

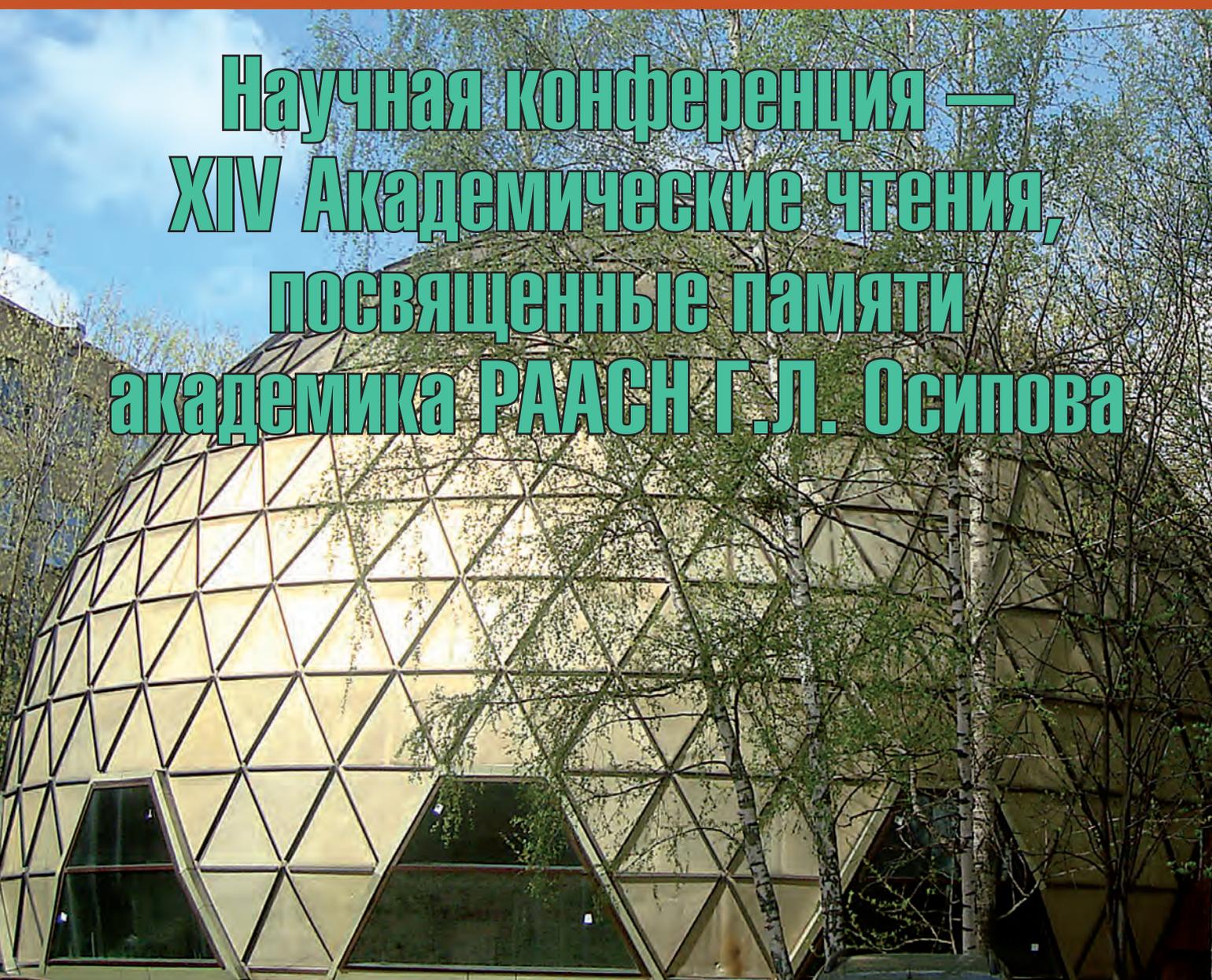
# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ<sup>®</sup>

№ 6



НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ ИЗДАЕТСЯ С 1955 г.

WWW.RIFSM.RU WWW.JOURNAL-CM.RU ИЮНЬ 2023 г. (814)



Научная конференция —  
XIV Академические чтения,  
посвященные памяти  
академика РААСН Г.Л. Осипова

*«Актуальные вопросы строительной физики.  
Энергосбережение.  
Надежность строительных конструкций  
и экологическая безопасность»*

23-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
ПРОИЗВОДИТЕЛЕЙ СУХИХ  
СТРОИТЕЛЬНЫХ СМЕСЕЙ

**23-25 августа  
2023**

**ВАЛТИМIX**

**МУРМАНСК**  **2023**



**Сияем  
МОЩНО**



**СМИТ**



**baltimix.ru**

Учредитель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»,  
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,  
д. 9, корп. 1, кв. 1  
Издатель: ООО РИФ «СТРОЙМАТЕРИАЛЫ»  
Адрес: 125319, г. Москва, ул. Черняховского,  
д. 9, корп. 1, кв. 1  
Свид. о регистрации ПИ № 77-1989  
ISSN 0585-430X (Print) ISSN 2658-6991 (Online)  
Входит в Перечень ВАК, РИНЦ,  
Russian Science Citation Index  
на платформе Web of Science  
Адрес редакции: Россия, 127434, г. Москва,  
Дмитровское ш., д. 9, стр. 3

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ®

№ 6

Основан в 1955 г.

(814) Июнь 2023 г.

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

**Научная конференция – XIV Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г.Л., «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность»**

Л.К. БОГОМОЛОВА, М.Ю. СМОЛЯКОВ, В.А. СМИРНОВ

**Исследование механических характеристик вибродемпфирующих материалов марок Sylomer и Gener..... 4**

П.П. ПАСТУШКОВ, Д.А. ИЛЬИН, В.Н. ШАЛИМОВ, И.С. КУРИЛЮК

**Эксплуатационная влажность теплоизоляционных плит из пенополиизоцианурата (PIR) в составе современных кровельных систем. .... 12**

И.В. БЕССОНОВ, М.Г. БРУЯКО, Э.А. ГОРБУНОВА, И.С. ГОВРЯКОВ

**Исследование модифицирующих добавок вспененного жидкого стекла. .... 16**

В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ, Д.З. КАДИЕВ

**Влияние напряженного состояния на стойкость конструкционных тяжелых и легких бетонов в условиях воздействия низкой отрицательной температуры. .... 21**

И.В. БЕССОНОВ, А.Д. ЖУКОВ, Р.С. ПОУДЕЛ, А.А. МАТОРИН

**Влияние структуры и состава на свойства бетонного полотна ..... 27**

В.И. РИМШИН, А.В. КАЛАЙДО, М.Н. СЕМЕНОВА, В.А. БОРЦ

**Строительные технологии обеспечения радонобезопасности зданий. .... 33**

Н.А. БУЗАЛО, С.И. ЕВТУШЕНКО, Б.А. ЧЕРНЫХОВСКИЙ, О.В. НЕВЕЛЬСКИЙ

**Экспериментальное исследование фланцевых соединений элементов стального каркаса, получивших повреждения ..... 39**

С.А. СОЛОВЬЕВ, А.А. СОЛОВЬЕВА, Н.П. УМНЯКОВА, А.А. КОЧКИН

**Вероятностная оценка надежности элементов строительных конструкций при эпистемологической неопределенности данных. .... 45**

## **Нерудные строительные материалы**

С.В. ВАВРЕНЮК, В.Г. ВАВРЕНЮК, Р.С. ФЕДЮК, А.А. КИМ, А.А. БОГОМАЗОВА

**Анализ и обобщение свойств горных скальных пород месторождений Камчатского края ..... 51**

## **Материалы и технологии**

В.Е. РУМЯНЦЕВА, Д.А. ПАНЧЕНКО, Ю.Ф. ПАНЧЕНКО, В.С. КОНОВАЛОВА, Э.Н. ХАФИЗОВА

**Разработка состава сухой штукатурной смеси на основе высокодисперсной извести ..... 57**

М.Р. БЕКМАНСУРОВ, Г.И. ЯКОВЛЕВ, А.Ф. ГОРДИНА, Н.В. КУЗЬМИНА,

З.С. САИДОВА, А.М. АЛЕКСАНДРОВ, А.Н. ЖУКОВ

**Быстротвердеющий состав на основе фторангидрита для послойной экструзии (3D-печати). .... 65**

Б.А. БОНДАРЕВ, А.Б. БОНДАРЕВ, П.В. БОРКОВ, С.К. ШУЛЕПОВ, В.К. ЖИДКОВ, Д.А. КОПАЛИН

**Анализ дефектов и повреждений материалов в конструкциях дорожных одежд автомобильных дорог промышленных предприятий и способы их устранения ..... 70**

Н.П. ЛУКУТЦОВА, А.А. ПЫКИН, Е.Ю. ГОРНОСТАЕВА, С.Н. ГОЛОВИН, И.В. МОСЬКИНА

**Фотолуминесцентный материал для защитно-декоративных покрытий строительных конструкций и элементов эвакуационных систем ..... 75**

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 on the platform Web of Science  
Editorial address: 9/3 Dmitrovskoye Highway,  
127434, Moscow, Russian Federation

Monthly scientific-technical and industrial journal

# STROITEL'NYE MATERIALY®

№ 6

Founded in 1955 (814) June 2023

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

**Scientific Conference – XIV Academic readings dedicated to the memory  
of Academician of RAACS Osipov G.L. "Actual problems of building physics.  
Energy saving. Reliability of building structures and environmental safety"**

L.K. BOGOMOLOVA, M.Yu. SMOLYAKOV, V.A. SMIRNOV <b>Study of the Mechanical Characteristics of Vibration-Damping Materials of the Sylomer and Gener Brands</b> .....	4
P.P. PASTUSHKOV, D.A. IL'IN, V.N. SHALIMOV, I.S. KURILYUK <b>Operational Humidity of the Thermal Insulation Boards with a Rigid Polyisocyanurate (PIR) Foam Core Used in Modern Roofing Solutions</b> .....	12
I.V. BESSONOV, M.G. BRUYAKO, E.A. GORBUNOVA, I.S. GOVRYAKOV <b>Research of Modifying Additives of Foamed Liquid Glass</b> .....	16
V.N. YARMAKOVSKY, D.Z. KADIEV <b>The Influence of the Stress State on the Durability of Structural Heavy and Lightweight Aggregate Concrete Under the Action of Low Negative Temperatures</b> .....	21
I.V. BESSONOV, A.D. ZHUKOV, R.S. POUDEL, A.A. MATORIN <b>Influence of Structure and Composition on the Properties of the Concrete Canvas</b> .....	27
V.I. RIMSHIN, A.V. KALAIKO, M.N. SEMENOVA, V.A. BORSCH <b>Construction Technologies for Ensuring Radon Safety of Buildings</b> .....	33
N.A. BUZALO, S.I. EVTUSHENKO, B.A. CHERNIKHOVSKY, O.V. NEVELSKY <b>Experimental Study of Flanged Joints of Damaged Steel Frame Elements</b> .....	39
S.A. SOLOVEV, A.A. SOLOVEVA, N.P. UMNIAKOVA, A.A. KOCHKIN <b>Structural Reliability Analysis with Epistemic Uncertainty of Data</b> .....	45

### **Non-metallic building materials**

S.V. VAVRENYUK, V.G. VAVRENYUK, R.S. FEDYUK, A.A. KIM, A.A. BOGOMAZOVA <b>Analysis and Generalization of the Properties of Mountain Rock Formations of the Deposits of the Kamchatka Territory</b> .....	51
---	----

### **Materials and technologies**

V.E. RUMYANCEVA, D.A. PANCHENKO, Yu.F. PANCHENKO, V.S. KONOVALOVA, E.N. KHAFIZOVA <b>Composition Development of a Dry Plaster Based on High-Dispersion Lime</b> .....	57
M.R. BEKMANSUROV, G.I. YAKOVLEV, A.F. GORDINA, N.V. KUZMINA, Z.S. SAIDOVA, A.M. ALEXANDROV, A.N. ZHUKOV <b>Fast Curing Fluoroanhydrite Composition for Layer-by-Layer Extrusion (3D printing)</b> .....	65
B.A. BONDAREV, A.B. BONDAREV, P.V. BORKOV, S.K. SHULEPOV, V.K. GIDKOV, D.A. KOPALIN <b>Analysis of Defects and Damages of Materials in the Pavement Structures of Highways of Industrial Enterprises and Methods for their Elimination</b> .....	70
N.P. LUKUTTSOVA, A.A. PYKIN, E.Yu. GORNOSTAIEVA, S.N. GOLOVIN, I.V. MOSKINA <b>Photoluminescent Material for Protective and Decorative Coatings of Building Constructions and Elements of Evacuation Systems</b> .....	75

**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)

Л.К. БОГОМОЛОВА<sup>1</sup>, канд. хим. наук (lb102@rambler.ru),  
М.Ю. СМОЛЯКОВ<sup>1</sup>, инженер; В.А. СМIRНОВ<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Исследование механических характеристик вибродемпфирующих материалов марок Sylomer и Gener

Рассмотрено поведение вибродемпфирующих материалов, используемых для снижения вибрации в конструкциях посредством поглощения энергии колебаний (демпфирования). Проведено сравнение свойств двух материалов, обладающих ячеистой структурой: Sylomer SR 110 (Австрия) и схожими, как заявляет производитель, по характеристикам Gener VX 110 (Россия). В рамках исследования выполнен комплекс испытаний по определению механических свойств указанных материалов, а также их изменению в процессе старения. Материал Gener VX 110 обладает более высокой ползучестью, чем Sylomer SR 110, а также более низкой стойкостью к старению, что приводит к значительному увеличению жесткости и снижению эффективности виброизоляции. Разброс измеренных характеристик для материала Gener VX 110 выше, чем для материала Sylomer SR 110, это требует введения дополнительных коэффициентов запаса.

**Ключевые слова:** вибродемпфирующие материалы, виброизоляция, жизненный цикл здания, эластомерные материалы.

**Для цитирования:** Богомолова Л.К., Смоляков М.Ю., Смирнов В.А. Исследование механических характеристик вибродемпфирующих материалов марок Sylomer и Gener // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 4–11.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-4-11>

L.K. BOGOMOLOVA<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Chemistry) (lb102@rambler.ru),

M.Yu. SMOLYAKOV<sup>1</sup>, engineer; V.A. SMIRNOV<sup>1,2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering)

<sup>1</sup> Scientific-Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivnyi Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

<sup>2</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Study of the Mechanical Characteristics of Vibration-Damping Materials of the Sylomer and Gener Brands

The behavior of vibration damping materials used to reduce vibration in structures by absorbing vibration energy (damping) is considered. A comparison was made of the properties of two materials with a cellular structure: Sylomer SR 110 (Austria) and similar, according to the manufacturer, according to the characteristics of Gener VX 110 (Russia). As part of the study, a set of tests was performed to determine the mechanical properties of these materials, as well as their change during aging. It was found that the material Gener VX 110 has a higher creep than Sylomer SR 110, as well as lower aging resistance, which leads to a significant increase in rigidity and a decrease in the effectiveness of vibration isolation. The spread of measured characteristics for Gener VX 110 is higher than for Sylomer SR 110, which requires the introduction of additional safety factors.

**Keywords:** vibration damping materials, vibration isolation, building life cycle, elastomeric materials.

**For citation:** Bogomolova L.K., Smolyakov M.Yu., Smirnov V.A. Study of the mechanical characteristics of vibration-damping materials of the Sylomer and Gener brands. *Stroitel'nyye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 4–11. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-4-11>

Вибродемпфирующие материалы, в качестве которых применяются маты из эластичных пластмасс, широко используют в строительстве и промышленности [1–3], в частности для снижения вибрации в конструкциях посредством поглощения энергии колебаний (демпфирования) или изоляции элементов конструкции, связанных с преобразованием, передачей и поглощением энергии. Для оптимального функционирования таких систем важно, чтобы их элементы обладали заданными (расчетными) динамическими свойствами в течение жизненного цикла защищаемого сооружения.

Системы виброизоляции, построенные на применении вибродемпфирующих материалов, выполненных из эластомерных материалов на основе вспененного полиуретана [4–6], нашли свое широкое применение в строительной практике в последние 15 лет на территории РФ [7, 8] и применяются уже более 40 лет на территории Западной Европы и

Северной Америки. В настоящее время отечественные производители ищут замену вспененным полиуретанам в качестве ультимативного вибродемпфирующего материала, в частности возникают решения на основе вспененных полиэтиленов и этилвинилацетатов.

Для проектирования систем виброизоляции важно понимать поведение (изменение основных характеристик) вибродемпфирующих материалов при действии не только статической, но и динамической нагрузки различной частоты и амплитуды в течение всего срока службы сооружения. Указанный тезис находит свое отражение в положениях раздела 5 ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения». В процессе эксплуатации происходит старение вибродемпфирующих материалов, деформация при воздействии агрессивных сред, появляются остаточные деформации и другие эффек-

ты, которые необходимо учитывать в расчетах для обеспечения требуемой эффективности системы виброизоляции здания и сооружения с момента ввода в эксплуатацию и на протяжении всего жизненного цикла [9–11].

Необходимые для расчетов характеристики материалов определяют по результатам испытаний, в том числе по ГОСТ Р 59940–2021 «Системы виброизоляции зданий и сооружений. Методы испытаний вибродемпфирующих материалов». Задачу определения статических и динамических свойств вибродемпфирующих материалов усложняет их нелинейное поведение и большая зависимость механических характеристик от условий эксплуатации. Учет изменения основных механических характеристик вибродемпфирующих материалов необходим для проектирования систем виброизоляции, эффективных в широком диапазоне нагрузок на нее, повышения качества и сроков службы систем виброизоляции, обеспечения постоянства заданных характеристик на протяжении всего срока эксплуатации объекта.

