**Benchmarks of direct emissions of greenhouse gases set in the European Union Emissions Trading System**

Название продукта	Значение бенчмарка		
	Установлено на 2013–2020 гг.	Среднее для 10% наиболее эффективных установок в 2016–2019 гг.	Установлено на 2021–2025 гг.
Клинкер для производства серого цемента*	0,766	0,722	0,693
Клинкер для производства белого цемента**	0,987	0,973	0,957

\* Клинкер для серого цемента как общее количество произведенного клинкера.  
 \*\* Клинкер для белого цемента для использования в качестве основного вяжущего компонента в составе таких материалов (сухих строительных смесей), как заполнители швов, клеи для керамической плитки, теплоизоляционные материалы и анкерные растворы, растворы для промышленных полов, готовые штукатурки, ремонтные растворы и водонепроницаемые покрытия с максимальным средним содержанием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> массовой долей 0,4; Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> массовой долей 0,003 и Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub> массовой долей 0,03.

в цементной промышленности включает проведение сравнительного анализа показателей, достигнутых российскими предприятиями, а также сравнение их с зарубежными бенчмарками. В табл. 1 приведены значения бенчмарков, действующих в Европейской системе торговли квотами на выбросы парниковых газов (European Union Emissions Trading System, EU ETS). Во многих государствах и регионах европейские бенчмарки принимаются во внимание при формировании программ декарбонизации отраслей промышленности и установлении целевых показателей снижения углеродоемкости

основных видов продукции; при этом цена на углерод варьируется в широких пределах [14, 15].

Значение бенчмарка ETS для клинкера для 2021–2025 гг. равно 693 кг CO<sub>2</sub>/т клинкера. При условии, что технологические выбросы от процесса кальцинирования составляют 530 кг CO<sub>2</sub>/т клинкера, получается, что выбросы от сжигания топлива не должны превышать 163 кг CO<sub>2</sub>/т клинкера. Энергопотребление, соответствующее НДТ для производства клинкера, составляет 97 кг у. т./т, таким образом, удельная углеродоемкость используемого топлива не должна превышать 1,68 т CO<sub>2</sub>/т у./т, что немногим выше показателя удельных выбросов CO<sub>2</sub> для природного газа. Таким образом, установленный бенчмарк соответствует сухому способу производства клинкера с удельным расходом топлива на уровне НДТ (97 кг у. т., или 2,83 ГДж/т клинкера).

Отметим, что удельные коэффициенты технологических выбросов CO<sub>2</sub> при производстве клинкера незначительно отличаются по странам, поскольку мало варьируется содержание CaO в клинкере. В национальной инвентаризации России выбросы CO<sub>2</sub> от производства клинкера рассчитываются с учетом значения содержания CaO, равного 65,9%.

#### Затраты на производство цемента и цена на углекислый газ

По имеющимся оценкам, использование новых технологий и материалов в производстве цемента приводит к его удорожанию на 70–115% (на 37–58 Euro/т цемента [13]). Однако такое повышение цен на цемент приводит к повышению стоимости зданий всего на 1–2%, поскольку доля цемента в бетоне составляет только 12–15%, а доля стоимости бетона в стоимости здания не превышает 10%. Таким образом, даже удвоение цен на цемент приводит к росту стоимости здания не более чем на 1,5%. При этом цена на углерод, которая может принимать форму налога на выбросы углекислого газа, стоимости квот на выбросы и др., постепенно возрастает (по-разному в различных юрисдикциях), что также необходимо учитывать (рис. 1). Обычно цену на углерод приводят в

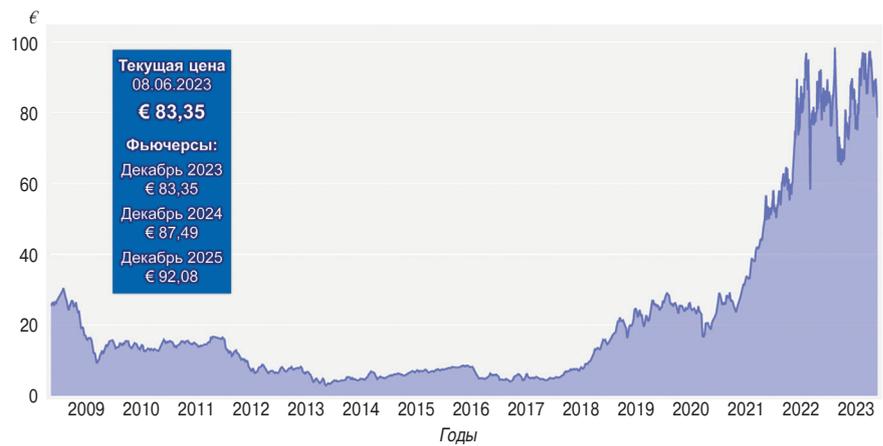


Рис. 1. Изменение стоимости CO<sub>2</sub> в Европейской системе торговли выбросами парниковых газов в 2009–2023 гг. (<https://sandbag.be/index.php/carbon-price-viewer/>)

Fig. 1. Dynamics of CO<sub>2</sub> price in the European Union Emissions Trading System in 2009–2023. (<https://sandbag.be/index.php/carbon-price-viewer/>)

расчете на эквивалент углекислого газа (CO<sub>2</sub>-экв.), что позволяет учесть выбросы всех парниковых газов (и парниковый потенциал каждого из них). Для цементной отрасли выбросы парниковых газов часто приводят в единицах массы углекислого газа, без уточнения CO<sub>2</sub>-экв., так как более 99,5% выбросов приходится именно на CO<sub>2</sub>.

В Евросоюзе затраты на производство цемента в 2021 г. оценивались в 46–58 Euro/т (без учета затрат на CO<sub>2</sub>). При цене на углерод в ETS, равной 55 Euro/т CO<sub>2</sub>-экв., затраты на CO<sub>2</sub> для среднего европейского цементного завода оценивались в 4,42 Euro/т, что соответствует 8–10% от общих затрат. При возрастании цены на углерод до 90 Euro/т CO<sub>2</sub>-экв. затраты на CO<sub>2</sub> для среднего цементного завода увеличатся до 7,23 Euro/т, что соответствует уже 12–15% от общих затрат.

По экспертным оценкам, цена на углерод, необходимая для обеспечения экономической привлекательности низкоуглеродного цемента, находится в диапазоне 60–130 долл. США/т CO<sub>2</sub>-экв. При цене около 80 долл. США/т CO<sub>2</sub>-экв. конкурентоспособной альтернативой становятся уже проекты по улавливанию, использованию и хранению углерода (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) [16]. В перспективе уровень этих цен будет зависеть от сокращения затрат за счет масштабирования применения инновационных технологий, а также от уровня цен на альтернативные компоненты цемента. Однако ни одна из низкоуглеродных технологий не позволяет сохранить цены на цемент на нынешнем уровне.

#### Исходные данные, используемые при оценке удельных выбросов парниковых газов

Исходные данные, используемые при оценке удельных выбросов парниковых газов, применительно к производству цемента можно разделить на три группы показателей. Прежде всего учитываются ассортимент продукции, способ и мощность производства, потребление ресурсов (сырья, топлива (ископаемого, альтернативного), электроэнергии, различ-

ных добавок, отходов и (или) материалов из отходов). Эти показатели можно назвать «показателями входа» в систему, для которой рассчитывают выбросы парниковых газов. «Показатели выхода» включают выпуск клинкера (с учетом его состава, т. е. содержания CaO, MgO, % сух. массы), основной продукции (цемента, в том числе портландцемента с минеральными добавками и без таковых, шлакопортландцемента и др.), а также образование побочной продукции и эмиссий (например, каменноугольного пека, цементной пыли) и характеристики вторичных энергетических ресурсов (отходящих газов, горячего воздуха после клинкерного холодильника, сведения о байпасировании печных газов и пр.).

Информация о «показателях входа» и «показателях выхода» должна накапливаться в рамках систем экологического и энергетического менеджмента предприятий, а также — в рамках систем менеджмента парниковых газов.

При производстве цемента учитывается ряд выбросов парниковых газов.

1. Прямые выбросы (область охвата 1) из источников, которые принадлежат цементному предприятию или контролируются им, прежде всего, выбросы от следующих источников:

- прокаливание карбонатов и сжигание органического углерода, содержащегося в сырье;
- сжигание печного топлива (ископаемое печное топливо, альтернативное ископаемое топливо, смешанное топливо с содержанием биогенного углерода, биомассы и пр.), связанное с производством клинкера и (или) сушкой сырья и топлива;
- сжигание непечного топлива, связанное с оборотом и транспортными средствами на объекте, отопление / охлаждение помещений;
- сжигание топлива для производства электроэнергии на месте;
- сжигание углерода, содержащегося в сточных водах (речь идет об осадках, образующихся при очистке хозяйственно-бытовых сточных вод).

2. Энергетические косвенные выбросы парниковых газов (область охвата 2), образующиеся в результате производства электроэнергии, приобретаемой цементным предприятием и потребляемой на принадлежащем или контролируемом им оборудовании.

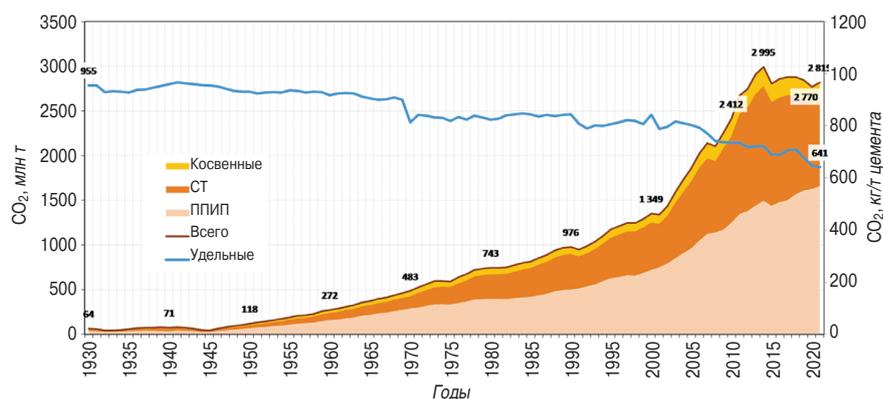


Рис. 2. Динамика выбросов парниковых газов от мировой цементной промышленности в 1930–2021 гг. (по [20])

Fig. 2. Dynamics of greenhouse gases emissions in 1930–2021 (based on [20], with changes)

3. Прочие косвенные выбросы парниковых газов (область охвата 3), в том числе выбросы, связанные с покупаемым клинкером, а также с производством, подготовкой и транспортировкой альтернативного топлива за пределами организации.

По данным крупнейших компаний, в производстве цемента преобладают прямые выбросы (охват 1) — 2–94%, а в прямых выбросах большая часть приходится на технологические выбросы — 64–67% (см., например, отчеты об устойчивом развитии LafargeHolcim [17], HeidelbergCement [18] и CEMEX [19]).

По охватам 1+2 на производство цемента\* в мире в 2019–2021 гг. пришлось около 3 Гт CO<sub>2</sub>-экв. (рис. 2), или 17% всех выбросов парниковых газов от промышленности и 5% от всех глобальных антропогенных выбросов парниковых газов [20].

В среднем по миру удельные выбросы при производстве 1 т цемента по охвату 1 равны 596–602 кг CO<sub>2</sub>/т цемента, а по охвату 1+2 — 639–647 кг CO<sub>2</sub>/т цемента. По оценкам Международного энергетического агентства, средние по миру удельные выбросы в 2020 г. были равны 590 кг CO<sub>2</sub>/т цемента [21]. По данным ГССА, в 2019 г. средние выбросы равны 635 кг CO<sub>2</sub>/т цемента и 834 кг CO<sub>2</sub>/т клинкера [22]. Однако данные ГССА не включают Китай, на долю которого приходится более 50% производства цемента в мире. Анализ данных по 1574 цементным предприятиям Китая показал [23], что удельные технологические выбросы в среднем составили 516 кг CO<sub>2</sub>/т клинкера и в основном варьировались в пределах 500–600 кг CO<sub>2</sub>/т клинкера. При этом удельные выбросы от сжигания топлива в среднем составили 348±242 кг CO<sub>2</sub>/т клинкера, а для отдельных предприятий были ниже 500 кг CO<sub>2</sub>/т клинкера. При значении клинкер-фактора для Китая в 2015–2020 гг. в диапазоне 0,57–0,67 средние

\* Способ расчета выбросов ПГ основан на методологии массового баланса, в которой при расчете выбросов используются входные данные (расходы топлива и сырья) и выходные данные (объемы производства клинкера, цемента, цементной пыли), а также измеренные или вмененные (при отсутствии измеренных) коэффициенты выбросов ПГ. Прямые выбросы имеют место на цементном предприятии. Косвенные выбросы возникают за его пределами. Дифференциация по охвату выбросов: охват 1 — это прямые выбросы из источников, которые принадлежат цементной компании или контролируются ею; охват 2 — это косвенные выбросы от производства покупной электроэнергии, тепла и пара, потребляемых на принадлежащем или контролируемом цементной компанией оборудовании; охват 3 является опциональным и позволяет рассматривать все другие косвенные выбросы. Охват 3 включает выбросы, воплощенные в сырье или полуфабрикатах. Выбросы при производстве закупленных объемов клинкера относятся к выбросам по охвату 3 («ИТС 6–2022. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство цемента» (утв. Приказом Росстандарта от 16.12.2022 № 3199)).

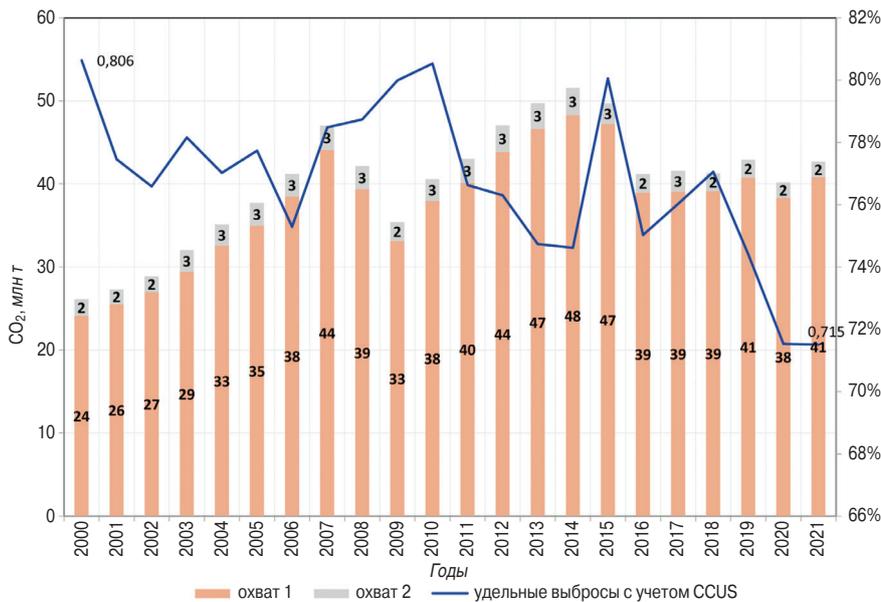


Рис. 3. Динамика выбросов парниковых газов от цементной промышленности в России в 2000–2021 гг. (по [24])  
 Fig. 3. Dynamics of greenhouse gases emissions in Russian cement manufacturing industry (based on [24])

удельные выбросы на 1 т цемента для охвата 1 получаются равными 459–532 кг CO<sub>2</sub>/т цемента, что заметно ниже средних по миру показателей.

В России наиболее низкие показатели демонстрируют экспортеры цемента; мировыми лидерами декарбонизации технологических процессов и продукции отрасли считаются Великобритания, Германия и Индия [15, 17].

Выбросы CO<sub>2</sub> от производства цемента в России по охватам 1+2 в 2019 г. составили 37 млн т, а в 2020 г. – 35 млн т, или около 1,2% от всех выбросов мировой цементной промышленности. При этом выбросы от сжигания топлива при производстве цемента составили соответственно 13 и 12 млн т CO<sub>2</sub>; от промышленных процессов – еще 22 и 21 млн т CO<sub>2</sub>, а от используемой в отрасли электрической и тепловой энергии – еще 2 млн т CO<sub>2</sub>. Снижение выбросов парниковых газов от российской цементной промышленности в 1990–2019 гг. можно оценить равным 43% (рис. 3), после 2000 г. пик выбросов – 49 млн т CO<sub>2</sub> – был достигнут в 2013 г.

В среднем по России удельные выбросы при производстве 1 т цемента\*: по охвату 1 в 2020 г. были равны 594 кг CO<sub>2</sub>/т цемента и 771 кг CO<sub>2</sub>/т клинкера; по охвату 1+2 – 628 кг CO<sub>2</sub>/т цемента. Удельные выбросы по охватам 1+2 в 2000–2020 гг. снизились на 22% – с 806 до 628 кг CO<sub>2</sub>/т цемента («ИТС 6–2022. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство цемента») [24]. Однако эти значения ниже среднемировых показателей, что свидетельствует о проблемах при проведении расчетов, поскольку в среднем у российских цементных предприятий выше удельный расход топлива на обжиг клинкера и большая доля клинкера в составе цемента.

\* По данным отчетности российских предприятий.

### Оценка углеродоемкости (бенчмаркинг) производства цемента в России

Национальный бенчмаркинг для цементной промышленности должен быть выполнен с учетом требований ГОСТ Р 113.00.11–2022. Российские методические указания по оценке прямых и косвенных выбросов парниковых газов базируются на методике Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК) «Руководящие принципы национальных инвентаризаций парниковых газов».

Первой задачей бенчмаркинга является обеспечение сопоставимости удельных показателей выбросов парниковых газов между отдельными производственными линиями и предприятиями в целом. На результаты сравнения показателей удельных выбросов ПГ при производстве цемента и клинкера могут влиять:

- способ производства цемента: сухой, мокрый, комбинированный (полусухой), комбинированный (полумокрый);
- вид и состав сырьевых материалов, поступающих в обжиговую (клинкерную) печь;
- доля и вид минеральных добавок, используемых при помоле цемента;
- вид и доля ископаемого топлива, сжигаемого в обжиговых (клинкерных) печах;
- вид и доля альтернативного топлива (при наличии), используемого на предприятии;
- коэффициенты выбросов CO<sub>2</sub> при сжигании природного и / или альтернативного топлива (широкий диапазон значений для разных видов топлива);
- коэффициенты косвенных выбросов CO<sub>2</sub> при использовании покупной электроэнергии (может меняться в очень широком диапазоне);
- степень интегрированности производства цемента, которая отражает учет выбросов парниковых газов на более ранних стадиях производственной цепочки (добыча и транспортировка сырьевых материалов) при расчете выбросов на каждом этапе технологического процесса.

Вторая задача бенчмаркинга состоит в определении эталонных значений удельных выбросов парниковых газов. Для этого нужно определить либо фиксированные эталонные значения, либо положение производственной линии или предприятия на кривой бенчмаркинга. Эталонное значение может соответствовать:

- самому низкому значению на кривой бенчмаркинга; применяется редко по причине возможного наличия уникальных условий на отдельной производственной линии или отдельном предприятии;

**Таблица 2  
Table 2**

**Эталонные значения показателей для проведения бенчмаркинга цементных предприятий России  
Reference values for running benchmarking of Russian cement manufacturing industries**

Наименование показателя	Ед. изм.	Россия (2021 г.)		Мир	
		Наилучшее значение (ВАТ/НДТ)	Среднее значение	Наилучшее значение (ВАТ/НДТ)	Среднее значение
<b>Технологический уровень</b>					
Соотношение клинкер / цемент (доля клинкера в цементе)	%	71,7	89	56,5	74,8
<b>Энергетический уровень</b>					
Доля использования альтернативных видов топлива	%	15,7	2,9	57,9	12,4
в том числе на основе биомассы	%	1,5	Нет данных	25,4	6,6
Удельный расход топлива (тепла) на обжиг клинкера	МДж/т клинкера	3438	4470	2814	3461
	кг у. т./т клинкера	117	153	96	118
Удельный расход электроэнергии при производстве цемента	кВт·ч/т цемента	69	120	64	102
<b>Удельные выбросы парниковых газов</b>					
Удельные прямые выбросы CO <sub>2</sub>	кг CO <sub>2</sub> /т клинкера	Нет данных	869	612–693	798
Удельные технологические выбросы CO <sub>2</sub> (процесс кальцинирования)	кг CO <sub>2</sub> /т клинкера	Нет данных	525	473	550
Удельные выбросы CO <sub>2</sub> от сжигания топлива	кг CO <sub>2</sub> /т клинкера	Нет данных	Нет данных	265	317
Удельные прямые и косвенные выбросы CO <sub>2</sub>	кг CO <sub>2</sub> /т цемента	Нет данных	743	419	607

– среднему значению для первых 10% производственных линий или предприятий (среднее для первого дециля) или уровню, замыкающему первый дециль; такие величины также называют уровнями наилучших доступных технологий (Best Available Techniques, ВАТ или НДТ);

– значению, замыкающему первые 20 или 25%; такие значения также называют уровнями наилучших практически используемых технологий (Best Practical Technologies, ВРТ);

– среднему значению для всех рассматриваемых производственных линий или предприятий.

В цементных производствах бенчмаркинг может проводиться по следующим уровням:

1. Технологический уровень. К этому уровню относится такой ключевой показатель, как соотношение клинкер-фактор (соотношение клинкер/цемент).

2. Энергетический уровень. К нему относятся такие ключевые показатели:

– доля использования альтернативных видов топлива (в том числе биомассы);

– удельный расход топлива (тепла) на обжиг 1 т клинкера;

– удельный расход электроэнергии при производстве цемента.

3. Уровень углеродоемкости отдельных видов продукции (удельные выбросы CO<sub>2</sub>). По этому уровню проводится бенчмаркинг цементных производств по удельным выбросам парниковых газов на единицу продукции (клинкер или цемент):

– удельные прямые выбросы CO<sub>2</sub> на 1 т клинкера или на 1 т цемента (охват 1);

– удельные технологические выбросы CO<sub>2</sub> на 1 т клинкера (выбросы в процессе кальцинирования – охват 1);

– удельные выбросы CO<sub>2</sub> от сжигания топлива на 1 т клинкера (охват 1);

– удельные косвенные выбросы CO<sub>2</sub> на 1 т цемента (охват 2);

– удельные прямые и косвенные выбросы CO<sub>2</sub> на 1 т цемента (охваты 1 и 2);

– удельные прямые и косвенные выбросы CO<sub>2</sub> на 1 т цемента с учетом выбросов парниковых газов на стадиях добычи и транспортировки сырья, складирования и транспортировки готовой продукции (охваты 1, 2 и 3).

В качестве эталонных значений для проведения бенчмаркинга цементных предприятий России по технологическому и энергетическому уровням, а также по уровню углеродоемкости продукции следует использовать минимальные и средние значения показателей как по России, так и по миру в целом (табл. 2) [20, 24].

Особенности выбора продукта для бенчмаркинга (клинкер или цемент) мы уже обсуждали. Безусловно, производство клинкера представляет собой самый энерго- и углеродоемкий этап производства цемента, но именно цемент является конечным продуктом отрасли. Кроме того, при установлении целевых показателей углеродоемкости для цемента формируется стимул снижения соотношения клинкер/цемент, что важно для декарбонизации отрасли в целом.

Ожидается, что в Российской Федерации результаты бенчмаркинга удельных выбросов парниковых газов будут являться основой для установления индикативных показателей удельных выбросов парниковых газов двух уровней («ИТС 6–2022. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство цемента»):

1. Верхний уровень индикативного показателя (ИП 1) может использоваться в рамках правового регулирования отношений, связанных с ограничением выбросов парниковых газов.

2. Нижний уровень индикативного показателя (ИП 2) может использоваться при принятии решений о государственной поддержке предприятий:

$$I_{ИП1} = (I_{max} - I_{min}) \cdot 0,15;$$

$$I_{ИП2} = (I_{max} - I_{min}) \cdot 0,6;$$

где  $I_{max}$  – максимальный удельный показатель выбросов  $CO_2$ , кг  $CO_2$ /т продукции, выявленный в отрасли;  $I_{min}$  – минимальный удельный показатель выбросов  $CO_2$ , кг  $CO_2$ /т продукции, выявленный в отрасли.

Индикативные показатели удельных выбросов парниковых газов при производстве цемента будут включены в «ИТС 6–2022. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям. Производство цемента» при его актуализации в 2023 г.

### Заключение

Повышение ресурсной (в том числе энергетической) эффективности производства – приоритет развития промышленности, который не оспаривается ни в одной стране мира. Вопросы сокращения выбросов парниковых газов, увеличения их поглощения, декарбонизации различных отраслей экономики обсуждаются на многих международных и национальных площадках; амбициозность целей, которые ставят перед собой различные государства и даже отрасли, варьируется в широких пределах. Производство минеральных неметаллических материалов, и прежде всего цемента, относится к числу секторов экономики, для которых разработаны планы (дорожные карты) декарбонизации и подготовлены практические рекомендации по снижению углеродоемкости как технологических процессов, так и продукции (в том числе на протяжении ее жизненного цикла).

В Стратегии социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года производство цемента рассматривается в ряду отраслей, сокращение выбросов парниковых газов в которых необходимо обеспечить для реализации целевого (интенсивного) сценария Стратегии. Производство цемента включено и в перечень отраслей, для которых в нашей стране установлены критерии проектов устойчивого (в том числе «зеленого») развития [11]. Эти обстоятельства определяют неотложность проведения уточненной оценки углеродоемкости технологических процессов и продукции отрасли в Российской Федерации, установления индикативных показате-

лей выбросов парниковых газов и совершенствования систем экологического и энергетического менеджмента предприятий.

### Список литературы / 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. Скобелев Д.О. Промышленная политика повышения ресурсоэффективности и достижение целей устойчивого развития // *Journal of New Economy*. 2020. Т. 21. № 4. С. 153–173. DOI: <https://doi.org/10.29141/2658-5081-2020-21-4-8>
2. Skobelev D.O. Industrial policy of increasing resource efficiency and the achievement of the sustainable development goals. *Journal of New Economy*. 2020. Vol. 21. No. 4, pp. 153–173. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.29141/2658-5081-2020-21-4-8>
3. Скобелев Д.О., Федосеев С.В. Политика повышения ресурсоэффективности и формирование экономики замкнутого цикла // *Компетентность*. 2021. № 3. С. 5–13. DOI: <https://doi.org/10.24412/1993-8780-2021-3-05-14>
3. Skobelev D.O., Fedoseev S.V. Resource efficiency policy and circular economy development. *Competency (Russia)*. 2021. No. 3, pp. 5–13. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.24412/1993-8780-2021-3-05-14>
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.
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. Никитин Г.С., Скобелев Д.О. Эффективность государственных и корпоративных инвестиций в развитие реального сектора экономики // *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер.: Социальные науки*. 2022. № 4 (68). С. 32–41.
5. Nikitin G.S., Skobelev D.O. Efficiency of state and corporate investments in the development of the real sector of the economy. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo. Seriya: Sotsial'nye nauki*. 2022. No. 4 (68), pp. 32–41. (In Russian).
6. Скобелев Д.О. Ресурсная эффективность экономики: аспекты стратегического планирования // *Менеджмент в России и за рубежом*. 2020. № 4. С. 3–13.
6. Skobelev D.O. Resource efficiency of the economy: strategic planning aspects. *Management v Rossii i za rubezhom*. 2020. No. 4, pp. 3–13. (In Russian).

7. 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>
7. 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-tekhnicheskoi i ekonomicheskoi informatsii*. 2021. Vol. 77. Iss. 9, pp. 1071–1086. DOI: <https://doi.org/10.32339/0135-5910-2021-9-1071-1086> (In Russian).
8. Доброхотова М.В. Особенности перехода российской угольной промышленности к наилучшим доступным технологиям // *Уголь*. 2022. № 9. С. 34–40. DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-34-40>
8. Dobrokhotova M.V. Specific features of the russian coal industry's transition to the best available technologies. *Ugol'*. 2022. No. 9, pp. 34–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.18796/0041-5790-2022-9-34-40>
9. Reimink H., Maciel F. CO<sub>2</sub> data collection user guide, Version 10. Partnership for Market Readiness. A Guide to Greenhouse Gas Benchmarking for Climate Policy Instruments. Washington. DC. World Bank. 2021. 120 p.
10. Tudor C., Sova R. Benchmarking GHG emissions: forecasting models for global climate policy. *Electronics*. 2021. No. 10, pp. 3149. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics10243149>
11. Скобелев Д.О., Волосатова А.А. Разработка научного обоснования системы критериев «зеленого» финансирования проектов, направленных на технологическое обновление российской промышленности // *Экономика устойчивого развития*. 2021. № 1 (45). С. 181–188.
11. Skobelev D.O., Volosatova A.A. Scientific rationale for the development of the “Green” project financing criteria system designed to achieve technological restoration for the Russian industry. *Economica ustoychivogo razvitiya*. 2021. No. 1 (45), pp. 181–188. (In Russian).
12. Shchelchikov K.A., Guseva T.V., Tikhonova I.O., Potapova E.N., Rudomazin V.V. The concept of best available techniques as an instrument for increasing industrial resource efficiency and reducing environmental impact in the Arctic. *Proceedings of IOP Conference Series: Earth And Environmental Science. International Russian Conference on Ecology and Environmental Engineering (RusEcoCon 2022)*. P. 012010.13. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1061/1/012010>
13. Technology Roadmap low-carbon transition in the cement industry. IEA & CSI. 2018. 61 p.
14. Toward net zero: decarbonization roadmap for China's cement industry. RMI and China Cement Association. Beijing. 2022. 15 p.
15. Existing and potential technologies for carbon emissions reductions in the Indian cement industry. CSI & IFC, 2018. 88 p.
16. Скобелев Д.О., Череповицына А.А., Гусева Т.В. Технологии секвестрации углекислого газа: роль в достижении углеродной нейтральности и подходы к оценке затрат // *Записки Горного института*. 2023. Т. 259. С. 125–140. DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.10>
16. Skobelev D.O., Cherepovitsyna A.A., Guseva T.V. Carbon capture and storage: net zero contribution and cost estimation approaches. *Zapiski gornogo instituta*. 2023. Vol. 259, pp. 125–140. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31897/PMI.2023.10>
17. Decarbonizing Building. 2023 Climate Report. URL: <https://www.holcim.com/sites/holcim/files/2023-03/31032023-holcim-climate-report-2023-7392605829.pdf> (Date of access 08.06.2023).
18. Heidelberg Materials. Annual and Sustainability Report. 2022. URL: [https://www.heidelbergmaterials.com/sites/default/files/2023-03/HM\\_Annual\\_and\\_Sustainability\\_Report\\_2022.pdf](https://www.heidelbergmaterials.com/sites/default/files/2023-03/HM_Annual_and_Sustainability_Report_2022.pdf) (Date of access 08.06.2023).
19. CEMEX: Building a Better Future. 2021 Integrated Report. URL: <https://liferayprod-cdn.cemex.com/documents/20143/57102208/IntegratedReport2021.pdf> (Date of access 08.06.2023).
20. Башмаков И. А. Масштаб необходимых усилий по декарбонизации мировой промышленности // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2022. Т. 8. № 2. С. 151–174. DOI: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-2-151-174>
20. Bashmakov I.A. The scale efforts required to decarbonize global industry. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. 2022. Vol. 8. No. 2, pp. 151–174. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2022-2-151-174>
21. International Energy Agency. Cement Sector Analysis. URL: <https://www.iea.org/reports/cement> (Date of access 08.06.2023).
22. Dietz S., Hastreiter N., Jahn V. Carbon performance assessment of cement producers: note on methodology. The Transition Pathway Initiative, London, 2021. URL: <https://www.transitionpathwayinitiative.org/publications/104.pdf?type=Publication> (Date of access 08.06.2023).
23. Cai B., Wang J., He J., Geng Y. Evaluating CO<sub>2</sub> 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
24. Башмаков И.А. Перспективы развития и декарбонизации цементной промышленности мира // *Фундаментальная и прикладная климатология*. 2023. Т. 9. № 1. С. 33–64. DOI: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2023-1-33-64>
24. Bashmakov I. A. Global cement industry development and decarbonization perspectives. *Fundamentalnaya i prikladnaya klimatologiya*. 2023. Vol. 9. No. 1, pp. 33–64. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21513/2410-8758-2023-1-33-64>



# К 70-летию Геннадия Ивановича СТОРОЖЕНКО,

д-ра технических наук, профессора кафедры строительных материалов, стандартизации и сертификации Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (СИБСТРИН).

Геннадий Иванович Стороженко родился на Украине в старинном селе Большая Писаревка Сумской области. В 1964 г. родители уехали работать в Новокузнецк, где он окончил среднюю школу.

В 1970 г. Геннадий Иванович поступил в Новосибирский государственный университет на факультет экономической кибернетики, где в то время преподавали такие звезды, как академик АН СССР А.Е. Аганбегян, д-р экон. наук А.Г. Гранберг и многие видные экономисты. Уже в молодости Геннадий Иванович Стороженко был склонен к обработке больших объемов научной информации, ее критическому анализу и составлению собственных выводов, которые умело отстаивал. Это ценнейшее качество в то время сослужило молодому студенту плохую службу: он не сошелся во мнении с преподавателями в научной оценке некоторых вопросов социалистического производства-потребления, в связи с чем был отчислен из вуза в 1972 г. с формулировкой «за неуспеваемость».

После службы в Вооруженных силах СССР, где Геннадий Иванович не только освоил многие строительные профессии, но и заинтересовался теорией строительного производства и строительным материаловедением, он поступил на строительный факультет Сибирского металлургического института, по окончании которого молодого специалиста оставили преподавать в вузе.

В 1982 г. Г.И. Стороженко поступил в аспирантуру Новосибирского инженерно-строительного института (СИБСТРИН) к известному ученому-материаловеду Галине Ивановне Книгиной. Школа Г.И. Книгиной в те годы славилась исследованиями в области теоретических и технологических основ получения строительных материалов, в том числе с использованием вторичных ресурсов. Многие научно-исследовательские работы выполнялись конкретно по заказам предприятий строительных материалов и завершались внедрением. Школа Книгиной во многом определила дальнейшую научную и производственную деятельность молодого ученого.

Когда в начале 1990-х гг. круто изменилась жизнь науки и промышленности, Г.И. Стороженко возгласил малое научно-производственное предприятие по проектированию и строительству кирпичных заводов на территории Красноярского края и Новосибирской области, которое за 10 лет построило 12 предприятий. В эти годы Геннадий Иванович также принимал участие в разработке технологии и аппаратного обеспечения заводов полусухого прессования с предварительной механоактивацией тощих закарбонизированных суглинков, занимался проблемами регулирования технологических свойств глинистых пород с помощью механохимической активации. Результаты научных исследований были обобщены в докторской диссертации, которую он блестяще защитил в 2000 г.

С целью внедрения своих научных разработок Г.И. Стороженко создал НПК «Баскей», которая занималась проектированием, инженерным контролем и пусконаладочными работами предприятий по сухому обогащению минерального сырья в Красноярске (вермикулитовая руда), Челябинской области (опал-кристаллитовые породы), Грузии (каолины), Казахстане и Украине (пески) и др.

10 лет отдал Геннадий Иванович проектированию, строительству и запуску в эксплуатацию завода по производству гранулированного пеностекла из трепельных глин в Челябинской области. В основу этой работы также легли собственные научные разработки.

В 2019 г. Г.И. Стороженко вернулся к научной и преподавательской работе на кафедре строительных материалов, стандартизации и сертификации Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (СИБСТРИН), которой когда-то руководила Г.И. Книгина. Вместе со своими учениками он ведет исследовательские работы, которые востребованы современными производителями строительных материалов, например кирпичным заводом «Ликолор».

Г.И. Стороженко — автор 68 научных публикаций в российских и зарубежных журналах, 12 патентов РФ, — почти все они внедрены в реальное производство!

Один из самых активных ученых — участников конференции КЕРАМТЭКС, Геннадий Иванович активно привлекает коллег в дружное профессиональное сообщество. Он постоянный автор, рецензент и научный консультант журнала «Строительные материалы»®. За долгие годы сотрудничества мы узнали Геннадия Ивановича не только как талантливого ученого и профессионала высокого класса, но и как верного товарища, прекрасного собеседника с искрометным чувством юмора, исполнителя душевных украинских песен, знатока и любителя классического балета. Он много читает, изучает итальянский язык, путешествует по Горному Алтаю и остается предан делу, которому служит.

Редакция и редакционный совет, коллеги сердечно поздравляют Геннадия Ивановича Стороженко с 70-летием и желают крепкого здоровья, неиссякаемой энергии, толковых учеников, творческих успехов и дальнейшей реализации научных идей.

УДК 691.4:553.61

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-13-17>

Г.И. СТОРОЖЕНКО<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор, И.М. СЕБЕЛЕВ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор, Т.Е. ШОЕВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент; Т.В. САПЕЛКИНА<sup>2</sup>, младший научный сотрудник

<sup>1</sup> Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН) (630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113)

<sup>2</sup> Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов СО РАН (667007, Республика Тыва, г. Кызыл, ул. Интернациональная, д. 117 А)

## Перспективы производства стенового клинкера в Сибирском федеральном округе

На основе природного и техногенного сырья Республики Тыва в лабораторных условиях изготовлены клинкерные стеновые материалы, физико-механические характеристики и структура которых сравнивалась с образцами зарубежных и отечественных про-

изготовителей. Приведены результаты анализа полученных образцов с клинкером стеновым зарубежных заводов ABC-keramik (ФРГ), Lode (Литва) и произведенных в Сибирском федеральном округе (ООО Кирпичный завод «Ликолор»). Физико-механические испытания показали соответствие эксплуатационных характеристик клинкерного кирпича ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия». Изучение фазового состава и структуры керамического камня выявили отличия, которые связаны с особенностями сырья, используемого для производства изделий. Определен химический состав клинкерного камня, выполнены микроскопические и петрографические исследования структуры. Показано, что качество и запасы глинистого и техногенного сырья в СФО, в частности в Республике Тыва, позволяют развивать в масштабное производство стеновых клинкерных изделий.

**Ключевые слова:** клинкерный кирпич, техногенное сырье, глины, каолины, полевешпатовые пески, арсиллиты Усть-Элегеста, механоактивация, плотность, водопоглощение.

**Для цитирования:** Стороженко Г.И., Себелев И.М., Шоева Т.Е., Сапелкина Т.В. Перспективы производства стенового клинкера в Сибирском федеральном округе // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 13–17.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-13-17>

G.I. STOROZHENKO<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (storozhenko\_gi@mail.ru), I.M. SEBELEV<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), T.E. SHOEVA<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering); T.V. SAPELKINA<sup>2</sup>, junior researcher

<sup>1</sup> Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (SIBSTRIN) (113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation)

<sup>2</sup> Tuvian Institute for Exploration of Natural Resources of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (117 A, Internacional'naja Street, Kyzyl, 667007, Republic of Tyva, Russian Federation)

### Prospects for the Production of Wall Clinker in the Siberian Federal District

Based on natural and man-made raw materials from the Republic of Tyva, clinker wall materials were manufactured in laboratory conditions, the physical and mechanical characteristics and structure of which were compared with samples from foreign and domestic manufacturers. The results of the analysis of samples obtained with wall clinker from foreign factories ABC-keramik (Germany), Lode (Lithuania) and those produced in the Siberian Federal District (SFO) (LLC Likolor Brick Plant) are presented. Physical and mechanical tests showed compliance of the performance characteristics of clinker bricks with GOST 530-2012 "Ceramic brick and stone. General technical conditions". The study of the phase composition and structure of ceramic stone revealed differences that are associated with the features of the raw materials used for the production of products. The chemical composition of clinker stone was determined, microscopic and petrographic studies of the structure were performed. It is shown that the quality and reserves of clay and technogenic raw materials in the Siberian Federal District, in particular the Republic of Tyva, make it possible to develop on a large scale the production of wall clinker products.

**Keywords:** clinker brick, technogenic raw materials, clays, kaolins, feldspathic sands, Ust-Elegest mudstones, mechanical activation, density, water absorption.

**For citation:** Storozhenko G.I., Sebelev I.M., Shoeva T.E., Sapelkina T.V. Prospects for the production of wall clinker in the Siberian Federal District. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 13–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-13-17>

В настоящее время в Российской Федерации растет потребность строительной отрасли в клинкерных материалах, которые применяются для облицовки зданий, мощения дорог, тротуаров, а также в элементах декоративного оформления [1]. В Западной Европе клинкер пользуется огромным спросом не только благодаря долговечности, но и архитектурной выразительности и производится в больших объемах.

Несмотря на то что за последние 10–15 лет на рынке появились отечественные клинкерные материалы: кирпич стеновой, кирпич дорожный, плитка, в стране по-прежнему существует объективный дефицит производства клинкерной керамики [2]. Все производства этих материалов сосредоточены в основном в европейской части России, поскольку для изготовления клинкера требуются не только лессовые глины, но и высококачественные тугоплавкие глины с широким интервалом спекания, запасы которых весьма ограничены в Сибирском федеральном округе. Только в редких случаях суглинок, глина или сланцевая глина имеют такой состав и структуру, которые необходимы для производства стенового клинкера и клинкерной брусчатки. Поиск месторождений и разработка составов для производства клинкерного кирпича, тротуарной и облицовочной плитки для региона являются весьма актуальными в связи с программой развития территорий нашей страны [3].

В Новосибирске на ООО Кирпичный завод «Ликолор» проводятся работы по подбору шихт на базе местного сырья (Верх-Тулинское месторождение) и привозной глины (Кайлинское месторождение) и отработке режимов производства стенового клинкера. В результате получены первые партии изделий, соответствующих требованиям ГОСТ 530–2012 на стеновой клинкерный кирпич, и работы по улучшению качества кирпича, его декорированию на заводе продолжаются. Однако не во всех регионах СФО состояние керамической отрасли благополучное настолько, что кирпичные заводы могут себе позволить вкладывать средства в поиск и разработку новых месторождений сырья для выпуска клинкера.

Наиболее сложная ситуация сложилась в Республике Тыва, куда не только клинкерный кирпич, но и керамический кирпич, камни керамические и керамическая плитка завозятся из близлежащих регионов, что приводит к росту цен на материалы и удорожанию строительства в целом. В то же время существует реальная возможность развития керамического производства на базе местного минерального сырья и техногенных отходов с использованием новых технологий и их аппаратного обеспечения для получения высококачественной продукции, что для республики имеет особую актуальность [4].

Таблица 1  
Table 1Химический состав сырья Республики Тыва, пригодного для производства клинкерных изделий  
Chemical composition of raw materials from the Republic of Tyva suitable for the production of clinker products

Сырьевой компонент	Содержание оксидов на прокаленное вещество, мас. %								
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	MnO	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Сукпакская глина	54,54	13,64	0,8	7,09	0,4	6,22	3,4	0,18	0,3
Аргиллиты Усть-Элегеста	68,22	9,11	1,82	1,14	1,48	12,44	5,11	0,06	0,4
Полевошпатовый песок месторождения Кызыльское	55,87	13,1	0,89	8,69	4,67	6,69	5,91	0,08	0,16

**Примечание.** Потери при прокаливании, %: сукпакской глины – 15,21; аргиллитов Усть-Элегеста – 11,75; полевошпатовых песков – 3,63.

Таблица 2  
Table 2Физико-механические характеристики клинкерного кирпича  
Physical and mechanical characteristics of clinker bricks

Производитель клинкера	Способ производства	Средняя плотность керамического камня, г/см <sup>3</sup>	Предел прочности керамического камня, МПа		Водопоглощение, %
			при сжатии	при изгибе	
ABC-keramik	Пластическое формование	2,091	36,3	4,8	4,4
Lode		1,894	30,2	5,8	4,6
«Ликолор»		1,873	35,2	5	2,1
Опытные образцы ТувИКОПР и НГАСУ					
Пластическое формование		1,845	29,9	5,1	11,2
Полусухое прессование		2,105	46,2	5,4	4,7

Сотрудники Тувинского государственного университета и Тувинского института комплексного освоения природных ресурсов СО РАН на протяжении многих лет проводили исследования различных месторождений глинистого и техногенного сырья, которое может быть использовано для производства клинкерного кирпича [5–7]. На основе результатов этих исследований в работе были выбраны в качестве сырья для производства клинкера вскрышные породы угольного разреза – аргиллиты Усть-Элегеста, полевошпатовый песок месторождения Кызыльское и сукпакская глина, химический состав которых представлен в табл. 1.

Согласно диаграмме А.И. Августиника область, которую занимают аргиллиты Усть-Элегеста, находится на границе зон сырья для клинкера мощения и керамического кирпича, а сукпакская глина – на границе зон керамзитовых и кирпичных глин.

Минеральные составы сукпакской глины и аргиллитов схожи и представлены кварцем, полевыми шпатами (ортоклаз), смешанослойными глинистыми минералами (каолинит-монтмориллонит), иллитом и вермикулитом в небольшом количестве.

В целом химический и минеральный составы аргиллитов соответствуют классу сырья для производства клинкерного кирпича – кремнеземистый модуль у них в среднем составляет от 3 до 4. Кроме того, аргиллиты Усть-Элегеста относятся к легкоплавкому сырью (температура плавления 1200–1250°C) с узким интервалом спекания, что обусловлено повышенным содержанием оксидов железа (до 10–12%) и щелочных металлов [8, 9]. В качестве дисперсной фазы, необходимой для повышения эксплуатацион-

ных характеристик керамического камня, использовался кварц-полевошпатовый песок месторождения Кызыльское-1 с повышенным содержанием Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и R<sub>2</sub>O (табл. 1).

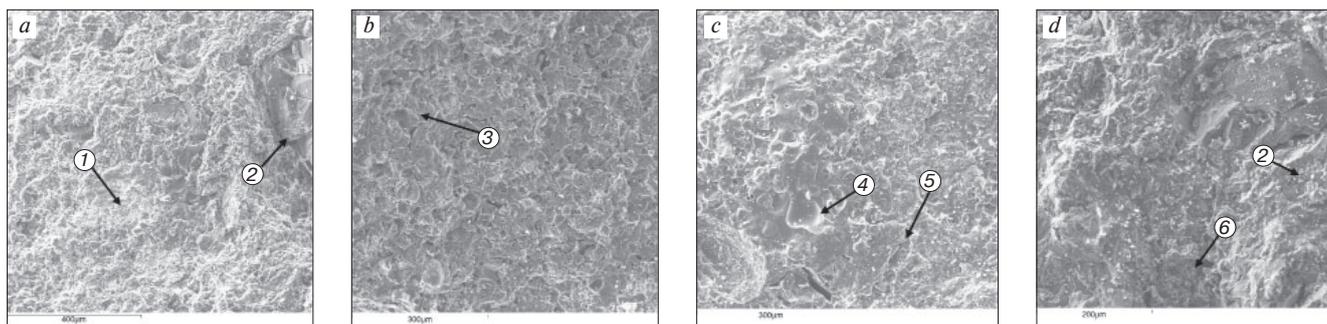
В лабораторных условиях были изготовлены образцы керамического кирпича пластического формования и полусухого прессования, которые обжигали по режиму, принятому на кирпичном заводе «Ликолор» для производства клинкерного кирпича (максимальная температура обжига 1050°C).

Были проведены исследования не только физико-механических свойств изделий на основе сырья Республики Тыва в сравнении с клинкерным кирпичом заводов ABC-keramik, Lode и завода «Ликолор» (табл. 2), но и их фазового состава и структуры.

Свойства клинкерных материалов в зависимости от номенклатуры изделий характеризуются следующими показателями: предел прочности при сжатии 64–140 МПа, водопоглощение 0,9–5,5%, для строительного клинкера R<sub>сж</sub> не менее 35 МПа [10].

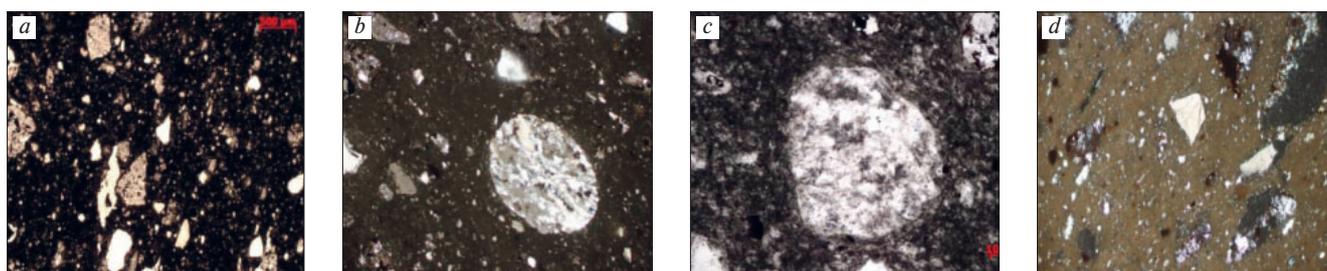
Результаты определения физико-механических характеристик клинкерного кирпича показали, что изделия пластического формования завода Lode и опытных образцов ТувИКОПР и НГАСУ по прочности не могут относиться к строительному клинкеру, а последние и по водопоглощению (табл. 2).

Опытные образцы полусухого прессования показали максимальную прочность при сжатии и низкое водопоглощение – <5%, такое же, как у ABC-keramik, минимальное водопоглощение у клинкера завода «Ликолор». Высокая прочность при полусухом прессовании обусловлена особенностями массоподготовки одного из компонентов шихты – аргиллитов.



**Рис. 1.** Результаты электронно-микроскопического сканирования образцов: *a* – ABC-keramik; *b* – Lode; *c* – «Ликолор»; *d* – опытный образец полусухого прессования: 1 – BaSO<sub>4</sub> (светлые участки); 2 – кварц в матрице продуктов термических превращений; 3 – продукты термических превращений глинистых минералов, предположительно гидрослюдистых; 4 – оплавленный участок (стеклофаза); 5 – мусковит; 6 – титаномagnetит

**Fig. 1.** Results of electron microscopic scanning of samples: *a* – ABC-keramik; *b* – Lode; *c* – “Licolor”; *d* – prototype of semi-dry pressing: 1 – BaSO<sub>4</sub> (light areas); 2 – quartz in the matrix of thermal transformation products; 3 – products of thermal transformations of clay minerals, presumably hydromica; 4 – melted area (glass phase); 5 – muscovite; 6 – titanomagnetite



**Рис. 2.** Результаты петрографических исследований шлифов образцов: *a* – ABC-keramik; *b* – Lode; *c* – «Ликолор»; *d* – опытный образец полусухого прессования

**Fig. 2.** Results of petrographic studies of thin sections of samples: *a* – ABC-keramik; *b* – Lode; *c* – “Licolor”; *d* – semi-dry pressing prototype

Таблица 3  
Table 3

Химический состав керамического камня исследованных образцов  
Chemical composition of ceramic stone of the studied samples

Производитель клинкера	Содержание оксидов на прокаленное вещество, мас. %								
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	R <sub>2</sub> O	BaO
ABC-keramik	56,44	4,8	33,52	6,37	–	1,28	0,42	5,25	0,83
Lode	53,11	0,42	18,68	11,2		14,61	0,45	5,1	0,78
«Ликолор»	65,66	1,07	26,76	2,21	0,71	0,93	0,28	3,26	–
Опытный образец полусухого прессования	63,84	0,67	22,69	6,57	–	2,98	0,83	4,31	–

Предварительно проводились исследования по влиянию механоактивации на технологические свойства аргиллитов, которые показали существенный рост как пластичности, так и остальных технологических характеристик.

Рентгенофазовый анализ керамического камня во всех образцах показал наличие кристаллических фаз кварца и муллита; ортоклаз присутствует в опытных образцах и кирпиче Lode; кристобалит обнаружен в клинкере завода «Ликолор» и опытных образцах.

Химический анализ позволил установить наличие в образцах заводов ABC-keramik и Lode оксида бария (табл. 3), а с помощью сканирующего электронного микроскопа был обнаружен BaSO<sub>4</sub> (рис. 1, *a, b*, светлый участок на фото), который, видимо, вводят в шихту для устранения высолов на поверхности кирпича. Поры во всех образцах закрытые, за редким исключением. Минеральные составляющие клинкера по результатам сканирования представлены на рис. 1.

Петрографическое исследование шлифов керамического камня позволили установить, что все образцы сложены спекшейся стекловатой массой (рис. 2). Текстура их массивная, структура порфирикластовая и представлена кварцем, кристобалитом, плагиоклазом, мелкими агрегатами муллита, рудным минералом – гематитом (рис. 2, *a*). В некоторых образцах (рис. 2, *b, c*) присутствуют миндалевидные обособления, состоящие из мелкозернистых агрегатов кварца; их образование, возможно, связано с заполнением пор силикатным расплавом, существенно кремниевое состава. Плагиоклаз, ортоклаз (рис. 2, *d*) образуют удлиненные, призматические зерна и встречаются практически во всех образцах. Гематит повсеместно встречается в агрегатах совместно с кварцем в форме отдельной вкрапленности в основной массе и образует зерна призматической формы (рис. 2, *d*).

Таким образом, установлено, что для оценки качества клинкерных материалов требуется комплекс-

ное исследование не только их физико-механических характеристик, но и вещественного состава и структуры, что позволяет оценить их долговечность. Главный вывод по результатам работ заключается в том, что использование механоактивированных ар-

гиллитов Усть-Элегеста в комбинации с глинистым сырьем Сукпакского месторождения и полевошпатными песками месторождения Кызылское-1 позволяет получить стеновой клинкер полусухим способом прессования.

#### Список литературы

1. Семёнов А.А. Некоторые тенденции в развитии рынка керамических стеновых материалов в России // *Строительные материалы*. 2022. № 4. С. 4–5. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-891-4-4-5>
2. Котляр В.Д., Ужахов К.М., Котляр А.В., Терехина Ю.В. Клинкерный кирпич: стандартизация, свойства, применение // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 4–8. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-4-8>
3. Разрабатываем Стратегию развития строительной отрасли до 2030 года. URL: <https://stroystategy.ru> (2017 г.). Текст: электронный.
4. Сапелкина Т.В., Стороженко Г.И., Шоева Т.Е. Композиционные керамические материалы из техногенных пород Республики Тыва // *Строительные материалы*. 2023. № 5. С. 4–8. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-9-13>
5. Кара-сал Б.К., Чюдюк С.А., Сапелкина Т.В. Разработка состава шихты на основе вскрышных пород угледобычи для изготовления стеновых керамических материалов // *Естественные и технические науки*. 2019. № 9 (135). С. 165–169.
6. Кара-сал Б.К., Стрельников А.А., Сапелкина Т.В. Технологические свойства керамических масс на основе аргиллитовых вскрышных пород угледобычи, измельченных на различных помольных установках // *Естественные и технические науки*. 2020. № 5 (143). С. 122–127.
7. Кара-сал Б.К., Чюдюк С.А., Сапелкина Т.В. Технологические свойства глинистых вскрышных пород угледобычи при производстве керамических стеновых материалов // *Естественные и технические науки*. 2018. № 1. С. 165–169.
8. Kotlyar A.V., Lapunova K.A., Lazareva Y.V., Orlova M.E. Effect of argillites reduction ratio on ceramic tile and paving clinker of low-temperature sintering. *Materials and Technologies in Construction and Architecture. Material Science Forum Submitted*. 2018. Vol. 931, pp. 526–531. <https://doi.org/10.4028/www.Scientific.net/MSF.931.526>
9. Кара-сал Б.К., Чюдюк С.А., Иргит Б.Б. Особенности применения аргиллитовых вскрышных пород угледобычи для производства керамических стеновых материалов // *Вестник Тувинского государственного университета. Вып. 3. Технические и физико-математические науки*. 2020. № 2 (62). С. 6–18.
10. Котляр В.Д., Терехина Ю.В., Котляр А.В. Особенности свойств, применение и требования к клинкерному кирпичу // *Строительные материалы*. 2015. № 4. С. 72–74. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-724-4-72-74>

#### References

1. Semenov A.A. Some trends in the development of the ceramic wall materials market in Russia. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 4, pp. 4–5. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-4-5>
2. Kotlyar V.D., Uzhakhov K.M., Kotlyar A.V., Terekhina Yu.V. Clinker brick: standardization, properties, application. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 4–8. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-4-8>
3. We are developing a strategy for the development of the construction industry until 2030. - URL: <https://stroystategy.ru> (2017) - Text: electronic.
4. Sapelkina T.V., Storozhenko G.I., Shoeva T.E. Composite ceramic materials from natural and technogenic rocks of the Republic of Tyva. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 5, pp. 9–13. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-813-5-9-13>
5. Kara-sal B.K., Chudyuk S.A., Sapelkina T.V. Development of the composition of the charge based on overburden rocks of coal mining for the manufacture of ceramic wall materials. *Estestvennye i tehnicheckie nauki*. 2019. No. 9 (135), pp. 165–169. (In Russian).
6. Kara-sal B.K., Strelnikov A.A., Sapelkina T.V. Technological properties of ceramic masses based on argillite overburden coal mining, crushed at various grinding plants. *Estestvennye i tehnicheckie nauki*. 2020. No. 5 (143), pp. 122–127. (In Russian).
7. Kara-sal B.K., Chudyuk S.A., Sapelkina T.V. Technological properties of clay overburden rocks of coal mining in the production of ceramic wall materials. *Estestvennye i tehnicheckie nauki*. 2018. No. 1, pp. 165–169. (In Russian).
8. Kotlyar A.V., Lapunova K.A., Lazareva Y.V., Orlova M.E. Effect of argillites reduction ratio on ceramic tile and paving clinker of low-temperature sintering. *Materials and Technologies in Construction and Architecture. Material Science Forum Submitted*. 2018. Vol. 931, pp. 526–531. <https://doi.org/10.4028/www.Scientific.net/MSF.931.526>
9. Kara-sal B.K., Chudyuk S.A., Irgit B.B. Features of the use of argillite overburden coal mining rocks for the production of ceramic wall materials. *Vestnik of Tuva State University. Issue 3. Technical and physical-mathematical sciences*. 2020. No. 2 (62), pp. 6–18. (In Russian).
10. Kotlyar V.D., Terekhina Yu.V., Kotlyar A.V., Features of Properties, Application and Requirements for Clinker Brick. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 4, pp. C. 72–74. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2015-724-4-72-74>

УДК 691.42

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-18-22>

В.А. ГУРЬЕВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук (victoria-gurieva@rambler.ru);

В.В. ДУБИНЕЦКИЙ<sup>2</sup>, старший преподаватель

<sup>1</sup> Оренбургский государственный университет (460018, г. Оренбург, пр. Победы, 13)

<sup>2</sup> Бузулукский гуманитарно-технологический институт (филиал) ОГУ (461040, г. Бузулук, ул. Рабочая, 35)

## Керамический кирпич полусухого прессования на основе композиции алюмосиликатного сырья и минерального продукта отходов бурения

Представлены результаты исследования влияния активированного карбонатсодержащего минерального продукта отхода бурения (АКМПОБ) в композиции с легкоплавким суглинком на фазо- и структурообразование в условиях низкотемпературного синтеза; свойства керамического кирпича, предназначенного для устройства конструкций стен зданий и сооружений. В результате обработки карбонатсодержащего отхода бурения 6% раствором HCl, оптимизации составов формовочных масс, технологических параметров полусухого прессования, сушки и обжига достигается формирование кристаллических анортито- и волластонито-подобных новообразований, что обеспечивает получение керамического кирпича, отвечающего требованиям ГОСТ 530–2012: марка по прочности М125–150, плотность 1,6–1,9 г/см<sup>3</sup>, водопоглощение 12–14%, морозостойкость F75.