В рамках программы фундаментальных научных исследований НИИСФ РААСН выполнены лабораторные испытания механических характеристик вибродемпфирующих материалов ячеистой структуры, обладающих, по заявлениям производителей, примерно одинаковыми жесткостными параметрами, но изготовленных на основе разного сырья: Sylomer SR 110 (вспененный пенополиуретан) производства компании Getzner Werkstoffe GmbH и Gener VX 110 (вспененный этилвинилацетат) производства компании ООО «ЭкоПолимеры» (Gavary Group).

Вибродемпфирующий материал Gener VX 110 представляет собой композитный полимер полиолефиновой группы, изготавливаемый в соответствии с ТУ 22.21.30.110-010-81672649–2020. Производится в листах размером 2×1 м толщиной 12,5 или 25 мм. Пористый материал с закрытой структурой ячеек.

Вибродемпфирующие материалы Sylomer SR 110 изготавливают на основе вспененного полиуретана в соответствии с технической документацией производителя National technical approval № Z-16.8.467. Поставляется в рулонах размером 1,2×5 м или листах 1,2×1 м толщиной, кратной 12,5 мм. Имеет од-

нородную ячеистую структуру с комбинированными порами.

### Постановка эксперимента

В связи с особенностью работы вязкоупругих материалов в системах виброизоляции зданий и сооружений сравнительные испытания выполняли при одноосном сжатии в соответствии с методикой ГОСТ Р 59940–2021 при одинаковых параметрах.

Для испытаний подготовлена серия образцов размером 100×100×25 мм каждого материала. Перед проведением испытаний образцы кондиционировали в течение 40 ч в нормальных условиях. Сущность методов испытаний вязкоупругих материалов при сжатии заключается в определении входных и выходных параметров нагружения, при этом регистрация значений измеряемых параметров производится в течение всего процесса испытаний. Образец для испытания подвергают сжатию между плоскими металлическими пластинами с постоянной скоростью до тех пор, пока деформация не достигнет заданного значения.

Для определения параметров упругости материала (восстановления материала после снятия нагрузки) проведены испытания по определению относительной остаточной деформации при сжатии по ГОСТ 18268–2017 «Пластмассы ячеистые эластичные. Метод определения относительной остаточной деформации при сжатии», способ В.

Обеспечение требуемой эффективности системы виброизоляции на временном промежутке характеризуется постоянством физико-механических характеристик вязкоупругих материалов. Изменение механических характеристик вязкоупругих материалов происходит при воздействии различных факторов, таких как: старение, усталость, влияние различных агрессивных сред, жидкостей и масел, климатических факторов. Устойчивость эластомерных материалов к воздействию окружающей среды во многом определяется их химической структурой.

Определение деградации статических и динамических характеристик в процессе естественного старения для сроков службы сооружений, установленных по ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные по-

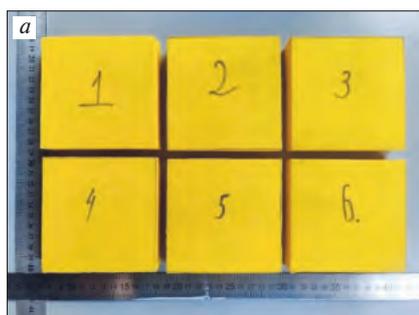


Рис. 1. Образцы для испытаний: а – Gener VX 110; б – Sylomer SR 110  
Fig. 1. Samples for testing: a – Gener VX 110; b – Sylomer SR 110



Рис. 2. Нагруженные образцы  
Fig. 2. Loaded samples



**Рис. 3.** Фотофиксация образцов после ускоренного климатического старения на 25 УГЭ: *a* – Gener VX 110; *b* – Sylomer SR 110  
**Fig. 3.** Photo fixation of samples after accelerated climatic aging at 25 conditional year of operation: *a* – Gener VX 110; *b* – Sylomer SR 110

Таблица 1  
Table 1

Остаточная деформация при сжатии на 50%  
Residual deformation at compression by 50%

Материал	Среднее значение, %	Среднеквадратическое отклонение (СКО), %
Sylomer SR 110	0,62	0,35
Gener VX 110	10,44	1,05

Таблица 2  
Table 2

Остаточная деформация после старения на 25 УГЭ  
Residual deformation after aging for the 25th conditional year of operation

Материал	При 0,05 МПа	При 0,11 МПа
Sylomer SR110	0,53 мм (2,1%)	1,88 мм (7,49%)
Gener VX110	5,03 мм (19,87%)	11,9 мм (46,89%)

ложения», от 50 до 100 лет, представляет собой долгий и дорогой процесс, результаты которого невозможно оценить в обозримой перспективе. В связи с этим для определения изменений механических характеристик во времени используют ускоренную методику, основанную на зависимости скорости химической реакции от температуры. Данная методика нашла широкое применение в практике исследования деградационных зависимостей для эластичных материалов [12–16] и включена в положения ГОСТ Р 59940–2021. Согласно уравнению Аррениуса скорость старения возрастает примерно в 2,5 раза при увеличении температуры на каждые 10°C. Испытания на ускоренное старение при высокой температуре предназначены для оценки устойчивости вибродемпфирующих материалов к старению в течение определенного времени с последующим определением соответствующих показателей и сравнением их с показателями до старения.

В процессе исследования определены статические и динамические характеристики материалов до начала старения (исходные), а также после 25 условных лет эксплуатации.

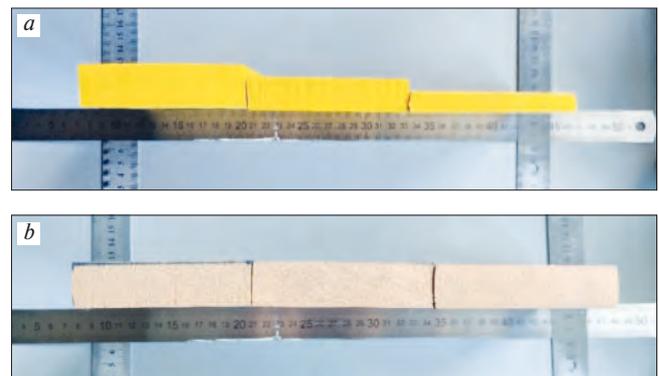
Старение исследуемых материалов проведено при действии постоянных статических нагрузок 0,05 (образцы № 1–3) и 0,11 Н/мм<sup>2</sup> (образцы № 4–6), соответствующих показателю предельной статической нагрузки, заявляемому производителями. Нагружение образцов выполняли при помощи специальной оснастки из металлических пластин и пружины, при этом контроль удельной нагрузки осуществляли по величине деформаций

пружины, обладающей линейной упругой характеристикой. Общий вид нагруженных образцов показан на рис. 2.

### Результаты исследования

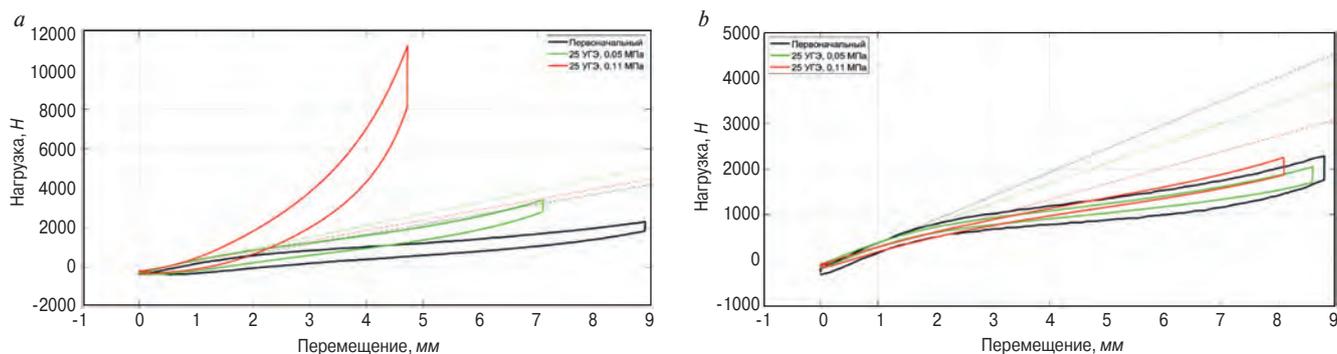
По результатам испытаний на остаточную деформацию при сжатии на 50% после выдержки в течение 72 ч и релаксации в течение 30 мин получены результаты, представленные в табл. 1.

Как показывают результаты испытаний исходных образцов, величина остаточной деформации сжатия для Gener VX 110 в 16,8 раза превышает аналогичное значение для материала Sylomer SR 110.



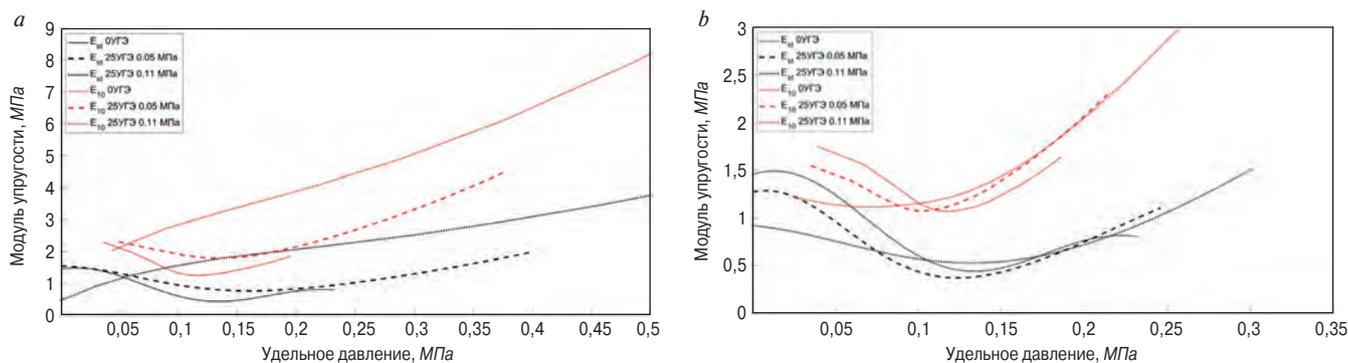
**Рис. 4.** Изменение толщины образцов после ускоренного климатического старения на 25 УГЭ; *a* – Gener VX 110; *b* – Sylomer SR 110; слева направо: образец до испытаний, образец по результатам ускоренного старения на 25 УГЭ (условных годов эксплуатации) при нагрузке 0,05 МПа и при нагрузке 0,11 МПа

**Fig. 4.** Change in the thickness of samples after accelerated climatic aging by 25 UGE; *a* – Gener VX 110; *b* – Sylomer SR 110; From left to right: sample before testing, sample after accelerated aging for the 25th conditional year of operation at a load of 0.05 MPa and at a load of 0.11 MPa



**Рис. 5.** Изменение поведения материалов при статическом нагружении после ускоренного климатического старения на 25 УГЭ: а – Gener VX 110; б – Sylomer SR 110

**Fig. 5.** Changes in the behavior of materials under static loading after accelerated climatic aging for the 25th conditional year of operation: а – Gener VX 110; б – Sylomer SR 110



**Рис. 6.** Изменение жесткости материалов после ускоренного климатического старения на 25 УГЭ: а – Gener VX 110; б – Sylomer SR 110

**Fig. 6.** Change in the stiffness of materials after accelerated climatic for the 25th conditional year of operation: а – Gener VX 110; б – Sylomer SR 110

При этом СКО измеренного показателя для материала Gener VX 110 также превышает аналогичное значение у Sylomer SR 110, что свидетельствует о трехкратном увеличении разброса измеренных характеристик.

На рис. 3, 4 приведена фотофиксация образцов после ускоренного старения на 25 УГЭ при действии постоянной удельной нагрузки. На рис. 4 слева направо показано изменение толщины материала: исходного и по результатам ускоренного старения на 25 УГЭ (условный год эксплуатации) при нагрузке 0,05 и 0,11 МПа. Полученная остаточная деформация материалов приведена в табл. 2.

Как показывают результаты испытаний составленных образцов, остаточная деформация для материала Sylomer SR 110 также существенно меньше аналогичных значений для материала Gener VX 110: величина остаточной деформации в 9,49 раза меньше при нагрузке 0,05 Н/мм<sup>2</sup> (МПа) и в 6,33 раза меньше при нагрузке 0,11 Н/мм<sup>2</sup> (МПа).

По результатам испытаний материала Gener VX 110, как для исходных, так и для состаренных образцов, величина остаточной деформации сжатия превышает 10%, что в соответствии с п. 8.2.7 СП 441.1325800.2019 не допускает его применения в системах виброизоляции зданий и сооружений.

На рис. 5 представлено изменение зависимости нагрузка–деформация исследуемых материалов для четвертого цикла статического нагружения до 35%

относительной деформации в процессе старения материала.

Пунктирной линией на рис. 5 показан линейный участок кривых, отражающий область линейно-упругой работы материалов. Изменение угла наклона пунктирной линии к оси абсцисс  $\alpha$  показывает изменение жесткости материалов в данном диапазоне нагрузок. Ниже приведено изменение угла наклона при старении материалов при разной нагрузке относительно первоначального состояния:

$$k_1^{VX110} = \frac{\alpha_{0,05}^{VX110}}{\alpha_0^{VX110}} = 1,171; \quad k_2^{VX110} = \frac{\alpha_{0,11}^{VX110}}{\alpha_0^{VX110}} = 1,034;$$

$$k_1^{SR110} = \frac{\alpha_{0,05}^{SR110}}{\alpha_0^{SR110}} = 0,842; \quad k_2^{SR110} = \frac{\alpha_{0,11}^{SR110}}{\alpha_0^{SR110}} = 0,672.$$

Указанные зависимости свидетельствуют о том, что жесткость материала Sylomer SR 110 в процессе старения имеет тенденцию к снижению ( $k=0,672-0,842 < 1$ ), а для материала Gener VX 110 – к увеличению ( $k=1,034-1,171 > 1$ ).

Как показывают результаты испытаний, для Sylomer SR 110 характерна высокая повторяемость кривых нагружения как между исходным и состаренными, так и между состаренными под различной нагрузкой образцами. Иная ситуация для материалов Gener VX 110 – максимальная величина сжатия

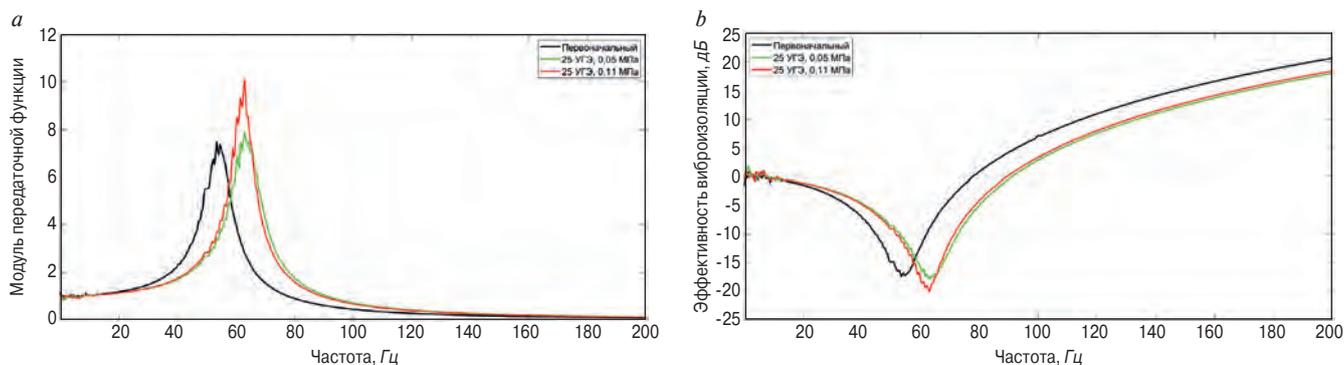


Рис. 7. Результаты испытаний Gener VX 110 резонансным методом при величине нагрузки на образец 10 кг: *a* – модуль передаточной функции; *b* – кривая эффективности виброизоляции

Fig. 7. Results of testing the Gener VX 110 by the resonance method with a sample load of 10 kg: *a* – transfer function modulus; *b* – vibration isolation efficiency curve

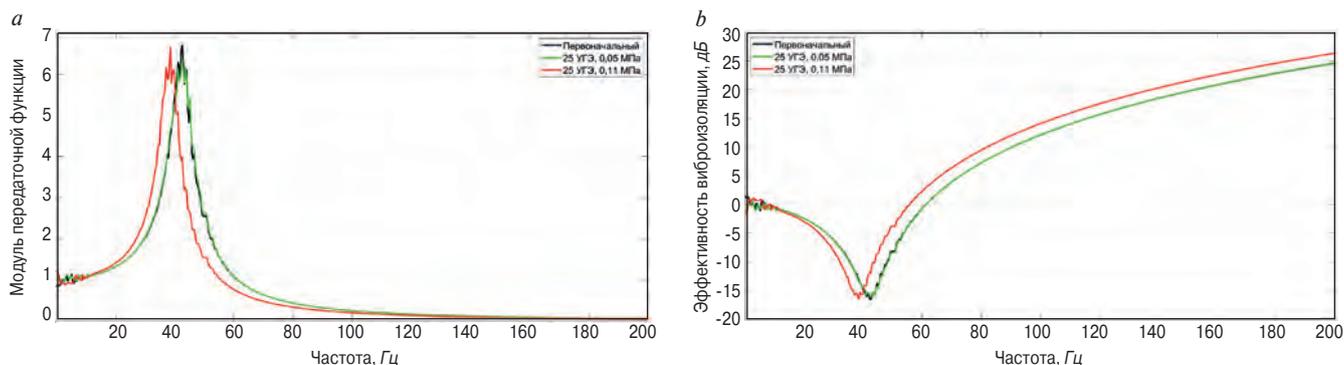


Рис. 8. Результаты испытаний Sylomer SR 110 резонансным методом при величине нагрузки на образец 10 кг: *a* – модуль передаточной функции; *b* – кривая эффективности виброизоляции

Fig. 8. Results of testing the Sylomer SR 110 by the resonance method with a sample load of 10 kg: *a* – transfer function modulus; *b* – vibration isolation efficiency curve

для образца до испытаний составила 8,9 мм при действующей нагрузке 2,3 кН; для состаренного под нагрузкой 0,05 МПа – 7,1 мм при нагрузке 3,4 кН; под нагрузкой 0,11 МПа – 4,7 мм при нагрузке 11,2 кН. Наблюдаемое резкое повышение величины сжимающей нагрузки при снижении величины сжатия свидетельствует о чрезвычайно высоком – более чем в 12,4 раза повышении жесткости материала в течение его срока службы.

На рис. 6 представлено изменение статического и динамического модуля упругости материалов при частоте воздействия 10 Гц в процессе старения. Сплошной линией показаны механические характеристики материалов в исходном состоянии, штриховой – после ускоренного старения на 25 УГЭ при постоянной удельной нагрузке 0,05 МПа, пунктирной – после ускоренного старения на 25 УГЭ при постоянной удельной нагрузке 0,11 МПа. Черным цветом приведен статический модуль упругости, красным – динамический на частоте 10 Гц.

По результатам испытаний можно отметить постоянство поведения материала Sylomer SR 110 в области удельного давления 0,1–0,25 МПа как в исходном, так и в состаренном состоянии. Увеличение модуля упругости материала в данном диапазоне не превышает 7–12%. При малых величинах давления при старении – 0,05 МПа характер поведения кри-

вых как для статического, так и для динамического модулей упругости практически не изменился при небольшом снижении жесткости материала во времени. Для давления 0,11 МПа – в диапазоне удельного давления до 0,1 МПа кривые модулей изменили свой характер, что, вероятно, связано с изменением пористой структуры материала (разрушением пор и перестройкой связей) при снижении жесткости материала.

Для материала Gener VX 110 также можно отметить качественное сходство кривых статического и динамического модулей упругости в исходном и состаренном состоянии при нагрузке 0,05 МПа. При этом динамический модуль упругости при нагрузке 0,11 МПа выше аналогичного при нагрузке 0,05 МПа на 56–75% (до 52% для статического модуля упругости).

Для оценки изменения эффективности виброизоляции системой с применением указанных материалов проведены испытания модельной одно-массовой системы при колебании основания. Такой метод широко используют для экспресс-оценки динамических характеристик конструктивных и вибродемпфирующих материалов [17–21]. Испытания выполнены резонансным методом на специальном стенде, разработанном с учетом положений ГОСТ 16297–80 «Материалы звукоизоля-

ционные и звукопоглощающие. Методы испытаний». Испытания проводили под воздействием широкополосного (белого) шума при нагрузке на образец 10 кг (~0,01 МПа).

По результатам динамических испытаний резонансным методом измеренные акселерограммы колебаний основания (подвижной части электродинамического вибровозбудителя)  $a_1(t)$  и груза  $a_2(t)$  обрабатывали для получения спектральных характеристик  $a_1(f)$  и  $a_2(f)$ . Передаточную функцию  $Tr(f)$  определяли как отношение спектральных характеристик виброускорений, полученных на основании, к спектральным характеристикам виброускорений, зарегистрированных на грузе:

$$Tr(f) = \left| \frac{a_2(f)}{a_1(f)} \right|, \quad (1)$$

где  $f$  – частота воздействия, Гц.

Эффективность виброизоляции [22] испытуемого образца  $\Delta L$ , дБ, определяли по формуле:

$$\Delta L(f) = 20 \cdot \log(Tr(f)). \quad (2)$$

Полученные результаты – графики модуля передаточной функции по формуле (1) и эффективности виброизоляции по формуле (2) приведены на рис. 7 и 8 для образцов материалов Gener VX 110 и Sylomer SR 110 соответственно.

Для материала Sylomer SR 110, как видно из графиков рис. 8, наблюдается снижение собственной частоты колебаний системы при старении (на 0% при нагрузке 0,05 МПа и до 10% при нагрузке 0,11 МПа), что, как уже было отмечено ранее, связано со снижением жесткости материала. Кроме того, коэффициент потерь состаренного образца (при нагрузке 0,05 МПа) по отношению к исходному увеличился на 5,4%. С учетом того, что с течением времени толщина материала также уменьшается на 2,1–7,5%, результирующая эффективность системы виброизоляции сохраняется.

Для Gener VX 110 на графиках рис. 7 наблюдается обратное явление – возрастание собственной частоты колебаний на 17,8%, связанное с повышением жесткости материала. Кроме того, коэффициент потерь состаренного образца (при нагрузке 0,05 МПа) по отношению к исходному снизился на 76%, что говорит о снижении эффективности рассеивания энергии колебаний. В итоге эффективность системы виброизоляции из материалов Gener VX 110 будет существенно снижаться в процессе эксплуатации.

### Выводы

Выбранные для исследования вибродемпфирующие материалы Sylomer SR 110 и Gener VX 110

не являются аналогами и обладают фундаментально различными физико-механическими характеристиками. При сравнительном анализе характеристик материалов нельзя использовать одни лишь параметры статического и (или) динамического модулей упругости, которые, как показывают результаты проведенного исследования, не в полной мере отражают изменение физико-механических свойств материалов, – напротив, комплексная оценка должна проводиться только на основании сопоставления различных показателей, выявленных в процессе испытаний.

По результатам выполненных испытаний Gener VX 110 обладает намного более высокой ползучестью, чем Sylomer SR 110, а также существенно более низкой стойкостью к старению, что приводит к значительному увеличению жесткости и снижению эффективности виброизоляции. Разброс измеренных характеристик для материала Gener VX 110 выше, чем для материала Sylomer SR 110, что требует введения дополнительных коэффициентов запаса.

Остаточная относительная деформация после ускоренного старения на 25 УГЭ при постоянном воздействии удельной нагрузки 0,11 МПа, соответствующей заявленному показателю – предельной статической нагрузки, составила более 46%, в то время как для Sylomer SR 110 – 7,49%.

Собственная частота системы виброизоляции с применением материалов Sylomer SR 110 сохраняется в диапазоне нагрузок до 0,05 МПа и даже имеет тенденцию к снижению (до 10%) в диапазоне нагрузок до 0,11 МПа, что говорит о сохранении эффективности виброизоляции в течение времени. Напротив, для материалов Gener VX 110 наблюдается обратное явление – возрастание собственной частоты колебаний на 17,8%, связанное с повышением жесткости материала. Таким образом, эффективность системы виброизоляции из материалов Gener VX 110 будет существенно снижаться в процессе эксплуатации.

С учетом выполненного комплекса исследований материалы Gener VX 110 не допускается применять в качестве вибродемпфирующего материала в незаменимых системах виброизоляции зданий и сооружений.

Для Sylomer SR 110 в процессе старения при воздействии постоянной удельной нагрузки отмечается снижение жесткости в диапазоне до предельной статической нагрузки и незначительное увеличение при возрастании давления на материал, что необходимо учитывать при проектировании систем виброизоляции зданий и сооружений.

### Список литературы

1. Узакова Л.П., Файзиев С.Х. Применение вибродемпфирующих материалов для уменьшения

### References

1. Uzakova L.P., Fayziev S.Kh. The use of vibration damping materials to reduce vibration and noise in the

- вибрации и шума в швейной промышленности // *Молодой ученый*. 2015. № 9 (89). С. 325–327.
2. Будовский А.В., Булыгин Ю.И., Павликов А.В., Трюхан А.В. Снижение виброакустической активности плавучих средств при использовании вибродемпфирующих материалов // *Безопасность техногенных и природных систем*. 2023. № 1. С. 28–38. DOI: 10.23947/2541-9129-2023-1-28-38.
  3. Шербаков В.И., Круглов К.М., Аксенов Д.В., Шкурко Л.С. Экспериментальная оценка вибродемпфирующих характеристик пластин из разных материалов // *Вестник машиностроения*. 2012. № 8. С. 31–34.
  4. Wong D.T.H., Williams H.L. Dynamic mechanical and vibration damping properties of polyurethane compositions // *Journal of Applied Polymer Science*. 1983. Vol. 28. Iss. 7, pp. 2187–2207. <https://doi.org/10.1002/app.1983.070280706>
  5. Ferry J.D. Viscoelastic properties of polymers. 3rd Ed. New York: John Wiley&Sons. 1980.
  6. Corsaro R.D., Sperling L.H. Sound and vibration damping with polymers. American Chemical Society. 1990. Vol. 424. DOI: 10.1021/bk-1990-0424
  7. Смирнов В.А. Защита несущих конструкций зданий от влияния вибрации, создаваемой железнодорожным транспортом // *Жилищное строительство*. 2020. № 12. С. 40–46. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-12-40-46>
  8. Смирнов В.А., Савулиди М.Ю., Смоляков М.Ю. Оценка воздействия вибрации на здания и сооружения в зоне влияния железной дороги // *Жилищное строительство*. 2022. № 11. С. 36–40. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-11-36-40>
  9. Цукерников И.Е., Тихомиров Л.А., Соломатин Е.О. Решение задач строительной акустики как фактора, обеспечивающего безопасность и комфортность проживания в зданиях // *Жилищное строительство*. 2014. № 6. С. 49–52.
  10. Гагарин В.Г., Шубин И.Л. Развитие теоретических и экспериментальных основ строительной физики как главного фактора обеспечения комфортности проживания, творчества и здоровой жизнедеятельности человека в рамках нового поколения. *Фундаментальные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2011 г. Научные труды РААСН*. Т. 2. М.: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2012. С. 234–238.
  11. Ханифов Ф.М., Загидуллина Г.М. Основные направления внедрения системы управления жизненным циклом объектов капитального строительства. *Инновации и качество профессионального образования: Материалы XV Международной научно-практической конференции*. Казань, 2021 С. 3–8.
  12. Борисов Л.А., Градов В.А., Третьяков В.И. и др. Исследование физико-механических и акустических характеристик тепло- и звукоизоляционных clothing industry. *Molodoy ucheniy*. 2015. No. 9 (89), pp. 325–327. (In Russian).
  2. Budovsky A.V., Bulygin Yu.I., Pavlikov A.V., Tryukhan A.V. Reducing the vibroacoustic activity of floating facilities when using vibration damping materials. *Bezopasnost' tekhnogennykh i prirodnykh sistem*. 2023. No. 1, pp. 28–38. (In Russian). DOI: 10.23947/2541-9129-2023-1-28-38
  3. Shcherbakov V.I., Kruglov K.M., Aksenov D.V., Shkurko L.S. Experimental assessment of vibration damping characteristics of plates made of different materials. *Vestnik mashinostroeniya*. 2012. No. 8, pp. 31–34. (In Russian).
  4. Wong D.T.H., Williams H.L. Dynamic mechanical and vibration damping properties of polyurethane compositions. *Journal of Applied Polymer Science*. 1983. Vol. 28. Iss. 7, pp. 2187–2207. <https://doi.org/10.1002/app.1983.070280706>
  5. Ferry J.D. Viscoelastic properties of polymers. 3rd Ed. New York: John Wiley&Sons. 1980.
  6. Corsaro R.D., Sperling L.H. Sound and vibration damping with polymers. American Chemical Society. 1990. Vol. 424. DOI: 10.1021/bk-1990-0424
  7. Smirnov V.A. Protection of bearing structures of buildings against the influence of vibration generated by railway transport. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2020. No. 12, pp. 40–46. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-12-40-46>
  8. Smirnov V.A., Savulidi M.Yu., Smolyakov M.Yu. Assessment of the impact of vibration on buildings and structures in the zone of influence of the railway. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2022. No. 11, pp. 36–40. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-11-36-40>
  9. Tsukernikov I.E., Tikhomirov L.A., Solomatin E.O. Solving the problems of building acoustics as a factor that ensures the safety and comfort of living in buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo [Housing Construction]*. 2014. No. 6, pp. 49–52. (In Russian).
  10. Gagarin V.G., Shubin I.L. The development of theoretical and experimental foundations of building physics as the main factor in ensuring the comfort of living, creativity and healthy human life within the new generation. *Fundamental research of the RAACS on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2011. Scientific works of the RAASN*. Vol. 2. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering. 2012, pp. 234–238. (In Russian).
  11. Khanifov F.M., Zagidullina G.M. The main directions of implementation of the life cycle management system for capital construction projects. *Innovations and quality of vocational education: Proceedings of the XV International Scientific and Practical Conference*. Kazan. 2021, pp. 3–8. (In Russian).

- материалов с использованием метода искусственного старения // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 4 (60). С. 4–9.
13. Клименко В.В., Горин В.А. Исследование динамических характеристик материалов упругих подложек паркетных полов в процессе эксплуатации // *Academia. Архитектура и строительство*. 2010. № 3. С. 204–207.
  14. Борисов Л.А., Градов В.А., Насонова Е.В. Динамические характеристики пенополиэтиленов под воздействием длительной нагрузки. *Проблемы экологической безопасности и энергосбережения в строительстве и ЖКХ: Материалы международной научно-практической конференции*. Кавала (Греция), 2014. С. 226–233.
  15. Третьяков В.И., Богомолова Л.К., Гузова Э.С. Физико-механические критерии оценки долговечности уплотнительных прокладок для оконных и дверных блоков и структурного остекления фасадов // *Строительство и реконструкция*. 2016. № 3 (65). С. 165–168.
  16. Третьяков В.И., Богомолова Л.К. Определение долговечности поливинилхлоридных оконных и дверных профилей для светопрозрачных конструкций в Испытательном центре «Стройполимертест» // *Светопрозрачные конструкции*. 2003. № 2. С. 59–62.
  17. Скрипченко Д.С., Овсянников С.Н. Методика проведения испытаний по определению динамического модуля упругости, динамического модуля сдвига и коэффициента потерь звукоизоляционных материалов // *Строительные материалы*. № 6. 2017. С. 55–58.
  18. Махмудов У.А., Лелюга О.В. Экспериментальные исследования упругодиссипативных свойств конструкционных материалов и расчет звукоизоляции ограждающих конструкций на основе уточненных характеристик методом СЭА. *Избранные доклады 66-й Университетской научно-технической конференции студентов и молодых ученых*. Томск. 21–25 сентября. 2020. С. 336–343.
  19. Овсянников С.Н., Лелюга О.В., Самохвалов А.С. и др. Экспериментальные исследования упругодиссипативных свойств конструкционных и герметизирующих материалов светопрозрачных конструкций // *Строительство и реконструкция*. 2022. № 6 (104). С. 56–68. DOI: 0.33979/2073-7416-2022-104-6-56-68.
  20. Овсянников С.Н., Лелюга О.В., Махмудов У.А., Щурова Н.Е. Исследование упругодиссипативных свойств конструкционных материалов ограждающих конструкций // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2020. № 6 (1030). С. 28–31.
  21. Заборов В.И., Росин Г.С. Измерение динамических параметров звукоизолирующих материалов // *Акустический журнал*. 1961. Т. 7. № 1. С. 92–94.
  22. Справочник по защите от шума и вибрации жилых и общественных зданий / Под ред. В.И. Забо-рова. К.: Будівельник, 1989. 160 с.
  12. Borisov L.A., Gradov V.A., Tretyakov V.I. et al. Investigation of physical-mechanical and acoustic characteristics of heat and sound insulation materials using the method of artificial aging. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2015. No. 4 (60), pp. 4–9. (In Russian).
  13. Klivenko V.V., Gorin V.A. Investigation of the dynamic characteristics of materials of elastic substrates of parquet floors during operation. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2010. No. 3, pp. 204–207. (In Russian).
  14. Borisov L.A., Gradov V.A., Nasonova E.V. Dynamic characteristics of polyethylene foams under the influence of a long-term load. *Problems of environmental safety and energy saving in construction and housing and communal services: Proceedings of the international scientific-practical conference*. Kavala (Greece), 2014. pp. 226–233.
  15. Tretyakov V.I., Bogomolova L.K., Guzova E.S. Physico-mechanical criteria for evaluating the durability of sealing gaskets for window and door blocks and structural glazing of facades. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2016. No. 3 (65), pp. 165–168. (In Russian).
  16. Tretyakov V.I., Bogomolova L.K. Determination of the durability of PVC window and door profiles for translucent structures in the Testing Center “Stroypolymertest”. *Svetoprozrachnyye konstruktsii*. 2003. No. 2, pp. 59–62. (In Russian).
  17. Skripchenko D.S., Ovsyannikov S.N. Test method for determination of dynamic modulus of elasticity, dynamic shear modulus and loss coefficient of soundproofing materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 6, pp. 55–58. (In Russian).
  18. Makhmudov U.A., Lelyuga O.V. Experimental studies of elastic-dissipative properties of structural materials and calculation of sound insulation of enclosing structures based on refined characteristics by the SEA method. *Selected reports of the 66<sup>th</sup> University Scientific and Technical Conference of Students and Young Scientists*. Tomsk. September 21–25, 2020, pp. 336–343. (In Russian).
  19. Ovsyannikov S.N., Lelyuga O.V., Samokhvalov A.S. and others. Experimental studies of elastic-dissipative properties of structural and sealing materials of translucent structures. *Stroitel'stvo i rekonstruktsiya*. 2022. No. 6 (104), pp. 56–68. DOI: 10.33979/2073-7416-2022-104-6-56-68.
  20. Ovsyannikov S.N., Lelyuga O.V., Makhmudov U.A., Shchurova N.E. Study of the elastic-dissipative properties of structural materials of building envelopes. *BST: Byulleten'stroytel'noy tekhniki*. 2020. No. 6 (1030), pp. 28–31. (In Russian).
  21. Zaborov V.I., Rosin G.S. Measurement of dynamic parameters of soundproofing materials. *Akusticheskiy zhurnal*. 1961. Vol. 7. No. 1, pp. 92–94. (In Russian).
  22. Reference book on protection against noise and vibration of residential and public buildings. Ed. Zaborov V.I. Kiev: Budivelnik. 1989. 160 p.