**Ключевые слова:** карбонатсодержащий минеральный продукт отхода бурения, механоактивация, пористость, предел прочности при сжатии, средняя плотность, водопоглощение, механическое диспергирование.

**Для цитирования:** Гурьева В.А., Дубинецкий В.В. Керамический кирпич полусухого прессования на основе композиции алюмосиликатного сырья и минерального продукта отходов бурения // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 18–22.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-18-22>

V.A. GUR'eva<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (victoria-gurieva@rambler.ru); V.V. DUBINETSKIY<sup>2</sup>, senior lecturer

<sup>1</sup> Orenburg State University (13, Avenue Pobedy, Orenburg, 460018, Russian Federation)

<sup>2</sup> Buzuluk Humanitarian and Technological Institute (BHTI) (branch) of OSU (35, Rabochaya Street, Buzuluk, Orenburg Region, 461040, Russian Federation)

### Ceramic Brick of Semi-dry Pressing Based on a Composition of Aluminosilicate Raw Materials and the Mineral Product of Drilling Waste

The results of scientific studies of the effect of activated carbonate-containing mineral product of drilling waste (ACMPOB) in a composition with low-melting loam on phase and structure formation under conditions of low-temperature synthesis, properties of ceramic bricks intended for the construction of wall structures of buildings and structures are presented. As a result of processing the carbonate-containing drilling waste with a 6% HCl solution, optimizing the compositions of molding masses, technological parameters of semi-dry pressing, drying and firing, the formation of crystalline anorthite- and wollastonite-like neoplasms is achieved, which ensures the production of ceramic bricks that meet the requirements of GOST 530–2012: strength grade M 125–150, density 1.6–1.9 g/cm<sup>3</sup>, water absorption 12–14%, frost resistance F75.

**Keywords:** carbonate-containing mineral product of drilling waste, mechanical activation, porosity, compressive strength, average density, water absorption, mechanical dispersion.

**For citation:** Gur'eva V.A., Dubinetskiy V.V. Ceramic brick of semi-dry pressing based on a composition of aluminosilicate raw materials and the mineral product of drilling waste.

*Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 18–22. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-18-22>

В настоящее время многие отечественные предприятия вынуждены отказаться от применения качественных привозных глин и ориентироваться на использование регионального алюмосиликатного сырья, в составе которого присутствуют различные примеси. Это обуславливает, как правило, низкие технологические свойства глин ближних месторождений и ухудшение эксплуатационных качеств керамического кирпича [1].

Для регулирования исходных свойств глин применяются добавки разного происхождения, которые в композиции с алюмосиликатным сырьем участвуют в процессе спека-

ния, определяя направленное фазо- и структурообразование кирпича. В качестве таких добавок используются разнообразные отходы промышленности [2], одной из разновидностей которых являются отходы бурения скважин.

В регионах, где развита промышленная добыча и переработка газа и нефти, актуально решение проблемы утилизации многотоннажных отходов — буровых шламов. Только на территории Оренбургской области в год образуется более 300 тыс. т буровых отходов. Для их складирования необходимо устройство шламовых амбаров, для чего из промышленного и сельскохозяйствен-

ного оборота регионов изымается большое количество территорий. В среднем по России образуется около 15 млн т отходов бурения, складирование которых усиливает загрязнение окружающей среды [3].

В ходе анализа научных работ установлено, что в производстве строительной керамики минеральная часть отходов бурения ранее не применялась. Это указывает на перспективность исследования и позволило сформулировать рабочую гипотезу, заключающуюся в том, что комплексная переработка минеральной части отходов бурения в композиции с умеренно пластичной глиной на этапах подготовки, фор-

Химический состав пластичного сырья  
Chemical composition of plastic raw materials

Вид сырья	Химический состав, мас. %											
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MnO	SrO	TiO <sub>2</sub>	ППП
Бузулукская глина	45,02	12,18	4,15	18,17	3,57	2,37	1,97	0,31				12,26
Бугурусланская глина	60,44	13,53	10,46	3,35	2,81	2,92	2,99	–				3,5
Минеральный продукт отхода бурения	28,45	4,06	3,56	43,6	4,96	4,5	0,68	9,22	0,05	0,28	0,64	

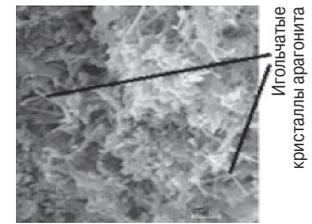


Рис. 1. Микроструктура в отраженном свете агрегата МПОБ (×1000)

Fig. 1. Microstructure in reflected light of the MDWP unit (×1000)

мования, сушки и обжига обеспечит в условиях низкотемпературного обжига в системе SiO<sub>2</sub>–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–R<sub>2</sub>O–RO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> направленное фазо- и структурообразование керамических изделий с физико-механическими свойствами, отвечающими требованиям ГОСТ 530–2012.

Исходными материалами для проведения исследований выбраны глины Бузулукского и Бугурусланского месторождений Оренбургской области и усредненный по составу минеральный продукт отхода бурения нефтяных скважин (далее – МПОБ), взятый с объектов АО «Оренбургнефть». Химический состав сырья представлен в таблице.

На начальном этапе исследования структурно-минералогические и технологические особенности исходных материалов.

Полученные данные позволяют утверждать, что опытные глины сходны по составам с месторождениями соседних регионов. По содержанию глинозема глины Бузулукского и Бугурусланского месторождений относятся соответственно к группам кислого и полукислого глинистого сырья; по содержанию оксидов железа (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>3%) характеризуются высоким содержанием красящих оксидов. Низкое содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и наличие щелочных оксидов указывает на легкоплавкость глин. Особенностью бузулукской глины является высокое содержание потерь при прокаливании (12,26%), что свидетельствует о наличии в глине органических примесей и гидрослюдистых компонентов; повышенное содержание CaO и MgO (Σ=21,74%) может привести в результате обжига к образованию извести и соответственно к различным дефектам кирпича. В бугурусланской

глине суммарное содержание оксидов CaO и MgO – 6,16% также указывает на присутствие карбонатных примесей в незначительном количестве [4].

Особенностью МПОБ является высокое содержание оксидов CaO и MgO, что указывает на присутствие карбонатных соединений. Результаты рентгенофазового анализа позволили установить, что кальцит, присутствующий в МПОБ, представлен его полиморфной разновидностью – арагонитом в виде игольчатых кристаллов (рис. 1), которые собраны в волокнистые агрегаты.

По данным ДТА, при температуре 350–400°C арагонит переходит в кальцит. Дальнейшая термическая обработка МПОБ сопровождается процессами изменения его фазового состава и структуры.

Суммарное содержание Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и SiO<sub>2</sub>, присутствие Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> свидетельствуют о легкоплавкости отхода. Таким образом, полученные результаты исследования позволили авторам отнести МПОБ к карбонатсодержащему сырью (КМПОБ) и указывают на возможности использования его в производстве изделий строительной керамики.

На следующем этапе изучены сушильные и обжиговые свойства двухкомпонентных образцов. Составы сырьевых шихт дозировали согласно плану эксперимента, мас. %: суглинок (95–45) + КМПОБ (5–55), затем шихту увлажняли (W=10%). После вылеживания массы в течение суток проводили формование на прессе с давлением 20 МПа и выдержкой в течение 30 с. Полученные изделия высушивали при температуре 120°C до постоянной влажности 3% и обжигали при температуре

1100°C с выдержкой при максимальной температуре в течение 240 мин (рис. 2).

По результатам проведенных исследований установлено, что ввод КМПОБ в выбранном диапазоне в массы из суглинка Бугурусланского/Бузулукского месторождений приводит к снижению R<sub>сж</sub> соответственно с 20,2 до 15,3 МПа и с 18,3 до 15 МПа. При этом водопоглощение образцов на бугурусланском суглинке возрастает с 13,8 до 16,3%, на бузулукском суглинке – с 13,9 до 16,3%. Такая динамика объясняется структурными изменениями, связанными с повышенным содержанием карбонатных соединений в исходном сырье – бузулукском суглинке и КМПОБ и протекающей в процессе обжига реакцией декарбонизации. Средняя плотность образцов на суглинках опытных месторождений находится примерно в одинаковом диапазоне, уменьшаясь с увеличением содержания КМПОБ с 1815 до 1410 кг/м<sup>3</sup>. Огневая усадка образцов на основе суглиновок обоих месторождений в зависимости от содержания КМПОБ снижается одинаково от 3 до 1,82% [5].

Выбор базового состава для дальнейших исследований выполнен с учетом основных структурных критериев, принятых в технологии керамического кирпича: W≤14% и ρ=1600–1900 кг/м<sup>3</sup>, и выявленных особенностей глин и КМПОБ. Исходя из анализа полученных результатов, для дальнейших исследований принята шихта состава: суглинок 70% + КМПОБ 30%. Однако образцы данного состава на опытных суглинках после обжига характеризуются относительно невысокой механической прочностью при сжатии, что можно объяснить низ-

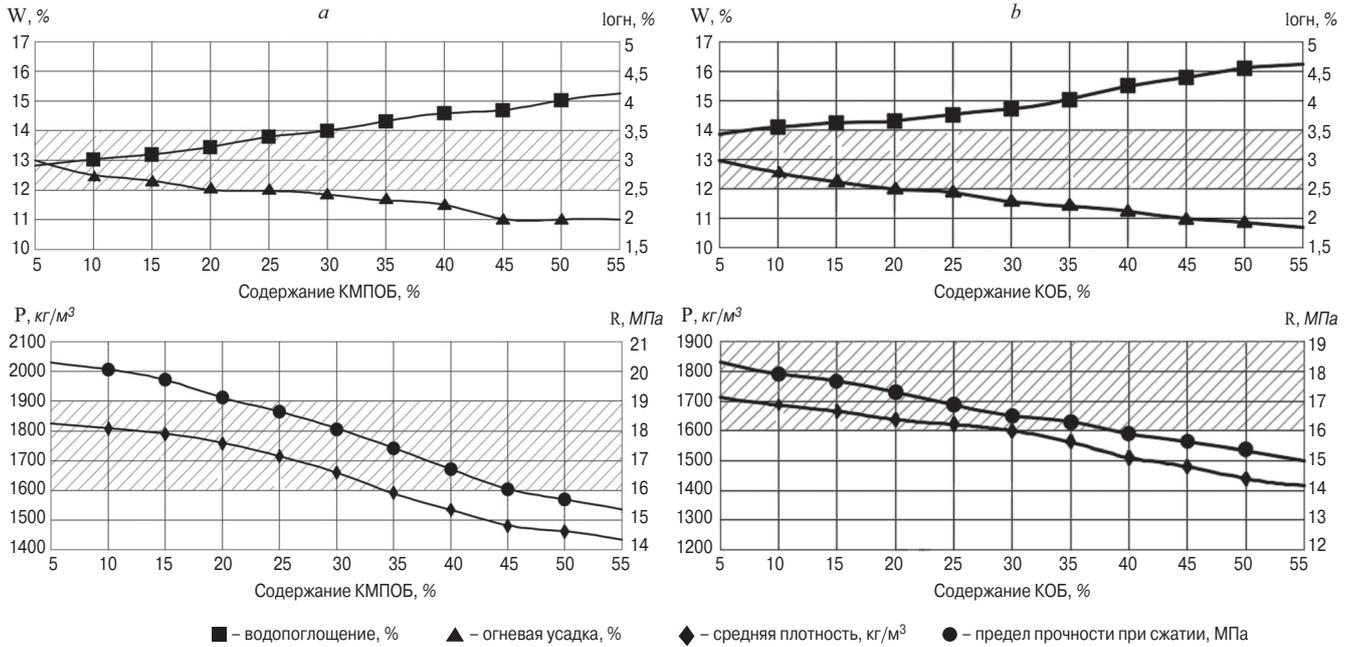


Рис. 2. Динамика изменения сушильных и обжиговых свойств образцов в зависимости от состава: а – суглинок Бугурусланского месторождения + КМПОБ; б – суглинок Бузулукского месторождения + КМПОБ  
 Fig. 2. Dynamics of changes in drying and firing properties of samples depending on the composition: а – loam of Buguruslansky deposit + CMDWP; б – loam of Buzulukskoye deposit + CMDWP

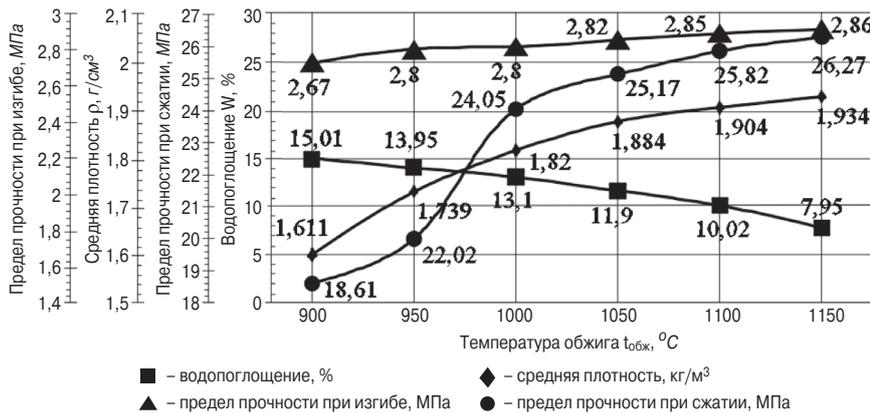


Рис. 3. Обжиговые свойства образцов состава суглинок Бугурусланского месторождения + 30% КМПОБ, полученных при оптимальных технологических параметрах ( $W_{\text{форм}}=9\%$ ;  $P=20$  МПа;  $t_{\text{обж}}=1000^\circ\text{C}$ )  
 Fig. 3. Firing properties of samples of the composition of loam of the Buguruslansky deposit + 30% CMDWP, obtained with optimal technological parameters ( $W_{\text{mol}}=9\%$ ;  $P=20$  МПа;  $t_{\text{fir}}=1000^\circ\text{C}$ )

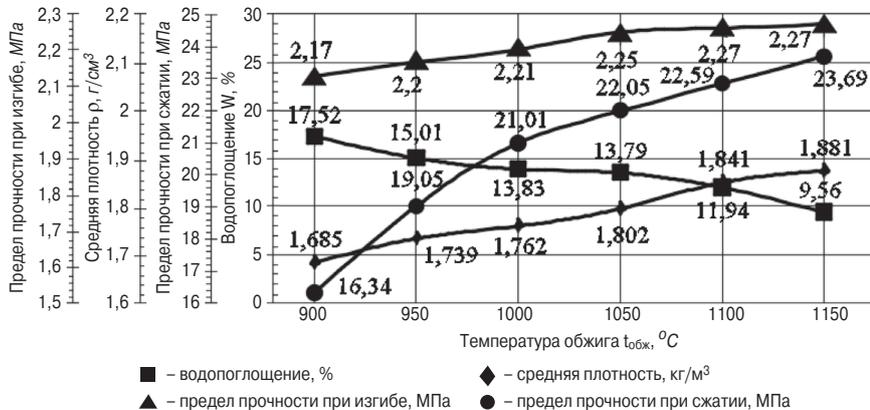


Рис. 4. Обжиговые свойства образцов состава суглинок Бузулукского месторождения + 30% КМПОБ, полученных при оптимальных технологических параметрах ( $W_{\text{форм}}=9\%$ ;  $P=20$  МПа;  $t_{\text{обж}}=1100^\circ\text{C}$ )  
 Fig. 4. Firing properties of samples of the composition of loam of the Buzulukskoye deposit + 30% CMDWP, obtained with optimal technological parameters ( $W_{\text{mol}}=9\%$ ;  $P=20$  МПа;  $t_{\text{fir}}=1100^\circ\text{C}$ )

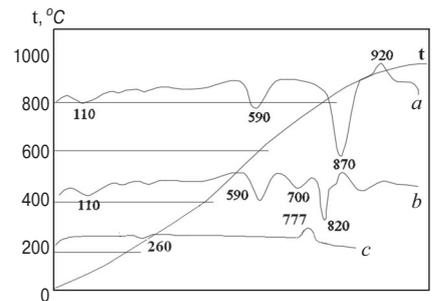


Рис. 5. Термограммы керамических образцов: а – бугурусланского суглинка; б – состав: 60% суглинок Бугурусланского месторождения + 35% АКМПОБ; с – КМПОБ после обработки 6% раствором HCl  
 Fig. 5. Thermograms of ceramic samples: а – Buguruslan loam; б – composition: 60% loam of Buguruslansky deposit + 35% ACMDWP; с – CMDWP, after treatment with 6% HCl solution

Рис. 6. Термограммы керамических образцов: а – суглинка Бузулукского месторождения 100%; б – 65% суглинок Бузулукского месторождения + 35% АКМПОБ  
 Fig. 6. Thermograms of ceramic samples of а – loam of Buzuluk deposit 100%; б – composition: 65% loam of Buzuluk deposit + 35% ACMDWP

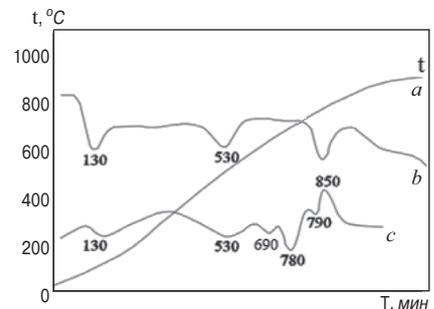
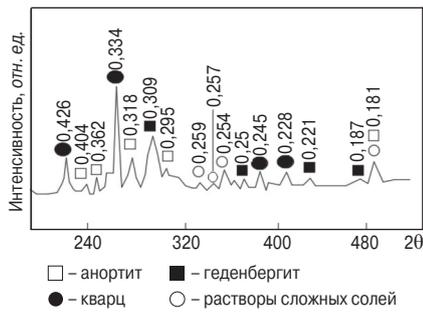
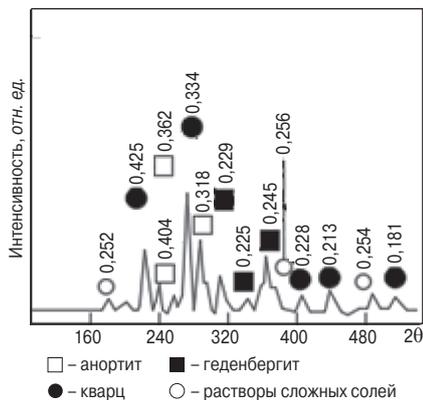


Рис. 6. Термограммы керамических образцов: а – суглинка Бузулукского месторождения 100%; б – 65% суглинок Бузулукского месторождения + 35% АКМПОБ  
 Fig. 6. Thermograms of ceramic samples of а – loam of Buzuluk deposit 100%; б – composition: 65% loam of Buzuluk deposit + 35% ACMDWP



**Рис. 7.** Рентнограммы образцов из суглинка бугурусланского 60% + 40% АКМПОБ при  $t_{\text{обж}}=1000^{\circ}\text{C}$

**Fig. 7.** Radiographs of samples obtained on the basis of Buguruslansky loam 60% + 40% ACMPOB  $t_{\text{fir}}=1000^{\circ}\text{C}$



**Рис. 8.** Рентнограммы образцов из суглинка бузулукского 65% + 35% АКМПОБ при  $t_{\text{обж}}=1050^{\circ}\text{C}$

**Fig. 8.** Radiographs of samples obtained on the basis of Buzuluksky loam 65% + 35% ACMPOB  $t_{\text{fir}}=1050^{\circ}\text{C}$

кой реакционной способностью частиц КМПОБ и высокой пустотностью пресс-порошков, не обеспечивающих плотное прилегание частиц при прессовании. В связи с этим исследовано влияние продолжительности помола на изменение зернового состава двухкомпонентной шихты и активацию спекания изделия-сырца в диапазоне температуры 950–1200°C.

По полученным данным выявлено, что изменение продолжительности помола в интервале 60–150 мин обеспечивает рост количества глинистых и пылеватых частиц, снижение песчаных частиц и в целом увеличение дисперсности по отношению к исходному сырью. С целью определения обжиговых свойств изделий [6] сырьевые смеси измельчались 90 и 120 мин, увлажнялись и формовались.

Анализ полученных результатов показывает, что механическое дис-

пергирование шихты в течение 120 мин позволяет получить зерновой состав частиц пресс-порошка, который обеспечивает после прессования на этапе обжига структурные изменения, определяющие улучшение физико-механических свойств керамического изделия.

На основе полученных результатов, проведены исследования влияния комплекса технологических параметров: формовочная влажность, давление формования, температура и продолжительность сушки и обжига на динамику изменения обжиговых свойств изделий оптимального состава (суглинок Бугурусланского/Бузулукского месторождения + 30% КМПОБ), рис. 3, 4.

Таким образом, в результате комплексного исследования разработана технология производства керамического кирпича на основе суглинка с добавкой КМПОБ в количестве 30% с характеристиками по прочности М150 и соответственно М125, что доказывает активное участие КМПОБ в процессе формирования структуры.

Учитывая, что продукты разрушения карбонатных включений при обжиге усиливают поризацию структуры формирующегося керамического камня, предложен и апробирован метод предварительной активации КМПОБ (далее – АКМПОБ) 6% раствором HCl. Для этого на полигонах, в хранилищах устраивается площадка из кислотоупорного бетона с установкой конвейера с питателем и форсунками-разбрызгивателями. В результате обработки происходит безопасное для окружающей среды химическое разрушение структуры карбонатных пород с выделением углекислого газа, воды, образованием  $\text{CaCl}_2$  в твердом виде с плотностью 2510 кг/м<sup>3</sup> и небольшого количества раствора  $\text{CaCl}_2[\text{OH}_2]$  [7].

С целью изучения динамики изменения обжиговых свойств выполнено математическое планирование эксперимента. В качестве факторов, влияющих на комплекс свойств изделий состава суглинок + АКМПОБ, выбраны: содержание в двухкомпонентной шихте АКМПОБ, % по мас-

се ( $X_1$ ) и температура обжига, °C ( $X_2$ ). Математическая модель полученных результатов позволяет увеличить содержание АКМПОБ в шихте до 35% и получить при  $t_{\text{обж}}=1000^{\circ}\text{C}$  кирпич марки М150 (Бугурусланское месторождение) и при  $t_{\text{обж}}=1050^{\circ}\text{C}$  с добавкой 30% КМПОБ (Бузулукское месторождение) – кирпич М125.

Определение влияния кальций-содержащего бурового шлама на формирование фазового состава керамического камня проведено по данным дифференциально-термического и рентгенофазового анализов образцов. Полученные результаты приведены на рис. 5, 6.

По данным ДТА на кривой *b* наблюдается: эндоэффект при  $t=260^{\circ}\text{C}$ ; экзотермический пик при  $t=772\text{--}782^{\circ}\text{C}$ , обусловленный переходом хлорида кальция в расплав, что указывает на активизацию в процессе обжига АКМПОБ.

На ДТА кривой *b* отмечается: эндоэффект при  $t=260^{\circ}\text{C}$ ; экзотермический пик при  $t=700^{\circ}\text{C}$ , что соответствует образованию микрорасплава из легкоплавких эвтектик щелочных металлов; снижение температуры декарбонизации кальцита суглинка до  $820^{\circ}\text{C}$ ; образование расплава с обогащением щелочными оксидами; переход двухвалентного железа в трехвалентное в продуктах разрушения суглинка и АКМПОБ определяет понижение температуры экзотермического пика с 920 до  $870^{\circ}\text{C}$ , с новообразованиями из продуктов разрушения исходного сырья, что влияет на прочностные показатели.

Для подтверждения выводов и идентификации новообразований, сформированных при обжиге, проведен рентгенофазовый анализ. На рентгенограмме образца с содержанием 35–40% АКМПОБ (рис. 7, 8) наряду с кварцем, гематитом отмечаются дифракционные пики фаз анортита, геденбергита, а также твердых растворов сложного состава с волластонитовой структурой; по мнению авторов, образование последних происходит при спекании керамических масс вследствие частичного взаимодействия полевых шпатов и продуктов раскristаллизации расплавов и разрушения двойных карбонатов при температу-

ре 820°C с образованием СаО в суглинке [8, 9].

С целью изучения неизменности физико-механических параметров кирпича в естественных условиях эксплуатации исследована его морозостойкость. Результаты показали, что ввод в шихту в качестве добавки АКМПОБ в количестве 35–40% и дальнейший обжиг изделий при температуре 1000–1050°C позволяет достичь марки по морозостойкости керамического кирпи-

ча F75.

Таким образом, полученные экспериментальные данные доказывают:

– предварительная химическая активация обеспечивает дообжиговое разрушение структуры карбонатных соединений, содержащихся в минеральных продуктах отходов бурения;

– механоактивация композиции АКМПОБ с легкоплавкими суглинками определяет формирование фа-

зового состава (анортита, твердых растворов сложного состава, геденбергита) и структуры изделий стеновой керамики;

– разработанный комплекс технологических решений обеспечивает получение керамического кирпича на основе легкоплавких суглинков и АКМПОБ, свойства которого удовлетворяют требованиям ГОСТ 530–2012 «Кирпич и камень керамические. Общие технические условия».

### Список литературы

1. Семёнов А.А. Состояние российского рынка керамических стеновых материалов // *Строительные материалы*. 2016. № 8. С. 9–12. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2016-740-8-9-15>
2. Коляда С.В. Перспективы развития производства строительных материалов в России до 2020 г. // *Строительные материалы*. 2008. № 7. С. 4–8.
3. Турчанинов В.И. Строительные материалы из промышленных отходов и местного сырья Оренбургской области. Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. 150 с.
4. Гурьева В.А., Дорошин А.В., Дубинецкий В.В. Исследование влияния модифицирующих добавок на морозостойкость и свойства керамики // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 52–57. DOI 10.31659/0585-430X-2018-762-8-52-56.
5. Гурьева В.А., Дубинецкий В.В., Вдовин К.М., Бутримова Н.В. Стеновая керамика на основе высококальцинированного сырья Оренбуржья // *Строительные материалы*. 2016. № 12. С. 55–58.
6. Салахов А.М., Тагиров Л.Р., Салахова Р.А., Фасеева Г.Р., Хацринов А.И. Повышение прочности изделий строительной керамики: от теории к практике // *Вестник Казанского технологического университета*. 2012. № 5. С. 18–21.
7. Гурьева В.А., Дубинецкий В.В. Химический метод активации карбонатсодержащих сырьевых компонентов в технологии производства керамического кирпича методом полусухого прессования // *Строительные материалы*. 2021. № 9. С. 28–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-28-31>
8. Яценко Н.Д., Зубехин А.П. Научные основы инновационных технологий керамического кирпича и управление его свойствами в зависимости от химико-минералогического состава сырья // *Строительные материалы*. 2014. № 4. С. 28–31.
9. Павлов В.Ф. Исследование реакций, протекающих при обжиге масс на основе каолиновых глин с добавкой карбонатов кальция, натрия, калия. Тр. ин-та НИИстройкерамики, 1981. Вып. 46. С. 53–75.

### References

1. Semenov A.A. The state of the Russian market of ceramic wall materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 8, pp. 9–15. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2016-740-8-9-15>
2. Kolyada S.V. Prospects for the development of production of building materials in Russia until 2020. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2008. No. 7, pp. 4–8. (In Russian).
3. Turchaninov V.I. Construction materials from industrial waste and local raw materials of the Orenburg region. Orenburg: OSU, 2006. 150 p.
4. Dubinetsky V.V., Guryeva V.A., Vdovin K.M. Drilling mud in the production of construction ceramics products. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 4, pp. 75–76. (In Russian).
5. Guryeva V.A., Dubinetsky V.V., Vdovin K.M., Butrimova N.V. Wall ceramic on the basis of highly calcined raw materials of Orenburzhye. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2016. No. 12, pp. 55–59. (In Russian).
6. Salakhov A.M. Increasing the strength of building ceramic products: from theory to practice. *Vestnik of Kazan Technological University*. 2012. No. 5, pp. 18–21. (In Russian).
7. Gur'eva V.A., Dubinetskiy V.V. Chemical method for activation of carbonate-containing raw materials in the technology of production of ceramic bricks by semi-dry pressing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 9, pp. 28–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-795-9-28-31>
8. Yatsenko N.D., Zubekhin A.P. Scientific bases of innovative technologies of ceramic bricks and management of its properties depending on the chemical and mineralogical composition of raw materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 4, pp. 28–31.
9. Pavlov V.F. Investigation of reactions occurring during the firing of masses based on kaolinite clays with the addition of calcium, sodium, and potassium carbonates. Proceedings of the Institute NIISstroykeramka, 1981. Iss. 46, pp. 53–75. (In Russian).



# «Dragon & Strong Group» (Китай)

«Dragon & Strong Group» была основана в 2002 г. и на сегодняшний день является ведущей машиностроительной группой компаний в Китае, производящей оборудование для производства керамического кирпича, керамической плитки и силикатного кирпича.

Этапы развития компании:

- 2002–2007 гг. – создание совместного предприятия с Bedeschi Spa Italy.

- 2008 г. – приобретение 100% акций компании A&B Impianti, г. Асти Италия.

Оборудование для производства керамического кирпича компания производит по итальянской технологии.

Оборудование для производства силикатного кирпича производится по немецкой технологии.

За все время существования компании «Dragon & Strong Group» успешно построила «под ключ» в Китае более ста современных заводов по производству керамического кирпича и более пятидесяти современных заводов по производству силикатного кирпича. За последние три года компания построила в Китае шестнадцать современных заводов по производству керамического кирпича, мощностью от 800 до 1000 т обожженного кирпича и блоков в день.

Штат компании насчитывает более 150 опытных сотрудников.

Компания ориентируется на итальянские технологии и европейское качество.

## Рынок России и стран СНГ

«Dragon & Strong Group» готова предложить своим клиентам следующие услуги:

1. Строительство «под ключ» кирпичных заводов разной мощности.
2. Модернизация и/или автоматизация существующих и старых кирпичных заводов.

3. Поставка оборудования: автоматические линии разгрузки и упаковки, обвязочные машины, вальцы для удаления камней, вальцы, экструдеры, резаки, роботы, газовые горелки, устройства для шлифования и текстурирования облицовочного кирпича, устройства автоматической очистки вагонеток печи, комплектные лаборатории, редукторы, мотор-редукторы, серводвигатели и т. д.

4. Поставка любых качественных запасных и быстроизнашивающихся деталей – бандаж для вальцев и бегунов мокрого помола, гидроцилиндры, колеса печных вагонеток, специальный огнеупор для футеровки печи или печных вагонеток, вентиляторы и т. д.

5. Поставка любых электрических, электронных компонентов и других деталей европейских и лучших китайских брендов.

«Dragon & Strong Group» строит кирпичные заводы «под ключ» в следующих категориях:

- 30 млн шт. керамического кирпича в год;
- 40 млн шт. керамического кирпича в год;
- 60 млн шт. керамического кирпича в год;
- 90 млн шт. керамического кирпича в год.

Кроме того компания готова предложить свои услуги по строительству заводов, выпускающих глазурованную черепицу.



Приобретение 100% акций итальянской компании A&B Impianti г. Асти, Италия



Завод по производству облицовочного кирпича в Казани



Автоматическая линия обвязочных машин D&S

### Контакты в России:

Рамиль Фаезов — представитель компании в России и в странах СНГ

Моб.: +7 995 383 0775

Электронная почта: r.faezoff@gmail.com

### Контакты в Китае:

Гао Лихун — председатель группы

Моб.: +86 138 2070 2286

Электронная почта: glh@dragonstrong.cn



МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«РАЗВИТИЕ КЕРАМИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ»

**КЕРАМТЭКС**

# Конференция КЕРАМТЭКС заходит на третий десятилетний виток: полет нормальный!

## The KERAMTEX conference enters its third ten-year round: the flight is normal!

7–8 июня 2023 г. в Омске успешно прошла XXI Международная научно-практическая конференция «Развитие керамической промышленности России: КЕРАМТЭКС-2023». В ее работе приняли участие более 120 руководителей и ведущих специалистов кирпичных заводов, представителей машиностроительных и инжиниринговых компаний, ученых отраслевых исследовательских и учебных институтов из тридцати регионов России, Беларуси, Казахстана, Италии, а также российские менеджеры испанской компании. Выездные сессии состоялись на кирпичный завод «Керамикстрой», машиностроительное предприятие НПО «Контур» и в Институт новых технологий и автоматизации промышленности строительных материалов «ИНТА-СТРОЙ», который в этом году выступил генеральным спонсором КЕРАМТЭКС.

On June 7–8, 2023, the XXI International Scientific and Practical Conference «Development of the Ceramic Industry of Russia» was successfully held in Omsk: KERAMTEX-2023». More than 120 managers and leading specialists of brick factories, representatives of machine-building and engineering companies, scientists from industry research and educational institutes from 30 regions of Russia, Belarus, Kazakhstan, Italy, as well as Russian managers of a Spanish company took part in its work. Field sessions were held at the Keramikstroy brick factory, the Kontur NPO machine-building enterprise and the INTA-STROY Institute of New Technologies and Automation of the Building Materials Industry, which this year acted as the general sponsor of KERAMTEX.

В условиях продолжающегося санкционного давления, ухода с рынка европейских поставщиков технологического оборудования и инжиниринговых услуг, кирпичные заводы вынуждены мобилизовать свой интеллектуальный и организационный потенциал для сохранения работоспособности и высокого качества продукции при переориентации на оборудование и запасные части от разных поставщиков из России и Китая или прорабатывать сложные и дорогостоящие логистические схемы для ввоза европейской машиностроительной продукции по параллельному импорту.

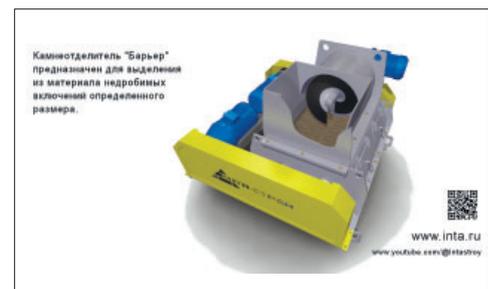
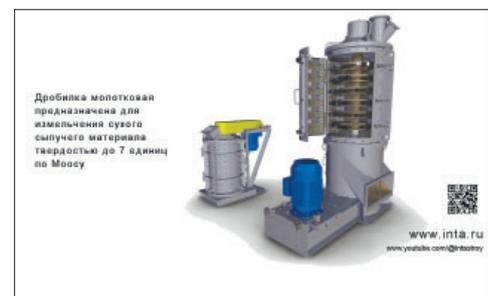
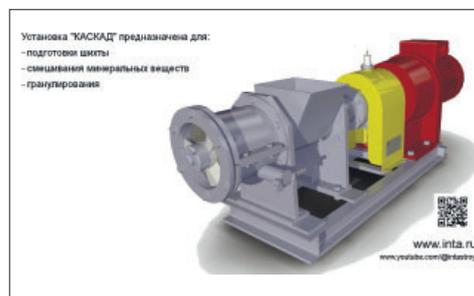
В этих условиях организаторы КЕРАМТЭКС пригласили на конференцию российские машиностроительные компании, которые могли предложить кирпичным заводам альтернативу зарубежному оборудованию. Из двадцати трех пленарных докладов, представленных на конференции, 13 были посвящены технологическому оборудованию.

Ведущие специалисты генерального спонсора, компании «ИНТА-СТРОЙ» (С.Н. Сапельников, С.Г. Марков, С.С. Шульга), представили свою компанию и ее разработки для керамической промышленности.

Следует отметить, что Институт новых технологий и автоматизации промышленности строительных материалов («ИНТА-СТРОЙ») явление в отечественной промышленности уникальное. В годы, когда происходило преступное уничтожение отечественного машиностроения для промышленности строительных материалов, Игорь Феликсович Шлегель шаг за шагом создавал машиностроительную компанию.

Окончив в 1972 г. Сибирский автомобильно-дорожный институт (СибАДИ) по специальности строительные и дорожные машины и оборудование, молодой инженер уехал работать в КБ Кемеровского завода «Строммашина». Именно там, работая в команде по созданию и внедрению в производство новых машин и агрегатов, талантливый инженер реализовал свои первые разработки и изобретения.

По возвращении в Омск в 1985 г. Игорь Феликсович собрал группу молодых исследователей и приступил к совершенствованию технологии полусухого прессования кирпича и разработке принципиально нового оборудования.



В этот период формируется концепция автоматизированного кирпичного завода. Основные положения концепции: метод полусухого прессования, тщательная подготовка сырья, повышенное давление прессования (не менее 400 кг/см<sup>2</sup>), шахтная обжиговая печь, комплексная автоматизация всех технологических переделов.

В начале 1990-х гг. появляются первые публикации И.Ф. Шлегеля с соавторами в журнале «Строительные материалы». С тех пор и по настоящее время все разработки компании отражены на страницах журнала. Это пример настоящей летописи развития небольшой компании «ШЛ» в полномасштабный научно-исследовательский и проектный институт, которая навсегда останется в истории отечественной промышленности строительных материалов.

За эти годы создан опытный пресс, разработан и внедрен сушильный барабан усовершенствованной конструкции в кирпичном производстве завода строительного кирпича. По разработанному проекту построен кирпичный завод ШЛ-100 с печью обжига шахтного типа в г. Серебряные Пруды Московской обл. Оборудование отработало более двух лет до закрытия завода по административным причинам.

Затем был разработан проект нового кирпичного завода полусухого прессования ШЛ-300 модульного типа с полной автоматизацией контроля и управления технологическим процессом, с прессом повышенной мощности, с обжиговым комплексом шахтного типа, автоматизированной системой упаковки готовой продукции.

Интенсивное развитие института пришлось на начало 2000-х гг., тогда был создан исследовательско-технологический отдел, экспериментальная лаборатория, расширена тематика разработок. Организованы новые тематические конструкторские отделы, цех пенобетона, участок пеноконцентрата, участок очищающих составов.

В декабре 2010 г. был пущен в эксплуатацию уникальный кирпичный завод полусухого прессования, технология и оборудование которого до сих пор не имеют аналогов в России. Завод выпускал полнотелый лицевой кирпич уменьшенного («церковного») формата. Эксплуатация завода подтвердила правильность всех принятых технологических и технических решений. Его работу высоко оценили участники первого научно-практического семинара «Инновационные технологии для кирпичных заводов средней и малой мощности», проведенного в рамках МИАП КЕРАМТЭКС в марте 2011 г. в Омске (журнал «Строительные материалы», № 4-2011).

На КЕРАМТЭКС-2023 были представлены современные разработки «ИНТА-СТРОЙ»: установка «КАСКАД» для подготовки шихты, смешивания минеральных компонентов и гранулирования; молотковая дробилка; дозатор циклического действия, обеспечивающий отсутствие пыли в зоне фасовки; измельчитель древесных опилок с влажностью до 50%; автомат-резчик глиняного бруса; камневыведитель «Барьер».

Лопастной экструдер и агрегаты на его базе, другое оборудование в действии (!) мы увидели на демонстрационной площадке института «ИНТА-СТРОЙ» во время выездной сессии.



**НПО «Контур»** – омская компания, интересный и перспективный партнер для нашей отрасли. Она создана в 2017 г., однако ее специалисты обладают многолетним опытом работы в машиностроении.

**А.С. Дергачев**, начальник контрактной группы, рассказал, что предприятие оснащено самым современным оборудованием, имеет собственное литейное производство (максимальная масса отливки до 1000 кг, максимальный диаметр до 1500 мм), кузнечное производство, цех предварительной и финишной металлообработки, испытательную лабораторию. Вся продукция, выпускаемая компанией, проходит стандартные контрольные испытания. Поэтому НПО «Контур» может изготовить практически любую деталь по чертежам заказчика. Специалисты рассчитывают, моделируют, проектируют узлы и агрегаты любой сложности.

Кирпичный завод «Керамикстрой» уже заказывает запчасти у НПО «Контур». При посещении предприятия заводчане буквально завалили директора В.Н. Петрова и его коллег конкретными вопросами по изготовлению различных запчастей и расходных материалов для нашего оборудования.





Компания «Абуко-сервис» (Уфа) дебютировала на КЕРАМТЭКСе в прошлом году. Как доложил исполнительный директор **Р.Р. Сарваров**, за прошедший год удалось много сделать для совершенствования продукции, применяемой в кирпичной промышленности. Заводы могут приобрести как готовое решение захватного устройства (грейферные, параллельные и клещевые захваты), так и заказать разработку индивидуального проекта.

Грейферные захваты для перегрузки кирпича на обжиг и упаковку имеют грузоподъемность от 1 до 3,5 т; параллельные захваты можно использовать для перегрузки сырца на сушку, садки на обжиговые вагонетки, упаковки. Компания уже поставляет захваты на многие кирпичные заводы и оптимизирует свои разработки при помощи коллег-кирпичников.

*Нам, организаторам конференции, было очень приятно получить благодарность от компании «Абуко-сервис» наряду с кирпичными заводами. Это высокая оценка вклада МИАП КЕРАМТЭКСа и журнала «Строительные материалы» в развитие кирпичной промышленности России.*

Компания «Техноробот» занимается автоматизацией технологических процессов на базе промышленных роботов с 2014 г.

На конференции работу компании представил директор **Р.Р. Ягудин** (на фото справа). В настоящее время для кирпичных заводов выполняются работы по модернизации участков садки-выставки и упаковки. Успешно выполнен проект на Стерлитамакском кирпичном заводе, где на участке садки рядового кирпича 1НФ заменили на робот-садчик тройной грейферный захват, из которого постоянно падали кирпичи. На Заводе строительных материалов № 7 на линии садки решали несколько задач. В процессе сушки происходил постоянный перекос полок, кроме того, на полках находилось разное количество кирпичей. Печные вагонетки на предприятии небольшие, для качественного обжига требовалось разработать схему надежного устойчивого пакета. Для решения задачи разработали специальный захват, формирующий зазоры между рядами кирпичей.



Ремонтно-механический завод «Нихард-сервис» из г. Златоуста Челябинской области уверенно зашел на рынок запчастей для керамической промышленности. Завод изготавливает высокоизносостойкие лопасти смесителей, шкивы приводов, била рыхлителей, молотки дробилок, корпуса подшипников, колеса вагонеток и т. д. **Ю.С. Буянова** отметила, что залогом высокого качества продукции и совершенствования производства является в том числе постоянное сотрудничество с Южно-Уральским государственным университетом, позволяющее РМЗ «Нихард-сервис» своевременно осваивать новейшие технологии и проводить эксперименты, используя исследовательскую базу университета. Со своей стороны, завод предоставляет ученым возможность выполнять эксперименты в условиях производства.

Завод активно осваивает выпуск запчастей для импортного оборудования. Если в 2021 г. он составлял 26%, то в 2022 г. увеличился до 48%. Многие производители кирпича заказывают запчасти для своих заводов и вполне довольны.



Компания «С.Т. Технолоджи» более пятнадцати лет специализируется на модернизации судостроительных и судоремонтных предприятий. Сотрудничество с предприятиями ПСМ относительно недавнее, но уже весьма продуктивное в плане восстановления и наплавки изнашивающихся деталей оборудования. Технический директор «С.Т. Технолоджи-Урал» (Свердловская обл.) **А.В. Манин** в качестве примера привел результаты наплавки на рабочие поверхности шнека (перо) порошковой проволокой EnDOTec DO\*33/30, а на реборду, как самую изнашиваемую поверхность, – порошковой проволокой EnDOTec DO\*48 с карбидом вольфрама. Твердость наплавленного слоя составила 68 HRC, а срок службы шнека увеличился в 6–7 раз.

Другой пример, актуальный буквально для всех кирпичных заводов, – повышение срока службы формующих рамок прессов. Для этого были использованы износостойкие плиты CDP 112, представляющие собой легкосвариваемую основу и износостойкий слой, полученный методом порошкового спекания в печи сплава NiCr с твердостью 64 HRC и карбида вольфрама с твердостью 2400 HV. Применение плит CDP 112 позволяет увеличить срок службы формующих рамок в 4–5 раз.





кой; с разделенным пустообразователем для каждого выхода и с защитой каждого отдельного компонента полностью съемными антиабразивными вставками. Это новое поколение фильер было специально разработано для удовлетворения требований клиентов, касающихся как простоты эксплуатации, так и экономии в обслуживании.

Фильеры серии Gamma Plus представляют собой упрощенную версию фильер Omega. Фактически фильеры Gamma Plus включают ту же систему, что и фильеры Omega, за исключением системы смазки тормозов и защитных вставок конической пластины скольжения, которые доступны как опции.

В докладе были подробно продемонстрированы конструкции новых фильер, приведены примеры фильер, уже изготовленных и поставленных российским заказчиком. В настоящее время компанией разработаны схемы поставки фильер и другого оборудования в Россию.

Мы очень рады были приветствовать на конференции наших давних партнеров из Италии компанию **Bongioanni Macchine**, которая много лет участвует в проекте КЕРАМТЭК как в России, так и в зарубежных мероприятиях. Директор по продажам **Роберто Мази** и региональный представитель **Тамара Русских** напомнили коллегам, что Bongioanni Macchine одна из старейших машиностроительных компаний для выпуска керамических строительных материалов, она была создана в 1907 г. и по настоящее время успешно работает в выбранном направлении.

Время пандемии компания использовала для модернизации собственного производства. В частности, более 5 млн евро были инвестированы в цеха изготовления машин и прессовой оснастки, где были модернизированы высокоточные станки с ЧПУ. От других компаний Bongioanni Macchine выгодно отличается высокой емкостью склада запасных частей для существующих машин, а также парком новых машин, которые находятся в процессе реализации.

Основной темой доклада стали фильеры с раструбами, конструкции которых также были обновлены во время пандемии. Заказчикам предлагаются линейка конических модульных фильер с одинарной/двойной тормозной системой серии OMEGA, оснащенных системой смазки с внешней регулировкой;



Большой интерес участников конференции вызвал доклад директора центра инженерных разработок «Машиностроительные технологии» ОмГТУ **В.Г. Штеле**. Он рассказал, что в Омском политехе к вопросу организации импортозамещения подошли системно. В июле 2022 г. университет получил грант Министерства промышленности и торговли РФ, а уже в сентябре был создан Центр инженерных разработок (ЦИР) для разработки комплектующих, конструкторской документации, оптимизации производства. Менее чем за год реализовано несколько крупных проектов: разработаны гидроциклоны из износостойкого чугуна ИЧХ28 для Инаглинского ГОКа, ранее импортируемые из США; изготовлены опытные образцы форсунок для каталитических систем, одобренные заказчиком; фильеры для каталитических систем Газпромнефти в настоящее время дорабатываются. НПО «Контур» тоже заказывал в Центре реинжиниринга некоторые детали. Так что кирпичникам есть куда обратиться в сложной ситуации.





Доклад **Р.Н. Гурова** несколько выбивался из общей канвы. Он представил свой опыт механизации и автоматизации технологических процессов производства керамического кирпича на заводе «Пионер» (Республика Дагестан) мощностью 15 млн шт. усл. кирпича в год на отечественной элементной базе.

Для последних лет, когда велось строительство мощных заводов на комплектном импортном оборудовании, данный проект является удивительным примером слаженной работы команды энтузиастов-единомышленников: владельца завода «Пионер» Э.С. Эмеева, Р.Н. Гурова, В.В. Курносова и других специалистов.

Для нового завода ИП «Гуров Р.» было изготовлено автоматизированное оборудование: автоматы резчики бруса и кирпича, автомат-укладчик сырца на сушильные рамки; элеватор-накопитель рамок с сырцом; многовилочный погрузчик; элеватор-снижатель, разбирающий рамки с высушенным кирпичом на цепной транспортер; автомат-перекладчик; автомат-садчик, послонно формирующий печной пакет. Тепловой агрегат нового завода – 24-камерная кольцевая печь со съёмным сводом, где управление режимом обжига ведется автоматизированно по программе, разработанной компанией «КОМАС» (хорошо известной участникам КЕРАМТЭК).

Следует отметить, что вопреки распространенному мнению идея строительства заводов малой и средней мощности, в том числе с сезонным режимом работы, оказалась вполне жизнеспособной и обоснованной для ряда южных и центральных регионов России и в перспективе для новых регионов, где сельское хозяйство является основным видом деятельности. Это обусловлено климатом, плотностью населения, традициями строительства и многими другими факторами.

Об этом уже не первый год говорит генеральный директор ЮЖНИИСтрома Н.Г. Гуров, постоянный участник КЕРАМТЭК, имеющий колоссальный опыт строительства заводов разной мощности во многих регионах России.

*В одном из последующих номеров журнала «Строительные материалы» будет опубликована статья, излагающая концепцию строительства сезонных заводов малой и средней мощности с предложениями по комплектации их исключительно отечественным оборудованием и экономическим обоснованием рентабельности таких предприятий.*



Участники конференции посетили кирпичный завод «Керамикстрой» – один из крупнейших заводов по производству строительной керамики в Омске. Завод был оснащен оборудованием ведущих европейских производителей и запущен в эксплуатацию осенью 2006 г. Как это нередко бывает с нашими предприятиями, он не раз переходил от одного собственника к другому, на некоторое время даже останавливался.

Как рассказал заместитель директора завода **А.В. Козлов**, в настоящее время завод выведен на стабильную работу, мощность составляет порядка 50 млн шт. усл. кирпича в год. В состав кирпичного завода «Керамикстрой» также входит собственный карьер с подтвержденными запасами сырья более 600 тыс. м<sup>3</sup>.



Два дня конференции пролетели незаметно. Коллеги общались буквально каждую минуту, свободную от докладов, – в перерывах, в автобусах, в неформальной обстановке. Прошедший КЕРАМТЭК дал большой объем информации и новые контакты. Появились новые идеи и у оргкомитета.

***Оставайтесь вместе, оставайтесь с нами!  
Объединение профессионалов гарантирует успех!***



# Выставка КЕРАМИКА КИТАЯ-2023

## Exhibition CERAMICS of CHINA-2023



19–22 июня 2023 г. в Кантонском выставочном комплексе в Гуанчжоу успешно прошла 37-я выставка CERAMICS CHINA-2023.

Журнал «Строительные материалы»®, МИАП КЕРАМТЭКС и выставка CERAMICS CHINA многие годы являются партнерами. Ограничения, связанные с пандемией, на несколько лет прервали наши поездки в Поднебесную, и вот наконец мы снова участвовали в экспозиции. Надо отметить, что журнал «Строительные материалы»® был единственным российским изданием – очным участником.

В этом году выставка CERAMICS CHINA проходила под девизом «Наращивание глобальной инновационной мощи, способствующей качественному развитию керамической промышленности». На площади в 70 тыс. м<sup>2</sup> разместились 682 экспонента из шестнадцати стран и регионов материкового Китая, Италии, Германии, Испании, США, Франции, Великобритании, Австралии, Кореи, Японии, России, Индии, Индонезии, Турции, Гонконга, Тайваня и др. Таким образом, выставка CERAMICS CHINA подтвердила позицию крупнейшего мирового события в области керамического оборудования и материалов.



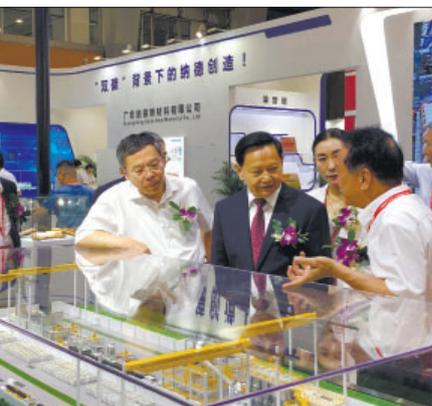
Традиционно выставка привлекает специалистов по керамике и торговых представителей из более чем шестидесяти стран мира, таких как Индия, Вьетнам, Бангладеш, Малайзия, Таиланд, Филиппины, Россия, Иран, Южная Корея, Япония и др. За четыре дня работы выставку посетили в общей сложности 60,4 тыс. человек.

Команда КЕРАМТЭКС была самой многочисленной российской организованной группой, в нее вошли руководители и ведущие специалисты крупнейших российских кирпичных заводов – постоянных участников конференции КЕРАМТЭКС. Конечно, многие коллеги приехали на выставку самостоятельно. На стенде журнала «Строительные материалы»®, было много радостных встреч. Мы даже шутили: только что виделись на конференции, и вот встреча в Китае – как не расставались!



Кроме выставочной программы организаторы совместно с медиапартнерами, такими как Ceramic News, Ceramic Info и Color & Glaze Web, а также отделением керамической посуды Китайской ассоциации керамической промышленности, Отделением керамических навесных фасадов и плит, Профессиональным комитетом по технологии монтажа керамической плитки и производства керамической продукции, Специальным комитетом Китайской ассоциации по обращению со строительными материалами, провели множество дополнительных мероприятий по производству оборудования и материалов в стране и за рубежом, продвигающих современные технологии, материалы и инновации.

Следует отметить, что экспозиция выставки претерпела существенные изменения, что в значительной степени обусловлено как изменениями в строительных технологиях, применяемых в городском строительстве Китая, так и вектором развития научных исследований. На фоне сокращения количества экспонентов – производителей оборудования для кирпичной промышленности существенно





выросло количество участников, представляющих оборудование и готовую продукцию отделочных керамических материалов. При этом очевидна тенденция выпуска большеформатных изделий и выпуска средств механизации их монтажа. Производители же кирпичного оборудования существенно увеличили его мощность, годовая производительность предлагаемых заводов составляет от 200 млн шт. усл. кирпича. Хотя справедливости ради отметим, что при заинтересованности со стороны потенциального партнера китайские машиностроители готовы обсуждать индивидуальные условия.

Другим существенно увеличившимся сегментом стало экологическое направление. Многие компании предлагали оборудование и материалы для водо- и газоочистки, специальную техническую керамику, ионообменники и т. п.

Очень популярен среди специалистов раздел выставки, где представлены огнеупорные и абразивные материалы, запасные части, пресс-формы и фильеры, услуги по проектированию для производственных предприятий.

Многие фирмы предлагали сырьевые материалы, добавки и пигменты, а также оборудование для производства сантехники, посуды и художественной керамики.

Учитывая, что не только наша редакция, но и практически все наши предприятия были несколько лет лишены возможности выезжать на зарубежные выставки, в этот раз мы не планировали дополнительную программу, так как у коллег дни были распланы почти по минутам. Многие задачи решили во время поездки, еще больше наметили планов.

Являясь событием мирового масштаба, получившим широкое признание коллег керамической промышленности, принимающих активное участие в нем, CERAMICS CHINA на протяжении тридцати семи лет выполняет миссию привлечения научных и технологических инноваций со всего мира и внедрения их на ведущих китайских предприятиях. Выставка CERAMICS CHINA своего рода флюгер и катализатор развития мировой керамической промышленности. Она чутко улавливает тренды и способствует их распространению в Китае. Экология, энергосбережение, использование вторичных ресурсов – разделы выставки, подтверждающие это.

Коллеги объясняют постоянный успех выставки слаженной работой различных ассоциаций, активностью профессионального и промышленного сообщества, широкой медиаподдержкой (в том числе нашей!) и особенно действенным вниманием правительства страны и региона. Следующая, 38-я выставка CERAMICS CHINA состоится в Гуанчжоу 18–21 июня 2024 г.

**Будем вместе развивать керамическую отрасль!**



УДК 693.22

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-32-37>

Р.Б. ОРЛОВИЧ<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор (orlowicz@mail.ru);

С.С. ЗИМИН<sup>2</sup>, канд. техн. наук, доцент (zimin\_serгей@mail.ru)

<sup>1</sup> ПИ Георекострукция (190005, г. Санкт-Петербург, Измайловский пр., 4)

<sup>2</sup> Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29)

## Резервы несущей способности каменных распорных конструкций

Проанализированы дефекты и механизмы повреждения каменных сводов, арок и лучковых оконных перемычек. Отмечены недостатки существующих методов их усиления. Обсуждаются запасы прочности цилиндрических и крестовых сводов с трещинами, а также положительное влияние на их несущую способность засыпки пазух. Приведены результаты экспериментальных исследований натурных образцов проездных и декоративных каменных арок. Установлено разгружающее влияние расположенных над ними участков каменной кладки. Выявлено, что в результате перераспределения усилий между арками и сопрягающимися с ними участками каменной кладки происходит изменение механизма разрушения и существенное увеличение несущей способности арок. Аналогичный эффект установлен для каменных перемычек различного криволинейного очертания. Эффект их совместной работы с расположенными над ними слоями каменной кладки возрастает с увеличением кривизны перемычек, а также толщины расположенной над ними каменной кладки. Выявленные резервы несущей способности каменных распорных конструкций во многих случаях позволяют избежать их дорогостоящего ремонта и усиления.

**Ключевые слова:** каменные своды, арки и перемычки, механизмы разрушения, резервы несущей способности.

**Для цитирования:** Орлович Р.Б., Зимин С.С. Резервы несущей способности каменных распорных конструкций // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 32–37. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-32-37>

R.B. ORLOVICH<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (orlowicz@mail.ru);

S.S. ZIMIN<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), Associate Professor (zimin\_serгей@mail.ru)

<sup>1</sup> «Georeconstruction» PI (4, Izmaylovskiy Avenue, Saint Petersburg, 190005, Russian Federation)

<sup>2</sup> Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (29, Politehnicheskaya Street, Saint-Petersburg, 195251, Russian Federation)

### Bearing Capacity Reserves of Stone Spacer Structures

Defects and mechanisms of damage to stone vaults, arches and arched window lintels are analyzed. The shortcomings of the existing methods of their strengthening are noted. The margins of safety of cylindrical and cross vaults with cracks are discussed, as well as the positive effect of sinus filling on their bearing capacity. The results of experimental studies of full-scale samples of passage and decorative stone arches are presented. The unloading effect of the masonry sections located above them was established. It was revealed that as a result of the redistribution of forces between the arches and the areas of masonry mating with them, the mechanism of destruction and a significant increase in the bearing capacity of the arches occur. A similar effect has been established for stone lintels of various curvilinear outlines. The effect of their joint work with the layers of masonry located above them increases with an increase in the curvature of the lintels, as well as the thickness of the masonry located above them. The identified reserves of the bearing capacity of stone spacer structures in many cases make it possible to avoid their costly repair and strengthening.

**Keywords:** stone vaults, arches and lintels, destruction mechanisms, bearing capacity reserves.

**For citation:** Orlovich R.B., Zimin S.S. Bearing capacity reserves of stone spacer structures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 32–37. (In Russian).

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-32-37>

Каменные распорные конструкции в виде сводов и арок имеют более чем тысячелетнюю историю и являются важными конструктивными элементами зданий и сооружений исторической застройки. В этих конструкциях наиболее полно реализуется прочность каменной кладки, работающей преимущественно на сжатие. Однако их проблема до сих пор является актуальной при оценке технического состояния, ремонтах, реконструкции и модернизации зданий. Часто наблюдаемыми дефектами распорных конструкций являются трещины, деградация и расслоение кладки и даже вывалы ее отдельных фрагментов, причиной которых могут быть эксплуатационный износ, перегрузки, динамические воздействия, техногенные и другие факторы [1–5]. Усиление таких конструкций иногда выполняется с нарушени-

ем требований, предъявляемых к историческим зданиям [6], либо с обеспечением чрезмерных запасов прочности (рис. 1). В связи с этим важным является изыскание резервов несущей способности, которые должны выявляться на этапе обследований конструкций. Следует отметить, что распорные системы, подобно другим пространственным конструкциям, способны к частичным изменениям или полной перестройке начальной рабочей схемы за счет своих скрытых резервов. К таким резервам относятся пространственная жесткость криволинейных форм, а также фактор снижения нагрузки за счет ее перераспределения между смежными с распорными системами конструкциями [4].

В соответствии с [7] проверочные расчеты конструкций и их элементов должны выполняться на

основании и с учетом уточненных обследований их геометрических параметров, фактических нагрузок, дефектов и повреждений, расчетных сопротивлений материалов и их реальной расчетной схемы. При этом наибольшие трудности связаны с выбором реальных расчетных схем, которые во многих случаях определяют действительную несущую способность распорных конструкций. Как известно, доминирующее влияние на несущую способность арочных конструкций имеет соотношение изгибающих моментов  $M$  и продольных сил  $N$ . При этом оптимальным является очертание арочных конструкций, совпадающее с кривой давления. Глубокие трещины, расчленяющие конструкции на несколько крупных соприкасающихся блоков, образуют как устойчивые одно-, трехшарнирные, так и мгновенно изменяемые мног шарнирные схемы, приводящие к разрушению сводов (рис. 2, *a, b*) [4]. Образование шарниров обусловлено выходом кривой давления за пределы ядра сечения и, как следствие, развитием трещин в растянутой зоне из-за низкого сцепления камней с раствором. На рис. 2, *c* приведена полученная авторами экспериментальная зависимость вертикальных деформаций « $u$ » замкового участка арки от величины нагрузки  $P$ . При этом можно выделить четыре характерных уровня нагрузки, при которых в связи с образованием шарниров происходило изменение статической схемы арки. На первом уровне при нагрузке  $P=6,7$  кН, составляющей около 45% величины разрушающей нагрузки  $P_p=14,8$  кН, в средней замковой части арки образовался первый шарнир. Следующие два шарнира 2 и 3 образовались практически одновременно при уровнях испытательной нагрузки составляющих соответственно

84 и 90% от разрушающей. Окончательное разрушение произошло при нагрузке  $P_p=14,8$  кН в результате образования четвертого шарнира в правой опорной пяте арки, после чего она превратилась в мгновенно изменяемую систему (рис. 2, *b*). Из приведенных экспериментальных данных следует, что наличие одной трещины в цилиндрических сводах не является признаком исчерпания их несущей способности. Это обстоятельство следует учитывать при обследовании сводов и расчетной проверке их действительной несущей способности в соответствии с требованиями норм [7, 8].

Существенным резервом несущей способности каменных сводов может быть учет влияния засыпки их пазух. Последняя обычно выполняется с целью выравнивания криволинейной поверхности сводов для устройства полов (рис. 3, *a*). При этом высота засыпки может быть как в одном уровне, так и выше шельги свода. В качестве материала засыпки в исторических зданиях обычно использовались строительные отходы в виде смеси песка, боя кирпича и остатков раствора. В последнее время при ремонтно-восстановительных работах такая засыпка часто заменяется на более легкую из керамзита. При этом в статических расчетах сводов засыпка их пазух обычно рассматривается как постоянная гравитационная нагрузка. В действительности засыпка взаимодействует со сводом, препятствуя возможным деформациям их опорных участков наружу, т. е. действует подобно связям и этим повышает его устойчивость [4].

Наиболее распространенными в исторических зданиях являются крестовые своды. Признаком исчерпания их несущей способности может быть образование трещин на внутренней поверхности распалу-

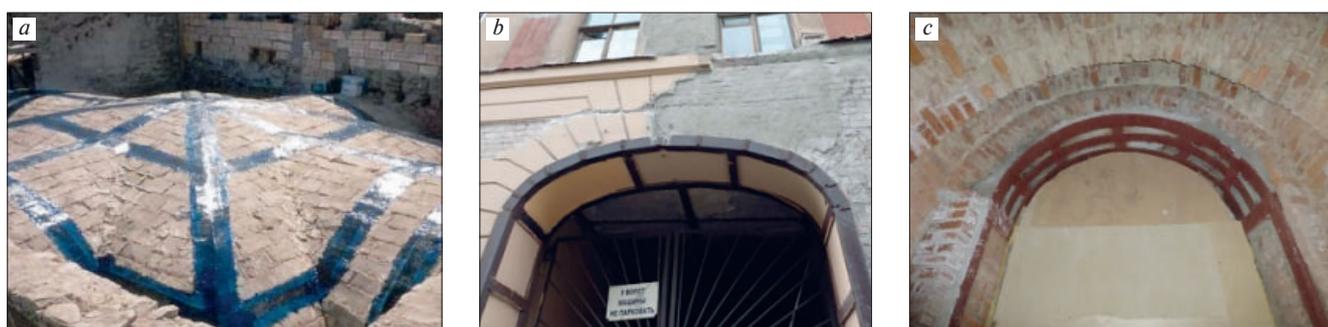


Рис. 1. Примеры нерационального усиления композитными материалами каменных сводов (*a*) и стальными элементами проездных арок (*b*) и оконных перемычек (*c*)  
 Fig. 1. Examples of the unnatural impact of composite materials on stone vaults (*a*) and steel damage to the passage arches (*b*) and window lintels (*c*)

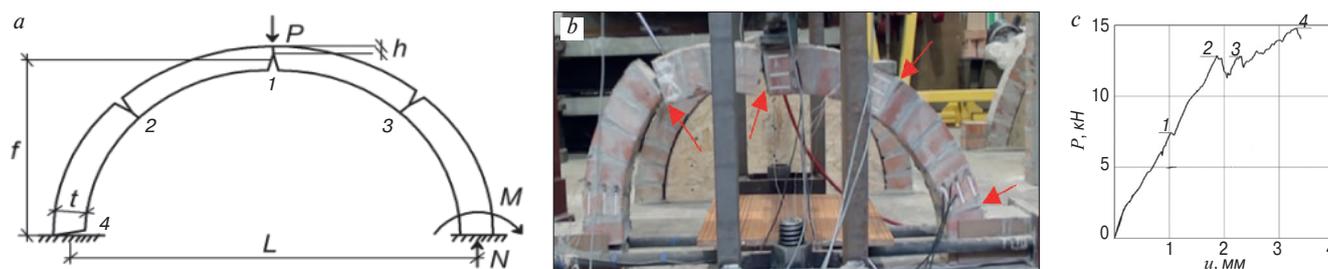
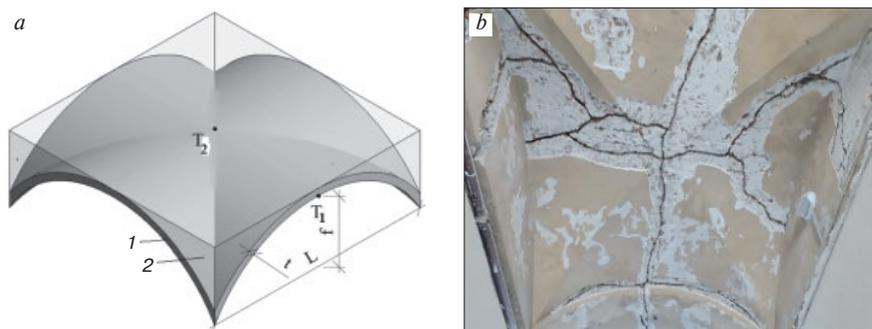
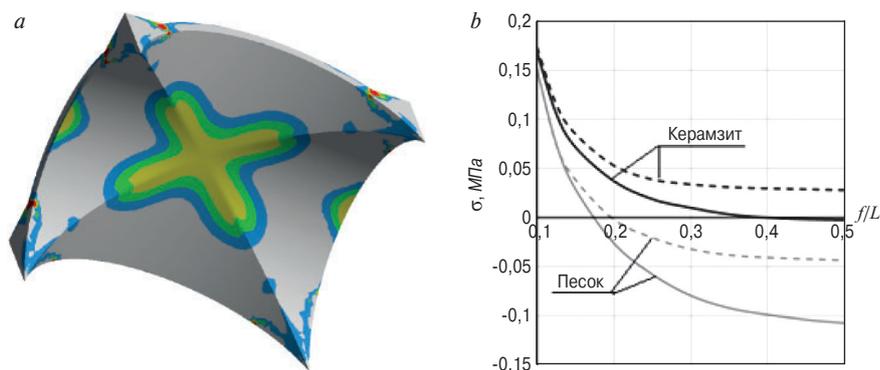


Рис. 2. Механизм образования шарниров в результате развития трещин в каменных арочных конструкциях  
 Fig. 2. The mechanism of hinge formation as a result of the development of cracks in stone arched structures

бок (рис. 3, *b*). Это связано с доминирующим влиянием на этой поверхности главных растягивающих напряжений (рис. 4, *a*). На рис. 4, *b* приведены результаты выполненных авторами численных исследований изменения максимальных напряжений в шельге распалубок квадратного в плане крестового свода пролетом  $L=8$  м и толщиной  $t=25$  см. Учитывалась нагрузка от его веса и веса засыпки, а также обобщенная распределенная нагрузка 5 кПа (полезная нагрузка и нагрузка от пола). Рассмотрены два варианта материала засыпки в виде песка и керамзита. Варьируемыми параметрами являлись соотношение  $f/L=0,1-0,5$  и модули упругости засыпки  $E$ , принимаемые равными:  $E=120$  МПа для песка плотностью  $1500$  кг/м<sup>3</sup> и  $E=15$  МПа для керамзита плотностью  $250$  кг/м<sup>3</sup>. В расчетной модели учтено трение между верхней поверхностью свода и засыпкой (принят обобщенный коэффициент трения  $0,6$  в соответствии с [9]). Из анализа пунктирных линий на рис. 4, *b* следует, что в зоне  $T_1$  шельги распалубок (рис. 3, *a*) при засыпке керамзитом напряжения являются растягивающими для всего диапазона изменения  $f/L$ , а при засыпке песком — только для пологих сводов с соотношением  $f/L < 0,2$ . При учете взаимодействия засыпки со сводом (сплошные линии на рис. 2, *b*) растягивающие напряжения существенно уменьшаются, причем эффективность влияния засыпки возрастает с увеличением ее модуля упругости. В связи с этим повышение эффективности низко модульной, но более легкой засыпки из керамзита возможно путем ее послойной проливки цементным молоком либо путем послойного армирования сетками из композитных материалов.

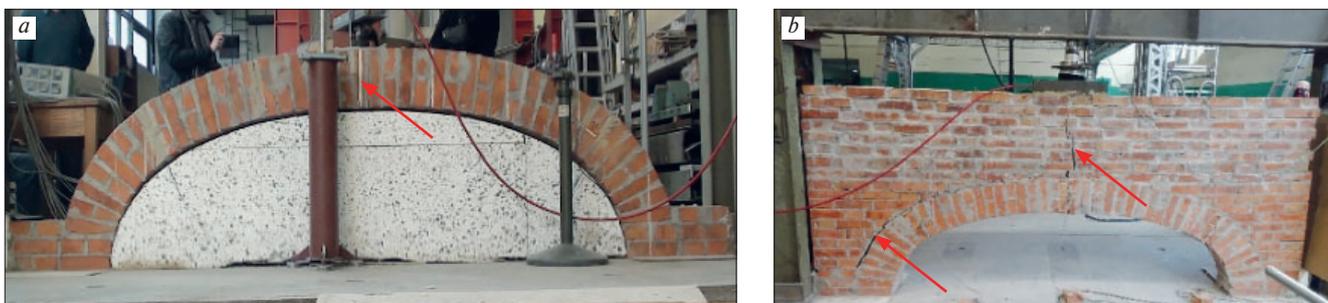


**Рис. 3.** Геометрические параметры квадратного в плане крестового свода (*a*) и образование трещин на его внутренней поверхности (*b*); 1 – распалубки, 2 – засыпка  
**Fig. 3.** Geometric parameters of a square cross vault (*a*) and the formation of cracks on its inner surface (*b*); 1 – stripping; 2 – backfill



**Рис. 4.** Изополя главных растягивающих напряжений на внутренней поверхности крестового свода (*a*) и зависимости максимальных напряжений в шельге распалубок (*b*) от соотношения  $f/L$  (пунктирные и сплошные линии соответственно без учета и с учетом взаимодействия засыпки со сводом)  
**Fig. 4.** Isofields of the main tensile stresses on the inner surface of the cross vault (*a*) and the dependence of the maximum stresses in the deck stripping (*b*) on the  $f/L$  ratio (dotted and solid lines, respectively, without and with the interaction of the backfill with the vault)

В соответствии с требованиями норм [7] в расчетных схемах эксплуатируемых конструкций должны учитываться реальные условия их сопряжения с другими смежными конструкциями. Это требование особенно актуально для каменных арок, являющихся интегральной частью зданий. К последним, в частности, относятся проезды арки с шириной поперечного сечения, равной толщине опирающихся на них стен. Нагрузка от последних обычно передается посредством простенков, опираемых на подоконные пояса высотой  $0,6-1,2$  м (рис. 1, *b*), благодаря чему происходит перераспределение контакт-



**Рис. 5.** Характер разрушения самостоятельной каменной арки (*a*) и с учетом расположенных над ней слоев стены высотой  $0,6$  м (*b*) (стрелками указаны зоны образования трещин)  
**Fig. 5.** The nature of the destruction of an independent stone arch (*a*) and taking into account the layers of the wall  $0,6$  m high located above it (*b*) (the arrows indicate the zones of crack formation)

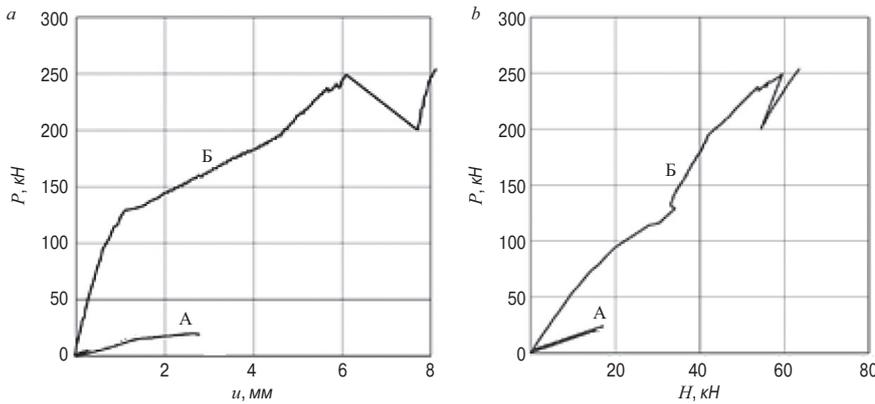


Рис. 6. Экспериментальные зависимости P-u (a) и P-H (b) для моделей арок А и Б  
 Fig. 6. Experimental dependences P-u (a) and P-H (b) for models of arches A and B

ного давления на арку. Характерными повреждениями таких арок являются трещины, деградация кладки и даже вывалы ее отдельных фрагментов, причиной которых могут быть эксплуатационный износ, перегрузки, динамические воздействия и другие факторы [3]. Ремонт таких арок чаще всего осуществляется путем инъектирования либо вычинки поврежденных участков кладки, а также усилением арок обрамляющими стальными элементами (рис. 1, b). Последний способ не только не соответствует предъявляемым к историческим зданиям требованиям [6], но и во многих случаях является излишним, поскольку не учитывает разгружающего влияния расположенной над аркой каменной клад-

ки. Ниже представлены результаты выполненных авторами лабораторных испытаний проездных арок коробового очертания пролетом  $L=2,5$  м со стрелой подъема  $f=0,5$  м. Для сравнения рассмотрены две модели арок: модель А в виде самостоятельной несущей конструкции (рис. 5, a) и модель Б, состоящая из арки и расположенным над ней слоем каменной кладки толщиной 0,6 м, который имитировал подоконный пояс (рис. 5, b). Модели выполнены из кирпича М150 на цементном растворе марки М75. Нагружение моделей силой  $P$  осуществлялось расположенным в середине их пролета гидравлическим домкратом посредством штампа, имитирующего междуоконный простенок шириной 50 см. Разрушение модели А произошло при нагрузке  $P=19,8$  кН из-за потери статического равновесия арки в результате ее преобразования в мгновенно изменяемую систему вследствие развития трещин (шарниров) в замковом и пролетных участках (рис. 5, a). Разрушение модели Б произошло при нагрузке  $P=250$  кН, т. е. почти в 13 раз большей, чем модели А. Первоначально в замковой части арки при нагрузке  $P=130$  кН возникла вертикальная трещина с последующим распространением в расположен-

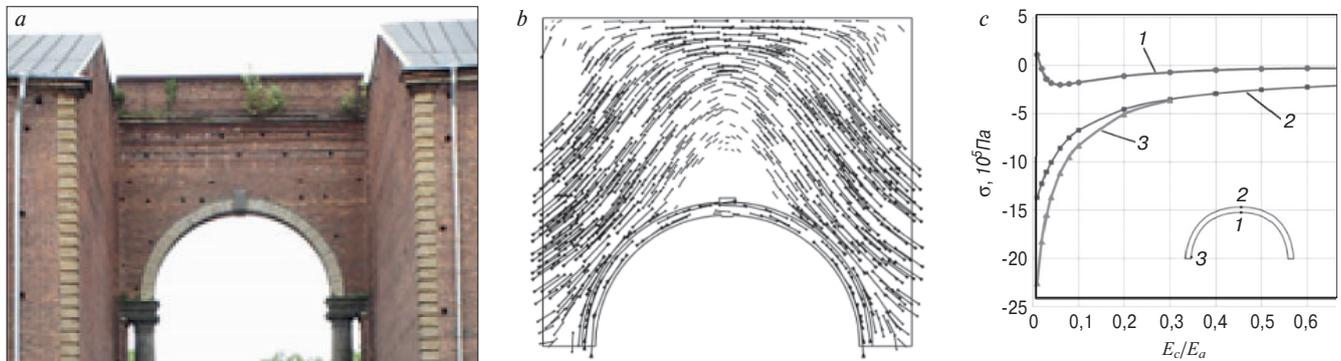


Рис. 7. Эффект включения в работу арки расположенной над ней каменной стены  
 Fig. 7. Effect of inclusion in the work of the arch of the stone wall located above it

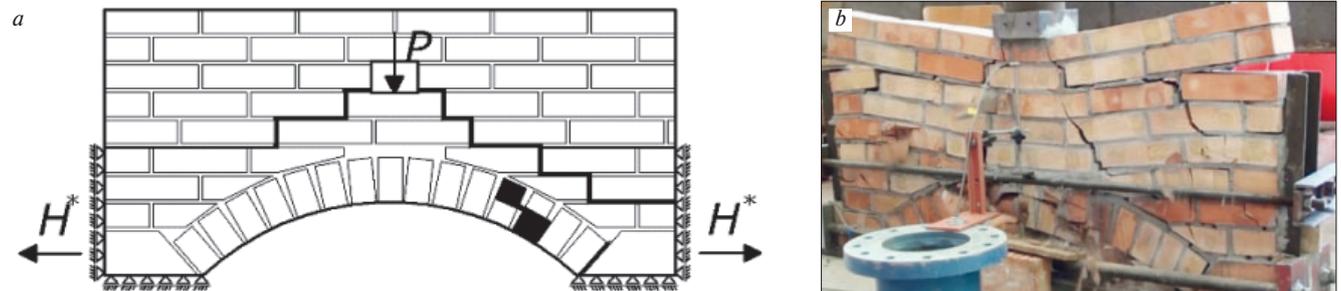


Рис. 8. Характер разрушения образцов с каменными лучковыми перемычками при действии сосредоточенной нагрузки  $P$ , расположенной над двумя (a) и пятью (b) рядами каменной кладки  
 Fig. 8. The nature of the destruction of samples with stone beam lintels under the action of a concentrated load  $P$  located above two (a) and five (b) rows of masonry

**Увеличение разрушающей нагрузки  $P$  на каменные перемычки различной кривизны с учетом влияния расположенной над ними каменной кладки**  
**Increase in the breaking load  $P$  on stone lintels of various curvature, taking into account the influence of the masonry located above them**

Зона действия нагрузки $P$	Лучковые ( $f/L=0,2$ )	Цилиндрические ( $f/L=0,5$ )	Стрельчатые ( $f/L=0,5$ )
В середине пролета	1,8	60	7,3
В 1/4 пролета	6,6	100	–

ную над ней каменную кладку. При дальнейшем возрастании нагрузки вплоть до разрушающей произошло отслоение арки от расположенной над ней каменной кладки, которая выполняла роль вторичной арки (рис. 5, *b*).

На рис. 6 представлены экспериментальные зависимости вертикальных прогибов «и» в шельге арок и горизонтального распора  $H$  в зоне их опирания от уровня нагрузки  $P$ . Из их анализа следует, что при одном и том же уровне нагрузки  $P$  жесткость модели Б была в 16 раз больше жесткости модели А, а усилия распора  $H$  соответственно в пять раз меньше.

Эффективность включения в работу арок расположенных над ними слоев каменной кладки существенно зависит от технического состояния последних. Наличие трещин, деградация кладки приводят к увеличению ее деформативности, снижая тем самым разгружающее взаимодействие с аркой. Примером тому может быть декоративная каменная арка, которая объединяет два каменных корпуса, расположенных на берегах протоки реки Мойки комплекса Новой Голландии в Санкт-Петербурге (рис. 7, *a*). Конструкция возведена во второй половине XVIII в. по проекту архитектора Ж.-Б. Валлен-Деламота и состоит непосредственно из арки полуциркулярного очертания пролетом 8 м и сечением 65×65 см, выполненной из известнякового камня. Над аркой возведена кирпичная стена толщиной 65 см и высотой 6,4 м, объединенная с торцевыми стенами расположенных по обе стороны речной протоки каменных зданий. В процессе инструментального обследования было установлено, что после многолетней эксплуатации из-за выветривания кладочных швов и деградации кирпича под действием атмосферных воздействий, в том числе загрязнения окружающей среды, кладка стены обладает рыхлой структурой. В то же время кладка самой арки находилась в удовлетворительном состоянии без явных признаков повреждений. С целью анализа напряженно-деформированного состояния арки с учетом деградации расположенных над ней слоев кладки стены авторами выполнены численные исследования с использованием комплекса конечно-элементного моделирования ANSYS. Первоначально анализировалось напряженное состояние конструкции от действия собственного веса арки и расположенной над ней стеной при одинаковых значениях модулей упругости их кладок. На рис. 7, *b* изображены траектории главных сжимающих напряжений в стене,

сопряженной с аркой, из анализа которых следует, что в стене над аркой образуется условная вторичная (дублирующая) арка, форма которой определяется траекторией главных сжимающих напряжений. Условная вторичная арка существенно разгружает расположенную под ней фактическую арку, во всех сечениях которой действуют только сжимающие напряжения, достигающие максимальных значений  $\sigma=0,19$  МПа в опорных пятах. Это значительно меньше установленного опытным путем расчетного сопротивления арочной кладки при сжатии  $R=0,5$  МПа. Однако при деградации кладки стены и вызванном этим уменьшением ее модуля упругости  $E_c$  по сравнению с модулем упругости  $E_a$  кладочного материала арки напряжения в последней существенно возрастают.

На рис. 7, *c* представлены графические зависимости максимальных напряжений  $\sigma$  в арке от соотношения модулей упругости каменной кладки стены  $E_c$  и арки  $E_a$ . Из их анализа следует, что с уменьшением соотношения  $E_c/E_a$  происходит перераспределение напряжений в сечениях арки. При  $E_c/E_a < 0,3$  в нижней замковой зоне сечения арки сжимающие напряжения уменьшаются и меняют знак на растягивающие (кривая 1). В то же время в верхней замковой зоне сечения сжимающие напряжения возрастают (кривая 2). Это связано с увеличением свободы горизонтальных и вертикальных перемещений пролетных сечений арки при уменьшении расположенной над ней жесткости стены. При приближении модуля упругости кладки стены к нулевому значению арка работает как самостоятельная конструкция под действием массы расположенной над ней стены. При этом наибольшие сжимающие напряжения возникают в опорных пятах арки (кривая 3), а их равнодействующая равна весу стены и арки. Следует отметить, что величина этих напряжений примерно в 10 раз превышает их величину при  $E_c=E_a$ , когда арка максимально разгружается при взаимодействии с расположенной над ней стеной.

Показательным примером наличия резервов несущей способности распорных конструкций являются каменные криволинейные перемычки. В соответствии с [9] нагрузка на перемычки от перекрытий и расположенных над ними участков каменной кладки рассматривается в виде гравитационных масс. В действительности указанные участки кладки работают совместно с перемычками, оказывая разгружающее влияние. В работе [10] приведены результаты экспериментальных исследований каменных перемычек

различной кривизны под действием сосредоточенных нагрузок  $P$  в виде опорных реакций балок перекрытий. В зданиях старой застройки такие балки обычно опираются на перемачки посредством расположенных над ними слоев каменной кладки стен. Для сравнения испытывались в натуральном масштабе самостоятельные перемачки различной формы и образцы с расположенными над ними слоями каменной кладки. При нагружении самостоятельно работающих перемачек их разрушение происходило в результате потери статического равновесия по аналогии с рис. 2, *b*. Перемачки с расположенными над ними слоями кладки разрушались в результате образования в последних наклонных трещин и раздробления кладки перемачек (рис. 8). Наклонный характер трещин свидетельствовал о формировании в расположенных над перемачкой слоях кладки вторичной перемачки, работающей совместно с основной. Причем эффект их совместной работы возрастает с увеличением стрелы подъема перемачек а также с увеличением толщины расположенных над ними слоев каменной кладки.

В таблице приведены соотношения разрушающих нагрузок для образцов с расположенными над перемачками слоями кладки и самостоятельно работающих перемачек. Наибольший эффект достигается при несимметричном нагружении перемачек, а также для цилиндрических перемачек с соотношением  $f/L=0,5$  как наиболее гибких. Благодаря этому в случае ремонта или увеличения нагрузки на перемачки представляется возможным избежать их усиления, например путем дублирования металлическими перемачками (рис. 1, *c*).

### Выводы

При оценке технического состояния каменных распорных конструкций зданий старой застройки целесообразно учитывать резервы их несущей способности. Применительно к каменным сводам к таким резервам относятся их пространственная жесткость и совместная работа с забутовкой пазух. В случае криволинейных перемачек над оконными и дверными проемами, арок над проездами, в том числе и декоративных, резервом их несущей способности является разгружающее влияние расположенной над ними каменной кладки стен. Учет таких резервов во многих случаях позволяет избежать дорогостоящего ремонта и усиления распорных конструкций.

### Список литературы

1. Бернгард В.Р. Арки и своды: Руководство по устройству и расчету арок и сводчатых перекрытий. СПб.: Типография Ю.Н. Эрлих. 1901. 128 с.
2. Ahnert R., Krause K.H. Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 1,2. Berlin, 2009.

3. Лахтин Н.К. Расчет арок и сводов. Москва, 1911. 468 с.
4. Исследование деформаций, расчет несущей способности и конструктивное укрепление древних распорных систем: Методические рекомендации. М., 1989.
5. Гроздов В.Т. Кирпичные своды перекрытий старых жилых и общественных зданий. СПб., 1999.
6. ГОСТ Р 59437–2021 «Сохранение памятников каменного зодчества. Общие требования».
7. СП 13-102–2003 «Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений».
8. СП 427.1325800.2018 «Каменные и армокаменные конструкции. Методы усиления».
9. СП 15.13330 «Каменные и армокаменные конструкции».
10. Орлович Р.Б., Новак Р., Деркач В.Н. Несущая способность каменных перемачек // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 7. С. 52–57.

### References

1. Bernhard V.R. Arki i svody: Rukovodstvo po ustrojstvu i raschetu arochnyh i svodchatyh perekrytij [Arches and vaults: A guide to the design and calculation of arched and vaulted ceilings]. St. Petersburg: Yu.N. Erlich. 1901. 128 p.
2. Ahnert R., Krause K.H. Typische Baukonstruktionen von 1860 bis 1960 zur Beurteilung der vorhandenen Bausubstanz. Band 1,2. Berlin, 2009.
3. Lakhtin N.K. Raschet arok i svodov [Calculation of arches and vaults]. Moscow. 1911. 468 p.
4. Issledovanie deformacij, raschet nesushchej sposobnosti i konstruktivnoe ukreplenie drevnih raspornyh sistem. Metodicheskie rekomendacii [Study of deformations, calculation of bearing capacity and structural reinforcement of ancient spacer systems. Guidelines]. Moscow. 1989.
5. Grozdov V.T. Kirpichnye svody perekrytij staryh zhi-lyh i obshchestvennyh zdaniy [Brick arches of floors of old residential and public buildings]. Saint Petersburg. 1999.
6. GOST R 59437–2021 Preservation of monuments of stone architecture. General requirements (In Russian).
7. SP 13-102–2003. Rules for the inspection of load-bearing building structures of buildings and structures (In Russian).
8. SP 427.1325800.2018. Stone and reinforced stone structures. Amplification methods (In Russian).
9. SP 15.13330. Stone and reinforced masonry structures (In Russian).
10. Orlovich R.B., Novak R., Derkach V.N. Bearing capacity of masonry flat arches. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2017. No. 7, pp. 52–57. (In Russian).

УДК 625.7/.8:691.175

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-38-47>

Д.В. МЕДВЕДЕВ<sup>1</sup>, инженер, первый заместитель генерального директора (medvedev@niitsk.ru);  
Ю.И. КАЛГИН<sup>2</sup>, д-р техн. наук, профессор (kalgin36@yandex.ru);  
Е.Н. СИМЧУК<sup>1</sup>, канд. экон. наук (simchuk@niitsk.ru),  
С.А. МИТРОФАНОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук, руководитель органа сертификации (bogomolovasa@niitsk.ru)

<sup>1</sup> Автономная некоммерческая организация «Научно-исследовательский институт транспортно-строительного комплекса» (АНО «НИИ ТСК») (111024, г. Москва, ул. Авиамоторная, 73А, стр. 16)

<sup>2</sup> Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84)

## Определение долговременной прочности геосинтетических материалов на основании расчета комплексного показателя долговечности

Приведен анализ современных зарубежных методик исследования долговечности геосинтетических материалов. Предложена математическая модель расчета комплексного показателя долговечности геосинтетических материалов, предназначенных для дорожного строительства. Проведены результаты мониторинга по оценке долговечности, а также результаты лабораторных и полигонных испытаний геосинтетических материалов, выполняющих различные функции в дорожных конструкциях. Сформирован перечень коэффициентов, предназначенных для расчета комплексного показателя долговечности исходя из функции геосинтетического материала в конструкции автомобильной дороги. Показаны технические и экономические преимущества использования комплексного показателя долговечности геосинтетических материалов в дорожном строительстве. Приведена методика вычисления комплексного показателя долговечности при учете каждой функции геосинтетического материала. Показано, как коэффициенты долговечности отображают влияние разных факторов на прочностные характеристики материала, таких как механические повреждения, повышенная температура, ультрафиолетовое излучение, химическое и биологическое воздействие и др. Приведен анализ результатов мониторинга применения предварительного национального стандарта, комплексных полигонных и лабораторных испытаний геосинтетических материалов. Показано использование результатов исследования для разработки нормативно-технической документации, применяемой в настоящее время на территории Российской Федерации, для определения долговечности геосинтетических материалов.

**Ключевые слова:** геосинтетические материалы, долговечность, долговременная прочность, дорожное строительство.

**Для цитирования:** Медведев Д.В., Калгин Ю.И., Симчук Е.Н., Митрофанова С.А., Определение долговременной прочности геосинтетических материалов на основании расчета комплексного показателя долговечности // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 38–47. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-38-47>

D.V. MEDVEDEV<sup>1</sup>, Engineer, First Deputy General Director (medvedev@niitsk.ru);

Yu.I. KALGIN<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (kalgin36@yandex.ru);

E.N. SIMCHUK<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Economics) (simchuk@niitsk.ru),

S.A. MITROFANOVA<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (bogomolovasa@niitsk.ru)

<sup>1</sup> Autonomous Non-Profit Organization "Scientific Research Institute of Transport and Construction Complex" (73A, Building 16, Aviamotornaya Street, Moscow, 111024, Russian Federation)

<sup>2</sup> Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya Street, Voronezh, 394006, Russian Federation)

### Determination of the Long-Term Strength of Geosynthetic Materials on the Basis of the Complex Durability Index Calculation

An analysis of modern foreign methods for studying the durability of geosynthetic materials is presented. A mathematical model for calculating the complex durability index for geosynthetic materials used in road construction is proposed. The results of monitoring were analyzed to assess the durability, as well as laboratory and field tests of geosynthetic materials that perform various functions in road structures. A list of coefficients for calculating a complex durability index based on the function of geosynthetic materials in a road structure has been formed. The technical and economic advantages of using a complex durability index of geosynthetic materials in road construction are shown. A method for calculating a complex durability index is presented, taking into account each function of a geosynthetic material. It is presented how the durability coefficients characterize the influence of various factors on the strength characteristics of the material: mechanical damage, elevated temperature, ultraviolet radiation, chemical and biological effects, etc. The results of monitoring the application of the preliminary national standard, field and laboratory tests of geosynthetic materials that perform various functions are presented. The use of research results for the development of normative and technical documentation, currently used to determine the durability of geosynthetic materials in the Russian Federation, is presented.

**Keywords:** geosynthetic materials, durability, long-term strength, road construction.

**For citation:** Medvedev D.V., Kalgin Yu.I., Simchuk E.N., Mitrofanova S.A. Determination of the long-term strength of geosynthetic materials on the basis of the complex durability index calculation. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 38–47. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-38-47>

Геосинтетические материалы широко используют при устройстве, реконструкции и капитальном ремонте конструкций автомобильных дорог и искусственных сооружений на них [1, 2]. От стабильности физико-механических и других свойств геосинте-

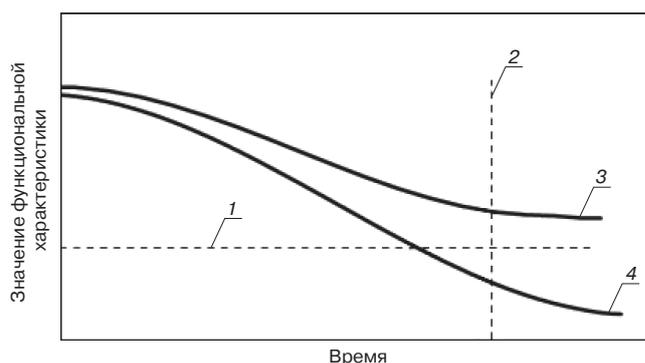
тического материала зависит качество, а также безопасность всей конструкции в целом, поэтому необходимо иметь достоверную информацию об изменении его характеристик в процессе эксплуатации. Долговечность геосинтетических материалов – это

способность выдерживать воздействия различных факторов, например, таких как погодные условия, механические, химические и биологические воздействия, на протяжении всего срока службы дорожной конструкции. Сведения о долговечности геосинтетических материалов необходимы прежде всего при проектировании конструкций автомобильных дорог и искусственных сооружений на них [3–5].

В ходе ранее проведенных исследований долговечности геосинтетических материалов было накоплено значительное количество информации о влиянии различных факторов (механических, физико-химических, биологических и др.) на долговременную прочность геосинтетических материалов [5–20].

Исследования долговечности проводят по двум направлениям. Первое предполагает проведение натурных испытаний в течение непродолжительного интервала времени (до одного года) с целью исследования негативного влияния различных факторов на прочностные характеристики геосинтетического материала и составление эмпирической математической модели для предсказания изменений его свойств. В работе [6] рассмотрена методика исследования долговечности геосинтетических материалов для укрепления откосов на морских побережьях, в том числе учитывающая воздействие волн, и предложена эмпирическая математическая модель. Негативное влияние ультрафиолетового излучения, влажности и загрязнения воздуха на прочностные характеристики геосинтетических материалов в процессе их эксплуатации отмечено в [7], включая описание пар влияющих факторов с синергетическим эффектом: «вызывающая ползучесть материала нагрузка – агрессивная среда», «вызывающая ползучесть материала нагрузка – ультрафиолетовое излучение». Результаты исследования совместного влияния вызывающей ползучесть материала нагрузки и влажности воздуха в лабораторных условиях приведены в [8].

Второе направление предполагает исследование негативного влияния каждого фактора на прочностные характеристики материала в отдельности с последующим моделированием их совокупного влияния исходя из области применения материала [9]. В [10–17] рассмотрено влияние механических повреждений при укладке на прочностные характеристики материала. В статьях [18, 19] приведены результаты оценки влияния ультрафиолетового излучения на прочность геосинтетических материалов, а в [20, 21] – результаты влияния агрессивных сред и повышенной температуры на прочность геосинтетических материалов из полипропилена. Следует отметить, что результаты частных исследований распространяются лишь на материалы определенной конструкции и конкретного сырья. Это ограничивает область применения предложенных методик и математических моделей для оценки долговечности материалов различных видов, изготовленных из разнообразного сырья.



**Рис. 1.** Зависимость приемлемой и неприемлемой функциональных характеристик геосинтетического материала от времени: 1 – требуемое значение функциональной характеристики; 2 – расчетный срок службы; 3 – приемлемая функциональная характеристика; 4 – неприемлемая функциональная характеристика

**Fig. 1.** Dependence of acceptable and unacceptable functional characteristics of a geosynthetic material on time: 1 – required value of the functional characteristic; 2 – estimated service life; 3 – acceptable functional characteristic; 4 – unacceptable performance

Накопленный опыт в области исследования долговечности был обобщен в международных стандартах: ISO/TS 13434:2020 Geosynthetics – Guidelines for the assessment of durability (Геосинтетические материалы – Рекомендации по оценке долговечности), ISO/TR 20432:2007 Guidelines for the determination of the long-term strength of geosynthetics for soil reinforcement (Рекомендации по определению длительной прочности геосинтетических материалов для армирования грунта). Методология проведения анализа долговечности геосинтетических материалов в стандарте ISO/TS 13434:2020 основана на оценке изменения функциональных характеристик, таких как прочность и секущий модуль. На графике (рис. 1) показано, как приемлемые (линия 3) и неприемлемые (линия 4) функциональные характеристики меняются с течением времени. Если значение функциональной характеристики (линия 1) меньше требуемого, геосинтетический материал считается неработоспособным. Запас работоспособности материала в любой момент времени определяется как расстояние между требуемым и фактическим значениями функциональной характеристики.

Функциональная характеристика геосинтетического материала может изменяться со временем в зависимости от воздействий, которые происходят с момента его изготовления и до конца срока эксплуатации конструкции, в составе которой он выполняет свою функцию. Так, во время транспортировки и хранения исходные функциональные характеристики геосинтетического материала могут быть ухудшены под влиянием погодных условий, а при его укладке в конструкцию и в технологическом процессе дальнейшего строительства автомобильной дороги материал подвержен механическим повреждениям, что приводит к еще большему падению показателей. В процессе эксплуатации автомобильной дороги, находящейся в дорожной конструкции, геосинтетический материал может быть подвержен химическому, биологическому и физическому воздействию от грун-

та земляного полотна, асфальтобетона и других материалов дорожных одежд, а также воздуха, воды, прочих органических веществ, что приводит к постепенному ухудшению функциональных характеристик.

Методы оценки устойчивости к различным факторам, воздействующим на геосинтетический материал на всех стадиях его жизненного цикла, описанные в стандарте ISO/TS 13434:2020, выбирают исходя из предназначения геосинтетического материала и определяют его устойчивость к влиянию следующих факторов:

- механические повреждения во время укладки, которые могут уменьшить прочность при растяжении или перфорации (продавливании);

- окисление, которое характерно, как правило, для геосинтетических материалов на основе полипропилена и полиэтилена и которое может вызвать уменьшение прочности или растрескивание поверхности. Данное воздействие может быть замедлено добавлением различных антиоксидантов при изготовлении геосинтетических материалов;

- старение под воздействием ультрафиолетового излучения и общее выветривание;

- гидролиз; например, для геосинтетических материалов из полиэфира и полиамида, гидролиз в водных растворах приводит к снижению прочности при растяжении;

- щелочное воздействие; например, для геосинтетических материалов из полиэфира, или применения добавок в полипропилен и полиэтилен приводит к уменьшению поперечного сечения и прочности при растяжении;

- кислотное воздействие; например, для геосинтетических материалов из полиамида или добавок в полипропилен и полиэтилен в аэробных условиях приводит к снижению прочности при растяжении;

- действие растворителей, которые могут вызывать разбухание полимеров, растрескивание под воздействием факторов окружающей среды и нагрузок, а также вымывание добавок;

- влияние сточных вод;

- ползучесть при сжатии или растяжении;

- циклы замораживания и оттаивания, влажности и сушки, ионного обмена.

Требования к долговечности геосинтетического материала формулируются с учетом расчетного срока службы материала, который зависит от его области применения (выполняемой функции). Как критерий долговечности используется ухудшение функциональных характеристик материала, например снижение прочности при растяжении на 35% к расчетному сроку службы.

В стандарте ISO/TS 13434:2020 предложена методика ускоренных испытаний, целью которых является усиление воздействия негативных факторов на материал. Однако указанный документ не содержит прямых указаний по оценке долговечности геосинтетических материалов, выполняющих различные функции в строительстве.

В стандарте ISO/TS 20432:2007 указаны рекомендации для определения долговременной прочности при растяжении геосинтетических материалов, используемых для армирования нижних слоев дорожной одежды из минеральных материалов, в том числе и грунта. Основой расчета долговременной прочности является средняя (исходная) прочность материала.

Для определения долговременной прочности геосинтетических материалов, используемых для армирования нижних слоев дорожной одежды, в стандарте ISO/TS 20432:2007 предложены следующие рекомендации, в соответствии с которыми расчет основан на снижении средней прочности материала при растяжении за счет следующих понижающих коэффициентов:

- коэффициент, отражающий деформацию, возникающую при длительном растяжении при постоянной нагрузке (ползучесть);

- коэффициент, отражающий механические повреждения материала при укладке;

- коэффициент, отражающий воздействие атмосферных условий на материал;

- коэффициент, отражающий воздействие химических и биологических факторов.

Результаты анализа стандартов по оценке долговечности геосинтетических материалов (ISO/TS 13434:2020 и ISO/TS 20432:2007) свидетельствуют о необходимости формирования номенклатуры показателей, влияющих на долговечность материалов, с учетом области их применения, а также разработки математической модели обобщенного показателя долговечности.

Цель проведенного исследования заключается в повышении достоверности результатов прогнозирования изменения прочностных характеристик геосинтетических материалов к концу срока их эксплуатации в дорожной конструкции. Для ее достижения необходимо разработать методику определения долговечности геосинтетических материалов, учитывающую область применения (функцию) геосинтетического материала в дорожной конструкции.

### **Методика определения показателя долговечности геосинтетических материалов, включающая лабораторные и полигонные испытания**

На территории Российской Федерации методика оценки долговечности геосинтетических материалов для дорожного строительства впервые была изложена в ОДМ 218.2.047 «Методика оценки долговечности геосинтетических материалов, используемых в дорожном строительстве». Необходимо отметить, что при разработке указанного ОДМ были использованы методики из стандарта ISO/TS 20432:2007, а в дальнейшем на основе результатов отечественных исследований был разработан ПНСТ 318–2018 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Методы испытаний на долговечность».

Таблица 1  
Table 1

Коэффициенты долговечности в зависимости от выполняемой функции  
Durability factors depending on the function performed

Коэффициент	Функция геосинтетического материала			
	Армирование асфальтобетонных слоев дорожной одежды	Армирование слоев дорожной одежды из минеральных материалов	Разделение слоев	Борьба с эрозией на откосах
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала при укладке	$k_{12}$	$k_{1x}$	$k_{1x}$	$k_{1x}$
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от ползучести	–	$k_2^*$	–	$k_2$
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия ультрафиолетового излучения	$k_3$	$k_3$	$k_3$	$k_3$
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия агрессивных сред	$k_{4x}$	$k_{4x}$	$k_{4x}$	$k_{4x}$
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от микробиологического воздействия	–	$k_5$	$k_5$	$k_5$
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания	$k_6$	$k_6$	$k_6$	$k_6$
Коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия повышенной температуры	$k_7$	–	–	–
Коэффициент, учитывающий прочность швов геосотовых материалов				$k_8$

**Примечание.** \* Только для геосинтетического материала, выполняющего функцию армирования основания и тела земляного полотна, откосов и армогрунтовых подпорных стен.



Рис. 2. Общий вид испытательного полигона с размещением геосинтетических материалов, засыпкой, уплотнением и извлечением  
Fig. 2. General view of the test site with geosynthetics placement, backfill, compaction and extraction

В соответствии с ПНСТ 318–2018 в качестве показателя долговечности геосинтетического материала используют комплексный показатель  $T_{\text{дол}}$ , характеризующий прочность после воздействия факторов в зависимости от выполняемой функции (области применения геосинтетического материала), который вычисляют по формуле:

$$T_{\text{дол}} = \frac{T_{\text{нор}}}{k_{\text{общ}}}, \quad (1)$$

где  $T_{\text{нор}}$  – прочность материала при растяжении, определяемая по ГОСТ Р 55030–2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения прочности при растяжении», используемому для всех материалов, кроме геосотовых, и по Приложению А ГОСТ Р 56338–2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования нижних слоев основания дорожной одежды. Технические требования» для геосотовых материалов;  $k_{\text{общ}}$  – обобщенный коэф-

фициент долговечности, вычисляемый в общем случае по формуле:

$$k_{\text{общ}} = k_{1x} k_2 k_3 k_{4x} k_5 k_6 k_7 k_8, \quad (2)$$

где  $k_{1x}$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от механических повреждений материала по ГОСТ Р 56336–2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Метод определения стойкости к циклическим нагрузкам» и ПНСТ 318–2018 при укладке в следующие материалы: песок –  $k_{11}$ ; щебень фракции от 4 до 8 мм –  $k_{12}$ ; щебень фракции от 31,5 до 63 мм –  $k_{13}$ ;  $k_2$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от ползучести по ГОСТ Р 56339–2015 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения ползучести при растяжении и разрыва при ползучести»;  $k_3$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия ультрафиолетового излучения по ГОСТ Р 55031–2012



Рис. 3. Образцы геосинтетических материалов, испытанные в рамках эксперимента  
Fig. 3. Samples of geosynthetic materials tested in the experiment

«Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к ультрафиолетовому излучению»;  $k_{4x}$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия агрессивных сред (выбирается наибольшее значение) по ГОСТ Р 55035–2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к агрессивным средам»: в кислотной среде ( $k_{41}$ ), в щелочной среде ( $k_{42}$ );  $k_5$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от микробиологического воздействия по ГОСТ Р 58830–2020 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Методика определения устойчивости геосинтетических материалов к микробиологическому воздействию»;  $k_6$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от многократного замораживания и оттаивания (далее – морозостойкость) по ГОСТ Р 55032–2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для дорожного строительства. Метод определения устойчивости к многократному замораживанию и оттаиванию»;  $k_7$  – коэффициент, учитывающий снижение прочности от воздействия повышенной температуры (теплостойкость) по ГОСТ Р 55034–2012 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические для армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды. Метод определения теплостойкости»;  $k_8$  – коэффициент, учитывающий прочность швов геосотовых материалов (его вычисляют только в случаях применения геосотовых материалов) по ГОСТ Р 56338–2015.

Выбор коэффициентов в зависимости от выполняемой функции приведен в табл. 1.

Коэффициенты, учитывающие уменьшение прочности от механических повреждений при укладке геосинтетического материала в песок ( $k_{11}$ ) и щебень фракции от 31,5 до 63 мм ( $k_{13}$ ), определяются в ходе полевых (полигонных) испытаний в соответствии с методикой, приведенной в ПНСТ 318–2018. Повреждение геосинтетического материала может возникнуть в результате контакта с гранулированными строительными материалами, что уменьшает его прочностные характеристики.

Общий вид испытательного полигона и основные операции полигонного испытания представлены на рис. 2.

Все остальные вышеописанные коэффициенты определяли в лабораторных условиях в соответствии с вышеуказанными национальными стандартами.

### Результаты исследования долговечности

В результате мониторинга применения ПНСТ 318–2018 были систематизированы и проанализированы значения коэффициентов долговечности 84 образцов геосинтетических материалов, применяемых в конструкциях автомобильных дорог. Эти материалы выполняют разные функции, такие как армирование асфальтобетонных слоев дорожной одежды, армирование слоев дорожной одежды из минеральных материалов, борьба с эрозией на откосах и разделение слоев из минеральных материалов. Значения коэффициентов были получены в ходе лабораторных испытаний, проведенных АНО «НИИ ТСК», а также полигонных испытаний, проведенных совместно с ООО «Мегатех инжиниринг» в период 2018–2020 гг.

В результате работы были исследованы в соответствии с ПНСТ 318–2018 образцы геосинтетических материалов (рис. 3), выполняющие следующие функции:

- армирование асфальтобетонных слоев дорожной одежды (георешетка с максимальной прочностью 40 кН/м);
- борьба с эрозией на откосах (геосотовый материал с максимальной прочностью 15 кН/м);
- разделение слоев (два нетканых геотекстиля с максимальной прочностью 5 кН/м);
- армирование слоев дорожной одежды из минеральных материалов (тканый геотекстиль с максимальной прочностью 30 кН/м).

Результаты лабораторных и полигонных испытаний дополнили результаты мониторинга применения ПНСТ 318–2018. Вся полученная информация была систематизирована и сгруппирована по функциональному назначению геосинтетических материалов, что показано в табл. 2–5 в зависимости от выполняемой функции.

Из данных табл. 2 следует, что на прочность при растяжении геосинтетических материалов, выполняющих функцию армирования асфальтобетонных слоев в дорожной одежде, наибольшее влияние оказывают механические повреждения при их укладке в щебень фракции 4–8 мм (усредненное значение потери прочности исследуемых материалов составляет примерно 22%), а наименьшее влияние – воздействие высокой

Таблица 2  
Table 2

**Долговечность геосинтетических материалов,  
выполняющих функцию армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды**  
**Durability of geosynthetic materials that perform the function of reinforcing asphalt concrete layers of pavement**

Материал	Сырье	$k_{12}$	$k_3$	$k_{41}$	$k_{42}$	$k_6$	$k_7$	$k_{общ}$	Максимальная прочность материала, кН/м	Расчетная прочность, кН/м
Георешетка вязаная	Полиэфир	1,1	1	1,1	1	1,1	1,1	1,5	100	67
Геосотовый материал	Полиэфир	1	1	1	1	1,01	1,03	1	20	20
Георешетка плетеная	Базальт	1	1,04	1	1	1,05	1,06	1,2	50	42
Георешетка плетеная	Базальт	1	1,07	1	1	1,05	1,01	1,1	100	91
Геоккомпозит	Полиэфир/ПП	1,05	1,02	1,04	1,25	1,05	1,04	1,5	50	33
Геоккомпозит	Полиэфир/ПП	1,03	1,04	1	1,05	1,03	1,06	1,2	80	67
Геоккомпозит	Полиэфир/ПП	1,1	1,08	1	1	1	1,02	1,2	50	42
Геоккомпозит	Полиэфир/ПП	1,15	1,04	1	1	1	1	1,2	80	67
Георешетка тканая	Полиэфир	1,15	1,35	1	1,03	1	1,07	1,7	65	38
Георешетка тканая	Полиэфир	1,15	1,02	1,01	1,09	1,06	1,06	1,4	50	36
Георешетка тканая	Полиэфир	1,16	1,13	1,08	1,1	1,07	1,07	1,7	50	29
Георешетка тканая	Полиэфир	1,18	1,19	1,11	1,2	1,11	1,07	2	40	20
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,53	1,04	1	1,58	1,54	1,04	4	100	25
Георешетка тканая	Полиэфир	1,21	1,01	1,03	1,08	1,04	1,03	1,4	50	36
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,28	1,04	1,19	1,35	1,06	1,07	2	50	25
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,08	1	1,17	1,41	1,05	1,04	1,7	200	118
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,18	1,01	1,22	1,36	1,01	1,01	1,7	100	59
Геополотно тканое	Полиэфир	1,81	1	1,05	1,09	1,07	1,07	2,3	150	65
Геополотно тканое	Полиэфир	1,56	1,06	1,11	1,09	1,11	1,05	2,1	400	190
Георешетка	Полиэфир	1,18	1,12	1	1,01	1	1,02	1,4	50	36
Георешетка	Полиэфир	1,19	1,06	1,08	1,06	1	1,03	1,4	50	36
Георешетка	Полиэфир	1,08	1,04	1	1,01	1	1,04	1,2	100	83
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,38	1	1,02	1,42	1,09	1,03	2,2	50	23
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,74	1	1	1,5	1,16	1,02	3,1	50	16
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,16	1	1	1,55	1,08	1,04	2	100	50
Георешетка вязаная	Стекловолокно	1,37	1	4,8	2,36	1,1	1,04	7,5	50	7
Георешетка вязаная	Полиэфир	1,05	1,02	1,04	1,08	1,01	1,07	1,3	50	38
Геоккомпозит	Полиэфир	1,39	1,05	1,03	1,06	1	1	1,5	40	27
Геополотно тканое	Полиэфир	1,3	1,14	1,11	1,11	1,04	1,07	1,8	800	444
Георешетка вязаная	Полиэфир	1,24	1,02	1,2	1,11	1	1,06	1,6	50	31
Георешетка вязаная	Полиэфир	1,36	1,07	1,2	1,11	1,03	1,04	1,9	100	53
Георешетка тканая	Полиэфир	1	1	1,02	1	1,02	1,03	1,1	80	73
Геополотно тканое	Полиэфир	1,17	1	1,08	1,07	1,01	1,04	1,3	400	308
Георешетка плетеная	Полиэфир	1,57	1,07	1	1,11	1	1,02	1,9	50	26
Георешетка тканая	Полиэфир	1,04	1,07	1,01	1,01	1	1,02	1,1	80	73
Георешетка тканая	Полиэфир	1,08	1,01	1	1,03	1	1,03	1,2	40	33

температуры (усредненное значение потери прочности около 4%). Также установлено, что сырье, из которого изготовлены вышеуказанные материалы, чувствительно к воздействию агрессивных сред (усредненное значение потери прочности составляет примерно 16% для кислотной среды и 17% для щелочной).

В целях армирования слоев дорожной одежды, устроенных из минеральных материалов, используются иные геосинтетические материалы, в отличие

от армирования асфальтобетонных слоев. При исследовании влияния на прочность при растяжении этих материалов выяснилось, что наибольший вред наносят повреждения при укладке в щебень (усредненная прочность у исследованных материалов уменьшается примерно на 28%), а наименьший вред наносит ультрафиолетовое излучение (усредненная прочность у исследованных материалов уменьшается примерно на 4%), что также следует из табл. 3.