П.П. ПАСТУШКОВ<sup>1,2</sup>, канд. техн. наук (pavel-one@mail.ru); Д.А. ИЛЬИН<sup>3,4</sup>, канд. техн. наук (ilin.d@tn.ru), В.Н. ШАЛИМОВ<sup>4</sup>, канд. техн. наук (shalimov@tn.ru); И.С. КУРИЛЮК<sup>1</sup>, инженер (kurilukis@yandex.ru)

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова (119192, г. Москва, Мичуринский пр-т, 1)

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

<sup>4</sup> ООО «ТехноНИКОЛЬ-Строительные Системы» (129110, г. Москва, ул. Гиляровского, 47, стр. 5, эт. 5, пом. I, комн. 13)

## Эксплуатационная влажность теплоизоляционных плит из пенополиизоцианурата (PIR) в составе современных кровельных систем

Представлены результаты комплексного исследования эксплуатационной влажности теплоизоляционных плит из пенополиизоцианурата (PIR) в составе современных кровельных систем. Проведены натурные обследования 12 плоских кровель, утепленных плитами PIR, введенных в эксплуатацию не менее трех лет назад и расположенных во всех трех зонах влажности России (9 регионах). После отбора проб определены значения эксплуатационной влажности плит PIR во всех исследованных объектах. Установлено, что расчетная влажность для плит из пенополиизоцианурата (PIR) с облицовкой из фольги в современных кровельных системах составляет для условий эксплуатации конструкций А – 2%, для условий эксплуатации конструкций Б – 3%. Полученные результаты предлагается использовать при подготовке Изменений № 3 к СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02–2003 Тепловая защита зданий» в части расчетных теплотехнических показателей плит из пенополиизоцианурата с облицовкой из фольги.

**Ключевые слова:** плиты из пенополиизоцианурата, тепловая защита зданий, кровельные системы, эксплуатационная влажность.

**Для цитирования:** Пастушков П.П., Ильин Д.А., Шалимов В.Н., Курилюк И.С. Эксплуатационная влажность теплоизоляционных плит из пенополиизоцианурата (PIR) в составе современных кровельных систем // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 12–15. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-12-15>

P.P. PASTUSHKOV<sup>1,2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (pavel-one@mail.ru); D.A. IL'IN<sup>3,4</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (ilin.d@tn.ru); V.N. SHALIMOV<sup>4</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (shalimov@tn.ru); I.S. KURILYUK<sup>1</sup>, Engineer (kurilukis@yandex.ru)

<sup>1</sup> Research Institute of Building Physics Russian Academy Architecture and Construction sciences (21, Lokomotivnyi Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

<sup>2</sup> Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University (1, Michurinsky Avenue, Moscow, 119192, Russian Federation)

<sup>3</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation)

<sup>4</sup> LLC "TechnoNICOL-Construction Systems" (room 13/ I, floor 5, 47/5 Gilyarovskogo Street, Moscow, 129110, Russian Federation)

### Operational Humidity of the Thermal Insulation Boards with a Rigid Polyisocyanurate (PIR) Foam Core Used in Modern Roofing Solutions

The article is devoted to the description of comprehensive studies of the operational humidity of thermal insulation boards with a rigid polyisocyanurate (PIR) foam core used in modern roofing systems. Full-scale surveys of 12 flat roofs insulated with PIR-boards realized at least three years ago and located in all three humidity zones of Russia (9 regions) were carried out. After sampling, the values of the operational humidity of the PIR-boards were determined for all the studied objects. It has been determined that the calculated humidity for the polyisocyanurate boards (PIR) faced on both sides with aluminum foil in modern roofing solutions is 2% (for the operating conditions of structures A) and 3% (for the operating conditions of structures B). The results are proposed to be used in the preparation of Amendments No. 3 to SP 50.13330.2012 "SNIP 23-02-2003 Thermal protection of buildings" in terms of the calculated thermal performance of the polyisocyanurate foam boards with aluminum facing.

**Keywords:** polyisocyanurate foam boards, operating conditions, operating humidity, roofing solutions.

**For citation:** Pastushkov P.P., Il'in D.A., Shalimov V.N., Kurilyuk I.S. Operational humidity of the thermal insulation boards with a rigid polyisocyanurate (PIR) foam core used in modern roofing solutions. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 12–15. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-12-15>

В процессе эксплуатации зданий влажностное состояние материалов ограждающих конструкций (содержание в них влаги во всех фазах) изменяется в зависимости от конструктивных особенностей, температурно-влажностных условий в помещениях, климатических условий района строительства, физических свойств самих материалов и прочих факторов. Эксплуатационной влажностью называется равновесное влагосодержание материала в ограждении с учетом влияния на него факторов внутренней и наружной среды во время эксплуатации. Влаго-содержание в материале становится равновесным

после окончания стадии строительства и следующей за ней стадии выхода конструкции на квазистационарный (практически неизменяемый в течение одних суток, однако периодически изменяемый в течение года) влажностный режим. Расчетной влажностью называют эксплуатационную влажность материалов для обобщенных условий эксплуатации А или Б [1, 2]. Условия эксплуатации назначаются для зоны влажности региона строительства и влажностного режима в помещении согласно табл. 2 в СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02–2003 Тепловая защита зданий» [3]. Соответственно расчетной тепло-



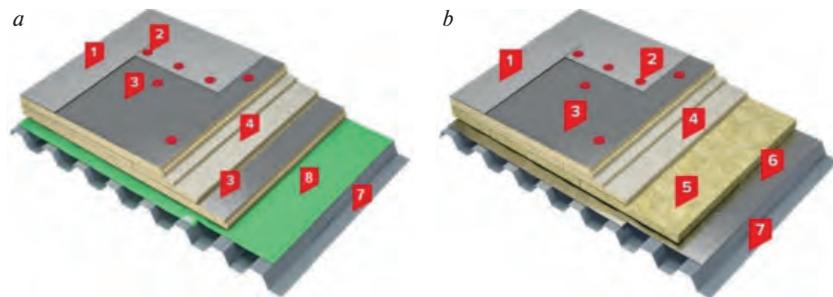
**Рис. 1.** Общий вид кровли на объекте для исследований (Республика Башкортостан)

**Fig. 1.** General view of the roof at the research facility (Republic of Bashkortostan)

проводностью называют теплопроводность материала или изделия при условиях эксплуатации конструкции А или Б (при расчетной влажности А или Б). Именно этот показатель используется при теплотехнических расчетах ограждающих конструкций, в том числе для определения толщины теплоизоляционных слоев из условий соответствия нормативным требованиям по тепловой защите [4].

Пенополиуретаны появились более 80 лет назад. В настоящее время этот вид материала составляет самую большую долю в сегменте терморепродуктивных полимерных эффективных утеплителей и активно применяется в строительной сфере. Самой современной модификацией полиуретанов, используемых в строительстве, является пенополиизоцианурат (PIR). В ряде работ описаны принципы разработки рецептуры изделий из вспененного полиуретана (PUR) и полиизоцианурата (PIR) [5, 6], а также исследования изменения теплопроводности PIR вследствие изменения газового состава в порах [7–12]. При этом в опубликованных работах не встречаются результаты исследований эксплуатационной влажности плит PIR в составе ограждающих конструкций.

При внесении несколько лет назад строки с данными для плит из пенополиизоцианурата в Приложение Т [3] с расчетными теплотехническими показателями строительных материалов и изделий были ис-



**Рис. 2.** Типы исследованных кровельных систем: а – с теплоизоляционным слоем из PIR; б – с комбинированным теплоизоляционным слоем из PIR и MW: полимерная ПВХ-мембрана – 1; система механического крепления – 2; слои теплоизоляции из плит PIR – 3, 4; слой теплоизоляции из плит MW – 5; пароизоляционный слой из битумной мембраны – 6 и ПЭ пленки – 8; несущее основание из металлического профилированного листа – 7

**Fig. 2.** Types of roofing systems: а – with a thermal insulation layer made of PIR; б – with a combined thermal insulation layer made of PIR and MW: polyester reinforced PVC membrane – 1; telescopic fastener – 2; thermal insulation layers made of PIR boards (aluminium facing)/(glass tissue with mineral binder) – 3, 4; thermal insulation layer made of MW-boards – 5; bitumen vapor barrier – 6; vapor barrier made of PE-film – 8; Corrugated steel sheet – 7

пользованы значения расчетной влажности для пенополиуретана, что в настоящее время не совсем корректно из-за различий свойств этих материалов и конструкций, в которых они применяются. В связи с введением в действие ГОСТ Р 59985–2022 «Конструкции ограждающие зданий. Методы определения теплотехнических показателей теплоизоляционных материалов и изделий при эксплуатационных условиях» с единой для всех теплоизоляционных материалов методикой определения расчетной теплопроводности, которая ссылается в части расчетной влажности на данные из Приложения Т [3], стала актуальной работа по определению эксплуатационной влажности плит PIR в составе современных кровельных систем, а также уточнению данных в [3] на основании результатов этой работы. Настоящая статья посвящена описанию результатов натурных исследований эксплуатационной влажности теплоизоляционных плит из пенополиизоцианурата (PIR) в составе кровельных систем, проведенных во всех климатических районах строительства РФ в 2021–2022 гг. специалистами сектора испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лаборатории строительной теплофизики НИИСФ РААСН совместно с компанией Технониколь.

#### Методика проведения исследований

Как описано в [1, 13], основным способом определения эксплуатационной влажности строительных материалов являются натурные исследования. Методика назначения расчетной влажности строительных материалов для условий эксплуатации конструкции А и Б описана в Методическом пособии по назначению расчетных теплотехнических показателей строительных материалов и изделий [14]. По этой методике исследования проводились в натурных условиях в девяти регионах, расположенных во всех зонах влажности России и относящихся к условиям эксплуатации А и Б согласно [3]. В каждом выбранном регионе для отбора проб было выбрано по 1–3 объекта со сроком введения в эксплуатацию не ранее трех лет до начала исследований. Всего исследованы кровли на 12 объектах. Объекты для проведения работ по отбору образцов плит PIR из кровельных систем были расположены в следующих регионах РФ: г. Москва, Московская обл., г. Краснодар, Владимирская обл., г. Санкт-Петербург, Республика Башкортостан, Республика Адыгея, г. Казань, г. Владивосток. Общий вид одного из объектов исследований приведен на рис. 1.

Были обследованы кровли двух типов, относящихся к неэксплуатируемым крышам по стальному профилированному настилу с кровельным ковром из полимерной мембраны и теплоизоляционным слоем из пенополиизоцианурата (PIR) – 5 исследо-



Рис. 3. Место отбора образца плит PIR из кровельного пирога  
Fig. 3. Sampling location of PIR-board samples from the roofing composition

ванных объектов из 12 (рис. 2, а) либо комбинированным теплоизоляционным слоем из пенополиизоцианурата (PIR) и каменной ваты (MW) – 7 объектов (рис. 2, б).

Определение эксплуатационной влажности проводилось с учетом требований [14]. На каждом объекте проводились работы по вскрытию гидроизоляционной кровельной мембраны и отбору образцов теплоизоляционного слоя не менее чем в трех участках кровли. Образцы теплоизоляционных материалов отбирали на всю толщину слоя (от гидроизоляционной мембраны до пароизоляционного слоя), герметично упаковывали и доставляли в лабораторию для проведения работ по определению влажности термogravиметрическим методом. На рис. 3 представлено место отбора образца из кровельного пирога.

### Результаты определения эксплуатационной влажности

Результаты определения эксплуатационной влажности плит из пенополиизоцианурата (PIR) в составе современных кровельных систем по всем исследованным объектам представлены в таблице.

По результатам проведенных натурных исследований на 12 современных кровлях, располагавшихся на торгово-развлекательных центрах (восемь объектов), промышленными и складскими помещениями (по два объекта), установлено, что средняя эксплуатационная влажность плит PIR составила 2–3 мас. %. В ходе экспериментов не установлено существенных различий между эксплуатационной влажностью верхних и нижних слоев PIR. Следует отметить, что все исследованные кровли находились в хорошем эксплуатационном состоянии и не имели следов механических повреждений тепло- и гидроизоляционных слоев, отсутствовали признаки протечек и прочих дефектов. Согласно методике [14], округляя полученные средние значения эксплуатационной влажности для разных условий эксплуатации до целого значения, установлено, что расчетная влажность для плит из пенополиизоцианурата (PIR) с облицовкой из фольги в составе кровельных конструкций составила для условий эксплуатации конструкций А – 2%, для условий эксплуатации конструкций Б – 3%.

### Закключение

Специалистами сектора испытаний теплофизических характеристик строительных материалов лабо-

### Результаты определения эксплуатационной влажности PIR Results of determination of operational humidity PIR

№	Месторасположение объекта исследования	Год ввода в эксплуатацию	Зона влажности*	Условия эксплуатации*	Толщина плит PIR, мм	Эксплуатационная влажность $W_3$ , %	
1	г. Москва	2017	2 – нормальная	Б	50+50	2,6	2,5
2	Московская обл., г. Химки	2017	2 – нормальная	Б	50+50	2,7	
3	Владимирская обл., г. Ковров	2017	2 – нормальная	Б	50+40	2,5	
4	Республика Татарстан, г. Казань	2017	2 – нормальная	Б	50+50	2,3	
5	г. Москва	2017	2 – нормальная	Б	50	2,7	
6	г. Москва, п. Внуково	2018	2 – нормальная	Б	50+50	2,6	
7	г. Санкт-Петербург	2017	1 – влажная	Б	50+50	1,8	
8	Ленинградская обл., д. Порошкино	2017	1 – влажная	Б	50+50	1,9	
9	Приморский край, г. Владивосток	2017	1 – влажная	Б	50+50	2,9	
10	Республика Адыгея, аул Новая Адыгея	2018	3 – сухая	А	50+50	1,7	2,1
11	Краснодарский край, г. Краснодар	2019	3 – сухая	А	80	2,1	
12	Республика Башкортостан, п. Булгаково	2018	3 – сухая	А	50	2,4	

Примечание. \* Согласно СП 50.13330.2012 [7].

ратории строительной теплофизики НИИСФ РААСН проведены комплексные исследования эксплуатационной влажности теплоизоляционных плит из пенополиизоцианурата (PIR) в составе современных кровельных систем. Исследования проводились на 12 плоских кровлях, введенных в эксплуатацию не менее трех лет назад и расположенных во всех трех зонах влажности России. После отбора проб определены значения эксплуатационной влажности плит PIR для всех исследованных объектов. Согласно методике [14] установлено, что расчетная влажность для плит из пенополиизоцианурата (PIR) с облицовкой из фольги в современных кровельных системах составляет для условий эксплуатации конструкций А – 2%, для условий эксплуатации конструкций Б – 3%. Полученные результаты предлагается использовать при подготовке Изменений № 3 к СП 50.13330.2012 [3] в части расчетных теплотехнических показателей плит из пенополиизоцианурата с облицовкой из фольги.