**Таблица 3  
Table 3**

**Долговечность геосинтетических материалов,  
выполняющих функцию армирования слоев дорожной одежды из минеральных материалов  
Durability of geosynthetic materials that perform the function of reinforcing pavement layers from mineral materials**

Материал	Сырье	$k_{11}$	$k_{12}$	$k_{13}$	$k_3$	$k_{41}$	$k_{42}$	$k_5$	$k_6$	$k_{общ}$	Максимальная прочность материала, кН/м	Расчетная прочность, кН/м
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,08	1,03	1,79	1	1,03	1,03	1,08	1	2	40	20
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,05	1,03	1,04	1,03	1	1	1,24	1,05	1,4	55	39
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,13	1,02	1,19	1	1	1,03	1,09	1,02	1,4	30	21
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,43	1,09	1,01	1	1,03	1,01	1,31	1,02	2	40	20
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,2	1	1,22	1,02	1	1,02	1,04	1,02	1,3	120	92
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,13	1,04	1,33	1	1	1	1,19	1,11	1,8	40	22
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,34	1,04	1,12	1,09	1,02	1,02	1,4	1,03	2,1	30	14
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,04	1,03	1,07	1,09	1,03	1,03	1,23	1,02	1,5	40	27
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,19	1,01	1,39	1,05	1	1,04	1,34	1,01	2,1	45	21
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,07	1,37	1,46	1	1,11	1,1	1,22	1,07	2,1	29	14
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,09	1,11	1,12	1,01	1,07	1,06	1,05	1,02	1,3	20	15
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,07	1,01	1,11	1,01	1,07	1,2	1,04	1,04	1,5	16	11
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,07	1,04	1,07	1,08	1	1,38	1	1,11	1,8	20	11
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,09	1,15	1,07	1,08	1,2	1,21	1,02	1,11	1,7	22	13
Георешетка пластмассовая экструдированная	ПП	1,06	1,01	1,05	1,06	1	1	1	1	1,1	20	18
Геополотно тканое	Полиэфир	1,2	1	1,22	1	1,03	1,1	1,18	1,04	1,6	150	94
Геополотно тканое	Полиэфир	1,05	1	1,05	1,01	1,1	1,02	1,2	1,07	1,5	800	533
Геополотно тканое	Полиэфир	1,04	1,15	1,39	1,02	1,11	1,11	1	1,05	1,7	200	118
Геополотно тканое	Полиэфир	1,11	1,23	1,11	1,05	1,13	1,12	1,02	1,09	1,6	400	250
Геополотно тканое	Полиэфир	1,07	1,07	1,28	1,01	1,52	1,54	1,59	1,28	4,1	600	146
Геополотно тканое	Полиэфир	1,05	1,2	1,03	1,05	1,02	1,15	1,18	1,04	1,8	600	333
Геополотно тканое	Полиэфир	1,09	1	1,42	1	1,02	1,03	1,02	1,02	1,5	195	130
Геокompозит	Полиэфир/ПП	1,08	1	1,08	1,04	1,05	1,09	1,09	1,06	1,4	150	107
Геополотно тканое	Полиэфир	1,19	1,14	1,18	1,08	1,05	1,03	1,23	1,06	1,8	400	222
Геокompозит	Полиэфир/ПП	1,25	1,36	1,76	1,07	1,2	1,11	1,15	1,03	2,7	400	148
Геополотно тканое	Полиэфир	1,14	1,11	1,38	1,09	1,04	1,04	1	1,11	1,7	800	471
Геополотно тканое	Полиэфир	1,02	1,69	1,02	1,03	1	1	1	1,07	1,9	150	79
Геополотно тканое	Полиэфир	1,37	1,43	1,79	1,1	1	1,09	1,1	1	2,4	200	83
Геополотно тканое	Полиэфир	1,24	1,25	1,5	1,02	1,17	1,29	1,16	1,17	2,7	1000	370
Геополотно тканое	Полиэфир	1,25	1,47	1,57	1,04	1,05	1,22	1,29	1	2,6	400	154
Геополотно тканое	ПП	1	1,17	1,37	1,01	1,01	1,02	1	1,01	1,4	50	36
Геополотно тканое	Полиэфир	1,5	1,4	1,82	1,06	1,14	1,14	1,43	1,07	3,4	600	176

Таблица 4  
Table 4

**Долговечность геосинтетических материалов,  
выполняющих функцию разделения слоев дорожной одежды из минеральных материалов**  
**Durability of geosynthetic materials that perform the function of separating layers of pavement from mineral materials**

Материал	Сырье	$k_{11}$	$k_{12}$	$k_{13}$	$k_3$	$k_{41}$	$k_{42}$	$k_5$	$k_6$	$k_{общ}$	Максимальная прочность материала, кН/м	Расчетная прочность, кН/м
Геополотно нетканое	ПП	1,1	1,1	1,2	1	1,1	1,1	1,1	1	1,5	11	7
Геополотно нетканое	ПП	1,2	1	1,2	1	1	1,1	1,1	1,1	1,6	14	9
Геополотно нетканое	ПП	1,3	2,04	1,23	1,08	1,3	1,37	1,33	1	4	0,5	0,1
Геополотно нетканое	ПП	1,05	1,25	1,14	1,11	1	1	1,04	1	1,4	9	6
Геополотно нетканое	ПП	1,25	1,11	1,2	1,42	1	1,03	1	1,05	1,9	13	7
Геополотно нетканое	Полиэфир	1,33	1,25	1,7	1	1,22	1,96	1,1	1,05	3,8	16	4
Геополотно нетканое	Полиэфир	1,25	1,12	1,32	1,08	1	1	1	1,05	1,5	18	12
Геополотно тканое	ПП	1	1,51	2,93	1	1,01	1	1	1	3	25	8

Понижение прочности геосинтетических материалов, которые используются для разделения слоев дорожной одежды из минеральных материалов, в основном вызывается механическими повреждениями, которые возникают при укладке между песком и щебнем (наблюдается уменьшение усредненного значения прочности в 1,5 раза). Меньше всего прочность падает под воздействием микроорганизмов, где потеря показателя прочности исследованных материалов составляет около 3%. Как было установлено ранее, сырье, используемое для производства этих геосинтетических материалов, чувствительно к воздействию щелочей (потеря усредненного показателя прочности исследованных материалов составляет около 20%). Данные результаты приведены в табл. 4.

Для геосинтетических материалов, используемых для борьбы с эрозией на откосах, наиболее сильное влияние на показатель прочности при растяжении оказывают механические повреждения, возникшие во время их укладки в щебень (потеря прочности исследованных материалов составляет около 12%), тогда как наименее сильное влияние оказывает микробиологическое воздействие (потеря прочности исследованных материалов составляет около 1%) – см. табл. 5.

#### Результаты и обсуждение

Результаты проведенных исследований подтвердили актуальность решения задачи, заключающейся в повышении достоверности прогнозирования изменения прочностных характеристик геосинтетических материалов к концу срока их эксплуатации. Для ее решения необходимо было разработать методику определения долговечности геосинтетических материалов, учитывающую область применения (функцию) геосинтетического материала в дорожной конструкции. Результаты показали важность введения комплексного показателя долговечности для геосинтетических материалов. В качестве дальнейшего обсуждения указанного утверждения предположим

наличие двух материалов, выполняющих функцию армирования асфальтобетонных слоев дорожной одежды, которые назовем № 1 и 2. Для материала № 1 в соответствии с ПНСТ 318–2018 получено значение обобщенного коэффициента долговечности  $k_{общ}=1,1$ , а для материала № 2 –  $k_{общ}=4$ . Если в проектной документации на строительство указана требуемая прочность материала 40 кН/м, то ее следует рассматривать как прочность материала к концу периода эксплуатации, которая может быть определена как отношение исходной прочности материала к значению обобщенного коэффициента долговечности. Тогда при выборе материала под указанное проектное значение материал № 1 должен иметь исходную прочность не ниже 44 кН/м, а материал № 2 – не ниже 160 кН/м. Таким образом, разница характеристик материалов будет колоссальна, и не только по показателю прочности, но, очевидно, и по цене за 1 м<sup>2</sup>. Применение вышеописанной методики для сравнения двух сходных по предварительным характеристикам требуемой прочности геосинтетических материалов, изготовленных из одного сырья разными производителями, поможет исключить масштабное различие свойств материалов к концу периода их эксплуатации и тем самым повысить срок службы дорожных конструкций. И еще одним важным преимуществом использования комплексного показателя долговечности является обеспечение конкурентной борьбы на отечественном рынке геосинтетических материалов, где за счет усовершенствования технологии производства и применения сырья только с требуемыми значениями физико-химических характеристик можно получать наиболее качественный материал.

#### Заключение

Применение предложенной в работе методики определения долговечности геосинтетических материалов на основе расчета комплексного показателя долговечности направлено на повышение достоверности прогнозирования изменения прочностных

**Таблица 5  
Table 5**

**Долговечность геосинтетических материалов, выполняющих функцию борьбы с эрозией на откосах  
Durability of geosynthetic materials that perform the function of erosion control on slopes**

Материал	Сырье	$k_{12}$	$k_3$	$k_{41}$	$k_{42}$	$k_6$	$k_7$	$k_{общ}$	Максимальная прочность материала, кН/м	Расчетная прочность, кН/м
Георешетка вязаная	Полиэфи́р	1,1	1	1,1	1	1,1	1,1	1,5	100	67
Георешетка плетеная	Базальт	1	1,04	1	1	1,05	1,06	1,2	50	42
Георешетка плетеная	Базальт	1	1,07	1	1	1,05	1,01	1,1	100	91
Геокмпозит	Полиэфи́р/ПП	1,05	1,02	1,04	1,25	1,05	1,04	1,5	50	33
Геокмпозит	Полиэфи́р/ПП	1,03	1,04	1	1,05	1,03	1,06	1,2	80	67
Геокмпозит	Полиэфи́р/ПП	1,1	1,08	1	1	1	1,02	1,2	50	42
Геокмпозит	Полиэфи́р/ПП	1,15	1,04	1	1	1	1	1,2	80	67
Георешетка тканая	Полиэфи́р	1,15	1,35	1	1,03	1	1,07	1,7	65	38
Георешетка тканая	Полиэфи́р	1,15	1,02	1,01	1,09	1,06	1,06	1,4	50	36
Георешетка тканая	Полиэфи́р	1,16	1,13	1,08	1,1	1,07	1,07	1,7	50	29
Георешетка тканая	Полиэфи́р	1,18	1,19	1,11	1,2	1,11	1,07	2	40	20
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,53	1,04	1	1,58	1,54	1,04	4	100	25
Георешетка тканая	Полиэфи́р	1,21	1,01	1,03	1,08	1,04	1,03	1,4	50	36
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,28	1,04	1,19	1,35	1,06	1,07	2	50	25
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,08	1	1,17	1,41	1,05	1,04	1,7	200	118
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,18	1,01	1,22	1,36	1,01	1,01	1,7	100	59
Геополотно тканое	Полиэфи́р	1,81	1	1,05	1,09	1,07	1,07	2,3	150	65
Геополотно тканое	Полиэфи́р	1,56	1,06	1,11	1,09	1,11	1,05	2,1	400	190
Георешетка	Полиэфи́р	1,18	1,12	1	1,01	1	1,02	1,4	50	36
Георешетка	Полиэфи́р	1,19	1,06	1,08	1,06	1	1,03	1,4	50	36
Георешетка	Полиэфи́р	1,08	1,04	1	1,01	1	1,04	1,2	100	83
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,38	1	1,02	1,42	1,09	1,03	2,2	50	23
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,74	1	1	1,5	1,16	1,02	3,1	50	16
Георешетка плетеная	Стекловолокно	1,16	1	1	1,55	1,08	1,04	2	100	50
Георешетка вязанная	Стекловолокно	1,37	1	4,8	2,36	1,1	1,04	7,5	50	7
Георешетка вязанная	Полиэфи́р	1,05	1,02	1,04	1,08	1,01	1,07	1,3	50	38
Геокмпозит	Полиэфи́р	1,39	1,05	1,03	1,06	1	1	1,5	40	27
Геополотно тканое	Полиэфи́р	1,3	1,14	1,11	1,11	1,04	1,07	1,8	800	444
Георешетка вязаная	Полиэфи́р	1,24	1,02	1,2	1,11	1	1,06	1,6	50	31
Георешетка вязаная	Полиэфи́р	1,36	1,07	1,2	1,11	1,03	1,04	1,9	100	53
Георешетка тканая	Полиэфи́р	1	1	1,02	1	1,02	1,03	1,1	80	73
Геополотно тканое	Полиэфи́р	1,17	1	1,08	1,07	1,01	1,04	1,3	400	308
Георешетка плетеная	Полиэфи́р	1,57	1,07	1	1,11	1	1,02	1,9	50	26
Георешетка тканая	Полиэфи́р	1,04	1,07	1,01	1,01	1	1,02	1,1	80	73
Георешетка тканая	Полиэфи́р	1,08	1,01	1	1,03	1	1,03	1,2	40	33

характеристик геосинтетических материалов к концу срока эксплуатации, что было использовано при разработке стандарта ПНСТ 318–2018. Основным ее преимуществом является использование при вычислении комплексного показателя долговечности с учетом каждой функции геосинтетического материала номенклатуры коэффициентов долговечности.

Коэффициенты долговечности характеризуют воздействие определенных факторов на прочностные характеристики геосинтетического материала: механические повреждения, повышенная температура, ультрафиолетовое излучение и др. Результаты мониторинга применения ПНСТ 318–2018 проведенных полигонных и лабораторных испытаний гео-

синтетических материалов, выполняющих различные функции, были использованы при разработке ГОСТ Р 70060—2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы геосинтетические. Методы испытаний на долговечность». Указанный стандарт заменил ПНСТ 318—2018.

### Список литературы / References

1. Алоян Р.М., Петрухин А.Б., Грузинцева Н.А. Тенденции и перспективы применения геотекстильных материалов в дорожном строительстве // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2017. Т. 368. № 2. № 318—321.
1. Aloyan R.M., Petrukhin A.B., Gruzintseva N.A. Trends and prospects of use of geotextiles in road construction. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2017. Vol. 368. No. 2, pp. 318—321. (In Russian).
2. Лысова М.А. и др. Установление взаимосвязи выполняемых функций геотекстильного материала в строительном объекте с технологическими воздействиями на него // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2021. Т. 391. № 1. С. 32—37.
2. Lysova M.A. et al. Establishing the relationship between the functions performed geotextile material in a construction object with technological influences on it. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2021. Vol. 391. No. 1, pp. 32—37. (In Russian).
3. Баранов А.Ю. Определение долговечности геосинтетических материалов // *Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности*. 2018. Т. 41. № 3. № 66—68.
3. Baranov A.Yu. Determination of the durability of geosynthetic materials. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*. 2018. Vol. 41. No. 3, pp. 66—68. (In Russian).
4. Koffler A. et al. Geosynthetics in protection against erosion for river and coastal banks and marine and hydraulic construction. *Journal of Coastal Conservation*. 2008. Vol. 12. No. 1, pp. 11—17. <https://doi.org/10.1007/s11852-008-0023-x>
5. German geotechnical society recommendations for design and analysis of earth structures using geosynthetic reinforcements. EBGeo. 2011. 338 p.
6. Watanabe K. et al. Accelerated test for evaluating the durability of geosynthetics on coasts. *Coastal Engineering Proceedings*. 2014. Vol. 1. No. 34. <https://doi.org/10.9753/icce.v34.structures.49>
7. Almeida M.S.S. et al. Brazilian contributions to geosynthetics engineering. *Proceedings of the GeoAmericas 2020 – 4th Pan-American Regional Conference on Geosynthetics*. 26—29 April 2020. Rio de Janeiro, Brazil. 122 p.
8. Dias Filho J.L.E., Maia P.C.A. A Non-conventional durability test for simulating creep of geosynthetics under accelerated degradation. *International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering*. 2021. Vol. 7. No. 65. 13 p. <https://doi.org/10.1007/s40891-021-00310-w>
9. Greenwood J.H., Schroeder H.F., Voskamp W. Durability of geosynthetics. CRC Press. 2016. 352 p.
10. Carlos D.M., Carneiro J.R., Lopes M.D.L. Effect of different aggregates on the mechanical damage suffered by geotextiles. *Materials*. 2019. Vol. 12. No. 24. 4229. <https://doi.org/10.3390/ma12244229>
11. Hufenus R. et al. Strength reduction factors due to installation damage of reinforcing geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*. 2005. Vol. 23. No. 5, pp. 401—424. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2005.02.003>
12. Lim S.Y., Mccartney J.S. Evaluation of effect of backfill particle size on installation damage reduction factors for geogrids. *Geosynthetics International*. 2013. Vol. 20. No. 2, pp. 62—72. <https://doi.org/10.1680/gein.13.00002>
13. Huang C.-C., Wang Z.-H. Installation damage of geogrids: Influence of load intensity. *Geosynthetics International*. 2007. Vol. 14. No. 2, pp. 65—75. <https://doi.org/10.1680/gein.2007.14.2.65>
14. Pinho-Lopes M. Experimental analysis of the combined effect of installation damage and creep of geosynthetics. *Geosynthetics*. 2002. Vol. 4, pp. 1539—1544.
15. Greenwood J.H. The effect of installation damage on the long-term design strength of a reinforcing geosynthetic. *Geosynthetics International*. 2002. Vol. 9. No. 3, pp. 247—258. <https://doi.org/10.1680/gein.9.0217>
16. Almeida F., Carlos D.M., Carneiro J.R., Lopes M.D.L. Resistance of geosynthetics against the isolated and combined effect of mechanical damage under repeated loading and abrasion. *Materials*. 2019. Vol. 21. No. 12. 3558. <https://doi.org/10.3390/ma12213558>
17. Kongkitkul W., Tatsuoka F., Hirakawa D. Creep rupture curve for simultaneous creep deformation and degradation of geosynthetic reinforcement. *Geosynthetics International*. 2007. Vol. 14. No. 4, pp. 189—200. <https://doi.org/10.1680/gein.2007.14.4.189>
18. Dias Filho J.L.E., Maia P.C.A., Xavier G.D.C. Spectrophotometry as a tool for characterizing durability of woven geotextiles. *Geotext Geomembr.* 2019. Vol. 47. No. 4, pp. 577—585. <https://doi.org/10.1016/j.geotextmem.2019.02.002>
19. Koerner R.M., Hsuan Y.G., Koerner G.R. Lifetime predictions of exposed geotextiles and geomembranes. *Geosynthetics International*. 2017. Vol. 24. No. 2, pp. 198—212. <https://doi.org/10.1680/jgein.16.00026>
20. Carneiro J.R., Almeida P.J., Lopes M.L. Some synergisms in the laboratory degradation of a polypropylene geotextile. *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 73, pp. 586—591. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.10.0012>
21. Carneiro J.R., Morais M., Lopes M.L. Degradation of polypropylene geotextiles with different chemical stabilisations in marine environments. *Construction and Building Materials*. 2018. Vol. 165, pp. 877—886. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.067>

УДК 625.711.2

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-48-56>

Ю.В. ШТЕФАН<sup>1</sup>, канд. техн. наук (shtephan\_y\_v@mail.ru);  
Б.А. БОНДАРЕВ<sup>2</sup>, д-р техн. наук (Insp-48@mail.ru),  
Р.Э. АГАМОВ<sup>2</sup>, инженер (agamovr@inbox.ru);  
П.В. МОНАСТЫРЕВ<sup>3</sup>, д-р техн. наук (monastyrev68@mail.ru)

<sup>1</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (125319, г. Москва, Ленинградский пр-т, 64)

<sup>2</sup> Липецкий государственный технический университет (398000, г. Липецк, ул. Московская, 30)

<sup>3</sup> Тамбовский государственный технический университет (392000, г. Тамбов, ул. Советская, 106/5)

## Влияние эксплуатации машин и механизмов на риски при возведении и обслуживании лесовозной автомобильной дороги

Проанализированы современные вызовы, которые ставит перед строителями лесовозных автомобильных дорог нынешняя ситуация в Российской Федерации. Выявлены ключевые факторы технической эксплуатации лесодорожных машин и лесовозов, которые влияют на основные риски двух этапов жизненного цикла дороги – возведения и эксплуатации. При помощи построенной диаграммы причин и следствий удобно управлять факторами, влияющими на показатели надежности как самих машин, так и выполняемой машинами работы, изучать показатели качества, выявлять риски и управлять ими. Обобщены актуальные на сегодняшний день опасные факторы для двух стадий жизненного цикла – строительства и эксплуатации лесовозной автомобильной дороги; построена матрица критичности для качественного анализа рисков, составлен реестр рисков и предложены способы реагирования на них со стороны строительных организаций и заказчика. Предложены методы компенсации и управления техническими рисками через разработку системы нормирования рисков, надежность-ориентированное техническое обслуживание и создание цифровых двойников. Введение контроля заказчиком исполнения эксплуатирующей организацией планово-предупредительных ремонтов машин и механизмов, задействованных при возведении и обслуживании лесовозной автомобильной дороги, позволит улучшить качество выполненных работ.

**Ключевые слова:** жизненный цикл лесовозной автомобильной дороги, оценка рисков, управление техническими рисками, техническая эксплуатация машин, технологии строительства.

**Для цитирования:** Штефан Ю.В., Бондарев Б.А., Агамов Р.Э., Монастырев П.В. Влияние эксплуатации машин и механизмов на риски при возведении и обслуживании лесовозной автомобильной дороги // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 48–56. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-48-56>

Yu.V. SHTEPHAN<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (shtephan\_y\_v@mail.ru); B.A. BONDAREV<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering),

R.E. AGAMOV<sup>2</sup>, Engineer (agamovr@inbox.ru); P.V. MONASTYREV<sup>3</sup>, Doctor of Sciences (monastyrev68@mail.ru)

<sup>1</sup> Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319, Russian Federation)

<sup>2</sup> Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398000, Russian Federation)

<sup>3</sup> Tambov State Technical University (106/5, Sovetskaya Street, Tambov, 392000, Russian Federation)

### The Impact of the Operation of Machines and Mechanisms on the Risks in the Construction and Maintenance of a Logging Road

The modern challenges that the current situation in the Russian Federation poses to the builders of logging roads are analyzed. The key factors of the technical operation of forestry machines and timber trucks, which affect the main risks of the two stages of the life cycle of the road – construction and operation, are identified. Using the constructed cause and effect diagram, it is convenient to manage the factors that affect the reliability indicators of both the machines themselves and the work performed by the machines, study quality indicators, identify risks and manage them. The current hazards for two stages of the life cycle – the construction and operation of a logging road – are summarized, a criticality matrix for a qualitative risk analysis is built, a register of risks is drawn up and ways of responding to them by construction organizations and the customer are proposed. Methods for compensation and management of technical risks are proposed through the development of a risk rationing system, reliability-oriented maintenance and the creation of digital twins. The introduction of control by the customer of the execution by the operating organization of preventive maintenance of machines and mechanisms involved in the construction and maintenance of the logging road will make it possible to improve the quality of the work performed.

**Keywords:** life cycle of a logging road, risk assessment, technical risk management; technical operation of machines, construction technology.

**For citation:** Shtephan Yu.V., Bondarev B.A., Agamov R.E., Monastyrev P.V. The impact of the operation of machines and mechanisms on the risks in the construction and maintenance of a logging road. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 48–56. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-48-56>

Оценка технических рисков на стадиях возведения лесовозных автомобильных дорог и их гарантийного обслуживания налагает большую ответственность на риск-менеджеров, занятых их оценкой [1]. Конечно, независимая оценка рисков может помочь

на стадиях проектирования и изысканий проектов возведения лесовозной автомобильной дороги, как это отмечается в работах [2–3]. Но какова роль этих рисков, когда уже проект принят и утвержден? Обычно необходимы согласования внесения измене-

ний (в зависимости от оснащённости парком машин строительной организации), корректировки по имеющимся на рынке строительным материалам, имеющимся в наличии в исправном состоянии механизмам. Усложняет такие корректировки проекта тот факт, что сами механизмы с низким уровнем надёжности подчас не являются чем-то раз и навсегда определённым у исполнителя строительно-монтажных работ. Какие риски выходят на первый план в эксплуатируемых механизмах организациях и как на них воздействовать, разберёмся в данной работе. Используя опыт российских учёных и представителей производства, важно предложить методы управления рисками для двух последующих за проектированием стадий жизненного цикла лесовозной автомобильной дороги – возведения и эксплуатации. Причём последняя стадия требует не только поддержания построенного объекта в работоспособном состоянии, но и проведения его периодического мониторинга [4].

Проведённый авторами анализ рисков (см. таблицу) показал, что жизненный цикл лесовозной автомобильной дороги, реализуясь на важных двух стадиях ее жизненного цикла строительства и эксплуатации, сталкивается с новыми рисками, управлять которыми невозможно без подхода к реализации проектов возведения их на основе полного жизненного цикла. Как известно из теории надёжности, она закладывается на стадии проектирования, учитывается на этапе изготовления и производства, а реализуется уже на стадиях эксплуатации, мониторинга и утилизации. Вопросы надёжно-ориентированного подхода (RCM) в управлении рисками отказов транспортно-технологических машин рассматривались многими учёными [5–7], и не только по отношению к машинам и возводимым объектам, но даже к помещениям, где они обслуживаются и ремонтируются [8–9].

На сегодняшний день нерешёнными остаются многие вопросы управления рисками при эксплуатации машин, которые будут возводить лесовозную автомобильную дорогу и реализовывать заложенные в проекте показатели качества. Именно от качества ее возведения будут в итоге зависеть показатели эксплуатационной пригодности, долговечности и даже эффективность целой отрасли народного хозяйства – лесозаготовок. Впрочем, уже возведённые лесовозные дороги могут впоследствии превратиться не только в дороги местного значения, но и в военные тропы и пути подвоза пожарной техники для высоковероятных лесных пожаров, уничтожающих огромные территории ценных запасов качественной древесины – исчерпаемых природных ресурсов. От качества технологии возведения дорожной одежды будет зависеть, сможет ли она реализовать заложенный в нее потенциал и подтвердить требования надёжности, несущей способности лесовозной автомобильной дороги и долговечности, что не может не учитываться при анализе рисков.

### Актуальность

Лесопромышленный комплекс на сегодняшний день представляет собой большое количество не только самих лесозаготовительных и лесоперерабатывающих предприятий (а это порядка 5748 организаций), которые приносят в федеральный бюджет страны по 185 млрд р., но и 815 млн га самого леса с развитой сетью лесовозных дорог общей длиной более 918 тыс. км (Беляков М.С. Производственно-техническая инфраструктура лесопромышленного предприятия как объект исследования. Студенческая научная весна: Тезисы докладов Всероссийской студенческой конференции, посвященной 175-летию Н.Е. Жуковского, Москва, 01–30 апреля 2022 года. М., 2022. С. 582–583), но еще и 60 тыс. шт. парка лесовозов и 73,5 тыс. шт. – парк лесодорожных машин и тракторов, которые необходимо обслуживать, поддерживать их уровень надёжности, своевременно ремонтировать. Система управления надёжностью машин и механизмов, ориентированная только на текущее состояние машины, не обеспечивает заданный уровень вероятности ее безотказной работы, а значит, и гарантировать качество выполняемой ими работы невозможно. Усложняют положение значительная удаленность мест проведения работ по обслуживанию и ремонту машин от лесотехнических пунктов и значительная дальность возки древесины – в среднем более 90 км.

В разное время вопросами управления надёжностью занимались такие выдающиеся учёные, как Л.Л. Афанасьев, Л.В. Дехтеринский, В.А. Зорин, В.К. Фёдоров, а в лесотехническом комплексе при строительстве лесовозных дорог и при управлении надёжностью машин – В.Ф. Бабков, Б.И. Кувалдин, И.И. Леонович, С.И. Булдаков, Н.П. Вырко, В.В. Быков и многие другие. Однако современные требования к управлению жизненным циклом лесовозной автомобильной дороги и обязательная оценка рисков требуют адаптации требований надёжности и инструментов менеджмента качества к удовлетворению ожиданий потребителя.

Надёжно-ориентированный подход при назначении периодичности плановых технических воздействий на машины и оборудование давно позволяет поддерживать в работоспособном состоянии парк машин вне зависимости от их возраста и наработки. Кроме того, обязательный к исполнению технический регламент ТР ТС 010/2011 «О безопасности машин и оборудования», к которому отнесены многие лесодорожные машины, и системы менеджмента качества лесопромышленных предприятий (в том числе и сертифицированные на требования стандарта по экологическому менеджменту ГОСТ Р ИСО 14001–2016 «Системы экологического менеджмента. Требования и руководство по применению») требуют обязательной оценки рисков после проведения капитальных ремонтов такой техники. Качество процессов обслуживания и ремонтов, в свою очередь, зависят и от квалификации слесарей, и от возможности авторе-

монтажного производства, и от подходов к управлению надежностью как парка лесодорожных машин, так и самих лесовозных машин. Эти же технические риски могут лечь в основу управления техническим состоянием машины на этапе ее участия в возведении лесовозной автомобильной дороги. Следует также отметить, что ГОСТ Р ИСО 14001–2016 является адаптацией ГОСТ Р ИСО 9001–2015 «Системы менеджмента качества. Требования» и ГОСТ Р ИСО 31000–2019 «Менеджмент риска. Принципы и руководство» к системам экологического менеджмента предприятий лесотехнического комплекса. Следовательно, управление рисками для таких предприятий будет также обязательным.

Актуальность исследований в области управления рисками на всех стадиях жизненного цикла лесовозных дорог обусловлена развитием инфраструктуры как самих лесов, так и лесозаготовок в частности. Разрозненные источники информации для проведения анализа рисков и отсутствие закреплённого понятия «жизненный цикл лесовозной автомобильной дороги» требуют систематизации знаний об источниках опасностей при возведении конкретного объекта строительства. Ситуацию с оценкой рисков усложняют не только молодость науки рискологии, расположение ее на стыке таких наук, как теория надежности, экономика, машиностроение и многих других отраслей знаний, но и отсутствие аттестованных риск-менеджеров. От их знаний, умений и способностей оценивать всевозможные сложные ситуации, навыков обращения с рисками и возможностями будет зависеть очень многое. Но сегодня этому сложно научить в высших учебных заведениях, в которых модные направления подготовки «менеджмент» пользуются огромной популярностью среди абитуриентов.

Без системы нормирования допустимых уровней риска при отсутствии внешнего контроля за управлением и обращением с рисками невозможен контроль качества технологии возведения строительных объектов. В свою очередь, это приводит к непроизводительным потерям времени на строительство, заставляет исполнителей работ перекладывать эти риски на другие этапы жизненного цикла построенной лесовозной дороги. Это, конечно, недопустимо и чревато увеличением затрат, снижением работоспособности и долговечности дороги, увеличением выбросов отработанных газов как лесодорожной техникой, так и самими лесовозами, срывами лесозаготовок, повышением затрат на эксплуатацию дороги и в итоге к сокращению ее жизненного цикла.

Следует также учитывать и специфические риски, например такие:

- внедрение инновационных технологий ремонта деталей машин при поддержании их работоспособного состояния;
- вероятность нарушения технологии возведения элементов дорожной одежды лесовозной дороги

из-за снижения производительности и качества выполняемой машинами работы;

- задержки поставок запчастей на импортную технику;
- другие особенности организации технического обслуживания и ремонта техники, за которыми нет контроля со стороны заказчика выполняемой машинами работы.

Особенность учета специфических рисков в том, что сложно их не только предсказать, но и проследить их влияние, от причины появления до итоговых последствий. И здесь на помощь приходят современные инструменты, которыми уже должен обладать современный менеджер (по крайней мере его этому учили при получении им высшего образования), – это дерево отказов, галстук-бабочка при анализе рисков, матрица критичности и реестр анализируемых рисков, а также диаграмма Ишикавы, или, как ее еще называют, диаграмма «рыбья кость», использованные авторами в данной работе для систематизации и управления рисками.

На стадии строительства лесовозной дороги начинают проявляться такие риски, как нарушения технологии изготовления, хранения и поставки на объект сырьевых инертных материалов при отсутствии возможности использовать местные грунты, полезные ископаемые и вяжущие для возведения дорожных одежд лесовозной дороги. И здесь нельзя не учитывать то, что отечественный рынок надежных машин для дробления и сортировки по фракциям каменных материалов, подготовки и очистки твердых горных пород или других ископаемых крайне скудный, а с уходом с рынка импортных производителей дробилок, грохотов и кубиков [11] эта отрасль все больше заполняется не самыми передовыми импортными и отечественными машинами. Анализ зависимости рынка лесозаготовительных машин от импорта [12–13] показал, что это такие страны, как Италия, Финляндия, Швеция, в порядке убывания доли импорта.

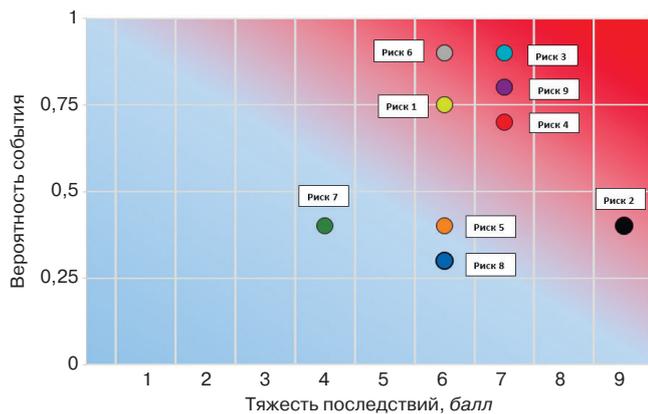
### Цель исследований

Выявление влияния факторов, проявляющихся на стадии эксплуатации машин, на основные этапы жизненного цикла лесовозной автомобильной дороги с целью снижения рисков на стадиях ее строительства и эксплуатации.

Решение задачи управления рисками следует начинать с составления реестра ключевых рисков (см. таблицу) и понимания того, на какие этапы жизненного цикла дороги будет влиять качество технической эксплуатации машин и механизмов, задействованных при возведении конструкций дорожных одежд лесовозной автомобильной дороги. Понимание источников опасностей позволило нам классифицировать риски и составить матрицу критичности (рис. 1), а затем занести в реестр предлагаемые меры воздействия на риски и реагирования на них.

Реестр рисков  
Risk Register

Риск	Описание риска	Оценка последствий	Оценка вероятности	Уровень риска	Предлагаемые меры по снижению риска
Контрольно-надзорные	Приемка результатов изысканий, утверждение проектной документации, приемка выполненных работ и т. д.	6	7.5	45	Контроль коррупции в органах исполнительной власти; независимая оценка рисков третьей стороной
Производители сырья	Сбои поставок, нарушения однородности производимых сырьевых материалов, разброс показателей качества, отсутствие отечественных аналогов	9	4	36	Долгосрочное сотрудничество с поставщиками сырья на взаимовыгодных условиях; согласование программы входных испытаний; сотрудничество с передовыми логистическими компаниями, оптимизация складских запасов
Риски несоблюдения технологии	Завышенные требования технологической документации, избыточные показатели технологичности, отсутствие методов экспресс-контроля, халатность технологов, возможность скрыть брак при приемке и сдаче в эксплуатацию; низкая надежность и возможности строительных машин	7	9	63	Проверка на предыдущей стадии, до использования материалов в технологии: оптимизация входного и операционного контроля; разработка экспресс-методов контроля каждого этапа технологии без страха выявлять несоответствия (приоритет не наказаний, а поощрений за создание условий отсутствия брака); невозможность передать брак на следующий этап; технический контроль допуска машин на стройку
Риски этапа инженерных изысканий	Заниженные требования к качеству выполненных работ, отсутствие контроля изысканий со стороны заказчика, отсутствие допуска СРО у исполнителей и др.	7	7	49	Прописывание в условиях торгов требований к качеству изысканий (фотофиксация, привязка к системе навигации, ГИС, единый реестр лесовозных автодорог), требования к исполнителям по использованию BIM-технологий – невозможность скрыть недостоверность изысканий; независимая оценка рисков изысканий и/или проекта
Риски этапа проектирования лесовозной дороги	Нарушение сроков проектирования, низкое качество требований к проекту со стороны заказчика, отсутствие альтернативной проработки, без технологий BIM	6	4	24	Повышение требований к проектным организациям по обязательному привлечению к проектам опытных риск-менеджеров, обучение ГИПов основам управления рисками; независимая оценка рисков проекта; ведение реестра рисков и воздействий на них в проектных организациях
Страховые риски у исполнителя строительных работ	Отсутствие требований страхования ответственности владельца дороги, низкое качество оценки страховых рисков страховщиком, завышенные/заниженные тарифы; недостаточность амортизационных средств для обновления техники	6	9	54	Неформальность допусков СРО через обязательное страхование ответственности за качество выполнения работ, невозможность передачи части остаточного риска на другие этапы жизненного цикла; своевременные технические обслуживание машин и исполнительных механизмов (техконтроль)
Инвестиционные риски	Недостаток финансирования, ненадежность инвестиционной политики со стороны государства, недостаток средств, потеря доверия исполнителям работ	4	4	16	Контроль финансирования со стороны государства; банковские гарантии; софинансирование проектов государством и частными инвестиционными компаниями
Требования к жизненному циклу	Завышенный/заниженный жизненный цикл продукции, заниженная ответственность исполнителей работ перед заказчиками, отсутствие контроля заказчиком и др.	6	3	18	Назначение гарантийного срока обслуживания построенной автомобильной дороги на основе статистики и оценки рисков
Эксплуатационные риски отсутствия машин и оборудования у исполнителя к началу работ	Отсутствие требований страхования ответственности владельца дороги, низкое качество оценки страховых рисков страховщиком, завышенные/заниженные тарифы	7	8	56	Контроль за службами технической эксплуатации машин и механизмов со стороны заказчика, своевременность плановых ТО и Р подвижного состава лесовозов и парка лесодорожных машин в межсезонный период, простоявания техники за счет долгосрочных договоров и возможности предоплаты выполненных работ



**Рис. 1.** Матрица критичности рисков: 1 – контрольно-надзорные риски; 2 – риски при взаимодействии с производителями сырьевых материалов для строительства; 3 – риски несоблюдения технологии; 4 – риски этапа изысканий; 5 – риски этапа проектирования; 6 – страховые риски у исполнителя строительно-монтажных работ; 7 – инвестиционные риски; 8 – требования к жизненному циклу; 9 – эксплуатационные риски отсутствия машин и оборудования у исполнителя к началу работ

**Fig. 1.** Criticality risk matrix: 1 – control and supervisory risks; 2 – risks when interacting with manufacturers of raw materials for construction; 3 – risks of non-compliance with technology; 4 – risks of the survey stage; 5 – risks of the design stage; 6 – insurance risks for the contractor of construction and installation works; 7 – investment risks; 8 – requirements for the life cycle; 9 – operational risks of lack of machinery and equipment at the contractor by the start of work

К лесодорожным машинам следует относить не только тракторы и вездеходную технику для перемещения по бездорожью и лежневым дорогам, но и мульчеры, роторы, грейдеры, а также колесные машины со сменным навесным оборудованием [3] и всю дорожно-строительную технику. Поэтому к машинам для возведения лесовозных дорог привлекаются и лесозаготовительные машины (для сооружения лежневых дорог), уплотнительные машины в виде катков и трамбователей. Качество и надежность этих машин значительно уступает импортным аналогам, а значит, риск простоев из-за роста вероятности появления отказов машин, конечно же, будет возрастать.

Основным способом защиты от данного вида рисков является проведение входного контроля поступающих на склад инертных материалов, оборудования и запчастей к нему, а также управление логистикой и сроками поставок. Важным этапом является контроль качества выпускаемых материалов самим производителем. При этом риск производителя (ошибочно забраковать годную продукцию) составляет 5%, а у потребителя он уже увеличивается до 10% (ошибочно принять бракованную часть поставленной партии). Это нормальная мировая практика, и она прописана в ГОСТ Р 50779.76–2018 «Статистические методы. Процедуры выборочного контроля по количественному признаку. Планы последовательного контроля для процента несоответствующих единиц продукции (стандартное отклонение известно)». Согласование планов контроля производителя и потребителя позволяет свести к минимуму негативные последствия от вероятности поставки некачественной продукции, не обременяя

никого увеличением себестоимости за счет контрольных операций.

### Риски несоблюдения технологии

При возведении лежневых дорог источником опасностей кроме природных опасностей существует риск нарушения сроков безопасной эксплуатации таких дорог в межсезонье. Такие риски невозможно компенсировать на стадии эксплуатации, они должны быть просчитаны ранее на стадии проектирования и изысканий. Прочность конструкции обеспечивается проволоочной увязкой сланей, поперечных бревен и продольных хлыстов, уложенных поверх бревен. На этом этапе строительства обязательно углубление слани для полного прилегания поперечного наката к грунту. Это позволяет равномерно распределить нагрузки от подвижного состава по ширине дороги. Небрежное выполнение этой операции ведет к поломке поперечного провисающего бревна, что характерно для зимнего периода строительства, когда слань опирается на замерзший грунт. Двухпорный поперечный настил не выдерживает нагрузки от транспорта. А весной, когда важно успеть вывезти заготовленный лес с зимней делянки, увеличивается опасность попадания нагруженного лесом автомобиля в вытаявшую, фактически заранее подготовленную «ловушку» [3]. Поэтому лежневки в период основного этапа вывозки ценного леса в период с ноября по март не самый надежный вариант конструкции из-за опасности переувлажнения грунтов.

В отличие от жесткой конструкции сланей, работающей по принципу понтонного моста, с заданной скоростью осадки, обусловленной скоростью фильтрации воды через торфяную подушку, эта конструкция может применяться совместно с геосетками. Они хорошо зарекомендовали себя с нежесткими дорожными одеждами при строительстве лесовозных дорог. Благодаря использованию геосеток значительно повышаются сроки службы лесовозной дороги, особенно в осенний и весенний периоды паводков. Но здесь возникает вероятность отсутствия на отечественном рынке геосеток чисто российского производства, а значит, риск ухода с рынка этих производителей нельзя сбрасывать со счетов.

Сравнение строительства с использованием сланей и традиционных технологий укрепления грунтов отходами металлургической промышленности показывает упрощение технологии, снижение рисков ее нарушения, сокращение парка строительной техники в пользу последних. Кроме того, появляется возможность переустройства лесовозной дороги в дорогу для военной техники, а затем в дорогу местного назначения общего пользования с капитальным покрытием. Это невозможно в случае использования сланей, их надо удалять во избежание роста вероятности гниения в увлажненных слоях глинистого грунта, поскольку тяжесть последствий этого риска будет высокой.



Способом компенсации риска нарушения технологии возведения лесовозных дорог может выступать страхование рисков производителей работ по аналогии с системой саморегулирования (СРО). В строительной отрасли на сегодняшний день эта система вызывает множество нареканий как со стороны самих СРО, так и со стороны их членов. Но система страховых взносов членов СРО там работает исправно.

### Факторы, снижающие качество строительных работ

Анализ множества факторов, влияющих на эффективность эксплуатации машин, позволяет провести ранжирование, выполненное авторами при помощи диаграммы Ишикавы (рис. 2).

Напомним принцип построения такой диаграммы причин и следствий: чем ближе к основному хребту или к голове диаграммы расположен фактор, тем он важнее, весомее и значимее влияет на следствие.

### Обсуждение результатов

Как видно на рис. 2, существует множество факторов технической эксплуатации машин и оборудования, задействованных при возведении лесовозной дороги, а также самих лесовозов. Построенная диаграмма позволила нам выявить наиболее значимые из них: это уровни надежности сборочных единиц машин, заложенные на стадии их проектирования и поддерживаемые на стадии их эксплуатации своевременной заменой и превентивными мероприятиями, которые каждая эксплуатирующая организация выбирает самостоятельно. И здесь нельзя недооценить принцип теории надежности – чем проще машина, ее устройство, тем она надежнее. С другой стороны, системы автоматизации машин как контроля исполнения технологических процессов строительства и обслуживания дороги берут на себя львиную долю риска человеческого фактора. Здесь поможет система удаленной диагностики машин (Claas Remote Service) и создание так называемых цифровых двойников машин [5–6; 14–15] (Алексеев С.А., Михеева Т.И. Применение транспортного цифрового двойника в интеллектуальной транспортной геоинформационной системе. *ИТ & транспорт: Сборник научных статей*. Т. 17. Самара, 2022. С. 3–16). Также не менее важно проведение плановых мероприятий по своевременному техническому обслуживанию и ремонту техники, которую обычно заказчик строительных работ даже не отслеживает у исполнителя. А между тем этот параметр вполне способен компенсировать часть риска потери работоспособности машины. Кроме того, системы автоматического регулирования технологических параметров (например, система нивелировки высотных отметок, которая может быть установлена на любую землеройную машину) требуют не только проведения плановых работ для поддержания ее уровня надежности, тщательной подготовки перед каждым началом работ, но и метрологии. Система должна быть откалибрована метрологической служ-

бой как средство измерений с периодичностью не реже раза в год. Такой порядок предусматривается ст. 13. Федерального закона № 102-ФЗ от 26.06.2008 «Об обеспечении единства измерений» (с изм. и доп., вступ. в силу с 29.12.2021 г. [http://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_77904/3bfb763ea01f7fc945dd7b589037fea5b6c90643/](http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/3bfb763ea01f7fc945dd7b589037fea5b6c90643/) Дата обращения 13.03.2023) на добровольном основании. Это следует учитывать при обновлении сильно устаревшего парка машин.

На сегодняшний день вступила в силу Стратегия развития лесного комплекса до 2030 года (Стратегия развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года. Утверждена распоряжением Правительства РФ от 11.02.2021 г. <https://docs.cntd.ru/document/573658653?marker=65A0IQ> Дата обращения 13.03.2023). Согласно этой стратегии парк машин в лесном хозяйстве имеет большой износ, в том числе моральный. Поэтому без грамотно организованной системы управления надежностью парка машин через систему планово-предупредительных ремонтов снижения качества работ, выполняемых лесодорожными машинами, не избежать.

### Выводы

Установлены основные источники опасностей и факторы организации технической эксплуатации машин и механизмов, задействованных при возведении конструкций лесовозных автомобильных дорог. В ходе исследований установлено, что не только надежно-ориентированный подход к назначению плановых технических воздействий помогает снижать риски. Современный уровень развития цифровых технологий уже позволяет проводить удаленную диагностику многих машин и создавать цифровые двойники. Все перечисленные меры в совокупности с усилением контроля своевременности проведения таких работ помогут снизить риски при возведении и эксплуатации лесовозных автомобильных дорог. Предложен подход к управлению рисками на основе жизненного цикла построенного объекта. В качестве мер, компенсирующих риски, предложены такие как:

- установка автоматических систем автоматизации управления технологическими машинами, снижающие риски нарушения технологии строительства и эксплуатации;
- разработка системы нормирования и оценки уровня рисков на завершающей стадии строительства;
- использование страхования ответственности исполнителя работ.

Использование возможностей создания цифровых двойников машин и проведение удаленной диагностики машин следует учитывать при обновлении парка машин для строительства и обслуживания построенных дорог.

Всесторонняя оценка рисков на всех стадиях жизненного цикла лесовозной автомобильной дороги позволит своевременно выявлять риски и воздействовать на них, не передавая на следующую стадию, развивать сеть лесовозных автодорог.

## Список литературы

1. Штефан Ю.В., Бондарев Б.А. Жизненный цикл лесовозной автомобильной дороги и управление рисками на стадиях проектирования и изысканий // *Строительные материалы*. 2023. № 4. С. 80–88. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-80-88>
2. Штефан Ю.В., Бондарев Б.А., Янковский Л.В. Укрепление глинистых грунтов временных лесовозных дорог отходами промышленности и металлургическими шлаками // *Строительные материалы*. 2020. № 4–5. С. 80–89. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-80-89>
3. Штефан Ю.В., Бондарев Б.А. Управление рисками в требованиях стандартов ИСО применительно к лесовозным дорогам // *Научный журнал строительства и архитектуры*. 2020. № 1 (45). С. 85–97. DOI: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.45.1.007>
4. Гаспар Г., Седивы С., Дудак Ю., Сковайса М. Метеорологическое обеспечение исследований по мониторингу состояния лесных дорог. *2021 2<sup>nd</sup> International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*. Тричи (Индия). 2021. С. 1265–1269. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOSEC51865.2021.9591632>
5. Кателани М., Чиани Л., Галар Д., Патризи Дж. Оптимизация политик обслуживания для системы отклонений с использованием обслуживания, ориентированного на надежность, и мониторинга состояния на основе управляемых данных // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Т. 69. № 9. С. 6241–6249. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.2968160>
6. Зорин В.А., Пегачков А.А. Прогнозирование технического состояния и рисков строительной техники на основе оперативного контроля диагностических параметров // *2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. М., 2022. С. 1–5. DOI: [10.1109/TIRVED56496.2022.9965521](https://doi.org/10.1109/TIRVED56496.2022.9965521)
7. Кочетков А.В., Андропова С.Ю., Щеголева Н.В., Валиев Ш.Н., Талалай В.В. Отраслевая система управления риском в техническом регулировании транспортного строительства // *Строительные материалы*. 2018. № 5. С. 61–67. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-61-67>
8. Якубович И.А., Якубович А.Н. Вероятностное моделирование надежности конструкций автотранспортных предприятий. *Актуальные вопросы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта: Сборник научных трудов по материалам 81-й научно-методической и научно-исследовательской конференции МАДИ*. М., 2023. С. 204–210.
9. Харченко А.О., Харченко А.А., Владецкая Е.А. Использование вероятностных методов оценки надежности технических объектов на примере технологических и автомобильных систем // *Мир*

## References

1. Shtefhan Yu.V., Bondarev V.A. Life cycle of a logging road and risk management at the design and survey stages. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 4, pp. 80–88. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-80-88>
2. Shtefhan Y.V., Bondarev B.A., Yankovskii L.V. On strengthening temporary logging road clay soil by industrial waste and metallurgical slags. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 4–5, pp. 80–89. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-780-4-5-80-89>
3. Shtefhan Y.V., Bondarev B.A. Risk management in requirements of the ISO standards in relation to logging roads. *Nauchnyi zhurnal stroitel'stva i arkhitektury*. 2020. No. 1 (45), pp. 85–97. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.25987/VSTU.2020.45.1.007>
4. Gaspar G., Sedivy S., Dudak J., Skovajsa M. Meteorological support in research of forest roads conditions monitoring. *2021 2<sup>nd</sup> International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*. Trichy, India. 2021, pp. 1265–1269. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICOSEC51865.2021.9591632>
5. Catelani M., Ciani L., Galar D., Patrizi G. Optimizing maintenance policies for a yaw system using reliability-centered maintenance and data-driven condition monitoring. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2020. Vol. 69, No. 9, pp. 6241–6249. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2020.2968160>
6. Zorin V. A., Pegachkov A. A. Forecasting the technical condition and risks of construction engineering based on operational monitoring of diagnostic parameters. *2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*. 2022, pp. 1–5. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIRVED56496.2022.9965521>
7. Kochetkov A.V., Andronova S.Yu., Shchegoleva N.V., Valiev Sh.N., Talalai V.V. A branch system of risk control in technical regulation of transport construction. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 5, pp. 61–67. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-759-5-61-67>
8. Yakubovich I.A., Yakubovich A.N. Stochastic simulations of reliability constructions of motor transport enterprises. *Current issues of technical operation and car service of rolling stock of automotive transport: Collection of scientific papers based on the materials of the 81<sup>th</sup> scientific-methodical and research conference of MADI*. Moscow. 2023, pp. 204–210. (In Russian).
9. Kharchenko A.O., Kharchenko A. A., Vladetskaya E.A. The use of stochastic methods for assessing the reliability of technical objects on the example of technological and automotive systems. *Mir transporta i tekhnologicheskikh mashin*. 2019. No. 4 (67), pp. 3–10. (In Russian).

- транспорта и технологических машин. 2019. № 4 (67). С. 3–10.
10. Улсен К., Ценг Э., Ангуло С.Ч., Ландманн М., Контессотто Р., Бальбо Х.Т., Кан Э. Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing // *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Т. 8. № 1. С. 494–502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.008>
  11. Быков В.В., Голубев М.И. Обновление парка машин в лесном комплексе импортной лесозаготовительной техникой. *Научно-информационное обеспечение инновационного развития АПК: Материалы XIII Международной научно-практической интернет-конференции, п. Правдинский, Московская обл., 08–10 июня 2021 год*, п. Правдинский, Московская обл. 2021. С. 505–509.
  12. Бурак П.И., Голубев И.Г. Состояние и перспективы обновления парка сельскохозяйственной техники // *Техника и оборудование для села*. 2019. № 10. С. 2–5.
  13. Фукс В.А. Универсальная система удаленной диагностики транспортных средств // *Молодой ученый*. 2019. № 12. С. 40–44.
  14. Рамазанова Г.Г., Кулаков К.В., Корешкова Т.В. Цифровые технологии при техническом сервисе сельскохозяйственной техники. *Современные проблемы энергоэффективности агроинженерных исследований в условиях цифровой трансформации: Материалы Международной научно-практической конференции*, Балашиха, 19 мая 2022 года. С. 16–20.
  15. Mubarak A., Asmelash M., Azhari A., Alemu T., Mulubrhan F., Saptaji K. Digital twin enabled industry 4.0 predictive maintenance under reliability-centred strategy. *2022 First International Conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*. Trichy, India. 2022, pp. 01–06. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEEICT53079.2022.9768590>
  10. Ulsen C., Tseng E., Angulo S.C., Landmann M., Contessotto R., Balbo J.T., Kahn H. Concrete aggregates properties crushed by jaw and impact secondary crushing. *Journal of Materials Research and Technology*. 2019. Vol. 8. No. 1, pp. 494–502. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2018.04.008>
  11. Bykov V.V., Golubev M.I. Renewal of the motor pool in a Forestry Complex by the import logging equipment. *Scientific and Information Support for Innovative Development APK: Materials of the XIII International Scientific and Practical Internet-Conference*. p. Pravdinskii, Moskovskaya obl. 2021, pp. 505–509. (In Russian).
  12. Burak P.I., Golubev I.G. The status and prospects of upgrade the motor pool of agricultural machines. *Tekhnika i oborudovanie dlya sela*. 2019. No. 10, pp. 2–5. (In Russian).
  13. Fuks V.A. Universal remote diagnostics system for vehicles. *Molodoi uchenyi*. 2019. No. 12, pp. 40–44. (In Russian).
  14. Ramazanova G.G., Kulakov K.V., Koreshkova T.V. Digital technologies for the technical service of the agricultural machinery. *Modern problems of energy efficiency of agricultural engineering research in the conditions of digital transformation: Materials of the International Scientific and Practical Conference*. Balashikha, Moskovskaya obl. 2022, pp. 16–20. (In Russian).
  15. Mubarak A., Asmelash M., Azhari A., Alemu T., Mulubrhan F., Saptaji K. Digital twin enabled industry 4.0 predictive maintenance under reliability-centred strategy. *2022 First International conference on Electrical, Electronics, Information and Communication Technologies (ICEEICT)*. Trichy, India. 2022, pp. 01–06. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEEICT53079.2022.9768590>

**СПЕЦИАЛЬНАЯ ЛИТЕРАТУРА**



**Книга «Теоретические основы белизны и окрашивания керамики и портландцемента»**

Авторы – Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Голованова С.П.

В книге представлены теоретические основы белизны и окрашивания керамических строительных материалов и белого портландцемента (БПЦ) с позиции теории цветности силикатных материалов в зависимости от их фазово-минерального состава, структуры, содержания хромофоров Fe, Mn и Ti, условий обжига и охлаждения (окислительных или восстановительных).

Установлены закономерности зависимости белизны, цвета и особенности окрашивания как пигментов, так и твердых растворов бесцветных фаз ионами-хромофорами от структуры, изовалентного или гетеровалентного изоморфизма, образования окрашивающих кластеров. Разработаны эффективные способы управления белизной и декоративными свойствами строительных керамических материалов (фарфора, фаянса, облицовочной плитки, кирпича) и белого портландцемента.



**Книга «Технология производства стеновых цементно-песчаных изделий»**

Авторы – Балакшин Ю.З., Терехов В.А.

Описано производство и применение стеновых материалов методом вибропрессования из цементно-песчаных бетонов. Рассмотрена существующая и перспективная номенклатура изделий и их свойства. Даны характеристики сырьевым материалам – песку, щебню, вяжущим и химическим добавкам и рекомендации по подбору состава бетонной смеси. Подробно представлена технология производства цементно-песчаных вибропрессованных стеновых изделий. Особое внимание уделено технологическому контролю на производстве и техническому контролю и обслуживанию оборудования. Книга предназначена для организации производственно-технического обучения на предприятии, будет полезна инженерно-техническому персоналу и широкому кругу специалистов.

Заказать литературу можно через редакцию по тел.: (499) 976-22-08, 976-20-36; e-mail: [mail@rifsm.ru](mailto:mail@rifsm.ru), или оформить заявку на сайте [www.rifsm.ru](http://www.rifsm.ru)

УДК 625.861

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-57-64>

А.Ф. ГАЛКИН, д-р техн. наук, профессор (afgalkin@mail.ru),

Н.А. ПЛОТНИКОВ, аспирант (plotnikov-nikolay96@mail.ru)

Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН (677010, г. Якутск, ул. Мерзлотная, 36)

## Выбор строительных материалов для теплоизоляционного слоя дорожной одежды

Целью работы являлось получение функциональной зависимости для определения коэффициента теплопроводности материалов, используемых при возведении теплоизоляционного слоя в дорожных одеждах, не допуская при этом оттаивания грунтов дорожного основания больше предельно допустимого значения. Для достижения цели использован алгоритм решения задачи в безразмерном виде: поиска критерия Био как функции критериев Фурье и Стефана. Получены простые инженерные формулы, позволяющие оперативно подобрать по известному числу Био необходимое термическое сопротивление дополнительного теплозащитного слоя в конструкции дорожной одежды. Для наглядности выполнены варианты расчетов, которые представлены в виде 2D- и 3D-графиков. Показано, что для характерных геокриологических и климатических условий криолитозоны коэффициент теплопроводности теплоизоляционных материалов и термическое сопротивление теплозащитного слоя изменяются в широких пределах и существенно зависят от допустимой глубины оттаивания грунтов дорожного основания. При этом наблюдается удобная для инженерных оценок закономерность: термическое сопротивление дополнительного теплозащитного слоя приблизительно изменяется во столько раз, во сколько изменяется безразмерная глубина оттаивания. Соответственно, при выборе строительных материалов для теплоизоляционного слоя можно считать, что увеличение допустимой глубины оттаивания пропорционально увеличению коэффициента теплопроводности материала. Например, если допустимая глубина оттаивания на некотором участке трассы может быть увеличена в два раза, то для возведения конструктивного теплозащитного слоя той же толщины может использоваться строительный материал с коэффициентом теплопроводности в два раза больше, чем на основном участке. Учитывая, что физико-механические свойства грунтов не являются постоянными по длине трассы, при проектировании следует определять термическое сопротивление конструктивного теплозащитного слоя для отдельных, характерных участков, а не для всей трассы в целом. Соответственно, материалы, используемые при строительстве на различных участках трассы, могут быть различными, в зависимости от принятых проектом конструктивных решений дорожного полотна.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, многолетняя мерзлота, тепловой режим, прогноз, коэффициент теплопроводности, дорожная одежда, оттаивание, допустимая глубина.

Работа выполнена по государственному заданию по теме «Тепловое поле и криогенная толща Северо-Востока России. Особенности формирования и динамика» (№ 122011800062-5).

**Для цитирования:** Галкин А.Ф., Плотников Н.А. Выбор строительных материалов для теплоизоляционного слоя дорожной одежды // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 57–64. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-57-64>

A.F. GALKIN, Doctor of Sciences (Engineering) (afgalkin@mail.ru), N.A. PLOTNIKOV, Engineer, Graduate student (plotnikov-nikolay96@mail.ru) Melnikov Permafrost Institute Siberian Branch Russian Academy of Sciences (36, Merzlotnaya Street, Yakutsk, 677010, Russian Federation)

### Selection of Building Materials for a Thermal Insulation Layer of a Road

The aim of the research was to obtain the functional relationship for determining the thermal conductivity coefficient of materials used in application of a thermal insulation layer of the roads to prevent foundation soil thawing beyond the permitted depth. To achieve this aim, an algorithm of dimensionless solution was used for finding the Biot criterion and the Fourier and Stefan criteria functions. Simple engineering formulas allowing to quickly select the additional thermal insulation layer of the road structure with the required thermal resistance using the known Biot number were obtained. Variant calculations were done and their results are presented as 2D and 3D charts. It was shown that for the typical geocryological and climatic conditions of the permafrost area, the thermal conductivity coefficient of thermal insulation materials and thermal resistance of the insulation layer vary across a wide range and are significantly dependent on the permitted thawing depth of the road foundation. A convenient regularity for engineering assessments is observed: the thermal resistance of additional thermal insulation layer changes by a factor equivalent to the factor of change in the dimensionless thawing depth. Accordingly, the increase in permitted thawing depth can be considered proportional to the increase in thermal conductivity coefficient of the material when selecting the construction materials for the thermal insulation layer. For example, if the permitted thawing depth at a particular road section increases twice, the thermal insulation layer of an equivalent thickness can use a material with two times higher thermal conductivity coefficient. Considering that the physical and mechanical properties of the soil are not the same along the road length, the thermal resistance of the thermal insulation layer should be determined for individual road sections rather than for the entire road. Correspondingly, the materials used in construction at different sections of the road may also be different depending on the construction solutions of the road structure adopted by the project.

**Keywords:** road, permafrost, thermal regime, forecast, thermal conductivity coefficient, thawing, permissible depth.

The work was carried out according to the state assignment on the topic “Thermal field and cryogenic strata of the North-East of Russia. Features of formation and dynamics” (No. 122011800062-5).

**For citation:** Galkin A.F., Plotnikov N.A. Selection of building materials for the thermal insulation layer of road clothing. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 57–64. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-57-64>

Тепловой режим автомобильных дорог в криолитозоне во многом определяет их надежную и безопасную эксплуатацию. Наиболее сильно это проявляется, когда подстилающий слой сложен дисперсными породами с высокой льдистостью [1–5]. При оттаивании у таких пород снижаются прочностные характеристики, что может приводить к повреждению дорожной одежды. Например, если подстилающий грунт имеет прослойки льда на определенной глубине, то их оттаивание может вызвать повреждение дорожной одежды за счет просадки пород дорожного основания. Сходные проблемы возникают и при оттаивании дисперсных льдистых пород дорожных оснований [6–10]. Прежде всего это объясняется существенной зависимостью прочностных свойств дисперсных пород от температуры и особенно от фазового состояния поровой влаги [11–16]. Эффективным способом управления глубиной оттаивания является включение в конструктивные слои дорожной одежды специального теплозащитного слоя. Этот конструктивный слой может быть выполнен как с использованием плит теплоизоляционного материала, например из пенополистирола, так и с использованием специальных теплозащитных смесей, состоящих из теплоаккумулирующих и теплоизоляционных материалов [17–23]. Отмечается перспективность использования пеностекольного щебня при строительстве автомобильных дорог в криолитозоне [24, 25]. Параметры теплоизоляционного (теплозащитного) слоя выбираются из условий: а) сохранение подстилающих грунтов в мерзлом состоянии в течение всего срока эксплуатации дороги; б) допускается сезонное оттаивание грунтов на некоторую величину, обеспечивающую заданную несущую способность дорожного полотна.

Целью работы являлось получение функциональной зависимости для определения коэффициента теплопроводности материалов, используемых при устройстве теплоизоляционного слоя в дорожных одеждах для недопущения оттаивания грунтов дорожного основания больше предельно допустимого значения.

Для получения расчетных зависимостей воспользуемся алгоритмом, предложенным в работах [26, 27], для обоснования оптимальных параметров теплозащитной крепи подземных сооружений криолитозоны. Суть его заключается в представлении исходных зависимостей в безразмерной (критериальной форме) и поиске критерия Био как функции критериев Фурье и Стефана, допускающего оттаивание пород (грунтов) на заданную проектом глубину, по которому определяется термическое сопротивление теплоизоляционного слоя. В рассматриваемом случае глубина оттаивания грунтов дорожного основания при наличии защитного слоя на поверхности может быть определена по формуле [28–30], полученной на основе приближенного решения одномерной однофазной задачи Стефана при граничных условиях 3-го рода, которую в безразмерном (критериальном) виде представим:

$$h = \sqrt{2Fo/St + 1} / Bi^2 - 1/Bi, \quad (1)$$

где  $Bi = h_0 / (R \cdot \lambda_n)$ ;  $R = \delta_i / \lambda_i$ ;  $Fo = at/h_0^2$ ;  $St = Lw/tC_p$ ;  $h = H/h_0$ .

Здесь приняты следующие обозначения:  $h$  – глубина оттаивания грунтового основания, м;  $h_0$  – характерный размер (масштаб), м;  $R$  – термическое сопротивление,  $m^2 \cdot K / Вт$ ;  $\lambda_n$  – коэффициент теплопроводности талого грунта,  $Вт / (м \cdot К)$ ;  $\delta$  – толщина слоя изоляции, м;  $\lambda_n$  – коэффициент теплопроводности слоя изоляции,  $Вт / (м \cdot К)$ ;  $L$  – скрытая теплота плавления льда,  $Дж / кг$ ;  $w$  – влажность грунта, д. е.;  $C_p$  – удельная теплоемкость грунта,  $Дж / (кг \cdot К)$ ;  $a$  – температуропроводность грунта,  $m^2 / с$ ;  $t$  – температура воздуха,  $^{\circ}C$ ;  $Bi$  – число Био;  $Fo$  – число Фурье;  $St$  – число Стефана.

Из уравнения (1) найдем число Био, не допускающее оттаивания грунтов больше заданной глубины за заданный промежуток времени:

$$Bi = (2h \cdot St) / (4Fo - h^2 St). \quad (2)$$

При выводе формулы (1) принято, что температура грунта деятельного слоя равна температуре плавления льда. Как показано в работе [31], в большинстве характерных случаев это допущение является вполне приемлемым для инженерных расчетов. Уточнить формулу (1), если не использовать данное допущение, можно, используя понятие эффективной теплоемкости горных пород [31, 32].

Особенности определения чисел Фурье и Стефана при решении задач теплообмена атмосферного воздуха с оттаивающим (промерзающим) массивом горных пород рассмотрены в работах [33–35]. В табл. 1 и 2 для примера приведены значения чисел  $Fo$  и  $St$  для характерных теплофизических свойств грунтов и климатических условий криолитозоны.

Данные табл. 1 и 2 являются ориентировочными и служат для оценки порядка рассматриваемых величин, а точные значения должны определяться для конкретных геокриологических и климатических условий эксплуатации дорог в криолитозоне.

Таблица 1  
Table 1

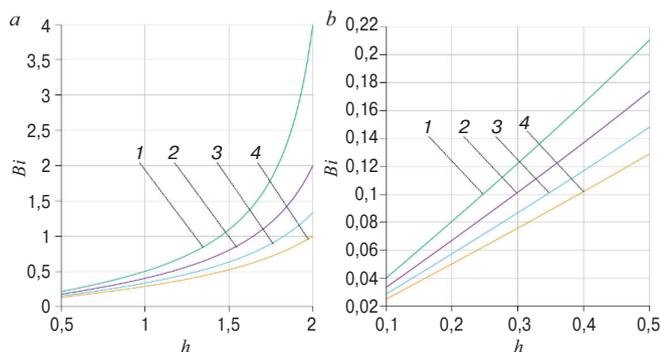
Изменение значения критерия Фурье в зависимости от длительности периода оттаивания грунта  
Change in the value of the Fourier criterion depending on the duration of the soil thawing period

τ, мес	1	2	3	4	5	6
$Fo$	3	6	9	12	15	18

Таблица 2  
Table 2

Значение критерия Стефана в зависимости от льдистости при различной температуре мерзлого грунта  
The value of the Stefan criterion depending on the ice content at different temperatures of frozen soil

W, %	10	20	30	40
$St (Te = -1^{\circ}C)$	4	8	12	16
$St (Te = -4^{\circ}C)$	1	2	3	4



**Рис. 1.** Число Био в зависимости от безразмерной глубины оттаивания грунтов дорожного основания при разных значениях комплекса  $(2Fo/St)$ : 1 – 2,5; 2 – 3; 3 – 3,5; 4 – 4; а – для больших допустимых значений безразмерной глубины оттаивания; б – для малых допустимых значений безразмерной глубины оттаивания

**Fig. 1.** Biot number depending on the dimensionless depth of thawing of road base soils at different values of the complex  $(2Fo/St)$ : 1 – 2.5; 2 – 3; 3 – 3.5; 4 – 4; а – for large permissible values of dimensionless depth; б – for small permissible values of dimensionless thawing depth

По известному числу Био, определенному по формуле (2), можно оперативно определить термическое сопротивление и выбрать подходящий материал дополнительного теплоизоляционного конструктивного слоя дорожной одежды. Число Био может быть найдено по формуле:

$$Bi = R_{II} / R_{II}, \quad (3)$$

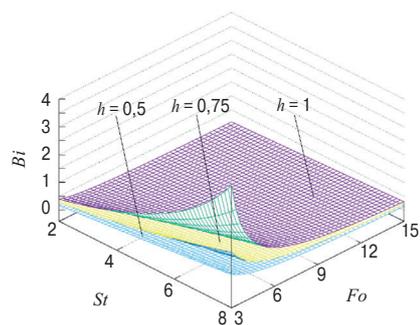
где  $R_{II} = h_0 / \lambda_{II}$ ;  $R_{II} = \delta / \lambda_{II}$ ;  $Bi = \alpha R_{II}$ .

По физическому смыслу параметр  $R_{II}$  – это единица термического сопротивления талого слоя грунта дорожного основания,  $m^2 \cdot K / Wt$ .

Коэффициент теплопередачи для плоской поверхности  $\alpha$  определяется по формуле [36]:

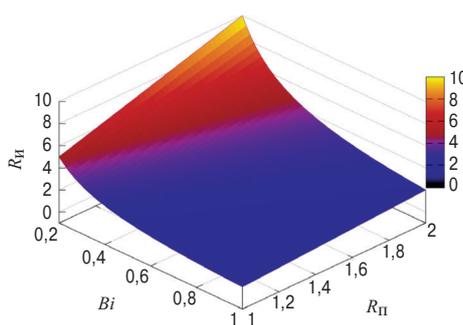
$$\alpha = 1 / (R_{II} + 1 / \alpha_0), \quad (4)$$

где  $\alpha_0$  – коэффициент конвективной теплоотдачи,  $Wt / (m^2 \cdot K)$ , который зависит от средней скорости воздуха за рассматриваемый промежуток времени и может быть вычислен по формуле Г.З. Перльштейна [37, 38].



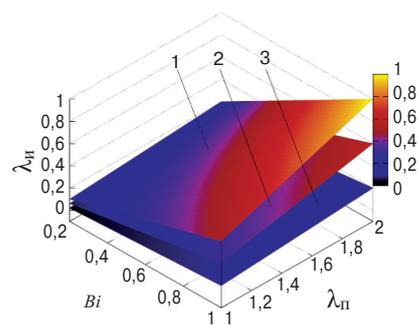
**Рис. 2.** Число Био в зависимости от значений критериев Фурье и Стефана при различных допустимых значениях безразмерной глубины оттаивания грунтов дорожного основания ( $h$ )

**Fig. 2.** Biot number depending on the values of the Fourier and Stefan criteria for various permissible values of the dimensionless depth of thawing of road base soils ( $h$ )



**Рис. 3.** Изменение термического сопротивления теплозащитного слоя в зависимости от числа Био и термического сопротивления слоя талого грунта

**Fig. 3.** Change in the thermal resistance of the heat-protective layer depending on the Biot number and the thermal resistance of the soil layer



**Рис. 4.** Коэффициент теплопроводности материала теплоизоляционного слоя ( $\lambda_{II}$ ,  $Wt / (m \cdot K)$ ) в зависимости от проектного числа Био и коэффициента теплопроводности талого грунта ( $\lambda_{II}$ ,  $Wt / (m \cdot K)$ ) при различных значениях толщины теплоизоляционного слоя: 1 – 0,5 м; 2 – 0,2 м; 3 – 0,1 м

**Fig. 4.** Thermal conductivity coefficient of the material of the thermal insulation layer ( $\lambda_{II}$ ,  $W / (m \cdot K)$ ) depending on the design Biot number and the thermal conductivity coefficient of thawed soil ( $\lambda_{II}$ ,  $W / (m \cdot K)$ ) at different thicknesses of the thermal insulation layer: 1 – 0.5 m; 2 – 0.2 m; 3 – 0.1 m

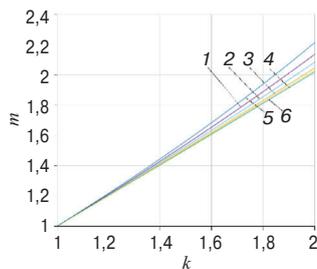
Если в расчетах учитывать термическое сопротивление всех слоев дорожной одежды, то термическое сопротивление теплоизоляционного слоя может быть найдено из выражения [29]:

$$R_{II} = (R_{II} / Bi) - (1 / \alpha_0 + \sum_{i=1}^n Ri), \quad (5)$$

где  $Ri$  – термическое сопротивление  $i$ -го отдельного слоя дорожной одежды, состоящей из  $n$  слоев (без учета теплоизоляционного слоя),  $m^2 / (Wt \cdot ^\circ C)$ .

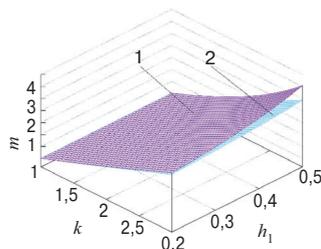
Принимая во внимание, что второй член в уравнении (5) значительно меньше первого слагаемого, далее при анализе будем пользоваться уравнением (3). Такой подход даст определенный расчетный запас, так как не учитываемый нами второй член в уравнении (5) уменьшает значение термического сопротивления теплозащитного слоя. Зная термическое сопротивление и возможную толщину дополнительного конструктивного теплоизоляционного слоя, можно выбрать материал для его обустройства с соответствующим коэффициентом теплопроводности. Окончательно по известному коэффициенту теплопроводности выбор конкретного экономически эффективного материала осуществляется по методике, предложенной в работе [39]. Согласно исследованиям авторов для определения экономически эффективного материала достаточно использования простого критерия, равного произведению коэффициента теплопроводности материала на стоимость одного кубического метра материала. Такой критерий позволяет оперативно и надежно выбрать один конкретный материал из нескольких возможных.

С практической точки зрения представляет интерес поиск зависимости между допустимой глубиной оттаивания и необходимым термическим сопротивлением теплозащитного слоя в конструкции дорожной одежды. Это важно в том смысле, что физико-механические свойства грунтов не являются посто-



**Рис. 5.** Степень изменения термического сопротивления  $m$  в зависимости от степени изменения допустимой глубины оттаивания грунтов  $k$  при различных значениях базовой величины  $h_1$ : 1 – 0,5; 2 – 0,4; 3 – 0,3; 4 – 0,2; 5 – 0,5; 6 – 0,2; (1–4 – при значении комплекса  $2Fo/St=6$ ; 5, 6 – при значении комплекса  $2Fo/St=4$ )

**Fig. 5.** The degree of change in thermal resistance  $m$  depending on the degree of change in permissible depth of soil thawing  $k$  at different values of the base  $h_1$  values: 1 – 0.5; 2 – 0.4; 3 – 0.3; 4 – 0.2; 5 – 0.5; 6 – 0.2; (1–4 – when the complex value  $2Fo/St=6$ ; 5, 6 – with a complex value of  $2Fo/St=4$ )



**Рис. 6.** Степень изменения термического сопротивления  $m$  в зависимости от степени изменения допустимой глубины оттаивания грунтов  $k$  и различных значениях базовой величины  $h_1$  при значении комплекса  $(2Fo/St)$ : 1=4; 2=8

**Fig. 6.** The degree of change in thermal resistance  $m$  depending on the degree of change in the permissible depth of soil thawing  $k$  and various values of the base value  $h_1$  with the value of the complex  $(2Fo/St)$ : 1=4; 2=8

янными по длине трассы и при проектировании следует определять термическое сопротивление конструктивного теплозащитного слоя для отдельных, характерных участков, а не для всей трассы в целом. Соответственно, и материалы, используемые при строительстве на различных участках трассы, могут быть тоже различными, в зависимости от принятых проектом конструктивных решений для строительства дорожного полотна. Введем показатель степени изменения термического сопротивления теплозащитного слоя  $m$  ( $m=R_{и2}/R_{и1}$ ) и показатель степени изменения допустимой глубины оттаивания грунтов дорожного основания  $k$  ( $k=h_2/h_1$ ). Показатели термического сопротивления теплоизоляционного слоя на базовом проектном участке (индекс 1) и конкретном проектном участке (индекс 2) определяются по формуле (3), в которую входит число Био, зависящее от соответствующего значения параметра  $h$ . После несложных преобразований получим зависимость между параметрами  $m$  и  $h$ :

$$m = k \left( \frac{2Fo}{St} - \frac{h_1^2}{2} \right) / \left( \frac{2Fo}{St} - \frac{k^2 h_1^2}{2} \right), \quad (6)$$

где  $h_1$  – допустимое значение безразмерной глубины оттаивания грунтов дорожного основания на базовом проектном участке.

### Результаты и обсуждение

Анализ полученных формул показывает, что часть из них отражает закономерности, представляющие практический интерес. Например, из выражения (3) следует вывод, что термическое сопротивление теплоизоляционного слоя дорожной одежды прямо пропорционально единице термического сопротивления талого слоя грунта дорожного основания и обратно пропорционально числу Био, допускающему оттаивание грунта на заданную проектом глубину. Для наглядности и комплексного анализа полученных формул были проведены варианты расчеты,

которые представлены в виде графиков на рис. 1–4. На рис. 1 показана зависимость числа Био ( $Bi$ ) от безразмерной глубины оттаивания грунтов дорожного основания ( $h$ ) при разных значениях комплекса  $(2Fo/St)$  для малых ( $a$ ) и больших ( $b$ ) допустимых значений безразмерной глубины оттаивания. Характер графиков на рисунке показывает, что для малых допустимых значений (рис. 1,  $b$ ) безразмерной глубины оттаивания эта зависимость близка к линейной. Причем, независимо от значений комплекса  $(2Fo/St)$ , степень увеличения числа Био при изменении значения безразмерной глубины оттаивания остается практически постоянной величиной. Так, например, при изменении безразмерной глубины в 2,5 раза (с 0,2 до 0,5) степень увеличения числа Био как для значения комплекса  $(2Fo/St)$ , равного 4, так и для равного 2,5 остается постоянной величиной, приблизительно равной 1,6. Характер кривых, описывающих зависимость критерия Био от безразмерной глубины оттаивания для ее больших значений ( $h > 0,5$ ), имеет явно нелинейный характер (рис. 1,  $a$ ). Например, при изменении безразмерной глубины оттаивания в те же 2,5 раза, но в интервале с 0,8 до 2 степень увеличения числа Био для значения комплекса  $(2Fo/St)$ , равного 4, составляет почти 2, а при значении комплекса 2,5 равно 4, т. е. почти в два раза больше, хотя степень изменения безразмерной глубины оттаивания осталась постоянной и равной, как и в первом примере, 2,5 раза.

На рис. 2 приведен трехмерный график зависимости числа Био от значений критериев Фурье и Стефана при разных значениях допустимой глубины оттаивания грунтов дорожного основания.

Как видно из графиков на рис. 2, с уменьшением значения безразмерной глубины оттаивания зависимость числа Био от критериев Фурье и Стефана уменьшается, и чем больше число Стефана и меньше число Фурье, тем эта зависимость меньше. Причем при малых числах Стефана и больших числах Фурье степень изменения числа Био незначительна (плоскости на рис. 2 почти сливаются). Иными словами, чем больше льдистость грунтов дорожного основания и меньше длительность теплого периода (периода оттаивания грунта), тем термическое сопротивление теплозащитного слоя может быть меньше. И при проектировании конструкции дорожной одежды можно выбирать материалы с большим коэффициентом теплопроводности.

На рис. 3 показана в графической форме зависимость термического сопротивления теплозащитного слоя от критерия Био и термического сопротивления слоя талого грунта.

Как видно из данных рис. 3, при увеличении числа Био влияние термического сопротивления слоя талого грунта на значение термического сопротивления теплоизоляционного слоя снижается (сравним грани плоскости при значениях числа Био, равного 0,2 и 1). Ближняя грань плоскости на рис. 3 ( $Bi=1$ ) практически параллельна оси  $R_{п}$ . При малых

значениях числа Био угол наклона резко увеличивается. В первом случае область изменения термического сопротивления теплоизоляционного слоя (голубой цвет) от 2 до 4, а во втором – от 2 до 10 (желтый цвет).

На рис. 4 показано изменение коэффициента теплопроводности материала теплоизоляционного слоя в зависимости от проектного числа Био и коэффициента теплопроводности талого грунта при различных значениях толщины теплоизоляционного слоя.

Анализ графиков на рис. 4 показывает, что выбор теплоизоляционного материала существенно зависит от ограничений на общую толщину дорожной одежды. Причем, чем больше возможная конструктивная толщина, тем больше вероятность того, что можно обойтись без использования специальных теплоизоляционных материалов, ограничившись простыми строительными дорожными материалами, например горелыми породами или сухим карьерным песком, коэффициент теплопроводности которых находится в пределах 0,4–1 Вт/(м·К). Естественно, что все изложенное справедливо для строго определенных и конкретных геокриологических условий – чисел Био, не допускающих оттаивания грунтов дорожного основания больше заданной из условий надежности и безопасности величины.

На рис. 5 и 6 представлены графики, построенные в результате вариантных расчетов по формуле (6).

На рис. 5 показаны графики, характеризующие зависимость параметра  $m$  от  $k$  при различных начальных значениях базовой безразмерной величины допустимой глубины оттаивания  $h_1$  для двух значений комплекса  $(2Fo/St)$ . Из графиков видно, что в рассмотренном диапазоне исходных величин связь между параметрами  $m$  и  $k$  почти линейная, причем градиент  $(\Delta m/\Delta k)$  близок к единице. Это означает, что термическое сопротивление дополнительного теплозащитного слоя приблизительно изменяется во столько раз, во сколько изменяется безразмерная глубина оттаивания. Соответственно, при выборе строительных материалов для теплоизоляционного слоя можно считать, что увеличение допустимой глубины оттаивания пропорционально увеличению коэффициента теплопроводности материала. Например, если допустимая глубина оттаивания на некотором участке трассы может быть увеличена в два раза, то для возведения конструктивного теплозащитного слоя той же толщины может использоваться строительный материал с коэффициентом теплопроводности в два раза больше, чем на основном участке.

На рис. 6 приведен 3D-график зависимости между рассматриваемыми величинами при различных значениях комплекса  $(2Fo/St)$ .

Как видно, в ранее рассмотренном диапазоне изменения параметра  $k$  ( $1 \leq k \leq 2$ ) две плоскости практически сливаются, несмотря на то что комплекс  $(2Fo/St)$  изменился в два раза, а степень изменения глубины оттаивания изменилась в 2,5 раза. Анализ графиков рис. 6 подтверждает возможность практи-

ческого применения зависимости между коэффициентами теплопроводности строительных материалов, используемых для возведения теплозащитного слоя заданной толщины, и изменением допустимой глубины оттаивания грунтов дорожного основания на различных участках проектируемой трассы. Данную зависимость можно выразить в виде линейной функции  $\lambda_2 = k\lambda_1$ , т. е. степень изменения коэффициента теплопроводности строительного материала равна степени изменения допустимой глубины оттаивания грунтов дорожного основания. Учитывая, что физико-механические свойства грунтов не являются постоянными по длине трассы, при проектировании следует определять термическое сопротивление конструктивного теплозащитного слоя для отдельных, характерных участков, а не для всей трассы в целом. Соответственно, и материалы, используемые при строительстве на различных участках трассы, могут быть различными, в зависимости от принятых проектом конструктивных решений для строительства дорожного полотна.

### Заключение

Исследована взаимосвязь между термическим сопротивлением теплоизоляционного слоя в дорожных одеждах и допустимой глубиной оттаивания грунтов дорожного основания. Получены инженерные зависимости, позволяющие оценить влияние основных факторов теплообмена и теплофизических свойств подстилающих грунтов, на выбор строительных материалов при проектировании дорог в криолитозоне. Все зависимости представлены в критериальном безразмерном виде. Это позволило получить новые закономерности, определяющие взаимосвязи между проектируемыми параметрами дорожной одежды при наличии теплоизоляционного слоя. В частности, показано, что термическое сопротивление теплоизоляционного слоя дорожной одежды прямо пропорционально единице термического сопротивления талого слоя грунта дорожного основания и обратно пропорционально числу Био, допускающему оттаивание грунта на заданную проектом глубину. Доказана возможность практического использования зависимости между коэффициентами теплопроводности строительных материалов, используемых для возведения теплозащитного слоя заданной толщины, и изменением допустимой глубины оттаивания грунтов дорожного основания на различных участках проектируемой трассы. Данную зависимость можно сформулировать так: степень изменения коэффициента теплопроводности строительного материала, используемого при возведении теплоизоляционного слоя в дорожной одежде, равна степени изменения допустимой глубины оттаивания грунтов дорожного основания. Для наглядности и объективности анализа полученных зависимостей выполненные многовариантные расчеты по формулам представлены в виде 2D- и 3D-графиков. Данная

работа имеет как научное, так и методическое значение и может представлять интерес не только для специалистов, но и для студентов и аспирантов, обучающихся по направлениям инженерного мерзловедения и дорожного строительства. Дальнейшие

исследования могут быть направлены на изучение влияния степени изменения параметров дорожной одежды и теплофизических свойств подстилающих грунтов в период эксплуатации дорог на надежность проектных технических решений.

### Список литературы

1. Железняк М.Н., Шестернев Д.М., Литовко А.В. Проблемы устойчивости автомобильных дорог в криолитозоне. *Материалы докладов XIV Общероссийской научно-практической конференции и выставки «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации»*. М., 2018. С. 223–227.
2. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах / Под ред. Ю.Я. Вели, В.В. Докучаева, Н.Ф. Федорова. Л.: Стройиздат, 1977. 552 с.
3. Шац М.М. Современное состояние городской инфраструктуры г. Якутска и пути повышения ее надежности // *Геориск*. 2011. № 2. С. 40–46.
4. Кондратьев В.Г., Кондратьев С.В. Как защитить федеральную автодорогу «Амур» Чита – Хабаровск от опасных инженерно-геокриологических процессов и явлений // *Инженерная геология*. 2013. № 5. С. 40–47.
5. Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 384 с.
6. Pankov V.Yu. The problem of mechanical loads on pavement of roads in the cryolithic zone. 2022. E3S Web Conf. Vol. 363. *XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry “State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2022”*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236301039>
7. Isakov A., Razuvaev D., Gudkova I., Chakhlov M. Modeling the operation of road pavement during the thawing of soil in the subgrade of highways. 2018. MATEC Web Conf. Vol. 239. *Siberian Transport Forum – TransSiberia 2018*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823905001>
8. Guofang Xu, Jilin Qi, Wei Wu. Temperature effect on the compressive strength of frozen soils: a review. Recent advances in geotechnical research // *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. 2019, pp. 227–236. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_19)
9. Шапран В. В., Фазилова З.Т. Факторы, оказывающие влияние на развитие продольных профильных деформаций земляного полотна в криолитозоне // *Мир транспорта*. 2020. Т. 18. № 2. С. 82–101.
10. Станиловская Ю.В., Мерзляков В.П., Сергеев Д.О., Хименков А.Н. Оценка опасности полигонально-жильных льдов для линейных сооружений // *Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология*. 2014. № 4. С. 367–378.
11. Вялов С.С. Реологические основы механики мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1978. 447 с.

### References

1. Zheleznyak M.N., Shesternev D.M., Litovko A.V. Problems of stability of highways in the cryolithozone. *Proceedings of the Fourteenth All-Russian Scientific and Practical Conference and Exhibition of Research Organizations “Prospects for the Development of Engineering Research in Construction in the Russian Federation”*. Moscow. 2018, pp. 223–227. (In Russian).
2. Handbook of construction on permafrost soils [Handbook of construction on permafrost soils / Edited by Yu.Ya. Veli, V.V. Dokuchaeva, N.F. Fedorova]. Leningrad: Stroyizdat. 1977. 552 p. (In Russian).
3. Shats M.M. The current state of the city infrastructure of Yakutsk and ways to improve its reliability. *Georisk*. 2011. No. 2, pp. 40–46. (In Russian).
4. Kondratiev V.G., Kondratiev S.V. How to protect the federal highway “Amur” Chita – Khabarovsk from dangerous geocryological engineering processes and phenomena. *Inzhenernaya geologiya*. 2013. No. 5, pp. 40–47. (In Russian).
5. Grechishchev S.E., Chistotinov L.V., Shur Yu. L. Kriogennye fiziko-geologicheskie protsessy i ikh prognoz [Cryogenic physico-geological processes and their forecast]. Moscow: Nedra. 1980. 384 p.
6. Pankov V.Yu. The problem of mechanical loads on pavement of roads in the cryolithic zone. 2022. E3S Web Conf. Vol. 363. *XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry “State and Prospects for the Development of Agribusiness – INTERAGROMASH 2022”*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202236301039>
7. Isakov A., Razuvaev D., Gudkova I., Chakhlov M. Modeling the operation of road pavement during the thawing of soil in the subgrade of highways. 2018. MATEC Web Conf. Vol. 239. *Siberian Transport Forum – TransSiberia 2018*. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201823905001>
8. Guofang Xu, Jilin Qi, Wei Wu. Temperature effect on the compressive strength of frozen soils: a review. Recent advances in geotechnical research. *Springer Series in Geomechanics and Geoengineering*. 2019, pp. 227–236. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7\\_19](https://doi.org/10.1007/978-3-319-89671-7_19)
9. Shapran V.V., Fazilova Z.T. Factors influencing the development of longitudinal profile deformations of the roadbed in the cryolithozon. *Mir transporta*. 2020. Vol. 18. No. 2, pp. 82–101. (In Russian).
10. Stanilovskaya Yu.V., Merzlyakov V.P., Sergeev D.O., Khimenkov A.N. Assessment of the danger of polygonal-vein ice for linear structures. *Geoekologiya. Inzhenernaya geologiya. Gidrogeologiya. Geokriologiya*. 2014. No. 4, pp. 367–378. (In Russian).

12. Цытович Н.А. Механика мерзлых грунтов. М.: Высшая школа, 1973. 448 с.
13. Hu X.D., Wang J.T., Yu X.F. Laboratory test of uniaxial compressive strength of shanghai frozen soils under freeze-thaw cycle // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 716, pp. 688–692. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.716.688>
14. Crepeau J., Siahpush A.S. Solid–liquid phase change driven by internal heat generation // *Comptes Rendus Mecanique*. 2012. Vol. 340. Iss. 7, pp. 471–476.
15. Вотяков И.Н. Физико-механические свойства мерзлых и оттаивающих грунтов Якутии. Новосибирск: Наука, 1975. 176 с.
16. Zhang X., Feng S.G., Chen P.C. Thawing settlement risk of running pipeline in permafrost regions // *Oil Gas Storage Transportation*. 2013. No. 6, pp. 365–369.
17. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Повышение тепловой устойчивости дорожных одежд в криолитозоне // *Строительные материалы*. 2021. № 7. С. 26–31. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-26-31>
18. Бессонов И.В., Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Говряков И.С., Горбунова Э.А. Анализ конструктивных решений в зависимости от типа изоляционных материалов в дорожных покрытиях в многолетнемерзлых грунтах // *Транспортное строительство*. 2022. № 1. С. 14–17. DOI: 10.18635/2071-2219-2020-4-24-28
19. Бек-Булатов А.И. Применение Styrodur®С в автодорожном строительстве // *Строительные материалы*. 2000. № 12. С. 22–23.
20. Ярцев В.П., Иванов Д.В., Андрианов К.А. Прогнозирование долговечности экструзионного пенополистирола в дорожных конструкциях // *Научный вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура*. 2010. № 3. С. 99–104.
21. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal protection of roads in the permafrost zone. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20. No. 2, pp. 395–399.
22. Ашпиз Е.С., Савин А.Н. Сооружение нового и стабилизация эксплуатируемого земляного полотна в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов северного широтного хода. В сб.: *Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике*. Салехард, 2021. С. 27–29.
23. Чжан А.А. Расчет положения верхней границы многолетнемерзлых грунтов в теле и основании земляного полотна при наличии теплоизоляции на откосах. *Криосфера Земли*. 2019. Т. 23. № 4. С. 54–59.
24. Панков В.Ю., Бурнашева С.Г. Анализ способов защиты автомобильных дорог от негативных криогенных процессов. В сб.: *Лучшая студенческая статья 2020*. МЦНС «Наука и просвещение». 2020. С. 52–55.
25. Клочков Я.В., Непомнящих Е.В., Линейцев В.Ю. Применение пеностекла для регулирования теплового режима грунтов в сложных климатических
11. Vyalov S.S. Reologicheskie osnovy mekhaniki merzlykh gruntov [Rheological foundations of mechanics of frozen soils]. Moscow: Vysshaya shkola. 1978. 447 p.
12. Tsytovich N.A. Mekhanika merzlykh gruntov [Mechanics of frozen soils]. Moscow: Vysshaya shkola. 1973. 448 p.
13. Hu X.D., Wang J.T., Yu X.F. Laboratory test of uniaxial compressive strength of shanghai frozen soils under freeze-thaw cycle. *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 716, pp. 688–692. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.716.688>
14. Crepeau J., Siahpush A.S. Solid–liquid phase change driven by internal heat generation. *Comptes Rendus Mecanique*. 2012. Vol. 340. Iss. 7, pp. 471–476.
15. Votyakov I.N. Fiziko-mekhanicheskie svoistva merzlykh i ottaivayushchikh gruntov Yakutii [Physico-mechanical properties of frozen and thawing soils of Yakutia]. Novosibirsk: Nauka. 1975. 176 p.
16. Zhang X., Feng S.G., Chen P.C. Thawing settlement risk of running pipeline in permafrost regions. *Oil Gas Storage Transportation*. 2013. No. 6, pp. 365–369.
17. Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F. Increasing the thermal stability of the embankment in permafrost regions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 7, pp. 26–31. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-26-31>
18. Bessonov I.V., Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Govryakov I.S., Gorbunova E.A. Analysis of design solutions depending on the type of insulating materials in road surfaces in permafrost soils. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2022. No. 1, pp. 14–17. (In Russian). DOI: 10.18635/2071-2219-2020-4-24-28
19. Bek-Bulatov A.I. Application of Styrodur®S in road construction *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2000. No. 12, pp. 22–23. (In Russian).
20. Yartsev V.P., Ivanov D.V., Andrianov K.A. Forecasting the durability of extruded polystyrene foam in road structures. *Nauchnyj vestnik VGASU. Stroitel'stvo i arhitektura*. 2010. No. 3, pp. 99–104. (In Russian).
21. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Thermal protection of roads in the permafrost zone. *Journal of Applied Engineering Science*. 2022. Vol. 20. No. 2, pp. 395–399.
22. Ashpiz E.S., Savin A.N. The construction of a new and stabilization of the exploited roadbed in the conditions of the spread of permafrost soils of the northern latitudinal course. In the collection: *Modern studies of the transformation of the cryosphere and issues of geotechnical safety of structures in the Arctic*. Salekhard, 2021. pp. 27–29. (In Russian).
23. Zhang A.A. Calculation of the position of the upper boundary of permafrost soils in the body and base of the roadbed in the presence of thermal insulation on the slopes. *The cryosphere of the Earth*. 2019. Vol. 23. No. 4, pp. 54–59. (In Russian).
24. Pankov V.Yu., Burnasheva S.G. Analysis of ways to protect highways from negative cryogenic processes. In the collection “The best student article 2020”. ICNS “Science and Education”. 2020, pp. 52–55. (In Russian).
25. Klochkov Y.V., Nepomnyashchikh E.V., Lineytssev V.Yu. Application of foam glass to regulate the

- условиях // *Вестник Забайкальского государственного университета*. 2015. № 6 (121). С. 9–15.
26. Галкин А.Ф. Расчет параметров теплозащитных покрытий подземных сооружений криолитозоны // *Известия вузов. Горный журнал*. 2008. № 6. С. 81–89.
  27. Galkin A.F. Efficiency evaluation of thermal insulation use in criolithic zone mine openings // *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 10, pp. 234–237.
  28. Galkin A.F. Controlling the thermal regime of the road surface in the cryolithic zone // *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63, pp. 1224–1228. DOI://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.128
  29. Галкин А.Ф. Определение допустимой глубины оттаивания дорожного полотна в криолитозоне // *Энергобезопасность и энергосбережение*. 2021. № 5. С. 18–22. DOI: 10.18635/2071-2219-2021-5-18-22
  30. Galkin A., Pankov V. Precision of determination of thawing depth of the frozen rocks // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2131. 052079. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052079
  31. Галкин А.Ф., Курта И.В. Влияние температуры на глубину оттаивания мерзлых пород // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2020. № 2. С. 82–91. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91
  32. Рекомендации по проектированию и строительству плотин из грунтовых материалов для производственного и питьевого водоснабжения в условиях Крайнего Севера и вечной мерзлоты. М.: Стройиздат, 1976. 112 с.
  33. Галкин А.Ф. Расчет критерия Фурье при прогнозе теплового режима талых и мерзлых дисперсных пород // *Арктика и Антарктика*. 2022. № 3. С. 1–10. DOI: 10.7256/2453-8922.2022.3.38555
  34. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Heat capacity of dispersed rocks // *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2131 (5). 052076. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052076
  35. Галкин А.Ф., Панков В.Ю., Большаков В.А. Определение числа Стефана для прогноза теплового режима автомобильных дорог в криолитозоне // *Естественные и технические науки*. 2021. № 4. С. 282–285.
  36. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.
  37. Перльштейн Г.З. Водно-тепловая мелиорация мерзлых пород на Северо-Востоке СССР. Новосибирск: Наука, 1979. 304 с.
  38. Панков В.Ю., Бурнашева С.Г. Влияние скорости ветра на температуру поверхности дорожного полотна // *Тенденции развития науки и образования*. 2020. № 8. С. 116–121. DOI: 10.18411/lj-08-2020-63
  39. Галкин А.Ф., Железняк М.Н., Жирков А.Ф. Критерий выбора строительных материалов для теплоизоляционных слоев дорожных одежд и оснований // *Успехи современного естествознания*. 2022. № 8. С. 108–113. <https://doi.org/10.17513/us.e.37875>
  - thermal regime of soils in difficult climatic conditions. *Vestnik of the Transbaikal State University*. 2015. No. 6 (121), pp. 9–15. (In Russian).
  26. Galkin A.F. Calculation of parameters of thermal protective coatings of underground structures of the criolithic zone. *Izvestiya vuzov. Gornyy zhurnal*. 2008. No. 6, pp. 81–89. (In Russian).
  27. Galkin A.F. Efficiency evaluation of thermal insulation use in criolithic zone mine openings. *Metallurgical and Mining Industry*. 2015. No. 10, pp. 234–237.
  28. Galkin A.F. Controlling the thermal regime of the road surface in the cryolithic zone. *Transportation Research Procedia*. 2022. Vol. 63, pp. 1224–1228. DOI://doi.org/10.1016/j.trpro.2022.06.128
  29. Galkin A.F. Determination of the permissible depth of thawing of the roadway in the cryolithozone. *Energobezopasnost' i energosberezhenie*. 2021. No. 5, pp. 18–22. (In Russian). DOI: 10.18635/2071-2219-2021-5-18-22
  30. Galkin A., Pankov V. Precision of determination of thawing depth of the frozen rocks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 2131. 052079. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052079
  31. Galkin A. F., Kurta I. V. Influence of temperature on the depth of thawing of frozen rocks. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2020. No. 2, pp. 82–91. (In Russian). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-2-0-82-91
  32. Recommendations for the design and construction of dams from soil materials for industrial and drinking water supply in the Far North and permafrost. Moscow: Stroyizdat. 1976. 112 p.
  33. Galkin A.F. Calculation of the Fourier criterion when predicting the thermal regime of thawed and frozen dispersed rocks. *Arktika i Antarktika*. 2022. No. 3, pp. 1–10. (In Russian). DOI: 10.7256/2453-8922.2022.3.38555
  34. Galkin A.F., Pankov V.Yu. Heat capacity of dispersed rocks. *Journal of Physics: Conference Series*. 2022. Vol. 2131 (5). 052076. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/5/052076
  35. Galkin A.F., Pankov V.Yu., Bolshakov V.A. Determination of the Stefan number for forecasting the thermal regime of highways in the cryolithic zone. *Estestvennyye i tekhnicheskkiye nauki*. 2021. No. 4, pp. 282–285. (In Russian).
  36. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukomel A.S. *Teploperedacha* [Heat transfer]. Moscow: Energoizdat. 1981. 416 p.
  37. Perlstein G.Z. *Vodno-teplovaya melioratsiya merzlykh porod na Severo-Vostoke SSSR* [Water-thermal reclamation of frozen rocks in the North-East of the USSR] Novosibirsk: Nauka. 1979. 304 p.
  38. Pankov V.Yu., Burnasheva S.G. The influence of wind speed on the surface temperature of the roadway. *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya*. 2020. No. 8, pp. 116–121. (In Russian). DOI: 10.18411/lj-08-2020-63
  39. Galkin A.F., Zheleznyak M.N., Zhirkov A.F. Criterion of selection of building materials for thermal insulation layers of road clothes and bases. *Uspekhi sovremennogo yestestvoznaniya*. 2022. No. 8, pp. 108–113. (In Russian). <https://doi.org/10.17513/us.e.37875>

УДК 625.861

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-65-71>

Д.В. ГЕРАСИМОВ, магистр, аспирант (gerasimovdv@ystu.ru)

Ярославский государственный технический университет (150999, г. Ярославль, Московский пр., 88)

## Прогнозирование гранулометрического состава гранулированной асфальтобетонной смеси

Предметом настоящего исследования является асфальтобетонная смесь для дорожного строительства, изготовленная с использованием фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата по методу гранулирования окатыванием. Целью исследования явилось прогнозирование гранулометрического состава рассматриваемого материала. Актуальность задачи обусловлена необходимостью дальнейшего определения технологических параметров производства, режимов уплотнения и структуры строительного конгломерата в составе конструкции дорожного покрытия на макро-, мезо- и микроуровнях. Методами ситового и численного анализа ядер гранул (щебня) и окатанных гранул установлен гранулометрический состав по массе и количеству частиц фракций. Смоделирована интегральная функция распределения частиц по крупности, сравнение которой с экспериментальными данными проводилось статистическими методами по критерию Пирсона. Установлено, что толщина наращиваемой оболочки пропорциональна исходному размеру ядер щебня. Интегральная функция распределения частиц по крупности определялась регрессионными методами на основе значений долей частиц каждой фракции. С надежностью  $\gamma=0,9$  установлено, что прогнозируемое теоретическое распределение не противоречит экспериментальным данным. Максимальное расхождение по массе фракций не превышает 15%.

**Ключевые слова:** асфальтовый гранулят, двухслойные гранулы, грануляция, интегральная функция распределения, критерий Пирсона.

**Для цитирования:** Герасимов Д.В. Прогнозирование гранулометрического состава гранулированной асфальтобетонной смеси // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 65–71. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-65-71>

D.V. GERASIMOV, Master, Postgraduate student (gerasimovdv@ystu.ru)

Yaroslavl State Technical University (88, Moskovsky Avenue, Yaroslavl, 150999, Russian Federation)

### Prediction of Granulometric Composition of Granulated Asphalt Concrete Mixture

The subject of this research is asphalt-concrete mixture for road construction made with phosphogypsum and secondary polyethylene terephthalate by granulation pelletizing method. The aim of the research is to predict the granulometric composition of the material in question. The urgency of the problem is caused by the necessity of further definition of technological parameters of production, compaction regimes and structure of building conglomerate as a part of road pavement on macro-, meso- and microlevels. By the methods of sieve and numerical analysis of the kernels of granules (crushed stone) and rounded granules the granulometric composition by mass and the number of fractions particles was established. The integral function of particle size distribution has been simulated; its correspondence with the experimental data was carried out by statistical methods using Pearson's criterion. It was found that the thickness of the built-up shell is proportional to the initial size of the crushed stone cores. The integral function of particle size distribution was determined by regression methods based on the values of fractions of particles of each fraction. With a reliability of  $\gamma=0,90$ , it was found that the predicted theoretical distribution did not contradict the experimental data. The maximum discrepancy in the fractions mass does not exceed 15%.

**Keywords:** asphalt granulate, two-layer granules, integral distribution function, Pearson's criterion.

**For citation:** Gerasimov D.V. Prediction of granulometric composition of granulated asphalt concrete mixture. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 65–71. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-65-71>

Анализируя особенности поступательного развития отрасли строительных материалов, можно сделать следующий вывод: прослеживается отчетливая тенденция к расширению сырьевой базы за счет вторичного использования (переработки) промышленных и бытовых отходов [1–3].

Основными направлениями исследований в данной области являются:

- изучение качественных характеристик промышленных и бытовых отходов в целях обоснования возможности их применения в производственно-технологическом цикле строительных материалов;

- моделирование количественного состава компонентов новых строительных материалов на основе или с применением промышленных и бытовых отходов.

Существует прямая зависимость качественного и количественного составов компонентов асфальтобетонной смеси и формирования так называемой опти-

мальной структуры искусственного строительного конгломерата, которыми являются все асфальтобетонные смеси, вне зависимости от механизма формирования их структуры [4]. Данное утверждение согласуется с теорией искусственных строительных конгломератов И.А. Рыбьева и полиструктурной теорией В.П. Селятина.

Закон створа Рыбьева, являющийся одним из постулатов теории искусственных строительных конгломератов, гласит: «Оптимальной структуре соответствует комплекс экстремальных значений свойств. Его можно выразить и как соответствие комплексу наиболее благоприятных показателей строительных свойств конгломерата оптимальной структуры» [5].

Однако в случае с композиционными строительными материалами, такими как асфальтобетонные смеси, прежде чем перейти к вопросам структурообразования, необходимо изучить и спрогнозировать

их гранулометрический состав. Поставленная проблема обостряется в случае с новыми, ранее не изученными асфальтобетонными смесями, с измененным составом и принципом производства.

Целью настоящего исследования является прогнозирование гранулометрического состава гранулированной асфальтобетонной смеси, разработанной в Ярославском государственном техническом университете. Способ получения гранулированной асфальтобетонной смеси включает получение гранул методом окатывания при использовании в качестве связующего смесь нефтяного дорожного битума и полиэтилентерефталата (10–20% по массе битума), вводимого в битум при температуре плавления пластика 230–240°C. В качестве ядер используются частицы щебня габбро-диабазы диаметром 5–8 мм. В качестве материала оболочки ядра гранул используется асфальтовяжущее вещество, содержание которого в гранулах составляет 30–45% от массы смеси. Образование оболочки вокруг ядра из щебня происходит путем попеременного ввода мелких порций вяжущего (модифицированного вторичным полиэтилентерефталатом нефтяного дорожного битума) и мелкодисперсного компонента – фосфогипса. Процесс грануляции методом окатывания протекает при температуре 130–150°. Укладка смеси в дорожное полотно может производиться как при температуре 80–100°, так и при температуре 15–20° в холодном состоянии [6].

Гранулированную асфальтобетонную смесь, произведенную по описанному способу [6], допустимо обобщить с понятием двухслойных гранул.

Изучение гранулометрического состава двухслойных гранул рассматривается во многих научных работах [7–13]. При этом можно выделить два основных направления: процессы гранулирования, в которых толщина покрытия превышает размеры ядер [7–10], и процессы гранулирования, в которых толщина оболочки значительно меньше размера ядер [11–13]. В случае получения асфальтового гранулята мы имеем процесс гранулирования второго типа. Отличие в осуществлении процессов гранулирования двух типов состоит в том, что в первом случае слипания ядер избежать практически невозможно и в модели роста гранул этот эффект учитывается [9–11]; во втором случае процесс слипания ядер маловероятен либо сведен к минимуму, и этим эффектом в модели роста гранул допустимо пренебречь [12, 13].

Практически во всех работах [7–13] отмечается, что рост оболочки пропорционален размерам исходного ядра. Но при этом предлагаются самые различные подходы при моделировании роста гранул. В работах [7, 8, 10] рассматриваются процессы гранулирования монодисперсных ядер. В работе [9] полидисперсность ядер учитывается и предполагается, что рост гранул подчиняется экспоненциальному закону. В работах [12, 13] предполагается, что рост гранул пропорционален относительной доле площади поверхности гранул. Поскольку площадь поверхности пропорциональна квадрату размера частиц ядер, то естественно сделать вывод о квадратичной зависимости. Использование автором экспоненциальной и квадратичной зависимостей роста оболочки гранул не получило экспериментального подтверждения.

### Материалы и методы

Изучение процесса гранулирования обычно начинается с исследования характеристик исходных ядер. Гранулометрический состав ядер (щебня) представлен в табл. 1.

При определении гранулометрического состава масса навески составила 3000,2 г; общее количество частиц – 6862 шт. При этом масса пылеватой фракции после просева составила 0,2 г, а лещадные частицы учтены в общий вес и количество частиц фракций ввиду малого их содержания (0,9% по количественному составу и менее 0,4% по массе). Коэффициент формы частиц щебня в табл. 1 рассчитывался как отношение средней массы частиц к массе сферической частицы с диаметром, равным среднему размеру [7].

Для определения объема пустот в слое ядер (щебня) в насыпном состоянии проводился следующий опыт. Определялся вес щебня до гранулирования. Щебень засыпался в лабораторную стеклянную колбу, затем слой щебня заливался водой с температурой 20° до полного заполнения слоя и снова взвешивался. Зная увеличение веса до и после заливания водой, определяли массу залитой воды при заданной температуре и соответственно объем пустот.

При рассмотрении компонентного состава, в процессе структурообразования и как следует из этого, в конечном уровне физико-механических характеристик дорожных покрытий, устроенных из асфальтобетонных смесей, ключевую роль играет не битумное вяжущее, а асфальтовяжущее вещество. Состав и роль

**Таблица 1**  
**Table 1**

**Гранулометрический состав ядер**  
**Granulometric composition of crushed stone**

Фракция, мм	Масса, г	Количество, шт.	Содержание от общего по массе, %	Содержание от общего в штуках, %	Коэффициент формы
5–5,6	23	112	0,8	1,63	0,94
5,6–7	984	3103	32,8	45,22	1,17
7–7,5	852	1258	28,4	18,33	1,3
7,5–8	1141	2389	38	34,82	0,72

асфальтовяжущего определил в середине XX в. профессор П.В. Сахаров [14]. Технологическая и сырьевая база отрасли производства асфальтобетонных смесей существенно изменилась за столь большой период, при этом теория асфальтовяжущего вещества является одной из главенствующих в вопросе проектирования и создания асфальтобетонных смесей как в отечественной, так и в зарубежной науке [15, 16].

В рамках технологии гранулирования окатывани-ем в процессе получения двухслойных гранул наиболее важным показателем является толщина наносимой оболочки асфальтовяжущего вещества. В соответствии с требованиями формирования прочной и водостойкой структуры композита (в рассматриваемом контексте – асфальтобетонного покрытия) наилучшие условия будут созданы тогда, когда объем оболочек асфальтовяжущего вещества вокруг ядер щебня будет равен объему пустот в слое щебня либо по крайней мере будет стремиться к этому показателю [17, 18]. Стоит отметить, что непосредственно приблизиться к данному значению зачастую не представляется возможным ввиду объективно допустимых возможностей абсолютного уплотнения асфальтобетонных смесей любой механизированной техникой. В связи с этим действующим ГОСТ 9128–2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия» предусмотрены лишь верхние пороговые значения остаточной пористости.

Исследования, проведенные автором, показывают, что для щебня габбро-диабаз фракции 5–8 мм объем пустот составляет 41,21%. В табл. 2 представлены данные по увеличению объема при получении двухслойных гранул для частиц щебня различной формы при нанесении оболочки с фиксированной толщиной 0,6 мм.

Приведенные данные показывают, что при нанесении оболочки толщиной 0,6 мм при среднем размере крупности частиц 6 мм прирост объема слоя частиц гранулированной асфальтобетонной смеси составляет в среднем 40%. Следует отметить, что крупность частиц при этом увеличивается в среднем на 20%. На основании полученных результатов была предварительно сделана оценка средней толщины наносимого покрытия.

Для описания гранулометрического состава твердых частиц наиболее широко используется инте-



Рис. 1. Распределение твердых частиц щебня по крупности  
Fig. 1. Distribution of solid particles of crushed stone by size

гральная функция распределения частиц по крупности [19, 20], оценка которой может быть определена по следующей формуле:

$$F = \frac{N_i}{N}, \quad (1)$$

где  $N_i$  – число частиц, имеющих размеры меньше, чем  $x_i$ , мм;  $N$  – общее число твердых частиц, мм.

На рис. 1 представлена гистограмма дифференциальной функции распределения по крупности твердых частиц щебня (ядер) и распределения по массе доли крупности твердых частиц щебня (ядер), которая построена по данным табл. 1.

Гистограмма показывает, что наибольшее значение оценки функции плотности вероятности принимает на отрезке значений крупности 5,6–7 мм; в свою очередь, наибольшее значение массовой доли принимает на отрезке значений крупности 7,5–8 мм.

Для построения выражения интегральной функции распределения частиц по крупности  $F(x)$  воспользуемся регрессионными методами. Используя в качестве регрессионной зависимости полином 2-го порядка, окончательно получим следующую формулу:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < 5; \\ 0,065x^2 - 0,49x + 0,8, & \text{при } 5 \leq x \leq 8; \\ 1, & \text{при } x > 8. \end{cases} \quad (2)$$

С помощью критерия Пирсона [21] производилась статистическая проверка соответствия интегральной функции распределения частиц по крупности, определяемой по формуле (2) и гистограмме, представленной на рис. 1. С надежностью  $\gamma = 0,95$  было установлено, что теоретическое распределение, определяемое формулой (2), не проти-

Таблица 2  
Table 2

Зависимость прироста объема пустот от формы гранул  
The dependence of the increase in the volume of voids on the shape of the granules

Форма частиц	Параметр А, мм	Параметр В, мм	Параметр С, мм	Объем, мм <sup>3</sup>	Прирост объема, %
Сферическая	6	6	6	113,04	42,13
Вытянутый эллипсоид	6	6	12	226,08	36,87
Сплюснутый эллипсоид	4	6	6	75,36	46,58
Кубическая	6	6	6	216	42,13

Примечание. А, В, С – размеры частиц в трех осях измерений.

воречит экспериментальным данным, представленным на рис. 1.

При определении гранулометрического состава конечного асфальтового гранулята будем исходить из следующих предположений. В процессе гранулирования ядра (частицы щебня) не слипаются между собой. Вторым предположением является допущение о том, что не происходит образования пустых гранул, не содержащих ядра (частицы щебня). Если не происходит слипания ядер и образования пустых гранул, то общее количество гранул в процесс гранулирования остается постоянным. Тогда количество гранул в каждой исходной фракции остается неизменным, а меняются только границы размеров частиц. В результате можно записать:

$$P_i^* = P_i, \quad (3)$$

где  $P_i$  и  $P_i^*$  – соответственно доли частиц  $i$ -й фракции до и после получения двухслойных гранул.

Опыт получения двухслойных гранул показывает, что толщина наращиваемой оболочки пропорциональна исходному размеру ядер.

Тогда можно записать:

$$\delta = \lambda x, \quad (4)$$

где  $\delta$  – толщина слоя наращиваемой оболочки;  $\lambda$  – некоторая константа, величина которой зависит от общего объема покрытия, наносимого на все ядра.

Общий объем наносимого покрытия определяется по следующей формуле:

$$V = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{\pi}{6} [(x_i + \lambda x_i)^3 - x_i^3] f(x) dx, \quad (5)$$

где  $f(x)$  – дифференциальная функция распределения ядер по размерам, которая определяется по следующей формуле:

$$f(x) = \frac{dF(x)}{dx}. \quad (6)$$

Уравнение (4) может использоваться для определения величины  $\lambda$ . При расчетах используется тот факт, что объем покрытия должен быть равен объему пустот в исходном материале ядер (щебня).