#### Список литературы / References

- Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Определение расчетной влажности строительных материалов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2015. № 8. С. 28–33.
- Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Determination of the calculated moisture content of building materials. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2015. No. 8, pp. 28–33. (In Russian).
- Пастушков П.П., Павленко Н.В., Коркина Е.В. Использование расчетного определения эксплуатационной влажности теплоизоляционных материалов // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 4 (60). С. 168–172.
- Pastushkov P.P., Pavlenko N.V., Korkina E.V. Using the definition of estimated operational moisture of thermal insulation materials. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2015. No. 4 (60), pp. 168–172. (In Russian).
- СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий» (с изменениями № 1, №2).
- SP 50.13330.2012 «SNiP 23-02-2003 Thermal protection of buildings» (with amendments No. 1, No. 2). (In Russian).
- Пастушков П.П. О проблемах определения теплопроводности строительных материалов // *Строительные материалы*. 2019. № 4. С. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63>
- Pastushkov P.P. On the problems of determining the thermal conductivity of building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 4, pp. 57–63. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-769-4-57-63> (In Russian).
- Grünbauer H.J.M., Bicerano J., Clavel P., Daussin R.D., de Vos H.A., Elwell M.J., et al. Rigid Polyurethane Foams. In book: *Polymeric Foams*. 2004. DOI:10.1201/9780203506141.ch7
- Ashida K. *Polyurethane and Related Foams: Chemistry and Technology* (1st ed.). CRC Press. 2006. 174 p.
- Wiedermann R.E., Adam N., Kaufung R. Flame-Retarded, Rigid PUR Foams with a Low Thermal Conductivity. *Journal of Thermal Insulation*. 1988. Vol 11(4), pp. 242–253.
- Albrecht W. Cell-gas composition – An important factor in the evaluation of long-term thermal conductivity in closed-cell foamed plastics. *Cellular Polymers*. 2000. Vol. 19(5), pp. 319–331.
- Albrecht W., Zehendner H. Thermal conductivity of Polyurethane (PUR) rigid foam boards after storage at 23°C and 70°C. *Cellular Polymers*. 1997. Vol. 16, pp. 35–42.
- Albrecht W. Change over time in the thermal conductivity of ten-year-old pur rigid foam boards with diffusion-open facings. *Cellular Polymers*. 2004. Vol. 23(3), pp. 161–172. <https://doi.org/10.1177/026248930402300303>
- Гагарин В.Г., Пастушков П.П. Изменение во времени теплопроводности газонаполненных полимерных теплоизоляционных материалов // *Строительные материалы*. 2017. № 6. С. 28–31.
- Gagarin V.G., Pastushkov P.P. Change in time of thermal conductivity of gas-filled polymer thermal insulation materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2017. No. 6, pp. 28–31. (In Russian).
- Пастушков П.П., Гагарин В.Г., Ильин Д.А., Нагаев И.Ф. Новые результаты по исследованиям изменения теплопроводности с течением времени плит из пенополиизоцианурата (PIR) современного производства // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 30–34. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-30-34>
- Pastushkov P.P., Gagarin V.G., Il'in D.A., Nagaev I.F. New results on research on changes in thermal conductivity over time of boards made of polyisocyanurate foam (PIR) of modern production. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 30–34. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-30-34>
- Гагарин В.Г., Пастушков П.П., Реутова Н.А. К вопросу о назначении расчетной влажности строительных материалов по изотерме сорбции // *Строительство и реконструкция*. 2015. № 4 (60). С. 152–155.
- Gagarin V.G., Pastushkov P.P., Reutova N.A. On the question of the appointment of the calculated moisture of building materials for sorption isotherm. *Stroitel'stvo i rekonstrukciya*. 2015. No. 4 (60), pp. 152–155. (In Russian).
- Методическое пособие по назначению расчетных теплотехнических показателей строительных материалов и изделий. М.: ФАУ «ФЦС», 2019.
- Methodical manual on the purpose of calculated thermal engineering indicators of building materials and products. Moscow: FAU «FCS», 2019. (In Russian).

УДК 666.189.3

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-16-20>

И.В. БЕССОНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru);  
 М.Г. БРУЯКО<sup>2</sup>, канд. техн. наук (mbryako@yandex.ru);  
 Э.А. ГОРБУНОВА<sup>1,2</sup>, инженер, студентка (eg15082000@mail.ru);  
 И.С. ГОВРЯКОВ<sup>1,2</sup>, инженер, студент (govr190@mail.ru)

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Исследование модифицирующих добавок вспененного жидкого стекла

Проведено исследование теплоизоляционного материала на основе вспененного жидкого стекла, полученного путем обработки по технологии СВЧ, которая подразумевает вспучивание за счет перехода воды из жидкого состояния в парообразное под действием электромагнитных волн. Исследовались составы с различными добавками – отвердителями жидкого стекла с целью поиска замены распространенной  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , так как, несмотря на ее способность к отверждению, она является токсичной. Изучена основная проблема группы материалов на основе вспененного жидкого стекла – низкая водостойкость. Проведен анализ выбранных модифицирующих добавок с целью сравнения и выявления оптимального варианта. Первичная оценка водостойкости полученного материала определялась методом краевого угла смачивания. В результате экспериментов установлено, что портландцемент является оптимальной модифицирующей добавкой для создания экологичного, огнестойкого теплоизоляционного материала; на основании выявленных характеристик обозначена область его возможного применения.

**Ключевые слова:** жидкое стекло, технология СВЧ, пористый материал, водостойкость, отвердители жидкого стекла, кремнийорганический гидрофобизатор.

**Для цитирования:** Бессонов И.В., Бруяко М.Г., Горбунова Э.А., Говряков И.С. Исследование модифицирующих добавок вспененного жидкого стекла // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 16–20. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-16-20>

I.V. BESSONOV<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru); M.G. BRUYAKO<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (mbryako@yandex.ru); E.A. GORBUNOVA<sup>1,2</sup>, Engineer, Student (eg15082000@mail.ru); I.S. GOVRYAKOV<sup>1,2</sup>, Engineer, Student (govr190@mail.ru)

<sup>1</sup> Research Institute of Building Physics, RAACS (21, Lokomotivny proezd, Moscow, 127238, Russian Federation)

<sup>2</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskeye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Research of Modifying Additives of Foamed Liquid Glass

A study was made of a heat-insulating material based on foamed liquid glass obtained by processing using microwave technology, which implies swelling due to the transition of water from a liquid state to a vapor state under the influence of electromagnetic waves. Compositions with various liquid glass hardeners were studied in order to find a replacement for the common  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , since, despite its curing ability, it is toxic. The main problem of a group of materials based on foamed liquid glass is studied – low water resistance. The analysis of the selected modifying additives was carried out in order to compare and identify the optimal option. The initial assessment of the water resistance of the obtained material was determined by the wetting angle method. As a result of the experiments, it was found that Portland cement is the optimal modifying additive for creating an environmentally friendly, fire-resistant, heat-insulating material; based on the identified characteristics, the scope of its possible application is indicated.

**Keywords:** water glass, microwave technology, porous material, water resistance, water glass hardeners, organosilicon water repellent.

**For citation:** Bessonov I.V., Bruyako M.G., Gorbunova E.A., Govryakov I.S. Research of modifying additives of foamed liquid glass. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 16–20. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-16-20>

В настоящее время устанавливаются более высокие требования к свойствам теплоизоляционных материалов и изделий, способствующие повышению экологической безопасности, снижению энергопотребления, уменьшению углеродного следа за весь жизненный цикл здания, что соответствует современным тенденциям повышения уровня устойчивости среды обитания в проектах жилых и общественных зданий и обеспечивает дальнейшее снижение вредного воздействия строящихся объектов на окружающую среду. Одновременно с экологичностью материалов предъявляются повышенные требования к их пожаробезопасности. Теплоизоляционные материалы относятся к категории материалов, которые активно участвуют в распространении пожаров ввиду их повы-

шенной горючести. Таким образом, разработка и исследование составов теплоизоляционных огнестойких материалов является весьма актуальной темой.

Развивается направление производства теплоизоляционных материалов на основе силикатных композиций [1–3]. Такие материалы экологически безопасны как на стадии производства, так и на стадии эксплуатации, имеют высокую адгезию к большинству материалов, являются доступными, а также имеют способность к созданию композитов с матрицей повышенной огнестойкости.

Основным недостатком композиций на основе жидкого стекла является их низкая водостойкость и улучшение данного показателя значительно расширит область их применения. Также это позволит

в ряде случаев обеспечить полную или частичную замену распространенным минеральным вяжущим. Это необходимо, так как производство большинства вяжущих связано с высокими энергозатратами, материалоемкостью, а также со значительным загрязнением окружающей среды [4–7].

Целью данного исследования является сравнение способов повышения водостойкости силикатных композиций путем введения добавок-отвердителей на примере изделий, изготовленных с применением технологии СВЧ-обработки.

Композиционные материалы на основе жидкого стекла обладают свойством затвердевать на воздухе в обычных условиях. При этом из-за испарения свободной воды повышается содержание коллоидного кремнезема, который впоследствии коагулирует и уплотняется. Гидроксид натрия в составе жидкого стекла препятствует осаждению кремнекислоты, но углекислота, содержащаяся в воздухе, нейтрализует его, обеспечивая переход кремнекислоты в коллоидный раствор. Такая схема отверждения жидкого стекла имеет ряд недостатков. Среди них низкая водостойкость изделия ввиду появления поверхностной пленки за счет действия углекислоты, а также низкая скорость твердения [8–10].

Исходя из этого, необходим подбор оптимальной модифицирующей добавки, способствующей ускоренному и объемному твердению жидкого стекла.

### Методы и материалы

Образцы пористого материала на основе жидкого стекла изготавливались по технологии обработки материала в СВЧ. Технология подразумевает объемную обработку электромагнитными волнами. Отличительными чертами и плюсами технологии СВЧ являются экологичность подвода энергии, быстрота обработки, равномерность воздействия СВЧ-поля, точный контроль подачи излучения. Также к плюсам можно отнести сохранность внешнего вида

#### Составы пористого материала на основе жидкого стекла с разными модифицирующими добавками Liquid glass porous material compositions with various modifying additives

Состав	Компоненты	Мас. %
1	Жидкое стекло натриевое $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$	85
	Кремнийорганический гидрофобизатор этилсиликонат натрия $\text{C}_2\text{H}_5\text{Si}(\text{OH})_2\text{ONa}$	15
2	Жидкое стекло натриевое $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$	87
	Гашеная известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$	13
3	Жидкое стекло натриевое $\text{Na}_2\text{O} \cdot 2,7\text{SiO}_2$	90
	Портландцемент (основная реакционно-активная фаза $\text{C}_3\text{S}$ )	10

**Примечание.** В исследовании использовалось жидкое стекло с плотностью 1,44 г/см<sup>3</sup> и силикатным модулем 2,7.

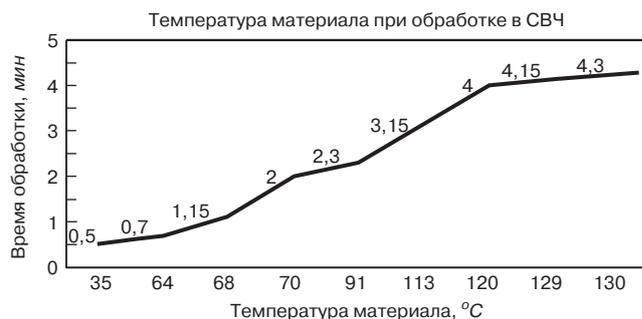


Рис. 1. Динамика увеличения температуры во времени до достижения максимального вспенивания

Fig. 1. Temperature dynamics over time until maximum foaming is achieved

материала за счет отсутствия загрязнения во время обработки.

При обработке в СВЧ-поле вспучивание жидкого стекла происходит за счет перехода воды из жидкого состояния в парообразное через определенное время, которое зависит от мощности и частоты излучателей. Известно, что при переходе силиката натрия из водной раствора в кристаллическую форму при тепловой обработке он становится диэлектриком с низкой диэлектрической проницаемостью, это потенциально можно использовать для вспучивания и отверждения композиций на основе жидких стекол [13–15].

В процессе обработки образцов применялось СВЧ мощностью 800 Вт. При данных параметрах максимальный объем вспенивания достигался при обработке в течение 4 мин, а первоначальный объем жидкой фазы, состоящей из основы – жидкого стекла и различных добавок, увеличился в пять раз. Также в композиции «жидкое стекло – модифицирующая добавка» отслеживалась температура поверхности изделия с использованием пирометра на этапах вспенивания до достижения максимального объема. Зависимость температуры от времени представлена на рис. 1.

Так, можно сделать вывод, что при данной мощности СВЧ подходящая скорость набора температуры в течение определенного времени способна обеспечивать оптимальную кратность вспенивания.

Для анализа влияния модифицирующих добавок на жидкое стекло было исследовано три состава. Поиск альтернативных добавок был направлен на замену распространенного модификатора-отвердителя  $\text{Na}_2\text{SiF}_6$ , так как он, несмотря на свою способность к отверждению жидкостекольной системы, является токсичным.

Варианты составов материалов представлены в таблице.

Выбранные для исследования добавки можно условно разделить на две категории:

1. Жидкие добавки водорастворимые на кремнийорганической основе (этилсиликонат натрия  $\text{C}_2\text{H}_5\text{Si}(\text{OH})_2\text{ONa}$ );

2. Сухие добавки минеральные (гидроксид кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  (гашеная известь) и портландцемент (основная реакционно-активная фаза  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ )).



**Рис. 2.** Структура различных силикатных композиций пористых материалов: *a* – пеностекло; *b* – пеностекольный щебень; *c* – материал на основе жидкого стекла с добавкой ПЦ, полученный по технологии СВЧ; *d* – материал на основе жидкого стекла и кремнийорганической добавки, полученный по технологии СВЧ; *e* – материал на основе жидкого стекла и добавки – гидроксида кальция, полученный по технологии СВЧ; *f* – материал на основе жидкого стекла с добавкой кремнефтористого натрия, полученный по технологии холодного отверждения

**Fig. 2.** Structure of various silicate compositions of porous materials: *a* – foamed glass; *b* – foamed stone; *c* – PCP-based liquid glass material with microwave technology; *d* – liquid glass and organosilicon additive produced with microwave technology; *e* – material based on liquid glass and calcium hydroxide additives produced by microwave technology; *f* – liquid glass based with silicone sodium added by cold curing technology

Полученные композиции представляют собой неорганические полимеры с развитой капиллярно-пористой структурой. Такая структура характерна для всех пористых материалов на силикатной основе. На рис. 2 приведены различные виды пористой структуры силикатных композиций, отличающихся формой, размером и распределением пор по объему материала в зависимости от особенностей технологии и сырьевого состава [11, 12].

Обобщенное описание полученных составов приведено далее. Первичное сравнение обработанных в СВЧ материалов проводилось по методу краевого угла смачивания.

### Результаты и обсуждения

**Состав № 1.** Взаимодействие жидкого стекла с кремнийорганическими водорастворимыми гидрофобизаторами обуславливает возникновение гидрофобной корки при обработке в СВЧ. Добавка не препятствует процессу вспенивания, в результате получается волокнистая структура материала (рис. 2, *d*). При определении краевого угла смачивания капля на поверхности материала образует угол  $>110^\circ$ , но при этом такой эффект достигается только на образовавшейся гидрофобной корке; при нанесе-

нии капли на поверхность среза изделия капля моментально впитывается.

**Состав № 2.** Отверждение жидкостекольной композиции гидроксидом кальция (гашеной известью) привело к замедлению вспенивания в СВЧ, неравномерному диспергированию частиц по объему в процессе обработки электромагнитными волнами и, как следствие, меньшей кратности увеличения вспениваемой массы по сравнению с остальными добавками (рис. 2, *e*). По итогу первичной проверки на повышение водостойкости материала методом краевого угла смачивания выявлено, что капля проникает в толщу материала через 5–7 с после нанесения.

**Состав № 3.** Наилучшим вариантом модифицирующей добавки для отверждения системы оказался портландцемент. Он в указанном процентном соотношении при реакции с жидким стеклом проявляет себя как отвердитель жидкостекольной матрицы, делая ее более водостойкой, также повышая прочность пористого материала (рис. 2, *c*). Краевой угол смачивания на поверхности данной композиции оказался более  $120^\circ$ .

На основе экспериментальных данных выяснилось, что процентное содержание добавки портландцемента, указанное в таблице, является оптималь-

ным, так как именно при данной дозировке портландцемент играет роль отвердителя жидкого стекла и не переходит в стадию проявления вяжущих свойств.

Причину повышения водостойкости в системе «жидкое стекло – портландцемент» можно описать так: при взаимодействии компонентов (свободная вода в жидком стекле связывается с портландцементом) образуются низкоосновные гидросиликаты кальция, а также гидроксид кальция, который впоследствии связывает свободные катионы натрия в жидком стекле в нерастворимые соединения. Реакцию взаимодействия трехкальциевого силиката портландцемента и свободной воды в жидком стекле можно представить следующим образом:



В данном случае портландцемент играет роль не просто активатора твердения силикатной композиции, но и участвует в повышении прочности и водостойкости материала за счет образования сетки нерастворимых натрий-кальциевых соединений.

#### Заключение

Исследования пористого материала на основе вспененного жидкого стекла, изготовленного по оптимально подобранной СВЧ-технологии показали,

#### Список литературы

1. Минько Н.И., Пучка О.В., Степанова М.Н., Вайсера С.С. Теплоизоляционные стекломатериалы. Пеностекло: Монография. 2-е изд. Белгород: Изд-во БГТУ, 2016. 263 с.
2. Мирюк О.А. Ячеистые материалы на основе жидкого стекла // *Universum: Технические науки: электрон. науч. журн.* 2015. № 4–5 (17). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2162>
3. Душкина М.А. Разработка составов и технологии получения пеностеклокристаллических материалов на основе кремнеземистого сырья: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2015. 196 с.
4. Хабибулин Ш.А. Разработка составов и технологии получения модифицированного жидкостекляного вяжущего и композиционных материалов на его основе: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2015. 136 с.
5. Зин Мин Хтет. Композиционные материалы на основе жидкостекляного связующего для теплоизоляции: Дис. ... канд. техн. наук. М., 2020. 136 с.
6. Малявский Н.И., Журавлева О.И. О возможности замены фторосиликатных отвердителей жидкого стекла на кальций-силикатные в технологии получения щелочно-силикатных утеплителей // *Вестник Евразийской Науки*. 2018. № 5. <https://esj.today/PDF/04SAVN518.pdf>
7. Малявский Н.И., Зверева В.В. Кальций-силикатные отвердители жидкого стекла для получения водостойких щелочно-силикатных утеп-

что при добавлении модифицирующей добавки – портландцемента повышается водостойкость и прочность силикатных композиций.

Большой интерес представляет применение поризованных композитов на основе водных растворов силикатов натрия, которые могут быть использованы в качестве теплоизоляционных материалов, как самостоятельных строительных изделий, так и при производстве стеновых трехслойных конструкций типа сэндвич-панелей в качестве среднего теплоизоляционного слоя.

Продолжаются исследования свойств пористого материала на основе вспененного жидкого стекла, предназначенного для применения в качестве акустического материала, обладающего звукопоглощающими свойствами.

Пористый материал на основе вспененного жидкого стекла соответствует требованиям обеспеченности местными сырьевыми ресурсами, а также делает возможным применение малоэнергоёмких технологий при производстве. Таким образом, материал можно назвать всесторонне экологичным, поскольку экологические требования соблюдаются как на стадии производства, так и на стадии эксплуатации, тем самым развивая направление промышленности строительных материалов с нулевым углеродным следом.

#### References

1. Min'ko N.I., Puchka O.V., Stepanova M.N., Vaysera S.S. Teploizolyatsionnyye steklomaterialy. Penosteklo [Heat-insulating glass materials. Foam glass]. Belgorod: BSTU. 2016. 263 p.
2. Miriuk O.A. Cellular materials based on liquid glass. *Universum: Texnicheskie nauki: electronic scientific magazine*. 2015. Vol. 4–5 (17). URL: <http://7universum.com/ru/tech/archive/item/2162> (In Russian).
3. Dushkina M.A. Development of compositions and technology for the production of foam-glass crystal materials based on silica raw material. Cand. Diss. (Engineering). Tomsk. 2015. 196 p. (In Russian).
4. Habibulin S.A. Development of compositions and technology for the production of modified fluid-based binder and composite materials based on it. Cand. Diss. (Engineering). Tomsk. 2015. 136 p. (In Russian).
5. Zin Min Htet. Composite materials based on liquid-based binder for thermal insulation. Cand. Diss. (Engineering). Moscow. 2020. 136 p. (In Russian).
6. Malyavsky N.I., Zhuravleva O.I. On the possibility of replacing fluorosilicate curing agents of liquid glass with calcium-silicate in the technology of alkaline silicate insulation. *Vestnik Evraziiskoi nauki*. 2018. No. 5. <https://esj.today/PDF/04SAVN518.pdf>. (In Russian).
7. Malyavsky N.I., Zvereva V.V. Calcium-silicate hardeners of liquid glass for the production of water-resistant alkaline silicate insulation. *Internet-vestnik VolgSACU*. 2015. Vol. 2(38). (In Russian).

- лителей // Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2015. Вып. 2 (38). С. 5.
8. Лотов В.А., Хабибулин Ш.А. Применение модифицированного жидкостеклового вяжущего в производстве строительных материалов // *Строительные материалы*. 2015. № 1. С. 72–75.
  9. Усова Н.Т., Лотов В.А., Лукашевич О.Д. Водостойкие безавтоклавные силикатные строительные материалы на основе песка, жидкостеклово-композиций и шламов водочистки // *Вестник ТГАСУ*. 2013. № 2. С. 276–284.
  10. Борило Л.П., Лютова Е.С. Влияние добавки оксида титана на биосвойства силикатных материалов // *Вестник ТГУ. Химия*. 2015. № 2. С. 101–110.
  11. Лукашевич О.Д., Лотов В.А., Усова Н.Т., Лукашевич В.Н. Получение водостойких, прочных силикатных материалов на основе природного и техногенного материала // *Вестник ТГАСУ*. 2017. № 6. С. 151–160.
  12. Зин Мин Хтет, Тихомирова И.Н. Теплоизоляционные материалы на основе вспененного жидкого стекла // *Успехи в химии и химической технологии*. Т. 31. 2017. № 3. С. 34–36.
  13. Заболотская А.В. Технология и физико-химические свойства пористых композиционных материалов на основе жидкого стекла и природных силикатов: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2003. 150 с.
  14. Филиппов В.А., Филиппов Б.В. Перспективные технологии обработки материалов сверхвысоко-частотными электромагнитными колебаниями // *Вестник ЧГПУ им. И.Я. Яковлева*. 2012. № 4 (76). С. 181–184.
  15. Калганова С.Г., Лаврентьев В.А., Архангельский Ю.С., Васинкина Е.Ю., Белоглазов А.П. СВЧ-энергия в производстве композиционных материалов // *Решетневские чтения*. 2017. № 21–1. С. 369–371.
  8. Lotov V.A., Habibulin S.A. Use of modified liquid-ecological, astringent in the production of building materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2015. No. 1, pp. 72–75. (In Russian).
  9. Usova N.T., Lotov V.A., Lukashevich O.D. Water-resistant, non-autoclave silicate building materials based on sand, liquid compositions and sludge water treatment. *Vestnik of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2013. No. 2, pp. 276–284. (In Russian).
  10. Borilo L.P., Lyutova E.S. Influence of titanium oxide additive on the bioproperties of silicate materials. *Vestnik TSU. Khimiya*. 2015. No. 2, pp. 101–110. (In Russian).
  11. Lukashevich O.D., Lotov V.A., Usova N.T., Lukashevich V.N. Production of water-resistant, durable silicate materials based on natural and technogenic material. *Vestnik of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering*. 2017. No. 6, pp. 151–160. (In Russian).
  12. Zin Min Htet, Tikhomirov I.N. Thermal insulation materials based on foamed liquid glass. *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2017. No. 3, pp. 34–36. (In Russian).
  13. Zabolotskaya A.V. Technology and physical-chemical properties of porous composite materials based on liquid glass and natural silicates. *Cand. Diss. (Engineering) Tomsk*. 2003. 203 p. (In Russian).
  14. Filippov V.A., Filippov B.V. Advanced technologies for processing materials with ultra-high-frequency electromagnetic oscillations. *Vestnik of the Chuvash State Pedagogical University named after I. Ya. Yakovlev*. 2012. No. 4 (76), pp. 181–184. (In Russian).
  15. Kalganova S.G., Lavrent'ev V.A., Arkhangel'skii Yu.S., Vasinkina E.Yu., Beloglazov A.P. Microwave energy in the production of composite materials. *Reshetnevskiy chteniye*. 2017. No. 21–1, pp. 369–371. (In Russian).

Новосибирский государственный аграрный университет  
Объединенная редакция научно-технических журналов «Жилищное строительство» и «Строительные материалы»<sup>®</sup>  
Российская академия естественных наук (РАЕН)  
Академия пробел качества (АПК)



### Международная научно-практическая конференция

## «НОВЫЕ ПРОГРЕССИВНЫЕ РЕЦЕПТУРНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ В СТРОИТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИИ»

18–21 июля 2023 г.

Б/О «Бухта Лазурная»\*

#### ПЛАН КОНФЕРЕНЦИИ

18 июля  
Заезд; расселение участников  
19 июля  
Пленарное заседание (конференц-зал, «Бухта Лазурная»)

#### ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

- Современные инновационные строительные материалы
- Новые технологические решения в материаловедении
- Использование нанодобавок для повышения качества строительных композитов
- Практические примеры внедрения новых материалов и технологий в строительстве
- Контроль качества строительных материалов и изделий

Заявки и материалы и для участия в работе просьба направлять по электронному адресу: [gmnsau@mail.ru](mailto:gmnsau@mail.ru) до 5 июля 2023 г.  
Председатель оргкомитета конференции ПИЧУГИН Анатолий Петрович, д-р техн. наук, проф., член редакционного совета журнала «Строительные материалы»<sup>®</sup>  
Тел.: 8-913-929-23-50.

По результатам работы на пленарном заседании будет сформирован сборник научных трудов, лучшие статьи и выступления которого будут рекомендованы для опубликования в журналах «Строительные материалы»<sup>®</sup> и «Жилищное строительство».

\* Новосибирская обл., Барабинский р-н, деревня Квашино. Проезд от ст. Барабинск, НСО до с. Квашино (50 км) и далее до «Бухта Лазурная» (4 км); Телефон для справок 8-913-929-23-50.

УДК 691.32

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-21-26>

В.Н. ЯРМАКОВСКИЙ, канд. техн. наук, гл. научный сотрудник, почетный член РААСН, эксперт РАН, член Международной федерации по конструкционным бетонам «International Federation for Structural Concrete» (fib) (yarmakovsky@yandex.ru),  
Д.З. КАДИЕВ, инженер (kadiyevdavid@mail.ru)

Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Влияние напряженного состояния на стойкость конструкционных тяжелых и легких бетонов в условиях воздействия низкой отрицательной температуры

Рассматриваются результаты выполненных в лаборатории НИИСФ № 56 «Ресурсоэнергосберегающие легкие бетоны и конструкции» исследований по влиянию напряженного состояния бетона на его морозостойкость. Особое внимание уделено воздействию низкой отрицательной температуры (до минус 70°C) на параметрические уровни областей напряженно-деформированного состояния при осевом сжатии конструкционных тяжелых и легких бетонов классов по прочности при сжатии В30 и В40, в частности на нижнюю ( $R_T^0$ ) и верхнюю ( $R_T^V$ ) границы областей микротрещинообразования этих бетонов. Выполнена оценка степени влияния на этот процесс структурно-технологических характеристик бетонов. Полученные результаты могут быть использованы в практике проектирования железобетонных конструкций, которые будут эксплуатироваться в условиях сурового климата северо-восточных регионов России, Крайнего Севера и побережья Арктического шельфа страны.

**Ключевые слова:** конструкционный легкий бетон на пористых заполнителях, тяжелый бетон на плотных природных заполнителях, морозостойкость, низкая отрицательная температура, нижняя и верхняя границы областей микротрещинообразования бетона.

**Для цитирования:** Ярмаковский В.Н., Кадиев Д.З. Влияние напряженного состояния на стойкость конструкционных тяжелых и легких бетонов в условиях воздействия низкой отрицательной температуры // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 21–26. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-21-26>

V.N. YARMAKOVSKY, Candidate of Sciences (Engineering), Chief Researcher, Honorary Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Expert of the Russian Academy of Sciences, member of the International Federation for Structural Concrete (fib) (yarmakovsky@yandex.ru)  
D.Z. KADIEV, Junior Researcher (kadiyevdavid@mail.ru)  
Research Institute of Building Physics RAACS (21, Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russian Federation)

### The Influence of the Stress State on the Durability of Structural Heavy and Lightweight Aggregate Concrete Under the Action of Low Negative Temperatures

The article discusses the results of investigations on the influence of the stress state of concrete on its frost resistance. Particular attention is paid to the effect of low negative temperatures (up to minus 70°C) on the parametric levels of the stress-strain state areas during axial compression of structural heavy and light concretes of B30 and B40 compressive strength classes, in particular, on the lower ( $R_T^0$ ) and upper ( $R_T^V$ ) boundaries of the microcracking areas of these concretes. An assessment of the degree of influence on this process of the structural and technological characteristics of concrete was made. The results obtained can be used in the practice of reinforced concrete structures designing that will be operated in the harsh climate of the North-Eastern regions of Russia, the Far North and the coast of the Arctic shelf of the country.

**Keywords:** structural lightweight aggregate concretes on the porous aggregates, concretes on dense natural aggregates, frost resistance, low negative temperatures, lower and upper boundaries of microcrack formation areas in concrete.

**For citation:** Yarmakovsky V.N., Kadiyev D.Z. The influence of the stress state on the durability of structural heavy and lightweight aggregate concrete under the action of low negative temperatures. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 21–26. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-21-26>

В настоящее время остро актуальной является проблема освоения северо-восточных регионов, Крайнего Севера и побережья Арктического шельфа РФ. Температура в этих районах страны опускается до минус 70°C. К тому же бетоны применяются не только для возведения общественных сооружений и гражданских зданий, но также и для возведения резервуаров для хранения сжиженных природных газов, температура эксплуатации которых достигает минус 196°C.

Анализ основополагающих работ, посвященных решению проблемы обеспечения долговечности бе-

тона в конструкциях инженерных сооружений, эксплуатирующихся в суровых климатических условиях [1–3], показывает следующее: недостаточно ограничиться использованием в практике проектирования таких конструкций только результатов исследований по влиянию отрицательной температуры на основные прочностные и деформативные характеристики бетонов, нормируемых лишь Сводом правил СП 63.13330.2012 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения».

Следует обратиться к работам отечественных исследователей научной школы О.Я. Берга [4, 5], а также

Е.А. Гузеева, Ю.В. Зайцева, С.Н. Леоновича [6, 7] и др; к работам зарубежных исследователей [8, 9], развивающих теорию механики разрушения конструкционных бетонов под нагрузкой, и в частности последовательного микротрещинообразования при поэтапном нагружении бетона осевым сжатием, а также к работам школы В.М. Москвина [1, 2] по механизму морозного разрушения бетона и по влиянию напряженного состояния бетона на его морозостойкость [10].

Анализ результатов вышеперечисленных работ приводит к следующему заключению: при расчете и проектировании железобетонных конструкций, предназначенных для эксплуатации в суровых климатических условиях, следует принимать во внимание особенности работы их в сложном напряженно-деформированном состоянии при одновременном воздействии отрицательной температуры и силовых нагрузок. В связи с этим следует использовать в качестве расчетных характеристик бетона наряду с нормативными характеристиками (по СП 63.13330.2018) прочностные характеристики поэтапного разрушения бетона под нагрузкой осевого сжатия, соответствующие параметрическим уровням областей напряженно-деформированного состояния бетона при нагружении его осевым сжатием в условиях воздействия низкой отрицательной температуры.

В соответствии с изложенным в настоящей работе поставлена цель: исследовать влияние низкой отрицательной температуры на следующие характеристики параметрических уровней областей напряженно-деформированного состояния бетона при нагружении его осевым сжатием, а именно:

– *нижнюю границу* области образования микротрещин в бетоне ( $\sigma=R_T^0$ ), определяемую величиной напряжения сжатия, при которой начинается интенсивное развитие так называемых в работах школы В.М. Москвина [1, 2] микротрещин зоны сцепления затвердевшей растворной части бетона с крупным (в частности, пористым) заполнителем; эта граница, по существу, определяет зону развития частично обратимых микротрещин и зону линейной ползучести бетона; из работы О.Я. Берга [5] следует, что эта граница соответствует пределу выносливости бетона при действии многократно повторяющихся нагрузок осевого сжатия;

– *верхнюю границу* области образования микротрещин ( $\sigma=R_T^V$ ), определяемую величиной напряжения сжатия, при которой начинается процесс развития микротрещин в цементном камне, соединение их с так называемыми трещинами сцепления и образование таким образом непрерывных, или «магистральных» (по Ю.В. Зайцеву [7]), трещин с развитием псевдопластических деформаций бетона, приводящих к его разрушению; из работы О.Я. Берга [5] следует, что эта граница соответствует пределу длительной прочности бетона при действии нагрузок осевого сжатия.

## 1. Методики и результаты исследований параметрических уровней напряжений, соответствующих нижней и верхней границам области микротрещинообразования бетонов различных видов при воздействии низкой отрицательной температуры

### 1.1. Методика исследований

В настоящей работе параметрические точки уровней напряжений осевого сжатия, соответствующих нижней  $\sigma=R_T^0$  и верхней  $\sigma=R_T^V$  границам областей микротрещинообразования бетона, определялись при испытании образцов-призм размерами  $15 \times 15 \times 60$  см, изготовленных из тяжелого бетона классов по прочности при сжатии В30 и В40 при величинах соответственно  $V/C=0,5$  и  $V/C=0,4$ . Бетонные образцы через 4 ч после формования и тепловлажностной обработки выдерживались в камере нормально-влажностного твердения. Затем образцы разделялись на группы по влажности:

– естественной влажности ( $W_1=3,3\%$  при  $V/C=0,5$  и  $3,12\%$  при  $V/C=0,4$ );

– промежуточной исходной влажности, полученной при насыщении бетонных образцов в емкости с водой ( $W_2=4,38\%$  и  $W_3=5,06\%$  при  $V/C=0,5$ );

– максимальной влажности, полученной при водонасыщении бетонных образцов под вакуумом ( $W_4=5,35\%$  при  $V/C=0,5$  и  $W_5=5,2\%$  при  $V/C=0,4$ ).

Первая серия образцов-призм при различной исходной влажности испытывалась на гидравлическом прессе, смонтированном в климатической термокамере, на осевое сжатие при обычной температуре  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , а вторая серия – в замороженном до температуры минус  $70^\circ\text{C}$  состоянии. Образцы-призмы нагружались осевым сжатием поэтапно через ступень в  $0,1 R_{пр}$  с выдержкой на каждой ступени 5 мин для выявления пластических деформаций бетона после ступени  $0,2-0,3 R_{пр}$ . На каждой ступени нагружения определялись продольные и поперечные деформации бетона и скорость прохождения ультразвуковых волн. По результатам обработки этих данных определялись параметрические уровни областей напряженно-деформированного состояния бетона. Образцы доводились до разрушения с измерением призмной прочности бетона.