Пусть величина  $\lambda$  определена. Тогда строим конечное распределение, используя условие (3). Если исходная фракция имела размеры  $(x_i, x_{i+1})$ , то после гранулирования в соответствии с формулой (3) ее размеры будут лежать в интервале  $(x_i + \lambda x_i, x_{i+1} + \lambda x_{i+1})$ . Тогда в соответствии с формулой (2) получим:

$$P^* \{x_i + \lambda x_i \leq x \leq x_{i+1} + \lambda x_{i+1}\} = P_i, \quad (7)$$

где  $P_i$  – соответственно доля частиц  $i$ -й фракции до получения двухслойных гранул.

По формуле (7) можно определить интегральную функцию распределения:

$$F(x) = P \{x \leq x_{i+1} + \lambda x_{i+1}\} = \sum_{j=1}^i P_j. \quad (8)$$

Используя данные табл. 1, формулы (7, 8) и в качестве регрессионной зависимости полином

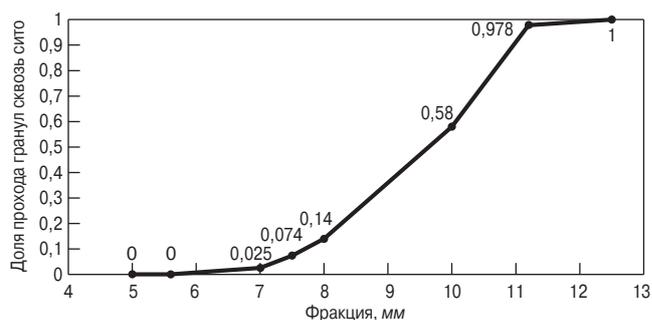


Рис. 2. Интегральное распределение частиц гранулированной асфальтобетонной смеси по крупности

Fig. 2. Integral particle size distribution of granular asphalt mix

2-го порядка, окончательно получим следующую формулу:

$$F(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < 5; \\ 0,035x^2 - 0,41x + 1,18, & \text{при } 5 \leq x \leq 11,2; \\ 1, & \text{при } x > 11,2. \end{cases} \quad (9)$$

На рис. 2 представлен прогноз гранулометрического состава гранулированной асфальтобетонной смеси, рассчитанный по формуле (9) и исходным данным, представленным в табл. 1. При расчетах использовалось значение  $\lambda = 0,49$ , которое было рассчитано по формуле (5) с учетом того, что прирост объема гранулированной асфальтобетонной смеси по сравнению с объемом ядер (щебня) составил 40%.

При определении массовой доли фракций готовых гранул по крупности будем предполагать, что плотность покрытия на всех гранулах одинакова и равна  $\rho_{\text{покр}}$ . Тогда масса  $i$ -й фракции после гранулирования будет равна:

$$m_i^* = m_i + k_{\text{фи}} \rho_{\text{покр}} \int_{x_i}^{x_{i+1}} \frac{\pi}{6} [(x_i + \lambda x_i)^3 - x_i^3] f(x) dx, \quad (10)$$

где  $m_i$  – масса  $i$ -й фракции до гранулирования;  $k_{\text{фи}}$  – коэффициент формы  $i$ -й фракции, значение которого приведено в табл. 2; функция  $f(x)$  определяется формулой (6).

### Результаты и обсуждение

Для сравнения данных теоретических выкладок с экспериментом были проведены лабораторные исследования процесса получения гранулированной асфальтобетонной смеси в латунном тарельчатом грануляторе при следующих технологических параметрах: диаметр барабана 450 мм, диаметр загрузочной горловины 200 мм, высота стенки 180 мм, угол наклона барабана 55°, частота вращения 45 об/мин. Компонентный состав гранулированной асфальтобетонной смеси представлен в табл. 3.

Модификация битума флексой полиэтилентерефталата протекала в отдельном реакторе при постоянной гомогенизации смеси лопастной мешалкой с частотой вращения 60 об/мин при температуре 235°. В разогретый газовой горелкой до 150° барабанный гранулятор вносилась вся порция щебня, процесс грануляции окатыванием начинался при стаби-

Таблица 3  
Table 3

Компонентный состав гранулированной асфальтобетонной смеси  
Component composition of granular asphalt mix

Компонент	Содержание	
	%	г
Щебень габбро-диабаз фр. 5–8 по ГОСТ 8267–93	58	3000
Фосфогипс типа Б (полуводный) по ТУ 2141-693-00209438–2015 «Гипс технический»	32	1655
Модифицированное ПЭТФ битумное вяжущее:	10	517
– битум БНД 60/90 по ГОСТ 22245–90	9	465
– ПЭТФ вторичный (ПЭТФ-флекса) фр. 5–10 по ГОСТ Р 51695–2000 «Полиэтилентерефталат»	1	52

Таблица 4  
Table 4

Гранулометрический состав асфальтобетонной смеси  
Granulometric composition of the asphalt concrete mix

Фракция, мм	Масса, г	Количество, шт.	Содержание, мас. % от общего	Содержание от общего в штуках, %
≤5	26	250	0,5	4,2
5–5,6	35,4	166	0,7	2,8
5,6–7	300,8	686	5,7	11,6
7–7,5	497,2	877	1,8	3,3
7,5–8	1385	2055	26,3	34,9
8–10	1536	1477	29,1	25,1
10–11,2	1241,6	861	23,6	14,6
11,2–12,5	113	49	2,1	0,8
≥12,5	537,4	170	10,2	2,9

лизации температуры щебня в диапазоне 130–150°. В объем гранулятора вводилась первая порция модифицированного битума. При наступлении полного окатывания щебня модифицированным ПЭТФ (полиэтилентерефталатом) вяжущим вводилась первая порция фосфогипса. Всего наносилось пять слоев покрытия. Объем модифицированного ПЭТФ вяжущего и масса фосфогипса, вводимого в объем гранулятора, повышались по мере роста оболочек гранул. Последней порцией вводилось модифицированное ПЭТФ вяжущее. Остывание смеси производилось на воздухе в один слой, во избежание образования агломератов гранул. Гранулометрический состав определялся ситовым анализом. В табл. 4 приведены данные по гранулометрическому составу гранулированной асфальтобетонной смеси.

На рис. 3 представлена гистограмма распределения частиц асфальтового гранулята по крупности. Приведенные данные показывают, что наибольшее число частиц составляет фракция 7,5–8 мм.

С помощью критерия Пирсона [21] производилась статистическая проверка соответствия интегральной функции распределения частиц по крупности, пред-

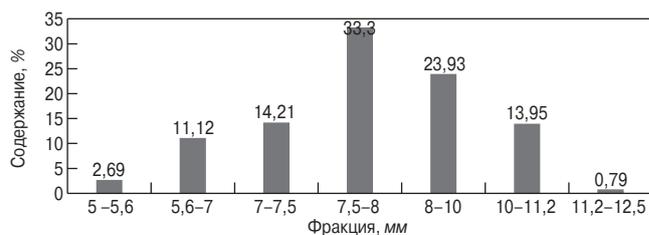


Рис. 3. Гистограмма распределения частиц гранулированной асфальтобетонной смеси по крупности

Fig. 3. Histogram of particle size distribution of granular asphalt mix

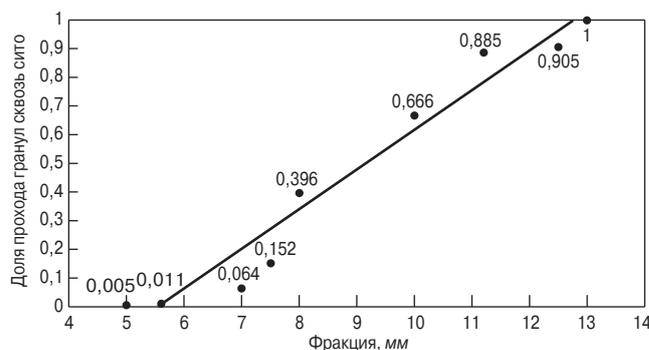


Рис. 4. Интегральная функция распределения массовой доли готовых гранул

Fig. 4. Integral distribution function of the mass fraction of finished granules

ставленной на рис. 2 и определяемой формулой (8), и гистограммы на рис. 3.

С надежностью  $\gamma=0,9$  было установлено, что теоретическое распределение, приведенное на рис. 2, не противоречит экспериментальным данным на рис. 3.

При сравнении теоретических и экспериментальных результатов по массе следует учесть, что формула (10) позволяет рассчитать массу исходных выделенных фракций по размерам ядра. После гранулирования размеры гранул увеличиваются и границы размеров исходных фракций не совпадают с границами фракций, полученными в результате ситового анализа. Поэтому вначале строится интегральная функция распределения массовой доли готовых гранул. После этого рассчитывается масса готовых гранул в исходных фракциях и сравнивается с массой, рассчитанной по формуле (10).

На рис. 4 представлена интегральная функция распределения массовой доли готовых гранул, построенная по данным табл. 4.

Используя данные табл. 4, формулы (11, 12) и используя в качестве регрессионной зависимости полином 2-го порядка, окончательно получим следующую формулу:

$$F_d^*(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < 5; \\ 0,001x^2 + 0,1209x - 0,7017, & \text{при } 5 \leq x \leq 13; \\ 1, & \text{при } x > 13. \end{cases} \quad (11)$$

Используя формулу (11), рассчитываем массу готовых гранул в исходных фракциях ядер:

$$m_i^* = m[F_d^*(x_{i+1} + \lambda x_{i+1}) - F_d^*(x_i + \lambda x_i)], \quad (12)$$

где  $m$  – общая масса готовых гранул.

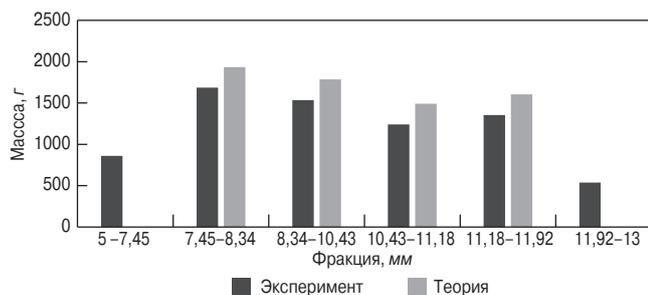


Рис. 5. Сравнение теоретических и экспериментальных данных по массе фракций

Fig. 5. Comparison of theoretical and experimental data on the mass of fractions

### Заключение

На рис. 5 приведено сравнение теоретических данных, рассчитанных по формуле (10), и экспериментальных данных по массе фракций. Экспериментальные данные рассчитаны по формулам (11, 12).

Полученные результаты, приведенные на рис. 3, свидетельствуют о неравномерности роста асфальто-

вых гранул. Причем толщина оболочки на частицах щебня самой крупной фракции превышает почти в два раза толщину оболочки на частицах щебня самой мелкой фракции.

Полученные результаты, приведенные на рис. 5, свидетельствуют о том, что теоретические данные дают завышенный результат по массе готовых гранул. Это объясняется тем, что при построении модели предполагалось, что слипания ядер и образования пустых гранул без ядер не происходит. На самом деле этот процесс имеет место и часть материала покрытия идет не на рост гранул, а на побочные процессы (образование гранул без зародышевого ядра, налипание на стенки тарели гранулятора).

Доказано, что количество слипшихся гранул не превышает 2,9%. В свою очередь, процент гранул без зародышевого ядра не превышает 4%.

Максимальное расхождение по массе фракций не превышает 15%. Тем не менее теоретические результаты дают удовлетворительное соответствие эксперименту.

### Список литературы

- Новиченкова Т.Б., Петропавловская В.Б., Завадько М.Ю., Бурьянов А.Ф., Пустовгар А.П., Петропавловский К.С. Применение пылевидных отходов базальтового производства в качестве наполнителя гипсовых композиций // *Строительные материалы*. 2018. № 8. С. 9–13. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-9-13>
- Орешкин Д.В., Шадрунова И.В., Чекушина Т.В., Прошляков А.Н. Утилизация отходов мрамора и бурового шлама в процессе производства строительных материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-65-72>
- Руденский А.В. Рациональное использование строительных материалов и ресурсосбережение – актуальные направления повышения эффективности работ при строительстве и ремонте автомобильных дорог // *Строительные материалы*. 2017. № 3. С. 76–80.
- Котлярский Э.В. Научно-методические основы оценки структурно-механических свойств композиционных материалов на основе органических вяжущих // *Строительные материалы*. 2011. № 10. С. 36–41.
- Рыбьев И.А. Строительные материалы на основе вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1978. 309 с.
- Патент РФ 2762177. Способ получения гранулированной асфальтобетонной смеси на основе дисперсных промышленных и бытовых отходов / Герасимов Д.В., Готовцев В.М., Игнатьев А.А. Заявл. 22.01.2021. Оpubл. 16.12.2021. Бюл. № 35.
- Терентьев А.М., Степаньянц Н.И. Аналитическое описание закона роста гранул в барабанных грануляторах-сушилках // *Теоретические основы химической технологии*. 1988. Т. 22. № 2. С. 270.

### References

- Novichenkova T.B., Petropavlovskaya V.B., Zavad'ko M.Yu., Buryanov A.F., Pustovgar A.P., Petropavlovskii K.S. The use of dusty wastes of basalt production as a filler for gypsum compositions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2018. No. 8, pp. 9–13. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-9-13>
- Oreshkin D.V., Shadrunova I.V., Chekushina T.V., Proshlyakov A.N. Disposal of waste marble and drill cuttings in the production of building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 4, pp. 65–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-65-72>
- Rudenskiy A.V. Rational application of building materials and resource saving – actual way of improving works efficiency when constructing and repairing automobile roads. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 3, pp. 76–80. (In Russian).
- Kotlyarskiy E.V. Scientific and methodical bases of an estimation of structural and mechanical properties of composite materials on the basis of organic binders. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 10, pp. 36–41. (In Russian).
- Rybiev I.A. *Stroitel'nye materialy na osnove vyazhushchih veshchestv* [Construction materials on the basis of binders]. Moscow: Vysshaya shkola. 1978. 309 p.
- Patent RF 2762177. *Sposob polucheniya granulirovannoy asfal'tobetonnoy smesi na osnove dispersnyh promyshlennyh i bytovykh othodov* [Method of obtaining granulated asphalt-concrete mixture on the basis of dispersed industrial and municipal wastes]. Gerasimov D.V., Gotovtsev V.M., Ignatiev A.A. Application. 22.01.2021. Published 16.12.2021. Bulletin no. 35. (In Russian).
- Terent'ev A.M., Stepanyants N.I. Analytical description of pellet growth law in drum granulator-dryers.

8. Попов А.М., Плотников К.Б., Устинова Ю.В., Крюк Р.В., Плотникова И.О. Исследование кинетики сушки полидисперсных продуктов // *Вестник ВГУИТ*. 2021. № 3 (89). DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-3-30-37>
9. Lichak D., Bytev D., Zaitsev A., Murashov A. Production of two-layer granules in machines with screw grooves. *XVI Ogólnopolska konferencja inżynierii chemicznej procesowj*. Krakow – Muslyna. 1998. Vol. 2, pp. 263–272.
10. Таран А.Л., Носов Г.А. Оценка условий, обеспечивающих гранулирование порошков окатыванием на частицах ретур // *Химическая промышленность*. 2000. № 3. С. 45–48.
11. Лобовиков Д.В., Матыгуллина Е.В. Получение композиционных гранулированных материалов в планетарном грануляторе. Пермь: Изд-во Пермского государственного технического университета, 2008. 153 с.
12. Одинцов А.В., Липин А.Г., Степанов В.В. Капсулирование минеральных удобрений в тарельчатом грануляторе // *Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение*. 2009. № 4. С. 64–68.
13. Липин А.Г., Одинцов А.В. Прогнозирование гранулометрического состава при получении двухслойных гранул // *Известия вузов. Химия и химическая технология*. 2010. Т. 53. № 5. С. 120–122.
14. Сахаров П.В. Способы проектирования асфальтобетонных смесей // *Транспорт и дороги города*. 1935. № 12. С. 22–26.
15. Ширяев А.О., Высоккая М.А. Минеральный порошок в современной системе проектирования асфальтобетонных систем // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2022. № 2. С. 8–19. DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-19>
16. Kocserha R. Some research results of conventional mineral fillers used in road construction // *Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 45. No. 1. pp. 96–105. DOI: 10.32974.mse.2020.009
17. Готовцев В.М., Шатунов А.Г., Румянцев А.Н., Сухов В.Д. Принципы формирования оптимальной структуры асфальтобетона // *Фундаментальные исследования*. 2012. № 11/1. С. 124–128.
18. Кирюхин Г.Н. К вопросу о теории структуры асфальтобетона // *Дороги и мосты: сборник*. 2019. № 41/1. С. 247–261.
19. Rimša V., Kačianauskas R., Sivilevičius H. Numerical analysis of as-phalt mixture and comparison with physical Marshall test. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2014. No. 20 (4), pp. 570–580. DOI: <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.920413>
20. Unsiwilai S., Sangpetngam B. Influences of particle size and content on deformation resistance of crumb rubber modified asphalt using dry process mix. *Engineering Journal*. 2018. Vol. 22. No. 3. DOI: 10.4186/ej.2018.22.3.181
21. Greenwood P.E., Nikulin M.S. A guide to chi-squared testing. New York: Wiley, 1996. 280 p.
8. Popov AM, Plotnikov KB, Ustinova AV, Kruk RV, Plotnikova I.O. The study of the kinetics of drying polydisperse products. *Vestnik VGUIT*. 2021. No. 3 (89), pp. 30–37. (In Russian). DOI: <http://doi.org/10.20914/2310-1202-2021-3-30-37>.
9. Lichak D., Bytev D., Zaitsev A., Murashov A. Production of two-layer granules in machines with screw grooves. *XVI Ogólnopolska konferencja inżynierii chemicznej procesowj*. Krakow – Muslyna. 1998. Vol. 2, pp. 263–272.
10. Taran A.L., Nosov G.A. Evaluation of conditions ensuring powders granulation by pelletizing on retur particles. *Himicheskaya promyshlennost'*. 2000. No. 3, pp. 45–48. (In Russian).
11. Lobovikov D.V., Matyugullina E.V. Poluchenie kompozitsionnyh granulirovannyh materialov v planetarnom granulyatore [Obtaining composite granulated materials in a planetary granulator]. Perm: Izdatel'stvo Permskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2008. 153 p.
12. Odintsov A.V., Lipin A.G., Stepanov V.V. Mineral fertilizers encapsulation in the disk granulator. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie*. 2009. No. 4, pp. 64–68. (In Russian).
13. Lipin A.G., Odintsov A.V. Prediction of the granulometric composition in obtaining two-layer pellets. *Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya*. 2010. Vol. 53. No. 5, pp. 120–122. (In Russian).
14. Sakharov P.V. Methods of designing asphalt concrete mixtures. *Transport i dorogi goroda*. 1935. No. 12, pp. 22–26. (In Russian).
15. Shiryayev A.O., Vysotskaya M.A. Mineral powder in a modern design system of asphalt concrete. *Vestnik of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2022. No. 2, pp. 8–19. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2021-7-2-8-19>
16. Kocserha R. Some research results of conventional mineral fillers used in road construction. *Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 45. No. 1, pp. 96–105. DOI: 10.32974.mse.2020.009.
17. Gotovtsev V.M., Shatunov A.G., Rummyantsev A.N., Sukhov V.D. Principles of formation of the optimal structure of asphalt concrete. *Fundamental'nye issledovaniya*. 2012. No. 11/1, pp. 124–128. (In Russian).
18. Kiryukhin G.N. To a question about the theory of asphalt concrete structure. *Dorogi i mosty: sbornik*. 2019. No. 41/1, pp. 247–261. (In Russian).
19. Rimša V., Kačianauskas R., Sivilevičius H. Numerical analysis of as-phalt mixture and comparison with physical Marshall test. *Journal of Civil Engineering and Management*. 2014. No. 20 (4), pp. 570–580. DOI: <https://doi.org/10.3846/13923730.2014.920413>
20. Unsiwilai S., Sangpetngam B. Influences of particle size and content on deformation resistance of crumb rubber modified asphalt using dry process mix. *Engineering Journal*. 2018. Vol. 22. No. 3. DOI: 10.4186/ej.2018.22.3.181
21. Greenwood P.E., Nikulin M.S. A guide to chi-squared testing. New York: Wiley, 1996. 280 p.

# 23-я Международная конференция с успехом прошла в Мурманске



## The 23<sup>rd</sup> International Baltimix Conference was successfully held in Murmansk

23–25 августа 2023 г. в Мурманске прошла Международная конференция производителей сухих строительных смесей – Baltimix.

Традиционно организатором конференции выступило ивент-агентство КВИНТЕТ (Санкт-Петербург) при научной поддержке НИУ МГСУ (Москва) и участии представителей Российского союза строителей; Ассоциации «Национальное объединение производителей строительных материалов и строительной индустрии» (НОПСМ); Российской гипсовой ассоциации; Ассоциации «Союз производителей сухих строительных смесей».

Спонсорами Baltimix в 2023 г. стали производители химических добавок и строительного оборудования: ГК «ПОЛИПЛАСТ» (г. Новомосковск, Тульская обл.); компании «Химпром» и «ХимИнТех» (Пермь); ГК «Строймеханика» (Тула).

В 2023 г. конференция собрала еще большее количество участников в сравнении с 2022 г. — более 270 специалистов из 126 компаний, 47 из которых производители сухих строительных смесей. Несмотря на продолжающееся санкционное давление, конференция Baltimix и в 2023 г. сохранила статус международной: в работе мероприятия приняли участие представители бизнеса Армении, Казахстана, Китая, Беларуси, Турции и Южной Кореи.

В рамках деловой программы конференции в течение двух дней были заслушаны 35 докладов, посвященные различным вопросам технологии и тенденциям рынка ССС. Участники обсудили ситуацию, сложившуюся в отрасли, перспективы развития, импортозамещение, поиск новых поставщиков и рынков сбыта.

*On August 23–25, 2023, the International Conference of Manufacturers of Dry Building Mixes – Baltimix was held in Murmansk.*

*Traditionally, the conference was organized by the KVINTET event-agency (St. Petersburg) with the scientific support of NRU MGSU (Moscow) and the participation of representatives of the Russian Union of Builders; Association «National Association of Manufactures of Building Materials and the Construction Industry» (NOPSМ); Russian Gypsum Association; Association «Union of Producers of Dry Building Mixes».*

*Baltimix sponsors in 2023 were manufacturers of chemical additives and construction equipment: POLYPLAST Group (Novomoskovsk); Khimprom Company and ChemInTech Company (Perm); Stroymechanika Group of Companies (Tula).*

*In 2023, the conference brought together an even larger number of participants, compared to 2022 – more than 270 specialists from 126 companies, 47 of which are manufacturers of dry building mixtures. Despite the ongoing sanctions pressure, the Baltimix Conference retained its international status in 2023 as business representatives from Armenia, Kazakhstan, China, Belarus, Turkey and South Korea took part in the event.*

*As part of the business program of the Conference, 35 reports were heard over 2 days, dedicated to various aspects and trends of the Dry Building Mixes market. The participants discussed the situation in the industry, development prospects, import substitution, the search for new suppliers and markets.*

Площадкой проведения конференции Мурманск был выбран не случайно. В марте 2021 г. Правительство России утвердило государственную программу развития арктических территорий. Осуществление программы позволит создать десятки тысяч новых рабочих мест и повысить доходы людей, оказать бизнесу поддержку в реализации перспективных проектов и привлечь в регионы Арктики инвесторов и квалифицированных специалистов.

От лица руководства Мурманской области с приветственным словом выступил первый заместитель министра строительства **А.Н. Грачиков**, кратко представивший состояние строительной отрасли региона, ход реализации различных программ, в том числе проектов по повышению комфортности городской среды и обще-

ственных пространств. Алексей Николаевич подчеркнул, что проведение таких масштабных мероприятий очень важно, и выразил надежду на развитие подотрасли сухих строительных смесей в регионе.

С докладом о совместной работе РСПП и Министерства строительства России в области технического регулирования строительного комплекса выступил заместитель сопредседателя Комитета РСПП по промышленной политике и техническому регулированию, председатель Совета по техническому регулированию и стандартизации при Минпромторге России (Москва) **А.Н. Лоцманов**. Он рассказал о ходе реализации второй Дорожной карты по совершенствованию нормативной документации в стро-





Директор исполнительной дирекции Российского союза строителей (Москва) **К.Э. Буравлев** представил доклад на тему «Особенности индустриализации строительства в Арктической зоне»



Участников конференции приветствует **А.Ф. Бурьянов**, д-р техн. наук, профессор, исполнительный директор Российской гипсовой ассоциации, член редакционного совета журнала «Строительные материалы»



О состоянии рынка химических добавок рассказал коммерческий директор РПП и ПК ГК «Полипласт» **Д.Ю. Фирсаев**



Впервые в работе конференции принял участие операционный директор DK FineChem\* **Браян Ли** (Brayan Lee). Он представил добавки для производства сухих строительных смесей из Кореи  
\*DFC является ведущим производителем эфиров целлюлозы

ительстве. Особо отметил важность вопросов стандартизации, в том числе межгосударственной, для организации производства новых, импортозамещающих строительных материалов и техники. Также Андрей Николаевич проинформировал о ходе разработки технического регламента ЕАЭС «О безопасности строительных материалов и изделий», ходе обсуждения его первой редакции. Он подчеркнул, что вступление в силу данного регламента позволит уменьшить долю контрафакта и фальсификата на рынке России и ЕАЭС, обеспечить строительство безопасных зданий и сооружений.

Более подробно о содержании технического регламента о безопасности строительных материалов и изделий (СМИИ) рассказал управляющий Ассоциацией «Союз производителей сухих строительных смесей» (Москва) **Р.Н. Борисов**. Настоящий технический регламент разработан в соответствии с Договором о Евразийском экономическом союзе от 29 мая 2014 г. в целях защиты жизни и (или) здоровья человека, имущества, окружающей среды, жизни и (или) здоровья животных и растений, предупреждения действий, вводящих в заблуждение потребителей, обеспечения энергетической эффективности и ресурсосбережения. Документ устанавливает обязательные минимально необходимые условия для исполнения и применения требований, обеспечивающих безопасность выпускаемых в обращение на территориях стран – участников ЕАЭС строительных материалов и изделий, а также правила их оценки соответствия; кроме того регламент распространяется на процессы производства, хранения, транспортировки, упаковки и процедуры маркировки, связанные с продукцией. Официальное общественное обсуждение документа завершилось 8 сентября 2023 г. После анализа замечаний и предложений, поступивших по итогам публичного рассмотрения, запланировано проведение международной конференции, где Межгосударственная рабочая группа рассмотрит свод замечаний и обновленную редакцию технического регламента (с документом можно ознакомиться по ссылке [https://docs.eaeunion.org/pd/ru-ru/0108427/pd\\_20062023](https://docs.eaeunion.org/pd/ru-ru/0108427/pd_20062023)).



Традиционно большой интерес участников вызвал аналитический доклад научного руководителя конференции Baltimix, руководителя комитета РСС по науке и инновационному развитию строительной отрасли, профессора, канд. техн. наук, МГСУ (Москва), **А.П. Пустовгара** о состоянии строительной отрасли в 2023 г. и перспективах ее развития. По представленной оценке, на начало 2023 г. в секторе жилищного строительства наблюдался всплеск (+18% относительно показателей 2022 г.); к концу июля рынок вышел на 60 млн м<sup>2</sup> построенного жилья, что совпадает с результатами аналогичного периода 2022 г. По предварительной оценке, к концу 2023 г. рынок должен выйти на поставленный правительством показатель – 100 млн м<sup>2</sup>. Эти данные свидетельствуют, что строительный рынок и рынок производства строительных материалов успешно справляются со сложившейся ситуацией. При этом интересным фактом являются данные, что примерно 60% построенных площадей (данные по Московскому региону) не проданы: стоят построен-





Руководитель отдела продаж «Хим Ин Тех» **П.В. Еловиков** представил линейку химических реагентов, производимых компанией, и подробно остановился на использовании бутилакрилат стирольного РПП в создании эластичных гидроизоляционных покрытий



Интересную дискуссию и ряд вопросов вызвало совместное выступление **Р.Г. Фафанова** (ген. директор) и **С.В. Дьячкова** (менеджер по развитию бизнеса), компания «Реттенмаер Рус» (Москва), о возможности печати дома на 3D-принтере



Применению СП 71.13330 «Изоляционные и отделочные покрытия» как стартового документа нормативного обеспечения в области отделочных работ посвящено выступление **А.Ю. Абрамовой**, зав. лабораторией физико-химического анализа НИИ СМиТ НИУ МГСУ

ные, но не востребованные. А учитывая, что основной потребитель ССС – производитель отделочных работ, роста спроса на сухие смеси не наблюдается.

По оптимистичному прогнозу генерального директора компании «Строительная информация» **Е.Н. Ботки**, емкость рынка ССС в 2023 г. составит 12,4 млн т (+7%) относительно 2022 г. При этом в I квартале 2023 г. продажи всех видов ССС (цементные ССС, гипсовые/комплексные ССС, полимерные ССС) составили 2,3 млн т (-10,8% относительно аналогичного периода 2022 г.). Однако уже к концу первого полугодия этот показатель составил +0,2%. При этом, по предварительной оценке, на 2024–2025 гг. значительного роста рынка ССС не предвидится.

Как и годом ранее, живой интерес участников вызвали доклады производителей и импортеров добавок для сухих строительных смесей, так как в условиях продолжающихся санкций и не до конца разрешенных вопросов логистики у производителей смесей все еще остро стоят вопросы адаптации рецептур, подбора составов, внедрения новых компонентов.

Основными проблемами в настоящее время является сохраняющийся дефицит РПП и других химических добавок; прекращение поставок РПП из Европы; резкие колебания курса рубля; ограниченные мощности российских производителей РПП и др.

При этом российские и иностранные производители уже практически полностью закрыли дефицит. На конференции свою продукцию представили компании «Полипласт», «Хим Ин Тех», «Химпром», «ЕТС», «Хома», «Аддитив Плюс», DK FineChem и др.

Зарубежные производители оборудования, ограничившие деятельность в России либо заявившие об уходе с российского рынка, заставили многие компании искать замену или альтернативу прежним продуктам и системам, решать вопросы, связанные со стабильностью и непрерывностью производственных процессов.

Приятно отметить, что на рынке присутствует и постоянно появляется все больше отечественных производителей, готовых предоставлять качественные агрегаты, узлы и оборудование.

Большой интерес участников вызвал доклад генерального директора ГК «Строймеханика» (Тула) **А.В. Терняева**. Завод «Строймеханика» производит промышленное оборудование с 2000 г., специализируется на разработке и установке заводов для обогащения и подготовки сырья, заводов по производству сухих смесей, проводит автоматизацию и модернизацию устаревшего оборудования, разрабатывает и внедряет автоматизированные системы управления заводами, складами сыпучих материалов, системами измерения массы груза.

Впервые приняли участие в конференции представители компании «СПЛАЙН-М» (г. Пенза), производящей оборудование для сушки/обжига/карбонизации сыпучих мате-



Бесменный коллектив организаторов Baltimix – ивент-агентства КВИНТЕТ (г. Санкт-Петербург) О.В. Островерхая, М.А. Новоселецкая, М.Г. Суслова, Е.М. Еремеева, Т.В. Усачева



риалов. Генеральный директор **А.Н. Серов** представил запатентованный сушильный барабан с расширенной передней частью и температурой входящего агента 1340–1500°C, который удаляет влагу из сыпучего материала путем его тепловой обработки (сушки) в потоке отходящих газов от теплогенератора (газовой или дизельной горелки) в непрерывном режиме.

Еще одного дебютанта конференции – завод ААМикс (Санкт-Петербург) представил руководитель проектов **А.С. Яськов**. Компания занимается разработкой и производством оборудования для сухих строительных смесей, а также для переработки и хранения сыпучих материалов. Благодаря накопленному опыту в данной сфере, собственному металлообрабатывающему производству, использованию инновационных технологий и высокой квалификации специалистов продукция компании успешно конкурирует с изделиями импортных производителей.

Традиционным стало выступление **Д. Карабрахимоглу**, директора по продажам и маркетингу компании PARGET MAKINA (Турция). В 2023 г. компании исполняется 10 лет, и к своему юбилею она представлена в 35 странах; реализовала 38 проектов «под ключ»; продала 7,5 тыс. единиц оборудования. Наиболее значимыми для России реализованными производствами стали: завод по производству гипса производительностью 1 тыс. т/сут (ООО «Волма»); завод по производству гипса производительностью 650 т/сут (ООО «Черкескстром»); завод по производству извести производительностью 440 т/сут (МЗ Балаково).

Заводы и оборудование для производства ССС китайского производителя Fujian South Highway Machinery Co., Ltd (NFLG) представил **Вэнь Хайфэн**. Компания NFLG была основана в 1991 г. и является производителем комплексных решений по переработке и производству материалов для строительства. Основываясь на глубоком понимании промышленного развития и более чем тридцатилетних специализированных исследованиях и разработках, NFLG сформировала экологический замкнутый цикл производственной цепочки, представленный тремя основными секторами: сектор обработки материалов; смесительного оборудования и переработки строительных отходов. Таким образом NFLG предоставляет клиентам более безопасное, экологически чистое, эффективное и умное комплексное решение для переработки и производства строительных материалов.

Вопрос состояния рынка бумажных мешков в России и их производства в условиях санкций подняла в своем выступлении руководитель отдела продаж компании «ВЕЛКОМС+» (Москва)

**О.Н. Купцова**. Она отметила, что, несмотря на все сложности, компания справляется со своими задачами. В настоящее время фабрика имеет проектную мощность выпуска продукции 40 млн шт./г., а к 2027 г. планирует выйти на показатель 107 млн шт./г.

Ряд докладов был посвящен актуальной и набирающей популярность теме – аддитивное строительство – 3D-печать, внедрение которой, по мнению специалистов, может привести к снижению стоимости строительства в два-три раза, сокращению примерно на 60% фонда оплаты труда, существенному уменьшению логистических затрат, снижению уровня влияния человеческого фактора, автоматизации производства, минимизации количества строительного мусора, отказу от применения дорогостоящей опалубки и др.

Актуальные направления и современные тенденции в сухих строительных смесях для аддитивного строительства представил в своем выступлении **А.О. Адамцевич**, канд. техн. наук, директор НИИ СМиТ НИУ МГСУ.

Журнал «Строительные материалы» много лет является информационным партнером конференции Baltimix, однако выступить с докладом мы решили впервые. Главный редактор **Е.И. Юмашева** сделала акцент на том, что в море информационного потока, который сейчас нас захлестывает, традиционные СМИ не теряют своей актуальности. За более чем 65-летнюю историю на страницах журнала отразился весь путь становления промышленности строительных материалов, в том числе подотрасли сухих строительных смесей. По результатам независимого исследования агентства «Идеи&Решения» <https://iands.ru/> (Москва) журнал «Строительные материалы» вошел в ТОП-10 (пятое место!) самых известных СМИ на строительном рынке в сегменте b2c. Однако для сотрудников редакции самым важным критерием оценки является мнение читателей. По оценке общественной экспертизы в национальном рейтинге SCIENCE INDEX, журнал «Строительные материалы» много лет по праву занимает первое место.

По результатам плодотворной двухдневной работы, количеству участников, качеству вопросов и неподдельному интересу к исследованиям как чисто научным, так и прикладным можно заключить, что 2023 г. складывается достаточно благополучно для подотрасли ССС. Высокий спрос на отделочные материалы, адаптация производителей к современным реалиям и сдерживание роста цен на продукцию позволят обеспечить стабильные экономические результаты по году и рост сектора реального производства.





Baltimix не только площадка профессионального общения, но и своего рода клуб друзей. Славной традицией стало совместное путешествие участников после завершения конференции. В этом году мы отправились на «край Земли» – в село Териберка\*, которое находится на берегу Баренцева моря.

Старая часть поселка напоминает традиционные прибрежные рыболовецкие деревни, которых когда-то было множество по всему Кольскому полуострову: деревянные домики, лодки, гаражи для лодок и прочие хозяйственные постройки.

«Достопримечательности» села не оставляют равнодушными даже тех, кто, кажется, видел уже все. Творения рук человека и «упадок цивилизованного прошлого» соседствуют здесь с невероятными природными пейзажами и чудесами. Суровые северные пейзажи Баренцева моря, скалы, фьорды, острова – все это великолепие открывается взору путешественника даже на непродолжительной морской прогулке.

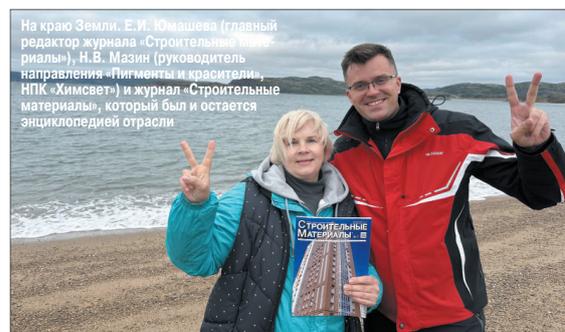
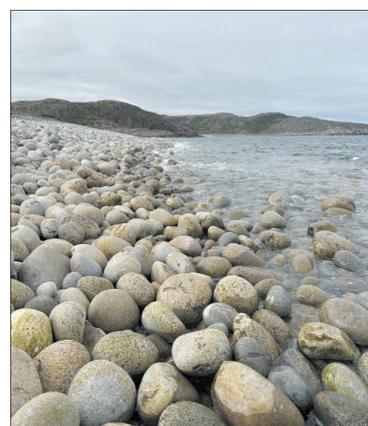
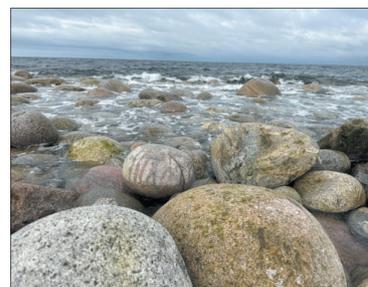
Одно из самых примечательных мест Териберки – каменный пляж «Яйца дракона». Местные жители с удовольствием пересказывают легенды о мифических драконах, которые обитали в этих местах в незапамятные времена. И именно здесь они откладывали яйца и ждали появления потомства. О причинах история умалчивает, но все яйца внезапно окаменели. Спустя тысячелетия они так и лежат гладкими разноцветными валунами на берегу.

Кладбище кораблей стало своеобразным символом Териберки. Оно напоминает о том, что в прошлом село было вполне преуспевающим районным центром. Но в 1960-е гг. административный центр перенесли в Североморск, а Териберка начала постепенно приходить в упадок. Рыболовецкие суда оказались не у дел и остались ржаветь прямо в устье реки.

**Т.А. Абакумова**

**Фото: М.А. Новоселецкая, ООО «КВИНТЕТ», автор**

\* В 2016 г. Териберка вошла в список двадцати наиболее популярных мировых туристических направлений по версии журнала «National Geographic Traveller».



На краю Земли. Е.И. Юмашева (главный редактор журнала «Строительные материалы»), Н.В. Мазин (руководитель направления «Пигменты и красители», НПК «Химсвет») и журнал «Строительные материалы», который был и остается энциклопедией отрасли



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)

УДК 666.973.2

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-77-82>

В.А. РАХМАНОВ, член-кор. РААСН, профессор (institute@unicon-zsk.ru),  
 В.И. МЕЛИХОВ, канд. техн. наук, заместитель генерального директора по науке (V.Melikhov@vniizhbeton.ru),  
 А.В. ЮНКЕВИЧ, инженер, генеральный директор (institute@unicon-zsk.ru),  
 С.Н. КЕКИНА, инженер (S.Kekina@vniizhbeton.ru)

ООО «Институт ВНИИжелезобетон» (111141, г. Москва, ул. Плеханова, 7)

## Негорючий полистиролбетон — новое поколение теплоизоляционно-конструкционных материалов

Приведены результаты исследований института «ВНИИжелезобетон» по разработке и получению негорючего полистиролбетона и его эффективному применению в энергосберегающих стеновых конструкциях. Результаты проведенных испытаний негорючих образцов плотностью D300, прочностью класса не ниже B1, морозостойкостью не ниже F75 и фрагментов стен в виде блочной кладки из такого материала на ветровые нагрузки, а также на пожарную опасность и огнестойкость открывают возможность применения негорючего полистиролбетона в наружных стеновых ограждающих конструкциях без их обязательной негорючей облицовки для жилых и общественных зданий высотой до 75 м (до 25 этажей) практически на всей территории Российской Федерации.

**Ключевые слова:** полистиролбетон, теплосбережение, негорючесть, огнестойкость, стеновые ограждающие конструкции зданий.

**Для цитирования:** Рахманов В.А., Мелихов В.И., Юнкевич А.В., Кекина С.Н. Негорючий полистиролбетон – новое поколение теплоизоляционно-конструкционных материалов // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 77–82.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-77-82>

V.A. RAKHMANOV, Corresponding Member of RAACS, Professor (institute@unicon-zsk.ru),  
 V.I. MELIKHOV, Candidate of Sciences (Engineering), Deputy General Director for Science (V.Melikhov@vniizhbeton.ru);  
 A.V. YUNKEVICH, Engineer, General Director (institute@unicon-zsk.ru), S.N. KEKINA, Engineer (S.Kekina@vniizhbeton.ru)  
 LLC «Institute VNIIZhelezobeton» (7, Plekhanova Street, Moscow, 111144, Russian Federation)

### Non-Combustible Polystyrene Concrete — a New Generation of Heat-Insulating and Structural Materials

The results of research by the VNIIZhelezobeton Institute on the development and production of non-combustible polystyrene concrete and its effective use in energy-saving wall structures are presented. The results of conducted tests of the non-combustible samples with density D300, strength class not lower than B1, frost resistance not lower than F75 and wall fragments in the form of block masonry from such material for wind loads, as well as for fire hazard and fire resistance, open up the possibility of using non-combustible polystyrene concrete in external wall enclosing structures without their obligatory non-combustible coating for residential and public buildings of up to 75 m high (up to 25 floors) throughout almost the entire territory of the Russian Federation.

**Keywords:** polystyrene concrete, heat conservation, non-combustibility, fire resistance, wall enclosing structures of buildings.

**For citation:** Rakhmanov V.A., Melikhov V.I., Yunkevich A.V., Kekina S.N. Non-combustible polystyrene concrete – a new generation of heat-insulating and structural materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 77–82. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-77-82>

В 1990-е гг. на основе проведенных институтом ВНИИжелезобетона НИОКР был создан и стандартизирован уникальный энергосберегающий теплоизоляционно-конструкционный материал — полистиролбетон (ПСБ), эффективно сочетающий положительные свойства вспененного полистирола и ячеистого бетона. Вопросы нормирования, изготовления и эффективного применения полистиролбетона по результатам работ ВНИИжелезобетон подробно изложены в монографии [1].

Следует отметить, что в [2] были отражены основы теории, методов расчета и технологического проектирования ограждающих конструкций зданий из бетонов низкой теплопроводности, в том числе из полистиролбетона, которые, в частности, по его деформативно-прочностным характеристикам коррелируют с результатами исследований и нормирования этого материала, выполненных ВНИИжелезобетон [1].

За последние 25 лет ПСБ был эффективно использован при строительстве и реконструкции в Централь-

ном и других регионах России в ограждающих конструкциях жилых и общественных энергоэффективных зданий общей площадью около 18 млн м<sup>2</sup> по разработанным ВНИИжелезобетона строительным системам «Юникон» и «Юникон-2» [3, 4].

Однако его массовое и эффективное применение сдерживалось тем, что в российском национальном стандарте ГОСТ Р 51263–2012 «Полистиролбетон. Технические условия» он нормировался как слабогорючий материал (группа горючести Г1) и в ограждающих конструкциях должен защищаться негорючими материалами (кирпич, штукатурка, ГВЛ и т. п.). Это усложняло и удорожало строительство энергоэффективных зданий.

В 2015–2016 гг. институтом были проведены исследования и выявлена принципиальная возможность получения негорючего полистиролбетона без снижения его нормативной прочности при сжатии для материала марок по средней плотности не менее D300 [5, 6], что было нормировано в межгосудар-

ственном стандарте ГОСТ 33929–2016 «Полистиролбетон. Технические условия».

В 2019 г., была выявлена возможность получения негорючего полистиролбетона группы НГ по классификации межгосударственного стандарта ГОСТ 30244–94 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть» или групп НГ1 и НГ2 по классификации национального российского стандарта ГОСТ Р 57270–2016 «Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть» для ПСБ марок по средней плотности D300–D600, что было подтверждено стандартными испытаниями ИЦ «Огнестойкость», запатентовано институтом [7] и отражено в Изменении № 1 ГОСТ 33929–2016, введенного в действие на территории РФ в феврале 2023 г. Внедрение этого Изменения намечается по новой более эффективной строительной системе «Юникон-3».

Основные результаты исследований негорючего ПСБ и положения, обосновывающие приоритетность и эффективность его применения в сборных наружных стеновых ограждающих конструкциях зданий в виде блоков (вместе с перемычками) плотностью D250–D300, приведены далее.

Было установлено, что негорючесть ПСБ зависит от отношения содержания в исходной ПСБ смеси горючей части материала, представленного органическим наполнителем – полистиролом вспененным гранулированным (ПВГ), к негорючей части, включающей портландцемент, а также (при необходимости) модифицирующие минеральные тонкодисперсные добавки, такие как микрокремнезем, зола-уноса, тонкомолотые шлаки и др.

Это соотношение, являющееся критерием негорючести материала, выражается неравенством:

$$K_{\text{нг(ПСБ)}} = \frac{100\varphi\rho_{\text{ПВГ}}}{\text{Ц} + \text{МД}} \leq 2,0\%, \quad (1)$$

где  $\varphi$  – удельное объемное относительное содержание ПВГ в полистиролбетоне (в долях от 1);  $\rho_{\text{ПВГ}}$  – средняя плотность зерен ПВГ (в кг/м<sup>3</sup>); Ц – удельный расход портландцемента (в кг/м<sup>3</sup>); МД – удельный расход минеральных тонкодисперсных добавок (в кг/м<sup>3</sup>).

При проведении исследований негорючего ПСБ изучалась возможность применения такого материала для стеновых блоков плотностью D250 и D300 с проверкой обеспечения его нормативной прочности.

Значения средней плотности зерен ПВГ, полученных после трехкратного вспенивания мелкого полистирольного бисера марки SE501, находились на уровне  $\rho_{\text{ПВГ}}=15,0–15,4$  кг/м<sup>3</sup>.

Как показали результаты исследований, для ПСБ марок по средней плотности D250 и D300 без минеральных добавок максимальная прочность может быть получена для плотностей соответственно  $\rho_{\text{ПСБ}}=270$  кг/м<sup>3</sup> и  $\rho_{\text{ПСБ}}=320$  кг/м<sup>3</sup>, при удельных расходах ПВГ, равных соответственно  $\varphi_{\text{D250}}=0,35$ , и  $\varphi_{\text{D300}}=0,42$ . Для этих условий расчетный удельный расход портландцемента составил соответственно  $\text{Ц}_{\text{D250}}=228$  кг/м<sup>3</sup> и  $\text{Ц}_{\text{D300}}=324$  кг/м<sup>3</sup>.

Однако при указанных параметрах для ПСБ марок по средней плотности D250 и D300 условие (1) не выполнялось, так как значения критерия негорючести составляют соответственно:  $K_{\text{нг(D250)}}=3>2\%$  и  $K_{\text{нг(D300)}}=2,4>2\%$ .

Поэтому для получения негорючего ПСБ плотностью D250 и D300 удельное содержание ПВГ было уменьшено до значения  $\varphi_{\text{нг}}$ , которое определялось из выражения:

$$\varphi_{\text{нг}} = \frac{0,02\rho_{\text{ПСБ}}}{\rho_{\text{ПВГ}}(1,26 + 0,007\sqrt{\rho_{\text{ПСБ}} - \rho_{\text{ПСБ1}}})}, \quad (2)$$

где  $\rho_{\text{ПСБ1}}=150$  кг/м<sup>3</sup>.

Вычисления по формуле (2) показывают, что для получения негорючего ПСБ плотностью D250 и D300 удельный расход ПВГ должен составить соответственно  $\varphi_{\text{нг(D250)}}=0,28$  и  $\varphi_{\text{нг(D300)}}=0,4$ .

Для ПСБ марки по плотности D250 с параметрами  $\rho_{\text{ПСБ}}=270$  кг/м<sup>3</sup>; Ц=228 кг/м<sup>3</sup> и  $\varphi_{\text{нг}}=0,28$  его негорючесть была подтверждена огневыми испытаниями по методикам ГОСТ 30244–94 и ГОСТ Р 57270–2016, однако средняя прочность материала составила  $R_{\text{ПСБ}}=0,49$  МПа (класс В0,35), что не соответствует нормативным требованиям ГОСТ 33929–2016 по минимальной допустимой прочности для D250 ( $R=0,59$  МПа, класс В0,5).

В то же время для негорючего ПСБ марки D300 при параметрах  $\rho_{\text{ПСБ}}=320$  кг/м<sup>3</sup>; Ц=274 кг/м<sup>3</sup> и  $\varphi_{\text{нг}}=0,4$  средняя прочность составила  $R_{\text{ПСБ}}=0,95$  МПа (класс В0,75), что удовлетворяло нормируемому значению по ГОСТ 33929–2016 для D300 ( $R=0,88$  МПа, класс В0,75).

Для негорючего ПСБ марки по средней плотности D300 также было апробировано применение мелкодисперсной минеральной добавки – микрокремнезема марки МК-85 по ГОСТ Р 58894–2020 «Микрокремнезем конденсированный для бетонов и строительных растворов. Технические условия» при его удельном расходе 25 кг/м<sup>3</sup> (10% от Ц=249 кг/м<sup>3</sup>) с соблюдением условия (1), в результате чего была получена средняя прочность  $R_{\text{ПСБ}}=1,2$  МПа. Это соответствует материалу класса В1, что на одну ступень выше, чем без использования микрокремнезема, и соответствует нормируемому по ГОСТ 33929–2016 (с Изм. № 1) ПСБ улучшенного качества.

Опыт проектирования и строительства зданий из полистиролбетона показывает [1], что его применение наиболее эффективно по теплосбережению и экономическим показателям при использовании сборных изделий (блоков, надпроемных перемычек) в наружных стеновых несущих ограждающих конструкциях для средне- и многоэтажных зданий высотой до 75 м.

Для таких условий была рассмотрена целесообразность и эффективность (по стоимости и энергосбережению) применения негорючего полистиролбетона марки по средней плотности D300 по сравнению с ближайшими аналогами с сопоставимыми физико-техническими характеристиками, в качестве которых приняты ячеистые бетоны: неавтоклавный

Таблица 1  
Table 1

**Основные нормируемые физико-механические характеристики полистиролбетона и неавтоклавного ячеистого бетона**  
**The main normalized physical and mechanical characteristics of polystyrene concrete and non-autoclaved cellular concrete**

Характеристика	Ячеистый бетон*				Полистиролбетон** ГОСТ 33929–2016 (с Изм. № 1)		
	Неавтоклавный (ГОСТ 25485–2019)		Автоклавный (ГОСТ 31359–2007)		Теплоизоляционный	Теплоизоляционно-конструкционный	Конструкционно-теплоизоляционный
	Теплоизоляционный	Конструкционно-теплоизоляционный	Теплоизоляционный	Конструкционно-теплоизоляционный			
Марка по средней плотности	D300–D400	D500–D800	D200–D400	D450–D700	D150–D225	D250–D350	D400–D600
Класс (марка) по прочности при сжатии	B0,5–B1	B1–B5	н. н.*	н. н.	M2–M5 (M2,5–B0,5)	B0,5–B1 (B0,75–B1,5)	B1,5–B2,5
Марка по морозостойкости	н. н.	F15–F50 (для D600–D800)***	н. н.	F15–F100	F35–F75	F100–F150	F150–F300
Теплопроводность в сухом состоянии, $\lambda_{\text{ср}}$ , Вт/(м·°C)	0,08–0,10 Ср. 0,09	0,10–0,18 Ср. 0,14	0,048–0,096 Ср. 0,72	0,108–0,17 Ср. 0,14	0,051–0,065 Ср. 0,058	0,07–0,085 Ср. 0,078	0,094–0,135 Ср. 0,12

**Примечания:**  
\* н. н. – не нормируется, так как классы по прочности автоклавного ячеистого бетона от B0,35 до B20 и марки по морозостойкости (F15–F100) не привязаны к маркам по средней плотности материала.  
\*\* Для полистиролбетона в скобках указаны требования к материалу улучшенного качества, изготовленному по спецтехнологии.  
\*\*\* Марки по морозостойкости для неавтоклавного ячеистого бетона приняты по данным отмененного ГОСТ 25485–89, так как в ГОСТ 25485–2019 они не нормированы.

Таблица 2  
Table 2

**Сравнение нормируемых расчетных коэффициентов теплопроводности полистиролбетона и ячеистых бетонов**  
**Comparison of the normalized design coefficients of thermal conductivity of polystyrene concrete and cellular concrete**

Марка по средней плотности	Полистиролбетон (ГОСТ 33929–2016, Изм. № 1)		Ячеистый бетон (газо- и пенобетон) (СП 50.13330.2012 с Изм. № 2)			
			На цементном вяжущем		Автоклавного твердения (на известковом вяжущем)	
	Расчетные коэффициенты теплопроводности, Вт/(м·°C), для условий эксплуатации А и Б					
	$\lambda_A$	$\lambda_B$	$\lambda_A$	$\lambda_B$	$\lambda_A$	$\lambda_B$
D200	0,063	0,065	–	–	0,079 (+25%)	0,084 (+29%)
D300	0,081	0,086	–	–	0,103 (+27%)	0,11 (+28%)
D400	0,106	0,113	0,14 (+32%)	0,15 (+33%)	0,128 (+21%)	0,136 (+20%)
D500	0,13	0,142	–	–	0,152 (+17%)	0,162 (+14%)
D600	0,158	0,176	0,22 (+39%)	0,26 (+48%)	0,176 (+11%)	0,188 (+7%)

по ГОСТ 25485–2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия» и автоклавного твердения по ГОСТ 31359–2007 «Бетоны ячеистые автоклавного твердения. Технические условия», являющиеся негорючими материалами. При этом для сопоставимых с полистиролбетоном по теплозащите стеновых конструкций должны учитываться эксплуатационные характеристики материалов, такие как морозостойкость и расчетная теплопроводность для условий эксплуатации А и Б.

В табл. 1 приведено сравнение основных физико-механических характеристик негорючего полистиролбетона с ячеистыми бетонами для сопоставимых

плотностей, а в табл. 2 – сравнение их нормируемых расчетных коэффициентов теплопроводности по ГОСТ 33929–2016 (с Изм. № 1) и СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий (с Изм. № 2).

Анализ приведенных в табл. 1 и 2 данных показывает, что ячеистый бетон группы конструкционно-теплоизоляционных материалов марок повышенной плотности D450–D800 более прочный, чем полистиролбетон группы теплоизоляционно-конструкционных материалов плотностью D400–D600, однако существенно проигрывает полистиролбетону по эксплуатационным показателям (морозостойкости и расчетной теплопроводности).

Таблица 3  
Table 3

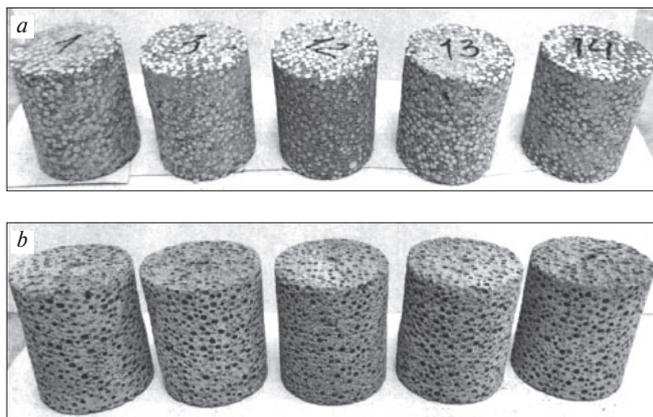
Оценка технико-экономических показателей несущих стен из легковесных бетонных блоков D300 при сопоставимой теплозащите для жилых зданий  
Evaluation of technical and economic indicators of load-bearing walls made of lightweight concrete blocks D300 with comparable thermal protection for residential buildings

Характеристика и показатель	Ед. изм.	Негорючий полистиролбетон	Автоклавный газобетон (ячеистый бетон)
		ЗАО «ЮНИКОН-ЗСК», (г. Москва)	BONOLIT, (г. Купавна, Московская обл.)
1. Блоки			
1.1 Размер в стеновой кладке:	мм		
– длина		595	300
– толщина		375	600
– высота		295	200
1.2. Марка по средней плотности	кг/м <sup>3</sup>	D300	D300
1.3. Класс по прочности		B1	B1-B1,5
1.4. Марка по морозостойкости		F75-F100	F15-F35
1.5. Теплопроводность (условия Б)*	Вт/(м·°C)	0,085	0,13
1.6. Стоимость с НДС (на 01.08.2022 г.)	р./м <sup>3</sup>	6480	5494
2. Наружная стена без облицовки и отделки:			
2.1. Толщина	мм	375	600
2.2. Количество блоков в кладке	шт./м <sup>2</sup>	5,6	16,5
2.3. Приведенное сопротивление теплопередаче**	м <sup>2</sup> ·°C/Вт	4,13	4,08
3. Стоимость материалов с НДС***	р./м <sup>2</sup>	2673	3751
4. Стоимость монтажных работ с накладными расходами, сметной прибылью и НДС	р./м <sup>2</sup>	2070	2898
5. Общая сметная стоимость	р./м <sup>2</sup> %	4743 100	6649 140,2
6. Трудоемкость	чел.ч/м <sup>2</sup> %	2,44 100	3,41 139,8
<b>Примечания:</b>			
* Теплопроводность полистиролбетона для условий Б указана согласно Изм. № 1 ГОСТ 33929–2016, для ячеистого бетона – согласно СП 50.13330.2012 (с Изм. № 2).			
** Приведенное сопротивление теплопередаче рассчитывалось с учетом влияния кладочных швов по рекомендациям СТО РНТО строителей 17532043-001–2005 «Нормы теплотехнического проектирования ограждающих конструкций и оценки энергоэффективности зданий».			
*** Стоимость материалов включает стоимость блоков, клеевой композиции и кладочной сетки.			