### 1.2. Результаты определения влияния отрицательной температуры на параметрические уровни напряженно-деформированного состояния бетонов, соответствующие их нижней и верхней границам области микротрещинообразования

Параметрические уровни процесса деформирования бетона определялись:

– соответствующие нижней границе области микротрещинообразования – уровнем напряжений осевого сжатия ( $\sigma/R_{пр}=R_T^0$ ), при котором скорость прохождения ультразвуковых волн через поперечное сечение образца достигала максимальной величины;

– соответствующие верхней границе области микротрещинообразования – уровнем напряжений осевого сжатия ( $\sigma/R_{пр}=R_T^V$ ), при котором величина

Прочностные характеристики областей напряженно-деформированного состояния бетона при положительной и отрицательной температуре  
 Strength characteristics of stress-strain state areas of concrete at positive and negative temperatures

В/Ц	$W_i, \%$	Характеристики бетона					
		$R_{пр}, \text{МПа}$		$R_T^0, \text{МПа}$		$R_T^V, \text{МПа}$	
		Температура бетона, °C					
		+20	-65	+20	-65	+20	-65
0,5	$W_1 = 3,3$	24,12	28,64	8,92	10,69	18,44	22,07
	$W_2 = 4,38$	22,07	35,5	8,63	14,12	17,26	28,44
	$W_3 = 5,06$	20,7	41,19	8,04	16,67	16,57	34,62
	$W_4 = 5,35$	20,2	38,8	8,24	15,3	15,98	29,22
0,4	$W_1 = 3,12$	28,64	33,73	10,98	12,85	22,36	26,77
	$W_2 = 4,05$	25,6	40,4	10,3	17,36	20	32,75
	$W_3 = 4,9$	24,32	46	9,8	17,85	19,22	37,56
	$W_4 = 5,11$	23,54	49,52	10,4	19,81	18,14	35,7
	$W_5 = 5,2$	23,34	33,34	10	16,67	18,24	22,75

Условные обозначения:  $R_{пр}$ ,  $R_T^0$ ,  $R_T^V$  – величины напряжений осевого сжатия, определяющие соответственно призменную прочность, нижнюю и верхнюю границы области микротрещинообразования бетона при указанной температуре испытания его под нагрузкой сжатия;  $W_i$  – массовое отношение влаги (влажность бетона)  $i$ -й группы водонасыщения.

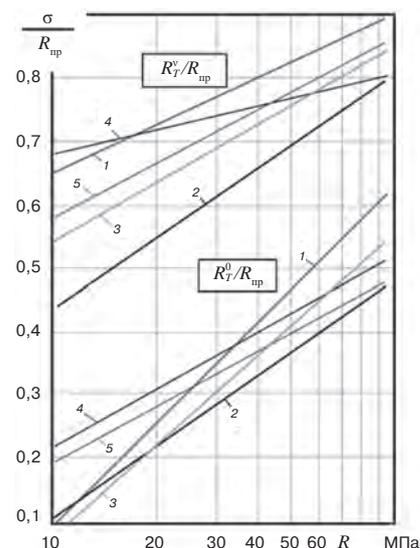


Рис. 1. Нижняя ( $R_T^0/R_{пр}$ ) и верхняя ( $R_T^V/R_{пр}$ ) границы области микротрещинообразования конструктивного легкого бетона и тяжелого бетона классов по прочности на осевое сжатие В30: 1 – бетон на пористом остеклованном шлаковом гравии; 2 – тяжелый бетон; 3 – керамзитобетон на пористом песке; 4 – керамзитобетон на кварцевом песке; 5 – бетон на безобжиговом зольном гравии и кварцевом песке  $R_T^V/R_{пр} = 0,525 \cdot \lg R_{пр} - 0,327$ ;  $R_T^0/R_{пр} = 0,239 \cdot \lg R_{пр} + 0,517$

Fig. 1. Lower ( $R_T^0/R_{пр}$ ) and upper ( $R_T^V/R_{пр}$ ) boundaries of the microcracking area of structural lightweight concrete and heavy concrete of axial compressive strength classes B30: 1 – concrete on porous vitrified slag gravel; 2 – normal weight concrete; 3 – expanded clay concrete on porous sand; 4 – expanded clay concrete on quartz sand; 5 – concrete on non-firing ash gravel and quartz sand

дифференциального коэффициента поперечной деформации бетона  $\Delta v = \Delta \epsilon_{\text{поп}} / \Delta \epsilon_{\text{прод}}$  (где  $\Delta \epsilon_{\text{поп}}$  – приращение поперечных деформаций бетонного образца-призмы, а  $\Delta \epsilon_{\text{прод}}$  – продольных деформаций на каждой ступени нагружения осевым сжатием) достигала значения 0,5.

Результаты проведенных испытаний, представленные в таблице, свидетельствуют, что замораживание бетона исследуемых составов с определенным диапазоном его влажности приводит к увеличению исследуемых прочностных характеристик областей напряженно-деформированного состояния бетона.

Так, в бетоне, испытываемом под нагрузкой сжатия в замороженном состоянии, по сравнению с бетоном, испытываемым при положительной температуре, наблюдается следующее.

Увеличиваются напряжения, соответствующие нижней и верхней границам области микротрещинообразования бетона  $\sigma_1 = R_T^0$  и  $\sigma_2 = R_T^V$ , тем в большей степени, чем выше его исходная (к началу испытаний под нагрузкой) влажность в диапазоне  $W_1 - W_3$  для В/Ц=0,5 и в диапазоне  $W_1 - W_4$  для В/Ц=0,4. При значениях влажности  $W_4$  (для В/Ц=0,5) и  $W_5$  (для В/Ц=0,4), которые превышают предельную величину  $W_{пр}$ , соответствующую предельной степени водонасыщения пор и капилляров бетона  $\omega_B = 90\%$ , наблюдается обратная картина: величины  $R_T^0$  и  $R_T^V$

резко снижаются, особенно величина  $R_T^V$ . Обусловлено это превышением степени водонасыщения бетона  $\omega_B$  предельной величины ( $\omega_B = 90\%$ ), когда при фазовом переходе воды в лед развивается избыточно высокое гидравлическое давление [8–10]. При этом происходит образование микротрещин в стенках этих пор и капилляров, приводящих к их дальнейшему разрушению. Механизм такого типа морозного разрушения бетона описан в работе [10], в которой впервые предложен метод расчета железобетонных конструкций повышенной морозостойкости.

Если принять во внимание данные работ [2, 7–9], посвященных исследованию механизма разрушения бетона под нагрузкой, то наблюдаемое изменение при его замораживании прочностных характеристик областей напряженно-деформированного состояния бетона, в том числе в сравнении с изменением традиционной призменной прочности, по существу, может свидетельствовать об отдалении в сторону более высоких напряжений сжатия, характеризующих:

– начало интенсивного развития микротрещин на поверхности раздела цементно-песчаного камня и крупного заполнителя, в частности так называемую зону сцепления этих компонентов бетона, а именно «микротрещин зоны сцепления» [2, 7], или «bond cracks» [8, 9];

– в еще большей степени – начало развития микротрещин непосредственно в цементно-песчаном камне, соединения с последними «микротрещинами зоны сцепления» и образования таким образом сети «непрерывных трещин» [2], или «continuous cracks» [8, 9], переходящих в так называемые магистральные трещины (по Ю.В. Зайцеву [7]);

– момент, когда сеть «непрерывных микротрещин» охватывает полностью всю структуру бетона и в результате происходит потеря его несущей способности.

По существу, последнее может означать, что условный путь от интенсивного развития «микротрещин зоны сцепления» до соединения их с микротрещинами в цементно-песчаном камне и образования таким образом сети «непрерывных трещин» увеличивается.

Следует заметить, что увеличение указанных прочностных характеристик замораживаемого бетона наблюдается тем в большей степени, чем не только выше его влажность при условии  $W < W_{пр}$ , но и чем меньше величина В/Ц, способствующая образованию более благоприятной дифференциальной пористости цементного камня, а именно с меньшим объемом пор-капилляров и соответственно с большим объемом замкнутых пор геля, причем меньшего диа-

метра в сравнении со структурой цементно-песчаного камня бетона с более высоким В/Ц.

Влияние фактора водоцементного отношения на изменение всех исследованных прочностных и деформативных характеристик замораживаемого бетона с влажностью больше предельной выражено в существенно меньшей степени, чем это наблюдается при замораживании бетона с влажностью меньше предельной.

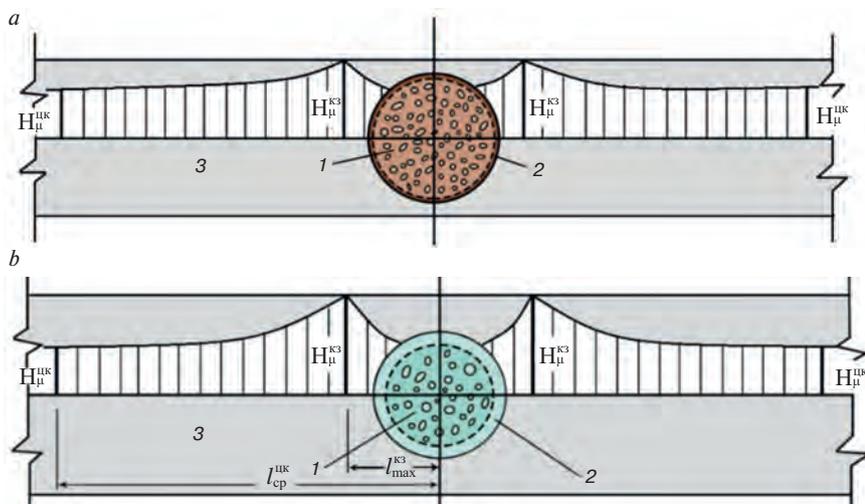
## 2. Границы области микротрещинообразования конструкционного легкого бетона в сравнении с равнопрочным тяжелым бетоном

Лабораторией легких бетонов и конструкций НИИЖБ под руководством В.Н. Ярмаковского выполнены натурные исследования по определению морозостойкости конструкционных легких бетонов на пористых заполнителях различных видов (в том числе изготавливаемых на основе продуктов переработки многотоннажных техногенных образований металлургии и тепловой энергетики) в сравнении с равнопрочными тяжелыми бетонами на натурном стенде в приливной зоне Кольского залива Баренцева моря не только в исходном состоянии на образцах-кубах в соответствии с действующими на тот период времени стандартами (ГОСТ 10060–62, затем ГОСТ 10060–76), но и по результатам испытаний таких бетонов в на-

пряженном состоянии различного вида: на образцах-балках длиной от 1,5 до 2 м, нагруженных на пружинных установках поперечной силой различной величины, а также на образцах предварительно напряженных пучковой арматурой балок длиной от 1 до 1,5 м – центральное (осевое) обжатие от 0,2 до 0,5  $R_{пр}$ . Результаты этих исследований отражены в соответствующей статье их авторов [11].

Оптимальная (с позиций морозостойкости) степень центрального обжатия ( $\sigma_{об}$ ) легкого бетона в балке с пучковой арматурой составляла 0,4–0,5  $R$ , тогда как в случае изготовления балки из тяжелого бетона величина  $\sigma_{об}$  не превышала 0,3–0,35. Это можно объяснить преимуществом КЛБ в сравнении с равнопрочным тяжелым бетоном в более высоком уровне нижней границы области микротрещинообразования  $R_T^0/R_{пр}$  или области развития обратимых упругих деформаций.

Наблюдается наиболее высокая разница в величинах  $R_T^0/R_{пр}$  при использовании в КЛБ в качестве крупного заполнителя остеклованного пористого шлакового гравия (ПШГ). Объясняется это,



**Рис. 2.** Эпюры средних значений микротвердости ( $H_{\mu}$ ) затвердевшего ( $\tau=28$  сут НВТ) цементно-песчаного камня ( $H_{\mu}^{ик}$ ) – затвердевшей растворной части легкого бетона класса по прочности при сжатии В50 и его контактной зоны ( $H_{\mu}^{к3}$ ) с зерном крупного пористого заполнителя (в данном случае пористого гравия из расплавов доменного шлака, переработанных в соответствии с авторской технологией):  $l_{max}^{к3}$  – расстояние от центра зерна крупного пористого заполнителя до усредненной максимальной ординаты эпюры микротвердости контактной зоны;  $l_{cp}^{ик}$  – то же, до усредненной ординаты условной центральной оси фрагмента растворной части ЦК бетона между зернами крупного заполнителя: *a* – условный фрагмент бетона на керамзитовом гравии (КГ): 1 – зерно КГ; 2 – оболочка КГ – обожженной керамики; 3 – цементно-песчаный камень (матрица).  $H_{\mu}^{к3} = 12550$  МПа.  $H_{\mu}^{ик} = 8600$  МПа; *b* – условный фрагмент бетона на пористом шлаковом гравии (ПШГ): 1 – зерно ПШГ; 2 – стекловидная оболочка ПШГ; 3 – цементно-песчаный камень (матрица).  $H_{\mu}^{к3} = 15800$  МПа.  $H_{\mu}^{ик} = 8800$  МПа

**Fig. 2.** Plots of the average values of microhardness ( $H_{\mu}$ ) of the hardened ( $\tau=28$  days of normal-humidity hardening) cement-sandstone ( $H_{\mu}^{ик}$ ) – the hardened mortar part of light concrete of the compressive strength class B50 and its contact zone ( $H_{\mu}^{к3}$ ) with a grain of a large porous aggregate:  $l_{max}^{к3}$  – is the distance from the center of the coarse aggregate grain to the averaged maximum ordinate of the diagram of the microhardness of the contact zone;  $l_{cp}^{ик}$  – the same, up to the averaged ordinate of the conditional central axis of the fragment of the mortar part of the concrete cement stone between the grains of coarse aggregate: *a* – Conditional fragment of concrete on expanded clay gravel (CG): 1 – CG grain; 2 – shell CG – fired ceramics; 3 – cement-sandstone (matrix).  $H_{\mu}^{к3} = 12550$  МПа.  $H_{\mu}^{ик} = 8600$  МПа; *b* – Conditional fragment of concrete on porous slag gravel (PSG): 1 – grain of PSG; 2 – vitreous shell of PSG; 3 – cement-sandstone (matrix).  $H_{\mu}^{к3} = 15800$  МПа.  $H_{\mu}^{ик} = 8800$  МПа

как будет показано далее, более плотной контактной зоной зерна ПШГ с цементным камнем в сравнении с использованием керамзитового гравия (рис. 2).

В ходе исследований, выполненных в лаборатории энергоресурсосберегающих легких бетонов и конструкций НИИСФ под руководством В.Н. Ярмаковского и при участии младшего научного сотрудника НИИСФ Д.З. Кадиева, на срезах образцов-балочек  $4 \times 4 \times 16$  см из КЛБ класса по прочности В40 определялась микротвердость в зоне, близкой к контакту зерна крупного пористого заполнителя и растворной части бетона на мелком плотном заполнителе (кварцевом песке с  $M_k=2,5$ ). При изготовлении КЛБ использовались два вида крупного пористого заполнителя со средним диаметром зерна  $d=20$  мм:

– традиционный керамзитовый гравий марки по насыпной плотности М500;

– пористый гравий из поризованных расплавов доменных шлаков со стекловидной оболочкой также марки по насыпной плотности М500, изготавливаемый по запатентованной технологии [12]<sup>1</sup>, разработанной авторским коллективом в составе руководителя и специалистов шлакоперерабатывающего цеха Новолипецкого металлургического комбината (НЛМК), а также Я.Ш. Школьника и В.Н. Ярмаковского [13].

Определялась величина микротвердости оболочки зерен крупного заполнителя контактной зоны и растворной части на удалении  $3d$  от оболочки зерна заполнителя. При этом использовалась алмазная пирамидка – микротвердомер «ПМТ-3». Результаты исследований в виде эпюр средних значений микротвердости указанных компонентов КЛБ приведены на рис. 2.

Рассмотрение эпюр показывает: микротвердость затвердевшей растворной части бетона (цементно-песчаного камня) в зоне, близкой к оболочке пористого зерна крупного заполнителя ( $H_{\mu}^{K3}$ ), и в средней зоне растворной части ( $H_{\mu}^{CK}$ ) составляет:

– в случае использования керамзитового гравия ООО «Ульяновский керамзитовый завод» марки по насыпной плотности М500 –  $H_{\mu}^{K3}=12550$  МПа;  $H_{\mu}^{CK}=8600$  МПа;

– в случае использования остеклованного пористого шлакового гравия по технологии НЛМК (см. выше) –  $H_{\mu}^{K3}=15800$  МПа;  $H_{\mu}^{CK}=8800$  МПа.

Большая величина микротвердости контактной зоны растворной части бетона  $H_{\mu}^{K3}$  в сравнении с аналогичной характеристикой цементного камня на удалении от контактной зоны  $H_{\mu}^{CK}$  обусловлена меньшим значением  $V_{ист}/Ц$  в этой зоне в сравнении с  $V_3/Ц$  растворной части за счет поглощения пористым заполнителем части воды затвердения  $V_3/Ц$ .

#### Список литературы

1. Москвин В.М., Иванов Ф.М., Алексеев С.Н., Гузев Е.А. Коррозия бетона и железобетона, методы их защиты. М.: Стройиздат, 1980. 536 с.

*Преимущество в прочности контактной зоны остеклованного пористого шлакового гравия с растворной частью бетона в сравнении с вариантом использования керамзитового гравия обусловлено новообразованиями в этой зоне в результате химического взаимодействия стеклофазы оболочки ШПГ и минералов цементного камня растворной части бетона.*

Действием этого безусловно структурирующего фактора можно объяснить и отмеченный выше (рис. 1) значимо более высокий уровень нижней границы области микротрещинообразования  $R_T^0/R_{пр}$  конструкционного легкого бетона, изготовляемого на основе остеклованного пористого шлакового гравия в сравнении с равнопрочным бетоном на основе керамзитового гравия.