Для подтверждения возможности применения негорючих полистиролбетонных блоков плотностью D300 класса по прочности B1 в стеновой кладке толщиной 375 мм без облицовки в наружных стенах многоэтажных зданий системы «Юникон-3» испытательным центром «НИЦстром» ВНИИжелезобетона были проведены испытания фрагментов таких стен на равномерно распределенные изгибающие нагрузки, имитирующие ветровые воздействия (нагрузки) на верхних этажах зданий высотой 75 м для условий Центрального региона России, рассчитанные согласно СП 20.13330.2016 «Нагрузки и воздействия». Такие испытания, проведенные по методике ГОСТ 8829–2018 «Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости», показали, что прочность простенков обеспечивается с существенным (не менее чем в 3–4 раза) запасом.

Это дает основание считать, что наружные стены многоэтажных зданий высотой до 75 м из необлицованных негорючих полистиролбетонных блоков толщиной в стене 375 мм с характеристиками по плотности D300 и прочности B1 могут выдерживать ветровые нагрузки практически во всех регионах Российской Федерации [8].

В 2021 г. ИЦ «Огнестойкость» по техническому заданию ВНИИжелезобетона повторно провел огневые испытания образцов, отобранных из ПСБ блоков плотностью D300, подтвердившие их негорючесть (рис. 1), а также впервые – огневые испытания простенков в виде необлицованной негорючими материалами кладки из таких блоков (рис. 2), показавшие класс пожарной опасности K0(45) по ГОСТ 30403–2012 «Конструкции строительные. Метод испытаний на пожарную опасность» и класс огнестойкости EI 90 по ГОСТ 30247.1–94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции». Результаты этих испытаний позволяют считать возможным использование негорючего полистиролбетона без его дополнительной дорогостоящей противопожарной защиты (облицовка негорючими материалами – кирпичом, штукатуркой, гипсоволокнистыми плитами и т. п.) в наружных стеновых ограждающих конструкциях энергосберегающих многоэтажных жилых и общественных зданий высотой до 75 м классов пожарной опасности С0 согласно СП 54.13330.2022 «Здания жилые многоквартирные» и СП 118.13330.2022 «Общественные здания и сооружения».



**Рис. 1.** Образцы ПСБ D300, испытанные на негорючесть: *a* – до испытаний; *b* – после испытаний

**Fig. 1.** Samples of PSB D300 tested for incombustibility: *a* – before testing; *b* – after testing

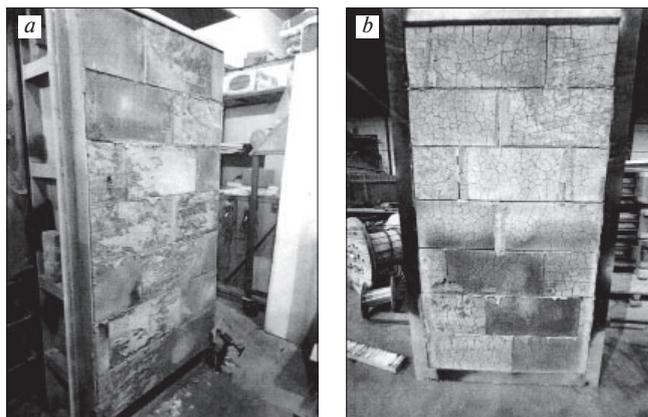
Оценочное сравнение технико-экономических показателей наружных несущих стен из легкобетонных блоков (полистиролбетон и автоклавный ячеистый бетон) для жилых зданий при сопоставимой теплозащите (приведенное сопротивление теплопередаче на уровне  $4,1 \text{ (м}^2 \cdot \text{°C/Вт)}$ ) представлено в табл. 3.

Как видно из данных табл. 3, при сравнении с ближайшим аналогом – несущими наружными стенами из ячеисто-бетонных блоков с сопоставимыми теплозащитными свойствами применение сборных стеновых конструкций из полистиролбетона по системе «Юникон-3» имеет лучшие показатели по морозостойкости и обеспечивает экономию по себестоимости и трудоемкости устройства  $1 \text{ м}^2$  наружных стен на уровне 40%.

Нормативному обеспечению внедрения негорючего ПСБ по строительной системе «Юникон-3» в несущих наружных стенах зданий без их облицовки негорючими материалами должно способствовать Изменение № 1 ГОСТ 33929–2016, а также внесение изменений и дополнений в СП 434.1325800.2018 «Конструкции ограждающие из полистиролбетона. Правила проектирования» на проектирование наружных ограждающих конструкций из полистиролбетона, выполняемых ВНИИжелезобетона согласно утвержденному плану Минстроя России на 2023 г.

### Выводы

1. Исследования ВНИИжелезобетона в области технологии полистиролбетонов позволили создать негорючий особо легкий полистиролбетон плотностью D300 класса по прочности В1 с марками по морозостойкости F75-F100 и теплопроводностью согласно требованиям норм, что соответствует оптимальным показателям стенового материала для массового применения в несущих однослойных наружных стенах энергоэффективных зданий системы «Юникон-3».



**Рис. 2.** Простенки из негорючих ПСБ блоков D300, испытанные на пожарную опасность: *a* – до испытаний; *b* – после испытаний

**Fig. 2.** D300 non-combustible PSB walls tested on fire hazard: *a* – before testing; *b* – after testing

2. Применение негорючего полистиролбетона в сборных стеновых несущих ограждающих конструкциях зданий наиболее целесообразно для жилых и общественных зданий высотой до 75 м (до 25 этажей), что подтверждено результатами стандартных прочностных испытаний на ветровые нагрузки, проведенных ВНИИжелезобетона, и огневых испытаний простенков (образцов) из негорючих полистиролбетонных блоков плотностью D300 на огнестойкость и пожарную опасность, проведенных ИЦ «Огнестойкость». При этом не использовалась облицовка простенков негорючими материалами.

3. Результаты испытаний образцов негорючего полистиролбетона плотностью D300, прочностью класса не ниже В1, морозостойкостью не ниже F75 и фрагментов стен в виде блочной кладки из такого материала на ветровые нагрузки, а также на пожарную опасность и огнестойкость открывают возможность применения негорючего полистиролбетона в наружных стеновых ограждающих конструкциях средне- и многоэтажных зданий практически по всей территории Российской Федерации.

4. По сравнению с ближайшим аналогом – несущими наружными стенами из ячеисто-бетонных блоков автоклавного твердения с сопоставимыми теплозащитными свойствами применение сборных стеновых конструкций из негорючего полистиролбетона по системе «Юникон-3» имеет лучшие показатели по морозостойкости и обеспечивает снижение до 40% себестоимости и трудоемкости устройства  $1 \text{ м}^2$  наружных стен.

5. Широкому и эффективному внедрению негорючего полистиролбетона при строительстве зданий должно способствовать введенное в действие Росстандартом Изменение № 1 ГОСТ 33929–2016 на полистиролбетон, а также внесение (согласно плану Минстроя России на 2023 г.) изменений и дополнений в СП 434.1325800.2018 на проектирование ограждающих конструкций из полистиролбетона.

Список литературы

1. Рахманов В.А. Полистиролбетон системы «Юникон» — энергоэффективный материал XXI века: Монография. М.: Золотое сечение, 2017. 512 с.
2. Баженов Ю.М., Король Е.А., Ерофеев В.Т., Митина Е.А. Ограждающие конструкции с использованием бетонов низкой теплопроводности (основы теории, методы расчета и технологическое проектирование). М.: АСВ, 2008. С. 141–153.
3. Патент на изобретение RU 2230717 C1 *Конструкционно-теплоизоляционный экологически чистый полистиролбетон, способ изготовления из него изделий и способ возведения из них теплоэффективных ограждающих конструкций зданий по системе «ЮНИКОН»* / Рахманов В.А., Довжик В.Г., Мелихов В.И., Козловский А.И., Амханицкий Г.Я., Росляк Ю.В., Воронин А.И., Казарин С.К., Карпенко В.В. 20.06.2004. Заявка № 2002129773/03 от 10.11.2002.
4. Рахманов В.А. Теплоэффективные ограждающие конструкции зданий с использованием полистиролбетонов, разработанных институтом «ВНИИжелезобетон» // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 2. С. 9–18.
5. Рахманов В.А., Мелихов В.А., Капаев Г.И., Козловский А.И. Инновационная спецтехнология получения полистиролбетона нового поколения // *Промышленное и гражданское строительство*. 2017. № 2. С. 29–31.
6. Рахманов В.А. Негорючий полистиролбетон и его строительно-технические свойства. *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2021 году: Сборник научных трудов РААСН*. М., 2022. С. 368–378.
7. Патент № 2753832 RU *Способ получения негорючего полистиролбетона* / Рахманов В.А., Мелихов В.И., Капаев Г.И. Заявитель и патентообладатель ВНИИжелезобетон. Приоритет 10.08.2020 г. Опубликовано 23.08.2021 г. Бюл. № 24.
8. Рахманов В.А., Мелихов В.И., Сафонов А.А. Испытания на ветровые нагрузки стеновой кладки из негорючих полистиролбетонных блоков // *Бетон и железобетон*. 2023. № 3 (617). С. 15–23. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-3\(617\)-15-23](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-3(617)-15-23)
- material of the 21st century. Monograph]. Moscow: Zolotoye secheniye. 2017. 512 p.
2. Bazhenov Yu.M., Korol E.A., Erofeev V.T., Mitina E.A. Ograzhdayushchiye konstruktсии s ispol'zovaniyem betonov nizkoy teploprovodnosti (osnovy teorii, metody rascheta i tekhnologicheskoye proyektirovaniye) [Enclosing structures using concrete with low thermal conductivity (fundamentals of theory, calculation methods and technological design)]. Moscow: ASV. 2008, pp. 141–153. (In Russian).
3. Patent for invention RU 2230717 C1 *Konstruktsionno-teploizolyatsionnyi ekologicheski chistyy polistirolbeton, sposob izgotovleniya iz nego izdelii i sposob vozvedeniya iz nikh teploeffektivnykh ograzhdayushchikh konstruktсии zdaniy po sisteme «YuNIKON»* [Structural and thermal insulation environmentally friendly polystyrene concrete, a method for manufacturing products from it and a method for constructing heat-efficient building envelopes from them using the UNICON system] / Rakhmanov V.A., Dovzhik V.G., Melikhov V.I., Kozlovsky A.I., Amkhanitsky G.Ya., Roslyak Yu.V., Voronin A.I., Kazarin S.K., Karpenko V.V. 20/06/2004. Application No. 2002129773/03 10.11.2002. (In Russian).
4. Rakhmanov V.A. Thermally efficient building envelopes using polystyrene concrete developed by the VNIIZhelezobeton Institute. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2017. No. 2, pp. 9–18. (In Russian).
5. Rakhmanov V.A., Melikhov V.A., Kapayev G.I., Kozlovsky A.I. Innovative special technology for producing new generation polystyrene concrete. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo*. 2017. No. 2, pp. 29–31. (In Russian).
6. Rakhmanov V.A. Non-combustible polystyrene concrete and its construction and technical properties. *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. Collection of scientific works of the RAACS*. Moscow. 2022, pp. 368–378. (In Russian).
7. Patent No. 2753832 RU *Sposob polucheniya negoryuchego polistirolbetona* [Method for producing non-flammable polystyrene concrete] / Rakhmanov V.A., Melikhov V.I., Kapayev G.I. Applicant and patent holder VNIIZhelezobeton. Priority 08/10/2020 Published 08/23/2021 Bulletin. No. 24.
8. Rakhmanov V.A., Melikhov V.I., Safonov A.A. Tests on wind loads of wall masonry made of non-combustible polystyrene concrete blocks. *Beton i zhelezobeton* [Concrete and reinforced concrete]. 2023. No. 3 (617), pp. 15–23. DOI: [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-3\(617\)-15-23](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-3(617)-15-23)

References

1. Rakhmanov V.A. Polistirolbeton sistemy «Yunikon» — energoeffektivnyy material XXI veka. [Polystyrene concrete of the Unicon system is an energy-efficient

УДК 666.96

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-83-88>

А.А. КУЛИКОВА<sup>1</sup>, ассистент (lika.panda.19@gmail.com),  
 Н.О. КОПАНИЦА<sup>1</sup>, д-р техн. наук, профессор (kopanitsa@mail.ru);  
 М.А. ДМИТРИЕВА<sup>2</sup>, д-р физ.-мат. наук, профессор (dmitrieva\_m@inbox.ru);  
 О.В. ДЕМЬЯНЕНКО<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент (demyanenko.olga.v@gmail.com);  
 А.Г. ПЕТРОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент (petrov-tomsk@list.ru);

<sup>1</sup> Томский государственный архитектурно-строительный университет (634003, г. Томск, Соляная пл., 2)

<sup>2</sup> Балтийский федеральный университет им. И. Канта (236041, г. Калининград, ул. Александра Невского, 14)

## Влияние бинарных модифицирующих добавок на процессы гидратации цементных систем

Одним из важных компонентов при производстве строительных смесей различного назначения являются модифицирующие добавки. Перспективным направлением в развитии технологий производства строительных смесей считается создание многофункциональных добавок, которые позволяют одновременно регулировать несколько эксплуатационных характеристик строительной смеси, обеспечивая их полифункциональность. Введение таких добавок, как правило в количестве нескольких процентов от массы цемента, позволяет активно влиять на процессы гидратации и образования структуры затвердевшего цементного камня. В работе представлены результаты исследований, связанные с изучением влияния бинарных модифицирующих добавок, состоящих из отходов производства мрамора – микрокальцита (MCa) и нанодиоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) на свойства цементных систем. Полученные добавки позволяют получить увеличение прочности в начальные сроки твердения до 40%, а в 28-суточном возрасте до 51% по сравнению с контрольным составом. Также проведен ряд калориметрических исследований, результаты которых использовались для оценки эффективных параметров уравнения макрокинетики, в частности кажущейся энергии активации у модифицированных цементных композиций в изотермических условиях.

**Ключевые слова:** модифицирующие добавки, микрокальцит, отходы производства, нанодиоксид кремния, цементные композиции, изотермический калориметр, кажущаяся энергия активации.

Работа выполнена при поддержке государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001.

**Для цитирования:** Куликова А.А., Копаница Н.О., Дмитриева М.А., Демьяненко О.В., Петров А.Г. Влияние бинарных модифицирующих добавок на процессы гидратации цементных систем // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 83–88.  
 DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-83-88>

A.A. KULIKOVA<sup>1</sup>, Assistant (lika.panda.19@gmail.com),  
 N.O. KOPANITSA<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Professor (kopanitsa@mail.ru);  
 M.A. DMITRIEVA<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Physics and Mathematics), Professor (dmitrieva\_m@inbox.ru);  
 O.V. DEMYANENKO<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), associate professor (demyanenko.olga.v@gmail.com);  
 A.G. PETROV<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), associate professor (petrov-tomsk@list.ru)

<sup>1</sup> Tomsk State University of Architecture and Building (2, Solyanaya Square, Tomsk, 634003, Russian Federation)

<sup>2</sup> Immanuel Kant Baltic Federal University (14, A. Nevsky Street, Kaliningrad, 236041, Russian Federation)

### Influence of Binary Modifying Additives on the Processes of Hydration of Cement Systems

One of the important components in the production of building mixtures for various purposes are modifying additives. A promising direction in the development of technologies for the production of building mixtures is the creation of multifunctional additives that make it possible to simultaneously regulate several operational characteristics of a building mixture, ensuring their multi-functionality. The introduction of such additives, as a rule, in an amount of several percent by weight of cement, makes it possible to actively influence the processes of hydration and formation of the structure of hardened cement stone. The paper presents the results of research related to the study of the influence of binary modifying additives consisting of marble production waste – microcalcite (MCa) and nanosilicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) on the properties of cement systems. The resulting additives make it possible to obtain an increase in strength in the initial stages of hardening up to 40%, and at 28 days of age up to 51% compared to the control composition. A number of calorimetric studies were also carried out, the results of which were used to estimate the effective parameters of the macrokinetics equation, in particular the apparent activation energy of modified cement compositions under isothermal conditions.

**Keywords:** modifying additives, microcalcite, production waste, nano-silicon dioxide, cement compositions, isothermal calorimeter, apparent energy activation.

The work was supported by the state order of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation FEMN-2022-0001.

**For citation:** Kulikova A.A., Kopanitsa N.O., Dmitrieva M.A., Demyanenko O.V., Petrov A.G. Influence of binary modifying additives on the processes of hydration of cement systems. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 83–88. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-83-88>

Модифицирующие добавки для строительных смесей имеют различный химический состав, дисперсность, агрегатное состояние и в значительной степени влияют на свойства цементных систем [1–3].

Следует отметить, что производителями большинства добавок для создания строительных смесей являются зарубежные фирмы. В последние годы интенсивного развития российского рынка строительных смесей

наблюдалось постепенное снижение импорта. В период 2014–2022 гг. в связи со сложной внешне-экономической ситуацией тенденция к импортозамещению усилилась [4].

Одним из способов улучшения физико-механических характеристик композиционного материала и направленного формирования макро- и микроструктуры является наполнение матрицы цементного вяжущего высокодисперсными минеральными частицами.

Применение микрокальцита в качестве основы для модифицирующих добавок актуально, так как он является отходом при переработке мрамора. Еще одним преимуществом микрокальцита является его химическое сродство с продуктами гидратации цементного камня [5–7].

Перспективным направлением также является применение в качестве модифицирующих добавок нанодисперсных оксидных систем, близких по составу и структуре к продуктам гидратации цемента, обладающих избыточной внутренней энергией и высокой химической активностью, что позволяет получить вяжущие с высокими физико-механическими характеристиками [8–10].

Исследования в данной работе проводились с целью изучения влияния бинарных модифицирующих добавок, состоящих из микрокальцита и нанодиоксида кремния, на свойства цементных систем.

В работах [11, 12] изучали влияние наноразмерных частиц  $\text{SiO}_2$  на свойства цементного камня. При введении наночастиц повышается прочность за счет активации процессов формирования структуры цементного камня на наномасштабном уровне. Микроразмерные компоненты с  $\text{нано-SiO}_2$ , в зависимости от способа получения, улучшают свойства ЦК (морозостойкость, прочность, адгезию, водонепроницаемость и др.). Добавка микрокальцита с  $\text{нано-SiO}_2$  позволит повысить прочность ЦК за счет формирования дополнительного объема продуктов гидратации ЦК, в основном образования низкоосновных гидросиликатов кальция при их взаимодействии с  $\text{нано-SiO}_2$ . Усиливающий эффект взаимодействия двух и более компонентов добавки характеризуется тем, что совместное действие этих факторов существенно превосходит полученные характеристики каждого компонента в отдельности, что соответствует концепции синергизма.

Ранее проведенные исследования по оценке влияния наноразмерных частиц на свойства цементного камня показали эффективность применения  $\text{нано-SiO}_2$ . Выявлено, что введение добавки Ts38 обеспечивает прирост прочности ЦК до 20% по сравнению с контрольным образцом при концентрации 0,03% от массы цемента в 28-сут возрасте твердения.

В исследованиях [13–16] установлена эффективность совместного применения микронаполнителей с наноразмерным диоксидом кремния на свойства цементного камня. При введении микрокальцита в

цементную композицию в количестве 5% от массы цемента прочность цементного камня в 28 сут увеличилась на 45%.

### Материалы и методы испытаний

Для проведения работы использовались:

– портландцемент ЦЕМ I 42,5Н Топкинского цементного завода (ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия»). Удельная поверхность –  $3000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;

– модифицирующие добавки:

1) микрокальцит (МСа), отход производства при переработке мрамора (мраморная мука), тонкодисперсный порошок, соответствующий ГОСТ Р 56775–2015 «Микрокальцит для строительных материалов. Технические условия». Мрамор добывается на Ново-Ивановском карьере вблизи г. Полевского, разрабатывается ООО «Эверест». Микрокальцит является отходом производства при переработке мрамора. Удельная поверхность  $2000 \text{ м}^2/\text{кг}$ ;

2) наномодификатор ( $\text{нSiO}_2$ ) – диоксид кремния Ts38. Наноразмерный диоксид кремния (Таркосил) получен способом испарения вещества под действием электронного пучка, создаваемого электронным ускорителем. Удельная поверхность  $38000 \text{ м}^2/\text{кг}$  [10];

– вода затворения (ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия»).

Исследования проведены на образцах-кубиках размером  $20 \times 20 \times 20$  мм из цементного теста нормальной плотности, которые твердели в воздушно-влажностных условиях ( $T=18-20^\circ\text{C}$ ;  $W=90-100\%$ ) и испытывались на прочность в 3, 7 и 28 сут по ГОСТ 310.1–76 «Цементы. Методы испытаний. Общие положения».

Для оценки особенностей гидратации модифицированного добавками цементного вяжущего определялись значения тепловыделения в образцах по ГОСТ 310.5–88 «Цементы. Метод определения тепловыделения» с использованием восьмиканального изотермического калориметра ТАМ AIR при В/Ц 0,5 и постоянной температуре внутри измерительного канала, равной 20; 30;  $40^\circ\text{C}$ . Показатели текущей мощности теплового потока в ходе измерения фиксировались каждые 30 с.

### Результаты исследований и их обсуждение

Для изучения влияния модифицирующих добавок на физико-механические свойства цементных систем были изготовлены образцы цементного камня с различным содержанием добавок микрокальцита и наномодификатора. Составы исследуемых образцов представлены в табл. 1.

Добавка  $\text{нано-SiO}_2$  в количестве 0,03% от массы цемента уменьшает водопотребность на 2,6% по сравнению с контрольным образцом. Водопотребность с добавкой микрокальцита увеличивается на 2,7%. Прочностные характеристики исследуемых

Таблица 1  
Table 1

Составы исследуемых образцов  
Compositions of the studied samples

Образец	Цемент, %	МСа, %	nSiO <sub>2</sub> , %	Нормальная густота, %
Контрольный	100	–	–	27,5
1	100	–	0,03	26,76
2	100	5	–	28,25
3	100	5	0,03	28,25

цементных образцов в разном возрасте представлены на рис. 1.

Увеличение прочности цементного камня состава 1 (нано-SiO<sub>2</sub> – 0,03%) составляет 32% в 28 сут твердения. Введение добавки микрокальцита в количестве 5% от массы цемента (состав 2), а также его совместно с нанодиоксидом кремния (состав 3) позволяет получить увеличение прочности в начальные сроки твердения до 40%, а в 28-сут возрасте до 51% по сравнению с контрольным составом.

Для определения тепловых эффектов при гидратации цемента были проведены исследования по установлению разницы между тепловыделением контрольного цемента и модифицированных вяжущих. В ампулы объемом 20 мл помещалась навеска 6 г модифицированного или контрольного состава и затворялась водой в заданном В/Ц отношении. Ампула герметизировалась крышкой и направлялась в соответствующий канал. В парное отделение помещалась ампула с эталонным инертным наполнителем – песком. Внутри каждого канала обеспечивалась постоянная температура 20, 30 или 40°C. Длительность каждого эксперимента составляла 3 сут. По итогам калориметрического анализа были получены значения суммарной тепловой энергии и теплового потока, отслеживаемые на протяжении всего испытания. Графики изменения теплового потока для исследуемых образцов представлены на рис. 2.

Исходя из данных рис. 2 во всех экспериментах тепловой поток развивался в соответствии с тремя этапами (резкий мгновенный пик вначале измерений следует исключить). На первом этапе выделяе-

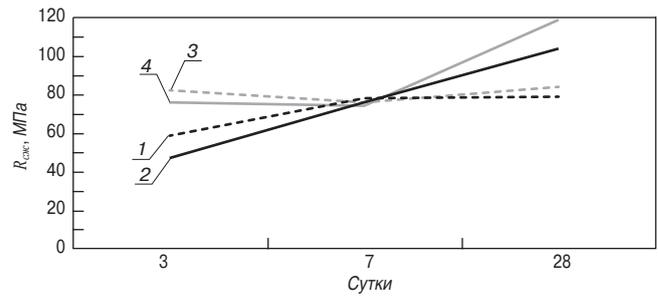


Рис. 1. Кинетические кривые предела прочности при сжатии модифицированного цементного камня: 1 – контрольный; 2 – цемент+nSiO<sub>2</sub>; 3 – цемент+МСа; 4 – цемент+nSiO<sub>2</sub>+МСа

Fig. 1. Kinetic curves of compressive strength of modified cement stone: 1 – control; 2 – cement+nSiO<sub>2</sub>; 3 – cement+MSa; 4 – cement+nSiO<sub>2</sub>+MSa

мое тепло незначительно (инкубационный период). За ним следует период ускорения, который указывает на образование новых гидратов. Наконец, период замедления является результатом диффузии воды и ионов через слои гидратов, толщина которых возрастает.

Моделирование процессов, сопровождающих схватывание цементного теста, возможно с позиций рассмотрения процессов гидратации, т. е. кинетики химического взаимодействия цемента с водой, и перекристаллизации отдельных фаз цемента, структуры исходной смеси цемента и инертных наполнителей на всех технологических этапах набора прочности бетона. Различные аспекты базовых подходов к исследованию формирования структуры и свойств бетонов рассмотрены в обзоре [17]. Очевидно, что комплексное моделирование и экспериментальное исследование кинетики поведения всех активных фаз бетонной смеси с учетом специфики конкретной структуры весьма трудоемко. В качестве альтернативы можно рассмотреть концепцию микромеханики композиционных материалов [18]. Процесс гидратации цемента в представительном объеме предлагается рассмотреть с позиций макрокинетики химических превращений [19].

Применение уравнения Аррениуса для характеристики хода гидратации цемента с позиций макрокинетики многофазной смеси компонентов бетона требует использования кажущейся энергии активации [20]. В [21] определение кажущейся энергии активации бетона проводилось методом изотермической калориметрии.

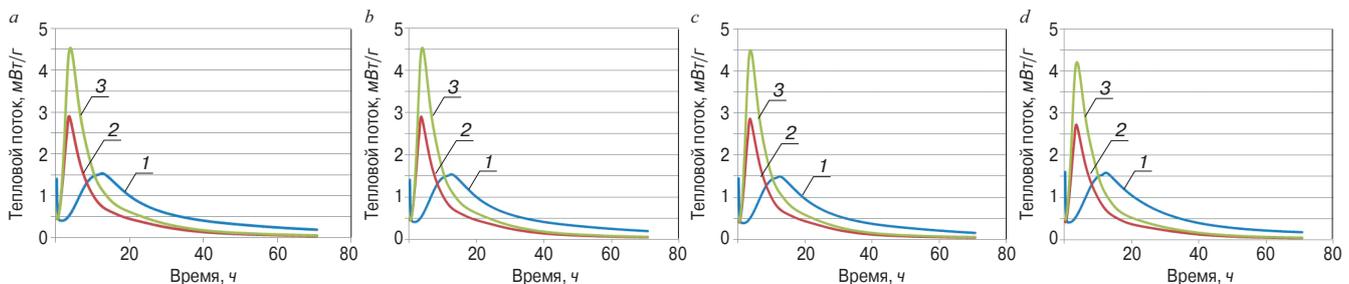


Рис. 2. Изменение теплового потока: а – контрольного состава; б – состава 1; с – состава 2; д – состава 3; при различной температуре: 1 – 20°C; 2 – 30°C; 3 – 40°C

Fig. 2. Change in the heat flux of the control composition at different temperatures: а – control composition; б – composition 1; с – composition 2; д – composition 3; 1 – 20°C; 2 – 30°C; 3 – 40°C

Развитая модель физико-химических процессов в реагирующих дискретных системах [22] позволяет прогнозировать структурные характеристики, эффективные механические свойства, кинетику технологических процессов, степень усадки, остаточные напряжения в композиционных материалах, получаемых в процессе спекания и синтеза многофазных полидисперсных систем. Математическая модель представляется совокупностью нестационарных задач теплового баланса и макрокинетики химических превращений. Термомеханическое состояние и фазовый состав реагирующей среды рассматриваются одновременно на макро- и микроскопических уровнях. Начальная структура цементного камня в бетоне отражает неоднородность концентраций и размеров исходных порошковых компонентов и пор, полифракционность компонентов и их конгломератов. На каждом шаге моделирования используются эффективные характеристики материала, определяемые макроскопической структурой представленных объемов композита, распределением в них исходных компонентов и пор, неоднородностью концентраций, фазового и фракционного составов компонентов.

Для определения кажущейся энергии активации  $E_A$  можно использовать значения скорости тепловыделения  $dQ/dt$  при нескольких значениях температуры  $T$ .

Уравнение Аррениуса записывается в виде:

$$k = \frac{dz}{dt} = \frac{1dQ}{Q_m dt} = k_0 \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) \cdot \varphi(z),$$

где  $z$  – степень гидратации;  $Q_m$  – интегральная величина теплового потока к моменту окончания процессов гидратации;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $k_0$  – предэкспоненциальный множитель в уравнении макрокинетики химических превращений;  $\varphi(z)$  – функция торможения, которую на начальных этапах набора прочности в условиях избытка жидкой фазы (воды затворения) можно считать равной 1 [22].

Для определения параметров уравнения Аррениуса используются значения константы скорости реакции гидратации  $k = \frac{dz}{dt}$  при нескольких температурах  $T$ . Для этого уравнение Аррениуса записывается в логарифмической форме [19]:

$$\ln k = \ln K_0 - \frac{E_A}{RT}$$

Уравнение Аррениуса неприменимо на поздних сроках гидратации, когда происходит переход от режима, контролируемого химическими реакциями, к режиму, контролируемому диффузией воды через слои гидратов [21]. Обычно этот переход происходит при достижении  $z=0,5$ .

Для определения кажущейся энергии активации использовались результаты описанной выше серии экспериментов в калориметре при различной температуре (рис. 2). Применяемый в настоящем исследовании восьмиканальный изотермический калориметр TAM AIR позволяет проводить измерения в

Таблица 2  
Table 2

Энергия активации  
Activation energy

Образец	$E_A$ , кДж/моль	$R_{сж}$ , МПа (3 сут)
Контрольный	43,087	58,96
1	44,123	47,4
2	40,054	82,43
3	36,838	75,42

широком диапазоне изменения температуры (от 5 до 90°C) с точностью  $\pm 0,02^\circ\text{C}$ .

Параметры макрокинетики определялись из решения задачи оптимизации методом наименьших квадратов. В качестве целевой функции принималась величина среднеквадратического отклонения между экспериментальными ( $x_i$ ) и расчетными ( $y_i$ ) значениями  $\ln k$  для  $i=3$  исследуемых значений температуры:

$$F = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_i - y_i)^2.$$

За величину  $x_i$  использовалось максимальное относительное значение мгновенной скорости тепловыделения, полученное по результатам калориметрических испытаний.

Значения энергии активации в сравнении со значениями ранней прочности для четырех рассмотренных составов представлены в табл. 2.

Снижение эффективного параметра энергии активации определяет увеличение скорости гидратации на ранних сроках и наряду с прочим способствует повышению прочностных характеристик цементных образцов. Так, составы 2 и 3, имея меньшие показатели энергии активации, показывают наибольший прирост прочности в ранние сроки твердения по сравнению с контрольным образцом.

Заключение

Исследованы прочностные характеристики затвердевшего цементного камня, модифицированного различными добавками. Бинарная добавка, состоящая из микрокальцита и нанодиоксида кремния, позволяет получить прирост прочности на всех сроках твердения. Эти данные согласуются с результатами определения энергии активации для различных составов. Представленный в работе подход определения макрокинетических характеристик процесса гидратации цементного вяжущего, модифицированного различными добавками, позволяет развить компьютерную модель процессов гидратации и формирования структуры цементного камня. Полученные экспериментальные оценки вклада модифицирующих добавок в эффективные свойства современных строительных смесей подтверждают активационную природу процессов гидратации цемента и показывают ее зависимость от срока твердения модифицированного цементного вяжущего.

## Список литературы

1. Пустовгар А.П. Модифицирующие добавки для сухих строительных смесей // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2002. № 4 (520). С. 8.
2. Кудяков А.И., Белых С.А., Даминова А.М. Смеси сухие растворные цементные с микрогранулированной воздухововлекающей добавкой // *Строительные материалы*. 2010. № 1. С. 52–53.
3. Кудяков А.И., Симакова А.С., Кондратенко В.А., Стешенко А.Б., Латыпов А.Д. Влияние органических добавок на свойства цементного теста и камня // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2018. Т. 20. № 6. С. 138–147.
4. Ботка Е.Н. Рынок сухих строительных смесей России: итоги полугодия // *Строительные материалы*. 2022. № 9. С. 15–17. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-15-17>
5. Kjellsen K.O., Lagerblad B. Influence of natural minerals in the filler fraction on hydration and properties of mortars. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute. 1995. 41 p.
6. Oshio A., Sone T., Matsui A. Properties of concrete containing mineral powders. Cement Association of Japan Review. 1987, pp. 114117.
7. Wakizaka Y., Morya S., Kawano H. Relationship between Mineral Assemblages of Rocks and Their Alkali Reactivities. Cement Association of Japan Review. 1987, pp. 292295.
8. Лхасаранов С.А. Модифицированный бетон на композиционных вяжущих с применением нанокремнезема: Дис. ... канд. техн. наук. Улан-Удэ, 2013. 140 с.
9. Урханова Л.А., Лхасаранов С.А., Бардаханов С.П. Модифицированный бетон с нанодисперсными добавками // *Строительные материалы*. 2014. № 8. С. 52–55.
10. Урханова Л.А., Доржиева Е.В., Гончикова Е.В., Яковлев А.П. Синтез коллоидной добавки на основе алюмосиликатных пород для модификации цементного камня // *Строительные материалы*. 2022. № 1–2. С. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-50-56>
11. Куликова А.А., Демьяненко О.В. Модифицирующие добавки на основе наномодификаторов в производстве строительных материалов. *Перспективы развития фундаментальных наук: Сборник трудов XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых*. Т. 6. Строительство и архитектура. Томск, 2021. С. 53–55.

## References

1. Pustovgar A.P. Modifying additives for dry building mixtures. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2002. No. 4 (520). P. 8. (In Russian).
2. Kudyakov A.I., Belykh S.A., Daminova A.M. Dry cement mortar mixes with micro-granulated air-entraining additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2010. No. 1, pp. 52–53. (In Russian).
3. Kudyakov A.I., Simakova A.S., Kondratenko V.A., Steshenko A.B. Influence of organic additives on the properties of cement paste and stone. *Vestnik of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2018. Vol. 20. No. 6, pp. 138–147. (In Russian).
4. Botka E.N. Dry building mixes market in Russia: half-year results. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 9, pp. 15–17. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-806-9-15-17>
5. Kjellsen K.O., Lagerblad B. Influence of natural minerals in the filler fraction on hydration and properties of mortars. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute. 1995. 41 p.
6. Oshio A., Sone T., Matsui A. Properties of concrete containing mineral powders. Cement Association of Japan Review. 1987, pp. 114117.
7. Wakizaka Y., Morya S., Kawano H. Relationship between Mineral Assemblages of Rocks and Their Alkali Reactivities. Cement Association of Japan Review. 1987, pp. 292295.
8. Lkhasaranov S.A. Modified concrete on composite binders using nanosilica. Cand. Diss. (Engineering). Ulan-Ude, 2013. 140 p. (In Russian).
9. Urkhanova L.A., Lkhasaranov S.A., Bardakhanov S.P. Modified concrete with nanodispersed additives. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 8. pp. 52–55. (In Russian).
10. Urkhanova L.A., Dorzhieva E.V., Gonchikova E.V., Yakovlev A.P. Synthesis of a colloid additive based on aluminosilicate rocks for cement stone modification. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 1–2, pp. 50–56. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-50-56>
11. Kulikova A.A., Demyanenko O.V. Modifying additives based on nanomodifiers in the production of building materials. *Prospects for the development of fundamental sciences: a collection of proceedings of the XVIII International Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists*. 2021. Vol. 6, pp. 53–55 (In Russian).

12. Куликова А.А., Демьяненко О.В., Копаница Н.О. Влияние нанодиоксида кремния на свойства цементного камня / А.А. Куликова. *Материалы III Международной научно-практической конференции «Качество. Технологии. Инновации»*. Новосибирск. 2020. С. 23–28.
13. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Effective polyfunctional additive for composite materials based on cement. In book: *Digital Technologies in Construction Engineering*. 2022, pp. 125–131. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_17)
14. Куликова А.А., Демьяненко О.В., Сорокина Е.А., Копаница Н.О. Комплексные модифицирующие добавки для строительных смесей на цементной основе // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2019. Т. 21. № 6. С. 140–148. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-140-148
15. Демьяненко О.В., Куликова А.А., Копаница Н.О. Оценка влияния комплексной полифункциональной добавки на эксплуатационные характеристики цементного камня и бетона // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020. Т. 22. № 5. С. 139–152. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152
16. Демьяненко О.В., Куликова А.А., Копаница Н.О., Петров А.Г. Влияние комплексных модифицирующих добавок на эксплуатационные свойства тяжелого бетона // *Известия вузов. Строительство*. 2021. № 5. С. 23–32. DOI: 10.32683/0536-1052-2021-749-5-23-32
17. Thomas J.J., Biernacki J.J., Bullard J.W., Bishnoi S., Dolado J.S., Scherer G.W., Luttge A. Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development // *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Iss. 12, pp. 1257–1278.
18. Meguid S., Weng G. *Micromechanics and nanomechanics of composite solids*. Switzerland: Springer. 2018. eBook
19. Франк-Каменецкий Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука 1987. 492 с.
20. Poole J.L., Riding K.A., Juenger M.C.G., Folliard K.J., Schindler A.K. Effects of supplementary cementitious materials on apparent activation energy // *Journal of ASTM International*. 2010. No. 7 (9), pp. 1–16.
21. Kada-Benameur, H., Wirquin, E., Duthoit, B. Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry // *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30 (2), pp. 301–305.
22. Лейцин В.Н., Дмитриева М.А. Моделирование связанных процессов в реагирующих средах: монография. Калининград: Изд-во БФУ им. И. Канта. 2012. 240 с.
12. Kulikova A.A., Demyanenko O.V., Kopanitsa N.O. Influence of nanodioxide silicon on the properties of cement stone. *Proceedings of the III International Scientific and Practical Conference “Quality. Technologies. Innovations”*. Novosibirsk. 2020, pp. 23–28 (In Russian).
13. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A. Effective polyfunctional additive for composite materials based on cement. In book: *Digital Technologies in Construction Engineering*. 2022, pp. 125–131. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_17)
14. Kulikova A.A., Dem’yanenko O.V., Sorokina E.A., Kopanitsa N.O. Complex modifying additives for building mixtures on a cement basis. *Vestnik of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2019. Vol. 21. No. 6, pp. 140–148. (In Russian). DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-140-148
15. Dem’yanenko O.V., Kulikova A.A., Kopanitsa N.O. Evaluation of the influence of a complex polyfunctional additive on the performance characteristics of cement stone and concrete. *Vestnik of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2020. Vol. 22. No. 5, pp. 139–152. (In Russian). DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152
16. Dem’yanenko O.V., Kulikova A.A., Kopanitsa N.O., Petrov A.G. Influence of complex modifying additives on the operational properties of heavy concrete. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo*. 2021. No. 5, pp. 23–32. (In Russian). DOI: 10.32683/0536-1052-2021-749-5-23-32
17. Thomas J.J., Biernacki J.J., Bullard J.W., Bishnoi S., Dolado J.S., Scherer G.W., Luttge A. Modeling and simulation of cement hydration kinetics and microstructure development. *Cement and Concrete Research*. 2011. Vol. 41. Iss. 12, pp. 1257–1278.
18. Meguid S., Weng G. *Micromechanics and nanomechanics of composite solids*. Switzerland: Springer. 2018. eBook
19. Frank-Kamenetskii D.A. *Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetike* [Diffusion and heat transfer in chemical kinetics]. Moscow: Nauka. 1987. 492 p.
20. Poole J.L., Riding K.A., Juenger M.C.G., Folliard K.J., Schindler A.K. Effects of supplementary cementitious materials on apparent activation energy. *Journal of ASTM International*. 2010. No. 7 (9), pp. 1–16.
21. Kada-Benameur, H., Wirquin, E., Duthoit, B. Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry. *Cement and Concrete Research*. 2000. Vol. 30 (2), pp. 301–305.
22. Leitsin V.N., Dmitrieva M.A. *Modelirovaniye svyazannykh protsessov v reagiruyushchikh sredakh: monografiya* [Modeling of related processes in reacting environments: monograph]. Kaliningrad: I. Kant. BFU. 2012. 240 p. (In Russian).

УДК 624.131:532.546

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-89-93>Л.И. КУЗЬМИНА<sup>1</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент (lkuzmina@hse.ru);Ю.В. ОСИПОВ<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент (yuri-osipov@mail.ru)<sup>1</sup> Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, г. Москва, ул. Мясницкая, 20)<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Фильтрация суспензии в пористом материале

Фильтрация взвешенных твердых частиц в пористом материале моделирует процессы укрепления фундаментов, создания водонепроницаемых стен в горной породе, строительстве и реконструкции дорог, кольматацию (осаждение частиц) в призабойной зоне скважины компонентами бурового раствора при нефтедобыче, работу фильтрующих элементов очистных сооружений и многое другое. Целью настоящей работы явилось исследование фильтрации монодисперсной суспензии высокой концентрации в однородной пористой среде, имеющей поры различных размеров и конфигурации. В пористую среду под давлением закачивалась суспензия, вытесняющая из пор чистую жидкость, не содержащую частиц. Предполагается, что основной причиной задержания частиц является размерный механизм: частицы свободно проходят через крупные поры и застревают в узких порах, диаметр которых меньше размера частиц. Моделируется нелинейная зависимость скорости роста осадка от концентрации взвешенных частиц, характерная для высококонцентрированной суспензии. При медленном движении суспензии в пористом материале осажденные частицы остаются неподвижными. Они не могут быть оторваны от каркаса пористой среды несущей жидкостью и ударами взвешенных частиц. Математическая модель описывает превращение взвешенных частиц в осадок и задает скорость роста осадка. Получено решение задачи фильтрации в неявной интегральной форме и простое алгебраическое соотношение (инвариант Римана), связывающее концентрации взвешенных и осажденных частиц. Задача решена для линейной функции фильтрации и общей нелинейной функции концентрации. Построено асимптотическое решение вблизи фронта концентраций взвешенных и осажденных частиц, задающее приближенное решение в виде явных алгебраических формул. Показано, что асимптотика близка к точному решению, погрешность уменьшается с ростом порядка асимптотического разложения.

**Ключевые слова:** фильтрация, пористый материал, суспензия, размерный механизм задержания частиц, точное решение, асимптотика.

**Для цитирования:** Кузьмина Л.И., Осипов Ю.В. Фильтрация суспензии в пористом материале // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 89–93. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-89-93>

L.I. KUZMINA<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Associate Professor (lkuzmina@hse.ru);Yu.V. OSIPOV<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Physics and Mathematics), Professor<sup>1</sup> National Research University Higher School of Economics (20, Myasnitskaya Street, Moscow, 101000, Russian Federation)<sup>2</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Filtration of Suspension in a Porous Material

Filtration of suspended solid particles in porous material simulates the processes of strengthening foundations, creating waterproof walls in rock, construction and reconstruction of roads, colmatation (deposition of particles) in the bottom-hole zone of the well by components of drilling fluid during oil production, the operation of filter elements of treatment facilities, and much more. The purpose of this work was to study the filtration of a monodisperse suspension of high concentration in a homogeneous porous medium having pores of various sizes and configurations. A suspension was pumped into the porous medium under pressure, displacing pure liquid containing no particles from the pores. It is assumed that the main reason for particle retention is a size mechanism: particles pass freely through large pores and become stuck in narrow pores, the diameter of which is smaller than the particle size. The nonlinear dependence of the sediment growth rate on the concentration of suspended particles, characteristic of a highly concentrated suspension, is modeled. With the slow movement of the suspension in the porous material, the deposited particles remain motionless. They cannot be torn away from the framework of the porous medium by the carrier fluid and impacts of suspended particles. A mathematical model describes the transformation of suspended particles into sediment and sets the rate of sediment growth. A solution to the filtration problem in implicit integral form and a simple algebraic relation (Riemann invariant) relating the concentrations of suspended and deposited particles are obtained. The problem is solved for a linear filtration function and a general nonlinear concentration function. An asymptotic solution was constructed near the concentration front of suspended and deposited particles, specifying an approximate solution in the form of explicit algebraic formulas. It is shown that the asymptotic behavior is close to the exact solution; the error decreases with increasing order of the asymptotic expansion.

**Keywords:** filtration, porous material, suspension, dimensional particle retention mechanism, exact solution, asymptotics.

**For citation:** Kuzmina L.I., Osipov Yu.V. Filtration of suspension in a porous material. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 89–93. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-89-93>

Фильтрация суспензий в пористых средах встречается во многих технологических процессах. При строительстве фундамента для укрепления непрочного грунта в породу закачивается жидкий бетон. Раствор фильтруется в порах грунта и после застывания усиливает прочность фундамента [1–3]. Осаждение примесей в пористой среде позволяет изменить свойства пористых материалов [4–6].

При фильтрации суспензии в пористой среде часть взвешенных частиц задерживается в порах и образует осадок. Блокирование частиц определяется многими факторами: гравитационными и электромагнитными силами, диффузией в тупиковые поры, застреванием на негладких стенках пор. Если распределение размеров частиц и пор перекрывается, то преобладающим является размерный механизм за-

держания частиц: взвешенные частицы свободно проходят через поры большого размера и застревают в горловине малых пор диаметром меньше размера частиц [7, 8].

Математическая модель фильтрации включает уравнение баланса масс взвешенных и осажденных частиц и кинетическое уравнение роста осадка [9]. Скорость роста осадка пропорциональна функции фильтрации  $\Lambda(s)$ , зависящей от концентрации осажденных частиц, и функции концентрации  $f(c)$ , зависящей от концентрации взвешенных частиц. При увеличении концентрации осадка  $s$  количество свободных пор малого размера уменьшается, следовательно, функция фильтрации  $\Lambda(s)$  убывает. Задержание частиц прекращается, когда все малые поры заблокированы и осадок достигает максимального значения  $s=s_m$ . Наиболее часто в моделях используется линейная функция фильтрации, называемая коэффициентом Ленгмюра [10].

Вид функции концентрации  $f(c)$  меняется в зависимости от концентрации взвешенных частиц в суспензии. При малой концентрации частицы не взаимодействуют между собой. В этом случае рост осадка пропорционален первой степени концентрации:  $f(c)=f_0c$ . Моделям с линейной функцией концентрации посвящено много работ. Для некоторых моделей найдены аналитические решения, для других используются численные методы [11–13].

Если концентрация взвешенных частиц велика, они взаимодействуют друг с другом и функция концентрации является нелинейной. Данная статья посвящена изучению модели с нелинейной функцией концентрации. Строится точное и асимптотическое решения задачи фильтрации. Численный расчет подтверждает близость асимптотики к решению.

### Математическая модель

В области  $\Omega=\{x,t: 0\leq x\leq 1, t\geq 0\}$  рассмотрим систему:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{\partial s}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial s}{\partial t} = \left(1 - \frac{s}{s_m}\right) f(c) \quad (1)$$

с начальными и граничными условиями:

$$x=0: c=1, t=0: c=0, s=0, \quad (2)$$

где  $f(c)$  – гладкая возрастающая функция,  $f(0)=0$ .

Условия (2) означают, что на вход пористой среды впрыскивается суспензия постоянной концентрации; в начальный момент пористая среда не содержит взвешенных и осажденных частиц. Граница между суспензией и пористой средой, не содержащей частиц, – фронт концентраций взвешенных и осажденных частиц движется от входа к выходу со скоростью  $v=1$  и задается уравнением  $t=x$ . В области  $\Omega_0=\{x,t: 0\leq x\leq 1, 0<t<x\}$  решение нулевое, в области  $\Omega_1=\{x,t: 0\leq x\leq 1, t\geq x\}$  решение положительное. Поскольку условия (2) не совпадают в начале координат, решение  $c$  разрывное на фронте концентраций. Решение  $s$  непрерывное во всей области  $\Omega$  и равно нулю на фронте концентраций [14].

В области  $\Omega_1$  совпадают решения системы (1) с условиями (2) и условиями:

$$x=0: c=1, t=x: s=0. \quad (3)$$

### Точное решение

Для линейной функции фильтрации  $f(c)=0$  точное решение задачи (1), (3) имеет вид:

$$c = \frac{1}{1 + (e^x - 1)e^{(x-t)/s_m}}, \quad s = s_m \frac{1 - e^{(x-t)/s_m}}{1 + (e^x - 1)e^{(x-t)/s_m}}. \quad (4)$$

В общем случае решение находится методом [15]. Согласно условию (3) на фронте концентраций  $t=x$  уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = -f(c). \quad (5)$$

Решение  $c_0(x)$  уравнения (5) с условием (3):

$$\int_{c_0(x)}^1 \frac{dc}{f(c)} = x. \quad (6)$$

Для нахождения решения в области  $\Omega_1$  перейдем к характеристическим переменным:

$$\tau = t - x, \quad x = x.$$

В области  $\Omega_\tau = \{x, \tau: 0 \leq x \leq 1, \tau \geq 0\}$  система (1), (3) принимает вид:

$$\frac{\partial c}{\partial x} = -\left(1 - \frac{s}{s_m}\right) f(c); \quad (7)$$

$$\frac{\partial s}{\partial \tau} = \left(1 - \frac{s}{s_m}\right) f(c) \quad (8)$$

с начальными и граничными условиями:

$$x=0: c=1, \quad (9)$$

$$\tau=0: s=0. \quad (10)$$

Выражаем функцию  $s(x, \tau)$  из уравнения (7):

$$s = s_m \left(1 + \frac{\partial c / \partial x}{f(c)}\right) \quad (11)$$

и подставляем формулу (11) в уравнение (8):

$$s_m \frac{\partial}{\partial \tau} \left(1 + \frac{\partial c / \partial x}{f(c)}\right) + \frac{\partial c}{\partial x} = 0, \quad (12)$$

В уравнении (12) меняем порядок интегрирования:

$$s_m \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial c / \partial \tau}{f(c)}\right) + \frac{\partial c}{\partial x} = 0 \quad (13)$$

и интегрируем по переменной  $x$ , используя условие (9):

$$s_m \frac{\partial c / \partial \tau}{f(c)} + c = 1. \quad (14)$$

Начальное условие для уравнения (14):

$$\tau=0: c=c_0(x). \quad (15)$$

Решение уравнения (14) с условием (15):

$$\int_{c_0(x)}^c \frac{dc}{(1-c)f(c)} = \frac{\tau}{s_m}. \quad (16)$$

Выведем соотношение Римана, связывающее решения  $c(x, \tau)$ ,  $s(x, \tau)$ , на характеристиках. Дифференцируем уравнение (16) по  $x$ :

$$\frac{\partial c}{\partial x} \frac{1}{(1-c)f(c)} - \frac{\partial c_0}{\partial x} \frac{1}{(1-c_0)f(c_0)} = 0. \quad (17)$$

Подставляем в соотношение (17) выражения для производных (5) и (7):

$$-\left(1 - \frac{s}{s_m}\right) \frac{1}{(1-c)} + \frac{1}{(1-c_0)} = 0$$

и выражаем  $s(x, \tau)$ :

$$s = s_m \frac{c - c_0}{1 - c_0}. \quad (18)$$

В области  $\Omega_\tau$  решение задачи (7)–(10) задается формулами (6), (16), (18).

### Асимптотическое решение

Для сокращения выкладок приведем вывод асимптотики второго порядка. Предположим, что функция  $f(c)$  допускает разложение в ряд:

$$f(c) = f(c_0) + f'(c_0)(c - c_0) + f''(c_0)(c - c_0)^2 / 2 + \dots \quad (19)$$

в любой точке  $c_0 : 0 < c_0 \leq 1$ .

В окрестности фронта концентраций  $\tau=0$  построим асимптотическое решение задачи (7)–(10) в виде [16]:

$$c(x, \tau) = c_0(x) + c_1(x)\tau + c_2(x)\tau^2 / 2 + \dots, \quad (20)$$

$$s(x, \tau) = s_1(x)\tau + s_2(x)\tau^2 / 2 + s_3(x)\tau^3 / 6 + \dots \quad (21)$$

Подставляем разложение (20) в ряд (19):

$$f(c) = f(c_0) + f'(c_0)c_1\tau + (f''(c_0)c_1^2 + f'(c_0)c_2)\tau^2 / 2 + \dots \quad (22)$$

и разложения (20)–(22) – в уравнения (7), (8):

$$c'_0 + c'_1\tau + c'_2 \frac{\tau^2}{2} = -\left(1 - \frac{s_1\tau + s_2\tau^2/2}{s_m}\right) \left(f(c_0) + f'(c_0)c_1\tau + (f''(c_0)c_1^2 + f'(c_0)c_2) \frac{\tau^2}{2}\right);$$

$$s_1 + s_2\tau + s_3 \frac{\tau^2}{2} = \left(1 - \frac{s_1\tau + s_2\tau^2/2}{s_m}\right) \left(f(c_0) + f'(c_0)c_1\tau + (f''(c_0)c_1^2 + f'(c_0)c_2) \frac{\tau^2}{2}\right).$$

Группируя слагаемые с одинаковыми степенями  $\tau$  и приравнявая их к нулю, получаем рекуррентную систему уравнений:

$$c'_0 = -f(c_0), \quad s_1 = f(c_0);$$

$$c'_1 = -f'(c_0)c_1 + \frac{s_1}{s_m} f(c_0), \quad s_2 = f'(c_0)c_1 - \frac{s_1}{s_m} f(c_0);$$

$$c'_2 = -(f''(c_0)c_1^2 + f'(c_0)c_2) + 2 \frac{s_1}{s_m} f'(c_0)c_1 + \frac{s_2}{s_m} f(c_0);$$

$$s_3 = (f''(c_0)c_1^2 + f'(c_0)c_2) - 2 \frac{s_1}{s_m} f'(c_0)c_1 - \frac{s_2}{s_m} f(c_0).$$

Начальные условия для обыкновенных дифференциальных уравнений следуют из условия (9):

$$x=0: c_0=1, c_1=0, c_2=0.$$

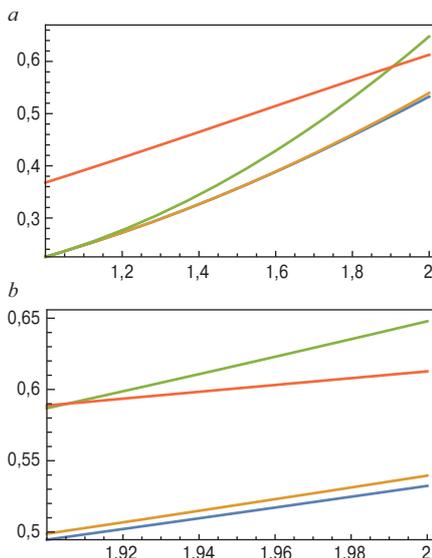
Первое уравнение рекуррентной системы совпадает с уравнением (5); его решение задано формулой (6). Последовательно решая рекуррентные уравнения, находим:

$$c_1 = \frac{1}{s_m} f(c_0)(1 - c_0), \quad s_2 = \frac{f(c_0)}{s_m} (f'(c_0)(1 - c_0) - f(c_0));$$

$$c_2 = \frac{f(c_0)}{s_m^2} (1 - c_0) ((1 - c_0)f'(c_0) - f(c_0));$$

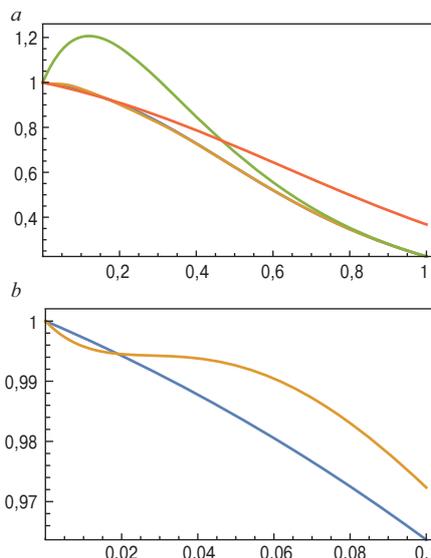
$$s_3 = \frac{f''(c_0)f^2(c_0)(1 - c_0)^2 + f'^2(c_0)f(c_0)(1 - c_0)^2 - 4f'(c_0)f^2(c_0)(1 - c_0) + f^3(c_0)}{s_m^2}.$$

Подставляем найденные решения в разложение (20), (21), получаем асимптотику второго порядка задачи (7)–(10):



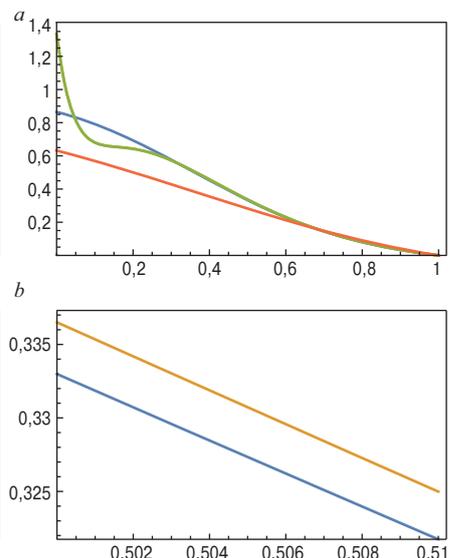
**Рис. 1.** Графики концентрации взвешенных частиц на выходе пористой среды  $x=1$ :  $c(1, t)$  – концентрация взвешенных частиц при  $x=1$ ;  $a$  – динамика при  $t \in [1; 2]$ ;  $b$  – динамика при  $t \in [1.9; 2]$

**Fig. 1.** Graphs of the concentration of suspended particles at the outlet of a porous medium  $x=1$ :  $c(1, t)$  – concentration of suspended particles at  $x=1$ ;  $a$  – dynamics at  $t \in [1.9; 2]$



**Рис. 2.** Графики концентрации взвешенных частиц в момент  $t=1$ :  $c(x, 1)$  – концентрация взвешенных частиц при  $t=1$ ;  $a$  – профили при  $x \in [0; 1]$ ;  $b$  – профили при  $x \in [0; 0.1]$

**Fig. 2.** Graphs of the concentration of suspended particles at the moment  $t=1$ :  $c(x, 1)$  – concentration of suspended particles at  $t=1$ ;  $a$  – profiles at  $x \in [0; 1]$ ;  $b$  – profiles at  $x \in [0; 0.1]$



**Рис. 3.** Концентрации осажденных частиц в момент  $t=1$  (профили осадка [17]):  $s(x, 1)$  – концентрация осажденных частиц при  $t=1$ ;  $a$  – профили при  $x \in [0; 1]$ ;  $b$  – профили при  $x \in [0.5; 0.51]$

**Fig. 3.** Concentrations of deposited particles at the moment  $t=1$  (sediment profiles [17]):  $s(x, 1)$  – concentration of retained particles at  $t=1$ ;  $a$  – profiles at  $x \in [0; 1]$ ;  $b$  – profiles at  $x \in [0.5; 0.51]$

$$c(x, \tau) = c_0 + \frac{1}{s_m} f(c_0)(1 - c_0)\tau + \frac{f(c_0)}{s_m^2}(1 - c_0)((1 - c_0)f'(c_0) - f(c_0))\frac{\tau^2}{2} + \dots;$$

$$s(x, \tau) = f(c_0)\tau + \frac{f(c_0)}{s_m}(f'(c_0)(1 - c_0) - f(c_0))\frac{\tau^2}{2} + \frac{f(c_0)}{s_m^2} \cdot (f''(c_0)f(c_0)(1 - c_0)^2 + f'^2(c_0)(1 - c_0)^2 - 4f'(c_0)f(c_0)(1 - c_0) + f^2(c_0))\frac{\tau^3}{6} + \dots$$

Здесь функция  $c_0 = c_0(x)$  задана формулой (6).

### Численный расчет

Пусть  $f(c) = c + c^2, s_m = 1.$  (23)

Формула (6) принимает вид:

$$\int_{c_0(x)}^1 \frac{dc}{c + c^2} = x. \quad (24)$$

Вычисляя интеграл в левой части уравнения (24), получаем:

$$c_0(x) = \frac{1}{2e^x - 1}. \quad (25)$$

Формула (16) принимает вид:

$$\int_{c_0(x)}^{c(x, \tau)} \frac{dc}{(1 - c^2)c} = \tau. \quad (26)$$

Из (26) получаем решение задачи (7)–(10) с функцией концентрации (23):

$$c(x, \tau) = \frac{1}{\sqrt{1 + 4e^{x-2\tau}(e^x - 1)}}. \quad (27)$$

На рисунках приведены графики точных и асимптотических решений в декартовых переменных  $x, t$ . Поскольку асимптотика четвертого порядка близка к точному решению и визуально графики совпадают (а), на рисунках (б) представлены укрупненные фрагменты.

На рис. 1 изображены графики концентрации взвешенных частиц на выходе пористой среды  $x=1$ : точные решения для линейной (красная линия) и квадратичной (синяя линия) функций фильтрации и асимптотика второго (зеленая линия) и четвертого (желтая линия) порядка.

Рис. 1, б показывает, что относительная погрешность асимптотики четвертого порядка составляет менее 2%.

На рис. 2 показаны графики концентрации взвешенных частиц в момент  $t=1$ : точные решения для линейной (красная линия) и квадратичной (синяя линия) функций фильтрации и асимптотика второго (зеленая линия) и четвертого (желтая линия) порядка.

Согласно рис. 2, б относительная погрешность асимптотики четвертого порядка составляет менее 1%.

На рис. 3 представлены концентрации осажденных частиц в момент  $t=1$  (профили осадка [17]): точные решения для линейной (красная линия) и квадратичной (синяя линия) функций фильтрации и асимптотика второго (зеленая линия) и четвертого (желтая линия) порядка.

Из рис. 3, б следует, что относительная погрешность асимптотики четвертого порядка составляет не более 1%.

### Заключение

Математическая модель фильтрации высококонцентрированной суспензии в пористой среде включает кинетическое уравнение роста осадка с нелинейной функцией концентрации. Для этой задачи построены точные и асимптотические решения. Решение нулевое перед фронтом концентраций и положительное за фронтом. Асимптотика близка к точному решению.

Аналитические решения служат для тонкой настройки экспериментов и позволяют сократить объем лабораторных исследований [18].

Асимптотика может использоваться для решения обратной задачи фильтрации – нахождения неизвестной функции концентрации по измеренной в лаборатории концентрации взвешенных частиц на выходе пористого образца [19, 20].

Для математических моделей фильтрации высококонцентрированной суспензии в пористой среде, учитывающих переменные пористость и допустимый поток, точные решения неизвестны. Построение асимптотики является эффективным способом нахождения приближенных аналитических решений, задающих зависимость решения от параметров модели в явном виде. Эти задачи будут рассмотрены отдельно.

### Список литературы / References

- Zhu G., Zhang Q., Liu R., Bai J., Li W., Xiao Feng X. Experimental and numerical study on the permeation grouting diffusion mechanism considering filtration effects. *Geofluids*. 2021. ID 6613990. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/6613990>
- Ибрагимов М.Н., Семкин В.В., Шапошников А.В. Цементация грунтов инъекцией растворов в строительстве. М.: АСВ, 2017. 266 с.
- Ibragimov M.N., Semkin V.V., Shaposhnikov A.V. Tsementatsiya gruntov inektsiei rastvorov v stroitel'stve [Cementation of soils by injection of solutions in construction]. Moscow: ASV. 2017. 266 p.
- Christodoulou D., Lokkas P., Droudakis A., Spiliotis X., Kasiteropoulou D., Alamanis N. The development of practice in permeation grouting by using fine-grained cement suspensions. *Asian Journal of Engineering and Technology*. 2021. Vol. 9 (6), pp. 92–101. DOI: <https://doi.org/10.24203/ajet.v9i6.6846>
- Мамедов Г.Н., Сулейманова И.Г., Тагиров Б.М. Высокоэффективный легкий заполнитель из стеклосодержащих отходов // *Строительные материалы*. 2020. № 12. С. 66–71. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-66-71>
- Mammadov H.N., Suleimanova I.H., Tahirov B.M. High-effective lightweight aggregate obtained from glass-containing waste. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 12, pp. 66–71. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-787-12-66-71>

5. Федорова Г.Д., Александров Г.Н., Скрябин А.П. Активация структурообразующих свойств оксида графена в цементных композитах // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 17–23. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-17-23>
5. Fedorova G.D., Aleksandrov G.N., Scryabin A.P. Activation of structure-forming properties of graphene oxide in cement composites. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 1–2, pp. 17–23. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-17-23>
6. Федорова Г.Д., Скрябин А.П., Александров Г.Н. Исследование влияния оксида графена на прочность цементного раствора // *Строительные материалы*. 2019. № 1–2. С. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-16-22>
6. Fedorova G.D., Skriabin A.P., Aleksandrov G.N. The study of the influence of graphene oxide on the strength of cement stone using river sand. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 1–2, pp. 16–22. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-767-1-2-16-22> (In Russian).
7. Santos A., Bedrikovetsky P., Fontoura S. Analytical micro model for size exclusion: Pore blocking and permeability reduction. *Journal of Membrane Science*. 2008. Vol. 308, pp. 115–127. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2007.09.054>
8. Bashtani F., Ayatollahi S., Habibi A., Masihi M. Permeability reduction of membranes during particulate suspension flow; analytical micro model of size exclusion mechanism. *Journal of Membrane Science*. 2013. Vol. 435, pp. 155–164. DOI: [10.1016/j.memsci.2013.01.043](https://doi.org/10.1016/j.memsci.2013.01.043)
9. Галагуз Ю.П., Кузьмина Л.И., Осипов Ю.В. Задача фильтрации суспензии в пористой среде с осадком // *Механика жидкости и газа. Известия Российской академии наук (Изв. РАН. МЖГ)*. 2019. № 1. С. 86–98. DOI: [10.1134/S0568528119010067](https://doi.org/10.1134/S0568528119010067)
9. Galaguz Yu.P., Kuzmina L.I., Osipov Yu.V. The problem of filtering a suspension in a porous medium with sediment. *Mekhanika zhidkosti i gaza. Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk (Izv. RAN. MZhG)*. 2019. Vol. 54(1), pp. 85–97. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.1134/S0015462819010063>
10. Kuzmina L.I., Osipov Yu.V. Determining the Lengmur coefficient of the filtration problem. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2020. Vol. 16(4), pp. 48–54. DOI: [10.22337/2587-9618-2020-16-4-48-54](https://doi.org/10.22337/2587-9618-2020-16-4-48-54)
11. Сафина Г.Л. Моделирование фильтрации двухчастичной суспензии в пористой среде // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 2. С. 31–35. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.02.31-35>
11. Safina G.L. Modelling of filtration of a two-particle suspension in a porous medium. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2022. No. 2, pp. 31–35. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.02.31-35>
12. Сафина Г.Л. Расчет профилей осадка двухчастичной суспензии в пористой среде // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 11. С. 110–114. DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.11.110-114>
12. Safina G.L. Calculation of deposit profiles of a two-particle suspension in a porous medium. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020. No. 11. С. 110–114. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.11.110-114>
13. Zhang H., Malgaresi G.V.C., Bedrikovetsky P. Exact solutions for suspension colloidal transport with multiple capture mechanisms. *International Journal of Non-Linear Mechanics*. 2018. Vol. 105, pp. 27–42. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijnonlinmec.2018.07.007>
14. Kuzmina L.I., Nazaikinskii V.E., Osipov Y.V. On a deep bed filtration problem with finite blocking time. *Russian Journal of Mathematical Physics*. 2019. Vol. 26 (1), pp. 130–134. DOI: [10.1134/S1061920819010138](https://doi.org/10.1134/S1061920819010138)
15. Vyazmina E.A., Bedrikovetsky P.G., Polyaniin A.D. New classes of exact solutions to nonlinear sets of equations in the theory of filtration and convective mass transfer. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*. 2007. Vol. 41(5), pp. 556–564. DOI: [10.1134/S0040579507050168](https://doi.org/10.1134/S0040579507050168)
16. Осипов Ю.В., Жеглова Ю.Г. Моделирование переноса и захвата частиц в пористой среде // *Промышленное и гражданское строительство*. 2019. № 11. С. 31–35. DOI: [10.33622/0869-7019.2019.11.56-60](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.11.56-60)
16. Osipov Yu.V., Zheglova Yu.G. Modelling of transport and retention of particles in porous media. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2019. No. 11, pp. 56–60. (In Russian). DOI: [10.33622/0869-7019.2019.11.56-60](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2019.11.56-60)
17. Malgaresi G., Collins B., Alvaro P., Bedrikovetsky P. Explaining non-monotonic retention profiles during flow of size-distributed colloids. *Chemical Engineering Journal*. 2019. Vol. 375. ID 121984. DOI: [10.1016/j.cej.2019.121984](https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.121984)
18. Vaz A, Maffra D, Carageorgos T, Bedrikovetsky P. Characterisation of formation damage during reactive flows in porous media. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*. 2016. Vol. 34, pp. 1422–1433. DOI: [10.1016/j.jngse.2016.08.016](https://doi.org/10.1016/j.jngse.2016.08.016)
19. Кузьмина Л.И., Осипов Ю.В., Царева В.И. Обратная задача для линейной функции фильтрации // *Промышленное и гражданское строительство*. 2020. № 6. С. 64–68. DOI: [10.33622/0869-7019.2020.06.64-68](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.06.64-68)
19. Kuzmina L.I., Osipov Yu.V., Tsareva V.I. Inverse problem for a linear filtration function. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2020. No. 6, pp. 64–68. (In Russian). DOI: [10.33622/0869-7019.2020.06.64-68](https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.06.64-68)
20. Alvarez A.C., Hime G., Marchesin D., Bedrikovetsky P.G. The inverse problem of determining the filtration function and permeability reduction in flow of water with particles in porous media. *Transport in Porous Media*. 2007. Vol. 70 (1), pp. 43–62. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11242-006-9082-3>

И.В. СТЕПИНА, канд. техн. наук (sudeykina@mail.ru),  
Ю.Г. ЖЕГЛОВА, канд. техн. наук (uliagermanovna@yandex.ru)

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

## Квалиметрия древесного композита по кинетическим параметрам модифицирования

Надежность строительных конструкций обуславливается в первую очередь качеством используемых при строительстве материалов. Древесина очень популярна в жилищном строительстве. Но ее качество может снижаться в процессе эксплуатации в результате действия огня и биокоррозии. Чтобы защитить древесину конструкций, ее модифицируют, тем самым гарантируя качество материала. В этой связи целью исследования явилась оценка качества древесины через степень модифицирования кремнийорганическими соединениями по кинетическим параметрам. В результате работы методами корреляционного анализа было установлено влияние фосфорорганических соединений различной природы на степень модифицирования подложки кремнийорганическими соединениями при различном времени воздействия. Причем было установлено, что между временем модифицирования и процентом содержания кремния в целлюлозе существует сильная прямая взаимосвязь. С помощью корреляционного анализа определены наиболее эффективные фосфорорганические «проводники» кремнийорганики в древесину в зависимости от природы последней и температуры модифицирования. В результате проведенного однофакторного дисперсионного анализа было установлено влияние условий обработки кремнийорганическими соединениями на содержание кремния в целлюлозе в % по массе при различной температуре.

**Ключевые слова:** древесина, фосфорорганические соединения, кремнийорганические соединения, степень модифицирования, корреляционный анализ, дисперсионный анализ.

**Для цитирования:** Степина И.В., Жеглова Ю.Г. Квалиметрия древесного композита по кинетическим параметрам модифицирования // *Строительные материалы*. 2023. № 9. С. 94–101. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-94-101>

I.V. STEPINA, Candidate of Sciences (Engineering) (sudeykina@mail.ru),

Y.G. ZHEGLOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (uliagermanovna@yandex.ru)

National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Qualimetry of Wood Composite by Kinetic Modification Parameters

The reliability of building structures is primarily due to the quality of the materials used in construction. Wood is very popular in residential construction. But its quality can decline during operation as a result of fire and biocorrosion. To protect the wood structures it is modified, thereby guaranteeing the quality of the material. In this regard, the purpose of the study was to assess the quality of wood through the degree of modification by kinetic parameters. As a result of the work, the influence of organophosphorus compounds of different nature on the degree of modification of the substrate by organochlorine compounds at different modification times was established by methods of correlation analysis. It was found that there was a strong direct correlation between the time of modification and the percentage of silicon content in cellulose. Correlation analysis was used to determine the most effective organophosphorus “conductors” of organosilicon into wood depending on the nature of the latter and the modification temperature. A single-factor analysis of variance revealed the effect of the conditions of treatment with organosilicon compounds on the silicon content in cellulose in % by mass at different temperatures.

**Keywords:** wood, organophosphorus compounds, organosilicon compounds, degree of modification, correlation analysis, analysis of variance.

**For citation:** Stepina I.V., Zheglova Y.G. Qualimetry of wood composite by kinetic parameters of modification. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 9, pp. 94–101. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-94-101>

Несмотря на множество новых композитных материалов, древесина не теряет своей популярности в индивидуальном жилищном строительстве. Обусловлено это в первую очередь экологичностью природного сырья. Не меньшее значение имеет простота обработки материала и высокий коэффициент конструктивного качества. Однако всем известны и недостатки древесины, такие как горючесть и биоразлагаемость, которая зависит от величины влажности подложки. В сухом состоянии развития спор дерево-разрушающих грибов не происходит. Но если влажность превышает 20%, то процесс прорастания спор происходит стремительно, особенно при повышенной температуре. Это ведет к ухудшению внешнего вида конструкции, снижению прочности, т. е. ухудшению качества. В этой связи одним из направлений защиты деревянных конструкций от биокоррозии и

сохранения качества материала является гидрофобизация — создание водоотталкивающих покрытий на поверхности древесного композита. В этом случае даже при контакте с капельно-жидкой средой древесины не будет впитывать воду, а значит, и развитие спор будет ограничено.

Как показано в проведенных ранее исследованиях, наиболее эффективными гидрофобизаторами поверхности древесины являются кремнийорганические жидкости [1–3]. Оптимальные условия силилирования целлюлозных материалов установлены в исследовании [4], в ходе которого различные целлюлозные субстраты и органорастворимый лигнин были гетерогенно обработаны органическими растворами триалкоксисиланов с переменной функцией четвертого заместителя. Впервые было однозначно показано, что Si–OR не реагирует с гидроксид-

группами целлюлозы даже при высокой температуре, в то время как он конденсируется с фенольными ОН-группами лигнина. Добавление воды в эти системы вызывает частичный гидролиз силоксановых молекул, и образующиеся силанольные группы могут реагировать с ОН-группами целлюлозы, но только при высокой температуре. Используя последние системы и силоксан, несущий полимеризуемую функцию, удалось прикрепить поли(метилметакрилатные) цепи к поверхности целлюлозных волокон с помощью двухступенчатой процедуры. В работе [5] показано, что силоксилирование целлюлозы позволяет снизить гигроскопичность подложки и повысить устойчивость к разрушающему действию молекул воды на макромолекулы целлюлозы. Как установили авторы [5], это становится возможным за счет химической сшивки силоксанового модификатора с гидроксильными группами целлюлозных волокон и образования таким образом полиэфиров. Авторы [6] разработали новый метод гидрофобизации бумаги с использованием новой недорогой силиконовой системы на основе эмульсии триэтоксиметилсилана в воде, смешанной в низкой концентрации с водным раствором крахмала. Установили, что удовлетворительная гидрофобизация (с углом контакта с водой более  $90^\circ$ ) может быть достигнута даже при 10 мас. % исходного триэтоксиметилсилана в 4 мас. водном растворе крахмала. Наибольшая гидрофобизация (с углом контакта с водой более  $100^\circ$ ) была получена при использовании смесей крахмал/силоксан. Покрытие на основе водного раствора триэтоксиметилсилана без крахмала привело к уменьшению угла контакта и снижению устойчивости к воздействию воды. Применение разработанной системы с использованием метода покрытия стержнем Майера обеспечило гидрофобные свойства без изменения цвета поверхности при сохранении основных механических свойств, таких как прочность при разрыве и сопротивление разрыву. Кроме того, образцы гидрофобизированной бумаги показали ненулевую воздухопроницаемость, что позволило отнести их к дышащим материалам. Также было отмечено увеличение шероховатости поверхности бумаги с покрытием.

В работе [7] показана эффективность кремний-органических модификаторов не только для гидрофобизации поверхности целлюлозных материалов, но и для обеспечения прочности подложки. Поли(метилгидрид)силоксан (ПМГС) был использован для гидрофобной модификации бамбуковой муки (БМ) при комнатной температуре на основе дегидрогенизации между гидроксильными группами БМ и  $-\text{Si}-\text{H}$  ПМГС, и было исследовано влияние модификации ПМГС на механические свойства композитов БМ/ПЭВП (полиэтилен высокой плотности). Было обнаружено, что гидрофобность БМ была значительно улучшена модификацией ПМГС и механические свойства композитов могут быть эффективно скорректированы.

Для обеспечения огнезащиты целлюлозы в состав модификаторов вводят фосфорсодержащие соединения. Фосфорамидатное силоксановое соединение может значительно улучшить огнезащитные свойства хлопчатобумажных тканей за счет стимулирования образования угольного слоя и выделения негорючих летучих веществ. Кроме того, данный метод отделки вызвал незначительное снижение прочности при разрыве и разрывного удлинения для хлопчатобумажных тканей, что говорит о том, что данный вид огнезащитного материала имеет определенный потенциал в практическом применении [8]. В работе [9] описаны процессы модификации целлюлозы смесью ортофосфорной кислоты и полифосфата аммония в среде карбамида или этими же составами с добавкой соли магния. Показано, что в условиях модификации этерифицирующий состав подвергается направленной анионной реорганизации с образованием линейных короткоцепочечных полифосфатов. Установлено, что уровень огневой защищенности модифицированной целлюлозы с использованием фосфатных составов зависит как от содержания фосфора в тканях, так и от состава вводимых эфирных групп. Эффективность сопротивляемости огню полученных материалов увеличивается с ростом длины фосфатных цепей. Полученные фосфаты целлюлозы обладают уровнем сопротивляемости огню, соответствующим трудногорючим материалам. Множество других научных исследований [10–12] подтверждают высокую эффективность фосфорорганических модификаторов для обеспечения огнезащитности. В их присутствии при термическом разложении целлюлозных материалов происходит уменьшение выхода летучих продуктов, увеличивается выход коксового остатка, уменьшается температура начала интенсивного терморазложения [13, 14]. В процессе терморазложения древесины, модифицированной фосфорорганическими соединениями (ФОС), образуются свободные радикалы, которые участвуют в реакциях рекомбинации с продуктами разложения древесины. Эти процессы уменьшают время самостоятельного горения и тления [15].

Описанные выше примеры модифицирования целлюлозосодержащих подложек КОС и ФОС показывают высокую эффективность с точки зрения улучшения эксплуатационных свойств древесного композита. И поэтому оптимизация этих процессов является весьма актуальной задачей. Научный интерес представляет изучение влияния предварительного фосфорилирования целлюлозной подложки на степень последующего силилирования, а также определение роли природы фосфорилирующего агента на выход конечного продукта силилирования. В своей работе методами корреляционного анализа авторы предприняли попытку установления влияния ФОС различной природы на степень модифицирования подложки КОС. Кроме того, с помощью однофакторного дисперсионного анализа попытались определить зависимость содержания кремния в % по массе от времени модифицирования.

### Методология

В качестве модификаторов использовались растворы фосфорорганических соединений (ФОС): диметилфосфит (ДМФ), трихлорэтилфосфит (ТИТ), трикрезилфосфат (ТКФ); разбавленные растворы кремнийорганических соединений (КОС): полиэтилгидридсилоксан (ПЭГС), тетраэтоксисилан (ТЭС), полиметилсиликонат натрия (ПМСН). Осуществлялось последовательное модифицирование сначала растворами ФОС, затем КОС в различных сочетаниях. Анализ полученных ранее экспериментальных данных [16] проводился в два этапа: на первом этапе производился расчет коэффициента корреляции для установления влияния ФОС различной природы на степень модифицирования подложки КОС с учетом температуры и времени. Коэффициент корреляции рассчитывался по следующей формуле:

$$r = \frac{n \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}; \quad (1)$$

полученный коэффициент корреляции отражает степень взаимосвязи между двумя показателями, а также определяет направление связи между зависимой и независимой переменными. Значения коэффициента корреляции находятся в диапазоне от -1 (сильная отрицательная связь) до +1 (сильная положительная связь). При равенстве коэффициента корреляции нулю между показателями нет никакой связи.

На втором этапе исследования методами однофакторного дисперсионного анализа определялось влияние условий обработки КОС (температуры и времени модифицирования) на содержание кремния в целлюлозе в % по массе.

При построении модели однофакторного дисперсионного анализа результатом эксперимента является некоторая случайная величина  $X$ , называемая также результативным признаком. На значения случайной величины  $X$  влияет фактор  $A$ , состоящий из нескольких уровней (групп)  $A_j, j=1, \dots, k$ .

Обозначим через  $x_{ij}$  значение  $i$ -го наблюдения ( $i=1, \dots, n$ ) в  $j$ -м уровне фактора  $A$ . Модель однофакторного дисперсионного анализа представим в виде:

$$x_{ij} = a + m_j + \varepsilon_{ij}, \quad (2)$$

где  $a$  – генеральное среднее всех мыслимых результатов наблюдений, т. е.  $M(X)$ ;  $m_j$  – эффект влияния на  $X$ , вызванный  $j$ -м уровнем фактора  $A$ , или, иначе, отклонение математического ожидания  $a_j$  результативного признака при  $j$ -м уровне фактора от общего математического ожидания  $a$ , т. е.  $m_j = a_j - a$ ;  $\varepsilon_{ij}$  – случайный остаток, отражающий влияние на величину  $x_{ij}$  всех других неконтролируемых факторов [17].

Выборочное среднее, соответствующее  $j$ -му уровню фактора  $A$  (групповое среднее), вычисляется по формуле:

$$\bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{ij}. \quad (3)$$

Среднее арифметическое всех величин, или общее среднее:

$$\bar{x} = \frac{1}{nk} \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n x_{ij} = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k \bar{x}_j. \quad (4)$$

Общая сумма квадратов – сумма квадратов отклонений наблюдаемых значений  $x_{ij}$  от общего среднего:

$$Q = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n x_{ij}^2 - nk\bar{x}^2. \quad (5)$$

Факторная сумма квадратов (обусловленная влиянием фактора  $A$ ) – сумма квадратов отклонений групповых средних от общего среднего:

$$Q_f = n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x})^2 = n \sum_{j=1}^k \bar{x}_j^2 - nk\bar{x}^2. \quad (6)$$

Остаточная сумма квадратов характеризует рассеяние внутри группы:

$$Q_o = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2. \quad (7)$$

Тогда справедливо тождество:

$$\sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x})^2 = n \sum_{j=1}^k (\bar{x}_j - \bar{x})^2 + \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2, \quad (8)$$

или

$$Q = Q_f + Q_o. \quad (9)$$

Таким образом, полная сумма квадратов отклонений от общего среднего  $Q$  разбивается на две компоненты:  $Q_f$  – сумма квадратов между группами,  $Q_o$  – сумма квадратов внутри групп.

Соответствующие числа степеней свободы рассчитываются следующим образом:

$$v = nk - 1; \quad v_j = k - 1; \quad v_o = k(n - 1), \quad (10)$$

а дисперсии

$$S^2 = \frac{Q}{v}; \quad S_f^2 = \frac{Q_f}{v_f}; \quad S_o^2 = \frac{Q_o}{v_o}. \quad (11)$$

Заметим, что величина  $S^2 = \frac{Q}{v}$ , являющаяся несмещенной оценкой для  $\sigma^2$ , всегда будет иметь распределение  $\chi^2$  с  $v$  степенями свободы и по ней можно построить доверительный интервал для  $\sigma^2$  [17].

Если нулевая гипотеза о равенстве средних справедлива, то эти дисперсии являются несмещенными оценками дисперсий генеральной совокупности. Значительное превышение дисперсии  $S_f^2$  над дисперсией  $S_o^2$  можно объяснить различием в средних группах. Поэтому для проверки нулевой гипотезы используется отношение этих средних  $F$ -статистика, носящее название дисперсионного отношения:

$$F = \frac{S_f^2}{S_o^2} = \frac{\frac{Q_f}{k-1}}{\frac{Q_o}{k(n-1)}}, \quad (12)$$

которая имеет распределение Фишера с числами степеней свободы  $(k-1)$  и  $k(n-1)$ . Нулевая гипотеза не противоречит результатам наблюдений на заданном уровне значимости  $\alpha$ , если:

$$F < F_U(k-1, k(n-1)); \quad (13)$$

в этом случае считается, что фактор  $A$  не оказывает существенного влияния на показатель  $X$ .

Таблица 1  
Table 1



Рис. 1. Критическая область дисперсионного анализа при проверке гипотезы  $H_0$  [18]

Fig. 1. Critical area of the analysis of variance when testing hypothesis  $H_0$  [18]

При заданном уровне значимости  $\alpha$  нулевая гипотеза отклоняется, если вычисленная  $F$ -статистика больше верхнего критического значения  $F_U$ . Как показано на рис. 1 [18], решающее правило формулируется следующим образом: нулевая гипотеза  $H_0$  отклоняется, если  $F > F_U$ ; в этом случае считается, что фактор  $A$  оказывает существенное влияние на показатель  $X$  [18].

Если нулевая гипотеза  $H_0$  является истинной, вычисленная  $F$ -статистика близка к единице, поскольку ее числитель и знаменатель являются оценками одной и той же величины – дисперсии  $\sigma^2$ , присущей анализируемым данным. Если нулевая гипотеза  $H_0$  является ложной (и между математическими ожиданиями разных групп существует значительная разница), вычисленная  $F$ -статистика будет намного больше единицы, поскольку ее числитель  $S_f^2$ , помимо естественной изменчивости данных, оценивает эффект условий эксперимента или разности между группами, в то время как знаменатель  $S_o^2$  оценивает лишь естественную изменчивость данных [18].

### Результаты и обсуждение

В табл. 1 представлены результаты элементного анализа на кремний образцов модифицированной целлюлозы [16]. Из данных табл. 1 видно, что для всех кремнийорганических модификаторов предварительное фосфорилирование подложки повышает степень модифицирования. Увеличение времени выдержки и температуры также приводит к росту процентного содержания кремния в составе подложки.

Содержание кремния  
в модифицированной целлюлозе [16]  
Silicon content in the modified cellulose [16]

№ пп	Условия обработки			Содержание Si, % по массе			
	ФОС	КОС	T, °C	1 ч	2 ч	3 ч	4 ч
1	----	ПМСН	20	1,75	2,3	2,55	2,6
			40	2,4	3,1	3,35	3,4
			60	3,4	4,07	4,26	4,3
			80	4,3	4,84	5,19	5,21
2	ДМФ	ПМСН	20	2,9	4,4	4,8	4,9
			40	4,2	5,6	6,17	6,2
			60	5,4	6,8	7,38	7,41
			80	6,7	8,4	8,78	8,8
3	ТИТ	ПМСН	20	1,4	2,2	2,55	2,6
			40	1,65	2,4	2,77	2,8
			60	1,8	2,58	3	3,1
			80	2	2,68	3,1	3,2
4	ТКФ	ПМСН	20	0,7	1	1,26	1,3
			40	0,88	1,21	1,4	1,41
			60	1,06	1,45	1,6	1,65
			80	1,22	1,66	1,88	1,9
5	----	ТЭС	20	0,34	0,5	0,73	0,75
			40	0,55	0,7	0,92	0,95
			60	0,74	0,88	1,11	1,14
			20	0,5	0,72	0,93	0,96
6	ДМФ	ТЭС	40	0,65	0,81	1,1	1,13
			60	0,8	1,03	1,28	1,3
			20	0,4	0,59	0,76	0,8
			40	0,6	0,78	0,95	1
7	ТИТ	ТЭС	60	0,8	1	1,2	1,25
			20	0,53	0,55	0,56	0,57
			40	0,62	0,67	0,69	0,7
			60	0,71	0,77	0,79	0,8
8	ТКФ	ТЭС	20	0,03	0,08	0,14	0,14
			40	0,12	0,17	0,22	0,23
			60	0,2	0,27	0,31	0,33
			20	0,07	0,16	0,26	0,28
9	----	ПЭГС	40	0,21	0,32	0,43	0,44
			60	0,35	0,45	0,55	0,57
			20	0,13	0,23	0,33	0,35
			40	0,26	0,4	0,5	0,52
10	ДМФ	ПЭГС	60	0,41	0,52	0,64	0,65
			20	0,06	0,14	0,23	0,24
			40	0,15	0,25	0,35	0,36
			60	0,25	0,35	0,46	0,47
11	ТИТ	ПЭГС	20	0,06	0,14	0,23	0,24
			40	0,15	0,25	0,35	0,36
			60	0,25	0,35	0,46	0,47
			20	0,06	0,14	0,23	0,24
12	ТКФ	ПЭГС	40	0,15	0,25	0,35	0,36
			60	0,25	0,35	0,46	0,47

Таблица 2  
Table 2

Коэффициенты корреляции зависимости влияния ФОС различной природы на степень модифицирования подложки КОС (содержания кремния в целлюлозе в % при времени 1, 2, 3 и 4 ч)  
Correlation coefficients of correlation between the effect of POPs of different nature on the degree of modification of COC substrate (silicon content in cellulose in % at time 1, 2, 3 and 4 hours)

Условия обработки	ПМСН			ТЭС			ПЭГС		
	20°	40°	60°	20°	40°	60°	20°	40°	60°
Нет ФОС	0,9282	0,9106	0,8942	0,961	0,9671	0,9664	0,9473	0,9683	0,9676
ДМФ	0,8927	0,9056	0,9067	0,96	0,9627	0,9568	0,9707	0,9562	0,9683
ТИТ	0,9199	0,9215	0,9432	0,9683	0,9752	0,973	0,9683	0,9556	0,9573
ТКФ	0,959	0,9276	0,9276	0,9827	0,9431	0,9287	0,9613	0,9573	0,9584

Таблица 3  
Table 3

Результаты однофакторного дисперсионного анализа для условия обработки ПМСН  
Results of single-factor analysis of variance for the PMSN treatment condition

T, °C	Источник дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия	Статистика Фишера, F	P-значение	F <sub>U</sub>
20	Между группами	3,43051875	3	1,14350625	0,631028382	0,60891994	3,490294819
	Внутри групп	21,745575	12	1,81213125			
	Общая	25,1760937	15				
40	Между группами	3,561075	3	1,187025	0,350956338	0,789259408	3,490294819
	Внутри групп	40,5871	12	3,382258333			
	Общая	44,148175	15				
60	Между группами	3,674475	3	1,224825	0,231859892	0,872434541	3,490294819
	Внутри групп	63,3913	12	5,282608333			
	Общая	67,065775	15				

Таблица 4  
Table 4

Результаты однофакторного дисперсионного анализа для условия обработки ТЭС  
Results of one-factor analysis of variance for the TPP treatment condition

T, °C	Источник дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия	Статистика Фишера, F	P-значение	F <sub>U</sub>
20	Между группами	0,27756875	3	0,092522917	5,65961514	0,011866676	3,490294819
	Внутри групп	0,196175	12	0,016347917			
	Общая	0,47374375	15				
40	Между группами	0,303475	3	0,101158333	6,018344075	0,009629045	3,490294819
	Внутри групп	0,2017	12	0,016808333			
	Общая	0,505175	15				
60	Между группами	0,33735	3	0,11245	3,977597642	0,035139742	3,490294819
	Внутри групп	0,33925	12	0,028270833			
	Общая	0,6766	15				

Таблица 5  
Table 5

Результаты однофакторного дисперсионного анализа для условия обработки ПЭГС  
Results of single-factor analysis of variance for the PEGS treatment condition

T, °C	Источник дисперсии	Сумма квадратов	Число степеней свободы	Дисперсия	Статистика Фишера, F	P-значение	F <sub>U</sub>
20	Между группами	0,08466875	3	0,028222917	5,796747967	0,010946523	3,490294819
	Внутри групп	0,058425	12	0,00486875			
	Общая	0,14309375	15				
40	Между группами	0,10586875	3	0,035289583	3,263147756	0,059335512	3,490294819
	Внутри групп	0,129775	12	0,010814583			
	Общая	0,23564375	15				
60	Между группами	0,105525	3	0,035175	2,346955796	0,124184706	3,490294819
	Внутри групп	0,17985	12	0,0149875			
	Общая	0,285375	15				

В табл. 2 представлены рассчитанные коэффициенты корреляции зависимости условий обработки ФОС: отсутствует ФОС, ДМФ, ТИТ, ТКФ от содержания кремния в целлюлозе в течение 4 ч. Данные коэффициенты рассчитаны для трех значений температуры 20, 40 и 60° для каждого условия обработки КОС (ПМСН, ТЭС, ПЭГС).

Из данных табл. 2 видно, что все значения близки к единице, поэтому можно сделать вывод, что между

временем опыта и содержанием кремния существует сильная прямая взаимосвязь. Разброс значений рассчитанных коэффициентов корреляции в табл. 2 от 0,8927 до 0,9827. Причем в зависимости от значения коэффициента корреляции видно, для каких условий обработки ФОС она будет сильнее, например при 20° для условий обработки ТКФ для всех КОС (ПМСН, ТЭС, ПЭГС) коэффициенты корреляции будут выше, чем для остальных условий обработки ФОС: нет ФОС,

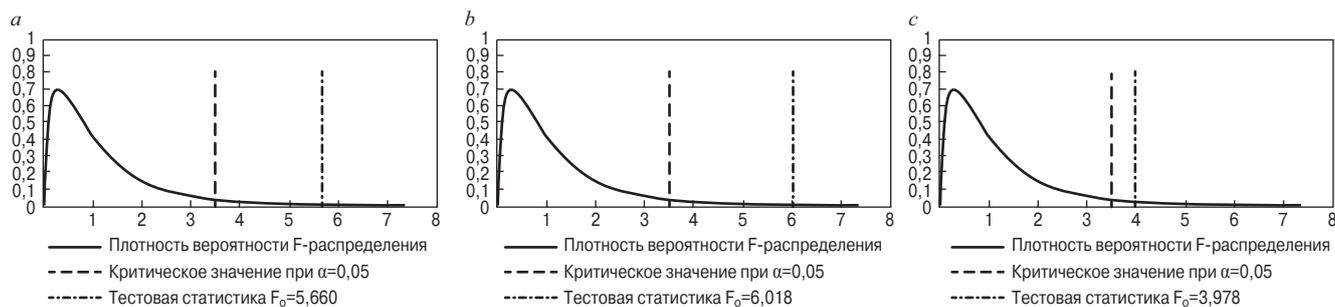


Рис. 2. Распределение Фишера для условий обработки ТЭС: а – при 20°C; б – при 40°C; с – при 60°C  
 Fig. 2. Fisher distribution for TPP treatment conditions: a – at 20°C; b – at 40°C; c – at 60°C

ДМФ и ТИТ. При остальной температуре особого разброса коэффициента корреляции не произошло, поэтому они при каждом эксперименте степени взаимосвязи получились примерно одинаковыми.

На следующем этапе исследования полученных экспериментальных данных был применен метод однофакторного дисперсионного анализа как наиболее результативного метода, предназначенного для оценки влияния различных факторов на результат эксперимента.

Для каждого условия обработки КОС проверяется нулевая гипотеза  $H_0: m_1 = m_2 = \dots = m_k$  об отсутствии ее влияния на результативный признак  $X$  (содержания кремния в % в целлюлозе) фактора  $A$  (задача 1 – время, задача 2 – температура), имеющего  $k$  уровней  $A_j, j=1, \dots, k$ .

Основная идея дисперсионного анализа состоит в том, чтобы сопоставить дисперсию за счет воздействия фактора  $A$  с дисперсией, обусловленной случайными причинами. Если различие между ними несущественно, то влияние фактора  $A$  на признак  $X$  незначительно. Если же различие между факторной и остаточной дисперсиями значимо, то это говорит о влиянии фактора  $A$  на рассматриваемый признак  $X$ .

Предполагается, что случайная величина  $X$  имеет нормальное распределение с математическим ожиданием  $m_j$ , зависящим от уровня фактора  $A_j$ , и постоянной дисперсией  $\sigma^2$ . В качестве исходных данных используются выборочные значения величины  $X$ , полученные экспериментальным путем для каждого фактора  $A$  (времени/температуры). Число элементов выборки на каждом уровне равно  $n$ , тогда общее число наблюдений  $nk$ .

Определим зависимость содержания кремния в % от условий обработки КОС при определенной температуре, используя данные табл. 1. В каждой из групп для одного условия обработки КОС представлены четыре значения содержания кремния в %, для трех значений температуры 20, 40 и 60°C. Группы разделены по времени – 1, 2, 3 и 4 ч.

Результаты расчета, проведенного методами однофакторного дисперсионного анализа, для каждого типа условия обработки КОС представлены в табл. 3–5:

$P$ -значение в табл. 3–5 показывает вероятность того, что при истинной нулевой гипотезе  $F$ -статистика не меньше рассчитанного значения. Для отклонения

нулевой гипотезы необходимо, чтобы эта величина не превышала уровень значимости  $\alpha$ . Более того,  $P$ -значение свидетельствует о том, что вероятность обнаружить такую или большую разность между математическими ожиданиями генеральных совокупностей при условии, что на самом деле они одинаковы, равна рассчитанному  $P$ -значению.

На основании вышеизложенного проведем анализ полученных результатов. Из табл. 3 следует сделать вывод о том, что  $F$ -статистика много меньше рассчитанного значения, следовательно, нулевая гипотеза не противоречит результатам наблюдений на заданном уровне значимости  $\alpha=5\%$ . А из этого следует, что при модифицировании целлюлозы ПМСН содержание кремния в подложке не зависит от времени.

Данные табл. 4 подтверждают, что при фиксированной температуре обработки от 20 до 60°C условия обработки ТЭС влияют на содержание кремния в целлюлозе, так как для всей температуры  $F$ -статистика оказалась выше  $F_U$ , а величина  $P$ -значения не превышает уровня значимости  $\alpha=5\%$ . Графики распределения Фишера, представленные на рис. 2, наглядно показывают, что вычисленная  $F$ -статистика больше верхнего критического значения  $F_U$  и нулевая гипотеза  $H_0$  отклоняется.

Из данных табл. 5 видно, что при температуре 20°C  $F$ -статистика оказалась выше  $F_U$ , а вероятность того, что при истинной нулевой гипотезе  $F$ -статистика не меньше рассчитанного значения, равна 1%, поэтому при температуре 20°C мы получаем вывод о том, что условия обработки ПЭГС влияют на содержания кремния в целлюлозе. График распределения Фишера, наглядно иллюстрирующий отклонение  $H_0$  гипотезы, представлен на рис. 3.

При температуре 40 и 60°C было получено, что  $F$ -статистика  $< F_U$ , т. е., что условия обработки ПЭГС перестают оказывать существенное влияние на содержание кремния в целлюлозе.

### Заключение

На основании проведенного анализа можно сделать следующие выводы. Предварительное фосфорилирование подложки повышает степень ее модифицирования изученными КОС. Вероятно, это связано с тем, что обладающие лучшей проникающей способностью полярные молекулы ФОС, закрепляясь в

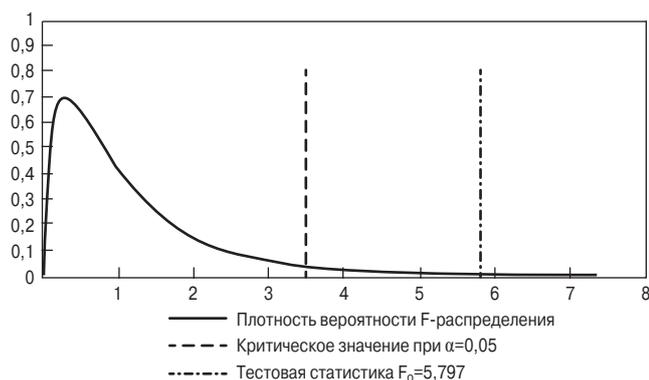


Рис. 3. Распределение Фишера для условий обработки ПЭГС при 20°C  
Fig. 3. Fisher distribution for PEGS treatment conditions at 20°C

составе подложки, выполняют роль проводников КОС в структуру подложки. Возможно, при последовательном модифицировании целлюлозы ФОС и КОС имеет место координация КОС с образованием интермедиата, включающего координацию типа  $=P \rightarrow Si=$ , вследствие чего облегчается взаимодействие функциональных групп КОС с ОН-группами целлюлозы. Увеличение времени выдержки также приводит к росту процентного содержания привитого кремния.

Методами корреляционного анализа было установлено влияние ФОС различной природы на степень модифицирования подложки КОС при различном времени модифицирования. Причем между временем модифицирования и процентом содержания кремния в целлюлозе существует сильная прямая взаимосвязь. Разброс значений рассчитанных коэффициентов корреляции варьировался от 0,8927 до 0,9827.

На основании проведенного корреляционного анализа можно сделать вывод, что наиболее эффективным «проводником» КОС в состав подложки в зависимости от времени модификации можно считать ТКФ при температуре модификации 20°, так как в данных условиях коэффициенты корреляции КОС выше, чем для остальных условий обработки ФОС.

Для каждого КОС наиболее эффективным предшественником при последовательном модифицировании с точки зрения наибольшего привития кремния в состав подложки будут следующие ФОС. В зависимости от времени модификации:

– для ПМСН наиболее оптимальным будет являться ТКФ при температуре модификации 20°C и 40°C, а при температуре 60°C оптимальным будет ТИТ;

– для ТЭС наиболее оптимальным будет являться ТКФ при температуре модификации 20°C, а при температуре 40 и 60°C наиболее оптимальным будет ТИТ;

– для ПЭГС также при температуре модификации 20°C наиболее оптимальным будет ТКФ, при температуре 40°C – без обработки ФОС, при температуре 60°C – ДМФ.

В результате проведенного однофакторного дисперсионного анализа было установлено влияние условий обработки КОС на содержание кремния в

целлюлозе в % по массе при различной температуре. В результате проведения однофакторного дисперсионного анализа было установлено, что при модифицировании поверхности целлюлозы ПМСН отсутствует взаимосвязь между процентным содержанием кремния в подложке и временем модифицирования. Мы предполагаем, что это может быть обусловлено высокой реакционной способностью ПМСН.

Проведенный анализ подтвердил существенное влияние условий обработки ТЭС на содержание кремния в целлюлозе в течение 4 ч при фиксированной температуре обработки 20, 40 и 60°C.

При использовании в качестве модификатора ПЭГС анализ показал влияние на содержание кремния от времени обработки только при температуре 20°C. При температуре 40 и 60°C было получено, что условия обработки ПЭГС перестают оказывать существенное влияние на содержание кремния в целлюлозе.

### Список литературы / References

1. Крутасов Б.В., Машкин Н.А. Повышение стойкости деревянных элементов очистных сооружений угольных шахт Кузбасса. *Повышение качества и эффективности строительных и специальных материалов: Сборник Национальной научно-технической конференции с международным участием*. Новосибирск, 2019. С. 245–249.
1. Krutasov B.V., Mashkin N.A. Increasing the durability of wooden elements of wastewater treatment plants at coal mines in Kuzbass. *Improving the quality and efficiency of building and special materials: Collection of the National Scientific and Technical Conference with international participation*. Novosibirsk. 2019, pp. 245–249 (In Russian).
2. Шведов В.Н., Крутасов Б.В., Машкин Н.А. Долговечность модифицированной древесины в конструкциях вентиляторных градирен и очистных сооружений // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2020. № 3 (735). С. 126–134. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-735-3-126-134.
2. Shvedov V.N., Krutasov B.V., Mashkin N.A. Durability of modified wood in the construction of fan cooling towers and treatment facilities. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Stroitel'stvo*. 2020. No. 3 (735), pp. 126–134. (In Russian). DOI: 10.32683/0536-1052-2020-735-3-126-134
3. Цветкова И.Н., Кычкин А.К., Шилова О.А. Атмосферостойкие покрытия для защиты древесины в Якутии. *Новые материалы и технологии в условиях Арктики: Материалы V Международной конференции с элементами научной школы*. Якутск, 2022. С. 83–84.
3. Tsvetkova I.N., Kychkin A.K., Shilova O.A. Weather-resistant coatings for wood protection in Yakutia. *New materials and technologies in the Arctic: Proceedings of the V International Conference with elements of a scientific school*. Yakutsk. 2022, pp. 83–84. (In Russian).

4. Castellano M., Gandini A., Fabbri P., Belgacem M.N. Modification of cellulose fibres with organosilanes: Under what conditions does coupling occur? *Journal of Colloid and Interface Science*. 2004. Vol. 273. Iss. 2, pp. 505–511. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2003.09.044>
5. Stiubianu G., Racles C., Nistor A., Cazacu M., Simionescu B.C. Cellulose modification by crosslinking with siloxane diacids. *Cellulose chemistry and technology*. 2011. Vol. 45. No. 3–4, pp. 157–162.
6. Ganicz T., Olejnik K., Rózga-Wijas K., & Kurjata J. New method of paper hydrophobization based on starch-cellulose-siloxane interactions. *BioResources*. 2020. Vol. 15 (2), pp. 4124–4142. DOI: 10.15376/biores.15.2.4124-4142
7. Xiao F., Gao J., Huang X. et al. Effect of poly(methylhydrogen)siloxane modification on adjusting mechanical properties of bamboo flour-reinforced HDPE composites. *Cellulose*. 2021. Vol. 28, pp. 5463–5475. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-021-03849-z>
8. Jiang Z., Xu D., Ma X. et al. Facile synthesis of novel reactive phosphoramidate siloxane and application to flame retardant cellulose fabrics. *Cellulose*. 2019. Vol. 26, pp. 5783–5796. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10570-019-02465-2>
9. Лунева Н.К., Езовитова Т.И., Шевчук В.В., Смичник А.Д. Получение фосфорилированной целлюлозы и оценка ее огнезащитных и прочностных свойств // *Известия Национальной академии наук Беларуси. Химическая серия*. 2018. Т. 54. №2. С. 204–215. DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-2-204-215>
9. Luneva N.K., Ezovitova T.I., Shevchuk V.V., Smichnik A. D. Preparation of phosphorylated cellulose and evaluation of its flame retardant and strength properties. *Izvestiya of the National Academy of Sciences of Belarus. Chemical series*. 2018. Vol. 54. No. 2, pp. 204–215. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2018-54-2-204-215>
10. Мнускина Ю.В., Руденский А.Р. Средства огнезащиты древесины // *Пожарная и техносферная безопасность: проблемы и пути совершенствования*. 2021. № 2 (9). С. 258–263.
10. Mnuskina Yu.V., Rudensky A.R. Means of fire protection of wood. *Pozharnaya i tekhnosfernaya bezopasnost': problemy i puti sovershenstvovaniya*. 2021. No. 2 (9), pp. 258–263. (In Russian).
11. Нигматуллина Д.М., Сивенков А.Б., Полищук Е.Ю. Физико-механические и пожароопасные свойства древесины с глубокой пропиткой огнебиозащитными составами // *Пожаровзрывобезопасность*. 2017. Т. 26. № 6. С. 43–52.
11. Nigmatullina D.M., Sivenkov A.B., Polishchuk E.Yu. Physico-mechanical and fire hazardous properties of wood with deep impregnation with fire-bioprotective compositions. *Pozharovzryvobezopasnost'*. 2017. Vol. 26. No. 6, pp. 43–52 (In Russian).
12. Осовская И.И., Васильева А.П. Новейшие огнезащитные средства для древесины. *Леса России: политика, промышленность, наука, образование: Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции*. СПб., 2021. Т. 2. С. 76–79.
12. Osovskaya I.I. Vasilyeva A.P. The latest fire retardants for wood. *Forests of Russia: politics, industry, science, education: Proceedings of the VI All-Russian Scientific and Technical Conference*. St. Petersburg. 2021. Vol. 2, pp. 76–79 (In Russian).
13. Покровская Е. Н. Increase of fire protection and strength of wooden structures by modification in a thin surface layer by nanodispersion composites. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol. 1425. Modelling and Methods of Structural Analysis. 13–15 November 2019, Moscow, Russian Federation. DOI: 10.1088/1742-6596/1425/1/012091
14. Скрипник И.Л. Использование антипиренов для повышения огнестойкости древесных конструкций. *Сборник конференции «Инновационные технологии, экономика и менеджмент в промышленности»*. 2021. Москва. РУДН. С. 79–81.
14. Skripnik I.L. The use of fire retardants to increase the fire resistance of wood structures. *Collection of the conference Innovative technologies, economics and management in industry*. 2021. Moscow, pp. 79–81. (In Russian).
15. Покровская Е.Н., Портнов Ф.А. Огнебиозащитный состав для древесины с эффективными дымогасящими компонентами // *Вестник МГСУ*. 2015. Т. 10. С. 106–115.
15. Pokrovskaya E.N., Portnov F.A. Fire-retardant composition for wood with effective smoke-extinguishing components. *Vestnik of MUCE*. 2015. Vol. 10, pp. 106–115. (In Russian).
16. Котенева И.В. Боразотные модификаторы поверхности для защиты древесины строительных конструкций: Монография. М.: МГСУ, 2011. 191 с.
16. Koteneva I.V. Borazotnyye modifikatory poverkhnosti dlya zashchity drevesiny stroitel'nykh konstruksiy: monografiya [Borazote surface modifiers for protecting wood of building structures: monograph]. Moscow: MUCE. 2011. 191 p.
17. Корниенко В.С. Математическая статистика. Решение задач по теме «Однофакторный дисперсионный анализ». Волгоград: Волгогр. гос. с.-х. акад., 2010. 20 с.
17. Kornienko V.S. Matematicheskaya statistika. Resheniye zadach po teme «Odnofaktornyy disperсионnyy analiz» [Math statistics. Solving problems on the topic «One-factor analysis of variance»]. Volgograd: Volgograd State Agricultural Academy, 2010. 20 p.
18. Левин Д.М., Стефан Д.К., Тимоти С., Беренсон М.Л. Статистика для менеджеров с использованием Microsoft Excel. М.: Вильямс, 2004. 1312 с.
18. Levin D.M., Stephan D.C., Timothy S., Berenson M.L. Statistika dlya menedzherov s ispol'zovaniyem Microsoft Excel [Statistics for managers using Microsoft Excel]. Moscow: Williams. 2004. 1312 p.

# 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>

**F**ull Industry Chain



**100000+**  
Attendees



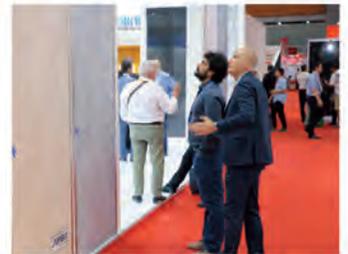
**100+**  
Countries and  
Territories



**900**  
Exhibitors



**8** Halls  
**80000** sqm



# Ceramics China 2024

## 18-21 June 2024

China Import and Export Fair Complex · Guangzhou

**All Industry for**

Building & Sanitary Ceramics | Tableware and Art Ceramics | Highly-Functional Ceramics and Powder | Environmental Protection Equipment

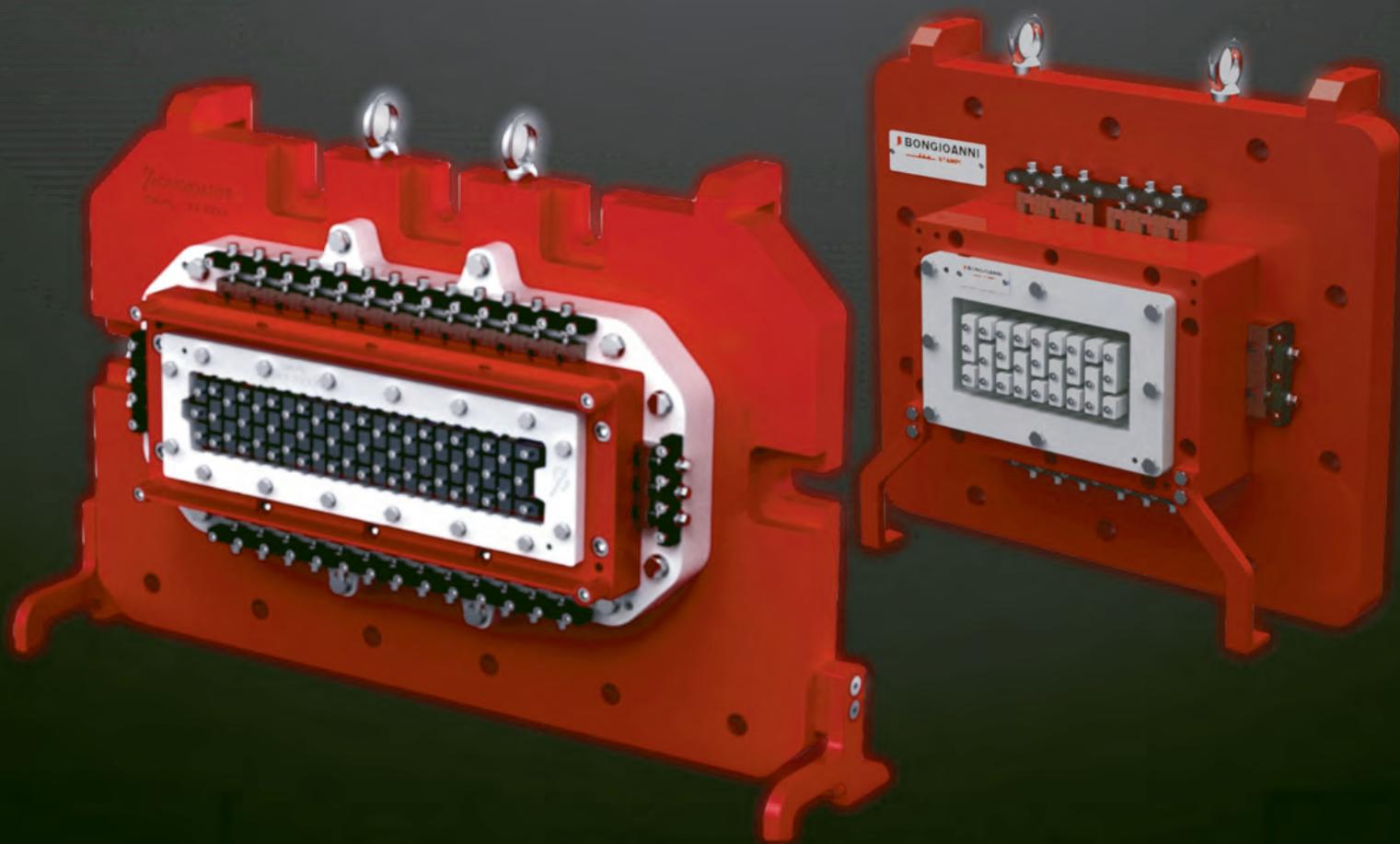
[stacey@ccpitbm.org](mailto:stacey@ccpitbm.org)

[www.ceramicschina.net](http://www.ceramicschina.net)

SOLID  
IDEAS

BONGIOANNI

Stampi e Macchine per la Plastica



[www.bongioannimacchine.com](http://www.bongioannimacchine.com)

[russia@bongioannimacchine.com](mailto:russia@bongioannimacchine.com)

[sales@bongioannistampi.com](mailto:sales@bongioannistampi.com)