*Таким образом, по существу, впервые в отечественной, а потом, как выяснилось, даже в мировой практике исследований определялось влияние напряженного состояния, причем различного вида, на морозостойкость бетона вообще и в натурных условиях в частности. Результаты этих исследований были доложены в пленарном докладе В.Н. Ярмаковского и Т.У. Брэннера [14] на III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону «Бетон и железобетон, взгляд в будущее» (организаторы: RILEM, Российская академия наук, fib, члены RILEM: Ш.К. Торпицев (Казахстан), В.Н. Ярмаковский (Россия)).*

#### Заключение

Использование в расчетах железобетонных конструкций по предельным состояниям полученных в результате вышеприведенных исследований характеристик – параметрических уровней областей напряженно-деформированного состояния равнопрочных тяжелого и конструкционного легкого бетонов, в частности нижней и верхней границ области микротрещинообразования этих бетонов под нагрузкой осевого сжатия в условиях воздействия низкой отрицательной температуры, а также влияния при этом структурно-технологических факторов позволяет проектировать такие конструкции, предназначенные для строительства в суровых климатических условиях, с учетом необходимости обеспечения их долговечности и надежности в эксплуатации в таких условиях.

#### References

1. Moskvin V.M., Ivanov F.M., Alekseev S.N., Guzev E.A. Korroziya betona i zhelezobetona, metody ikh zashchity [Corrosion of concrete and reinforced concrete, methods of their protection]. Moscow: Stroyizdat. 1980. 536 p.
2. Moskvin V.M., Savitskii A.N., Yarmakovskii V.M. Betony dlya stroitel'stva v surovyykh klimaticheskikh usloviyakh [Concrete for construction in harsh climatic conditions]. Leningrad: Stroyizdat. 1973. 169 p.

<sup>1</sup> Патент [12] экспонировался на Международном салоне изобретений и патентов «Архимед-2001» и награжден серебряной медалью.

2. Москвин В.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.М. Бетоны для строительства в суровых климатических условиях. Л.: Стройиздат, 1973. 169 с.
3. Горчаков Г.И., Капкин М.М., Скрамтаев Б.Г. Повышение морозостойкости бетона в конструкциях промышленных и гидротехнических сооружений. М.: Стройиздат, 1965. 270 с.
4. Берг О.Я. О предельном состоянии железобетонных конструкций по долговечности бетона // *Бетон и железобетон*. 1964. № 11. С. 4–10.
5. Берг О.Я., Щербаков Е.Н., Писанко Г.Н. Высокопрочный бетон. М.: Стройиздат, 1971. 208 с.
6. Гузеев Е.А., Леонович С.Н., Пирадов К.А. Механика разрушения бетона: вопросы теории и практики. Брест: БПИ, 1999. 215 с.
7. Зайцев Ю.В., Леонович С.Н. Прочность и долговечность конструкционных материалов с трещиной. Минск: БНТУ, 2010. 362 с.
8. Hsu T.C., Slate F.O., Sturman G.M., Winter G. Microcracking of plain concrete and the shape of stress-stain curve // *JACI*. 1963. Vol. 60. No. 2.
9. Shah S.P., Chandra S. Critical stress, volume change and microcracking of concrete // *JACI*. 1968. Vol. 65. No. 9.
10. Ярмаковский В.Н. О методе расчета железобетонных конструкций повышенной морозостойкости. *Сборник трудов НИИЖБ «Повышение стойкости бетона и железобетона при воздействии агрессивных сред» / Под ред. проф. В.М. Москвина*. М.: Стройиздат, 1975. С. 34–38.
11. Ярмаковский В.Н., Карпенко Н.И. Особенности технологии, структуры и механики высокопрочных конструкционных легких бетонов для морских гидротехнических сооружений в условиях Арктического континентального шельфа. *Труды Международной конференции «Полярная механика-2016»*. Владивосток. 2016. С. 24–32.
12. Патент РФ 2087438. *Установка для производства остеклованного пористого гравия*. Панченко В.Ф., Франценюк И.В. (НЛМК), Школьник Я.Ш., Ярмаковский В.Н., Каданцев Н.В., Коротаев А.С. (НЛМК). Заявл. 26.06.1996.
13. Iarmakovski V.N. New types of the porous slag aggregates and lightweight concretes and their application. *International Symposium on structural lightweight aggregate concrete. June 1995. Proceedings edited by Ivar Holland. Sandefjord. Norway. 1995*, pp. 363–373.
14. Ярмаковский В.Н., Брэмнер Т.У. Легкие бетоны. Настоящее и будущее: *Сборник трудов III Всероссийской (II Международной) конференции «Бетон и железобетон – взгляд в будущее»*. Т. 1. Пленарные доклады. С. 455–465.
3. Gorchakov G.I., Kapkin M.M., Skramtaev B.G. Povyshenie morozostoikosti betona v konstruktivnykh promyshlennykh i gidrotekhnicheskikh sooruzhenii [Increasing the frost resistance of concrete in the structures of industrial and hydraulic structures]. Moscow: Stroyizdat. 1965. 270 p.
4. Berg O.Ya. On the limiting state of reinforced concrete structures for the durability of concrete. *Beton i Zhelezobeton* [Concrete and Reinforced Concrete]. 1964. No. 11, pp. 4–10.
5. Berg O.Ya., Shcherbakov E.N., Pisanko G.N. Vysokoprochnyi beton [High strength concrete]. Moscow: Stroyizdat. 1971. 208 p.
6. Guzeev E.A., Leonovich S.N., Piradov K.A. Mekhanika razrusheniya betona: voprosy teorii i praktiki [Fracture Mechanics of Concrete]. Brest: BPI. 1999. 215 p.
7. Zaitsev Yu.V., Leonovich S.N. Prochnost' i dolgovечnost' konstruktivnykh materialov s treshchينوi [Strength and durability of structural materials with a crack]. Minsk: BNTU. 2010. 362 p.
8. Hsu T.C., Slate F.O., Sturman G.M., Winter G. Microcracking of plain concrete and the shape of stress-stain curve. *JACI*. 1963. Vol. 60. No. 2.
9. Shah S.P., Chandra S. Critical stress, volume change and microcracking of concrete. *JACI*. 1963. Vol. 65. No. 9.
10. Yarmakovskiy V.N. On the calculation method for reinforced concrete structures with increased frost resistance. *Collection of Proceedings of NIIZHB «Improving the resistance of concrete and reinforced concrete under the influence of aggressive environments» edited by Professor V.M. Moskvina*. Moscow: Stroyizdat. 1975, pp. 34–38. (In Russian).
11. Yarmakovskiy V.N., Karpenko N.I. Features of technology, structure and mechanics of high-strength structural lightweight concrete for marine hydraulic structures in the conditions of the Arctic continental shelf. *Proceedings of the International Conference «Polar Mechanics-2016»*. Vladivostok. 2016, pp. 24–32. (In Russian).
12. Patent RF 2087438. *Ustanovka dlya proizvodstva osteklovannogo poristogo graviya* [Installation for the production of vitrified porous gravel]. Panchenko V.F., Frantsenyuk I.V., Denisov G.A., Shkolnik Ya.Sh., Yarmakovskiy V.N., Kadantsev N.V., Korotaev A.S. Declared. 26.06.1996. (In Russian).
13. Iarmakovski V.N. New types of the porous slag aggregates and lightweight concretes and their application. *International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete. June 1995. Proceedings edited by Ivar Holland. Sandefjord. Norway. 1995*, pp. 363–373.
14. Yarmakovskiy V.N., Bremner T.W. Lightweight aggregate concrete. Present and Future. *Proceedings of the III Russian (II International) Conference «Concrete and Reinforced Concrete – A Look into the Future» (organizers: RILEM, Russian Academy of Sciences, FIB)*. Vol. 1. Plenary reports, pp. 455–465. (In Russian).

УДК 666.972

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-27-32>

И.В. БЕССОНОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (bessonoviv@mail.ru);

А.Д. ЖУКОВ<sup>2</sup>, канд. техн. наук (lj211@yandex.ru),

Р.С. ПОУДЕЛ<sup>2</sup>, аспирант (unlessmoney00@gmail.com),

А.А. МАТОРИН<sup>2</sup>, магистр (1905matorin@gmail.com)

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш, 26)

## Влияние структуры и состава на свойства бетонного полотна

Бетонное полотно представляет собой гибкую ткань, пропитанную смесью на основе модифицированного гидравлического вяжущего, которая затвердевает при гидратации с образованием тонкого, прочного, водонепроницаемого и огнеупорного бетонного слоя. Используется для борьбы с эрозией, защиты откосов, укрепления насыпи и борьбы с сорняками. Текстильная архитектура считается трехмерной, когда она включает в себя объем, независимо от того, сколько систем пряжи и архитектур ткани использовано. Целью исследований явилось изучение влияния состава минеральной композиции и структуры трехмерной волокнистой матрицы на свойства бетонного полотна. Исследования проводили на трехмерных волокнистых матрицах с различным геометрическим узором. Приведен обзор вариантов по формированию геометрии расположения и видов волокон, используемых при создании поверхностных слоев бетонного полотна и объемных армирующих структур. Рассмотрены вопросы зависимости эксплуатационных характеристик бетонного полотна от свойств армирующих компонентов и мелкозернистого модифицированного бетона как его основы. Осуществлена оптимизация полученных результатов и разработана номограмма, позволяющая решать практическую задачу и осуществлять подбор основных компонентов мелкозернистого бетона.

**Ключевые слова:** бетонное полотно, геометрические узоры, волокнистая матрица, плетение волокна, текстильная геометрия, прочностные свойства.

**Для цитирования:** Бессонов И.В., Жуков А.Д., Поудел Р.С., Маторин А.А. Влияние структуры и состава на свойства бетонного полотна // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 27–32. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-27-32>

I.V. BESSONOV<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (bessonoviv@mail.ru);

A.D. ZHUKOV<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (lj211@yandex.ru),

R.S. POUDEL<sup>2</sup>, PhD Student, Master (unlessmoney00@gmail.com),

A.A. MATORIN<sup>2</sup>, Master Student (1905matorin@gmail.com)

<sup>1</sup> Research Institute of Building Physics Russian Academy Architecture and Construction sciences (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

<sup>2</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Influence of Structure and Composition on the Properties of the Concrete Canvas

A concrete canvas is a flexible fabric impregnated with a modified hydraulic binder mixture that hardens upon hydration to form a thin, strong, waterproof and refractory concrete layer. Used for erosion control, slope protection, embankment reinforcement and weed control. A textile architecture is considered three-dimensional when it includes volume, no matter how many yarn systems and fabric architectures are used. The purpose of the research presented in the article is to study the influence of the composition of the mineral composition and the structure of the three-dimensional fibrous matrix on the properties of the concrete sheet. The studies were carried out on three-dimensional fibrous matrices with various geometric patterns. The article provides a broad explanation of how the geometry of the arrangement was created, along with information on the kinds of fibers used to create the concrete canvas' surface layers and its volumetric frameworks. The issues of producing the qualities of a concrete canvas are taken into account in accordance with the features of reinforcing elements and the properties of fine-grained modified concrete, which acts as the foundation of a concrete canvas. The results have been optimized and a nomogram is created to solve the prognosis problem and the primary components of fine-grained concrete was chosen.

**Keywords:** concrete canvas, geometrical patterns, fibrous matrix, fiber weaving, textile geometry, strength properties.

**For citation:** Bessonov I.V., Zhukov A.D., Poudel R.S., Matorin A.A. Influence of structure and composition on the properties of the concrete canvas. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 27–32. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-27-32>

Бетонное полотно представляет собой гибкий тканевый материал, пропитанный сухими смесями на основе портландцемента, модифицирующих добавок и мягких волокон, который затвердевает и образует при воздействии воды прочное тонкое покрытие из бетона, устойчивое к огню, воде и механическим нагрузкам [1–3]. Бетонное полотно можно рассматривать как одну из разновидностей текстильного армированного бетона (TRC) – композитного материала на основе модифицированного гидравлического вяжущего, мелкозернистого наполнителя,

армирующего компонента (дисперсно-распределенного или укладываемого в виде сеток). Изделия из текстиль-бетона обладают высокой несущей способностью, могут изготавливаться меньшей толщиной, коррозионной стойкостью, низкой водопроницаемостью [4, 5].

Использование текстиля в качестве армирования позволяет значительно увеличить прочность бетона при растяжении и при изгибе. Тем не менее прочность при растяжении, пластичность и характер расстрескивания TRC определяются не только его ком-

понентами, но и связью между армированием и матрицей, на которую влияет геометрия ткани [6, 7]. Также на свойства текстиль-бетона и его разновидности бетонного полотна оказывают значительное влияние свойства мелкозернистого бетона, формирующего основу бетонного полотна [8, 9].

Качество, объем и расположение используемых волокнистых материалов оказывают существенное влияние на характеристики композитного текстильного армированного бетона. В результате волокнистый материал и его текстильный состав должны отвечать целому ряду требований. Помимо высокой прочности волокна и относительного удлинения при разрыве, предпосылками эффективного армирования является модуль упругости, значительно превышающий модуль упругости мелкозернистой бетонной матрицы. На рис. 1 показано несколько видов композиционных нитей с небольшим структурным удлинением, которые являются предпочтительными для армирования материала.

3D-текстиль (трехмерный) — это текстиль с тремя направлениями в архитектуре пряжи и текстильной структуре, изготовленный одноэтапным или многоэтапным способами. Трехмерная волокнистая матрица с гидрофильной верхней поверхностью и нижней подложка, принятая в эксперименте, проиллюстрированы на рис. 2.

Текстильная структура (архитектура или геометрия пряжи) — это расположение пряжи на уровне армирования минеральной матрицы. Архитектура пряжи определяется как трехмерная, если для создания ткани используются три или более системы пряжи или основные ориентации пряжи, что позволяет прямоугольной системе координат вписываться в ориентацию таким образом, что одна координационная ось находится под прямым углом к каждой из ориентаций пряжи.

Текстильная геометрия описывается как трехмерная, если она образует и/или охватывает объем, не зависящий от количества разработанных систем пряжи и архитектуры пряжи. Формирование текстильной геометрии может осуществляться одним из двух методов. Во-первых, это одноэтапный метод, при котором производство текстильных изделий почти сетчатой формы реализуется за одну процедуру (например, трехмерное основовязальное, трехмерное плетение и т. д.). Во-вторых, это многоэтапный процесс, при котором производственные процедуры используются для создания практически текстильных изделий сетчатой формы (например, основовязальные и трансформирующиеся или ткацкие и швейные и т. д.).

Форма, близкая к сетчатой, — текстильная архитектура с профилем, аналогичным профилю конечного продукта. Этот термин обычно используется в контексте волокна для армированных материалов, таких как FRP или текстильный армированный бетон [10–12]. На рис. 2 показана структура типичного 3D-армирования прокладочной тканью.

## Методы и материалы

Модели рассматривались как трехмерные матрицы с разными геометрическими узорами. В качестве верхней гидрофильной поверхности выбран долговечный и чрезвычайно прочный материал — лен плотностью 490 г/м<sup>2</sup>. Структура ткани льняного текстиля представляет собой двухслойное атласное переплетение жгута, которое обладает отличной способностью поглощать воду, но так же хорошо удерживает сухую бетонную смесь. В химическом составе льна содержится композиция из целлюлозы (92%), гемицеллюлозы (2%), лигнина (4%) и других веществ (2%).

В качестве нижней водонепроницаемой подложки выбран геотекстиль UNIPLEX GEO плотностью 270 кг/м<sup>2</sup>, представляющий собой термофиксированное нетканое полотно (геотекстиль) с такими свойствами, как водопоглощение, низкая проницаемость. Плотный укрывной материал выдерживает повышенные нагрузки, не выделяет вредных веществ, не гниет, не боится плесени, грибка, насекомых, изготовлен из полимерного волокна.

Трехмерная матрица выполнена из гибридного волокна и представляет собой скрученное филламентное волокно, неоднородно перемешанное в поперечном сечении пряжи. Щелочестойкое, углеродостойкое и арамидостойкое химическое волокно, используемое в данном исследовании, представляет собой 100% полипропилен (диаметром 1,3 мм). Изучались две модели (табл. 1), обозначенные как 3D-волоконистая матрица (A1): геометрический рисунок, соответствующий трехмерной прямоугольной призме или структуре оригами и 3D-волоконистая матричная модель (B1): геометрический рисунок, соответствующий трехмерной прямоугольной призме поперечного сечения.

Размер образцов разных моделей 350×70×20 мм. Испытания на растяжение трехмерных прокладочных тканей проводились отдельно в направлениях основы и утка с учетом анизотропии. Перед испытаниями все образцы выдерживали при температуре 20±2°C и относительной влажности 65±4% в течение 12 ч.

При решении технологических задач и задач, связанных с подбором рецептуры строительных материалов, математическое планирование эксперимента является важным инструментом, обеспечивающим принятие решений по оптимизации состава. Обработку результатов эксперимента и математическое моделирование осуществляют с помощью специальных программ для ЭВМ. Аналитическая оптимизация осуществляется по методике, разработанной в МГСУ [13–15].

В качестве варьируемых факторов приняты расходы портландцемента, тонкомолотых отходов, пластификатора и армирующего компонента. Расход воды устанавливается в соответствии с В/Ц в зависимости от требуемой удобоукладываемости смеси и не является независимым фактором.

Функциями отклика приняты прочность бетона при сжатии ( $Y_1$ ), прочность при изгибе ( $Y_2$ ) и его

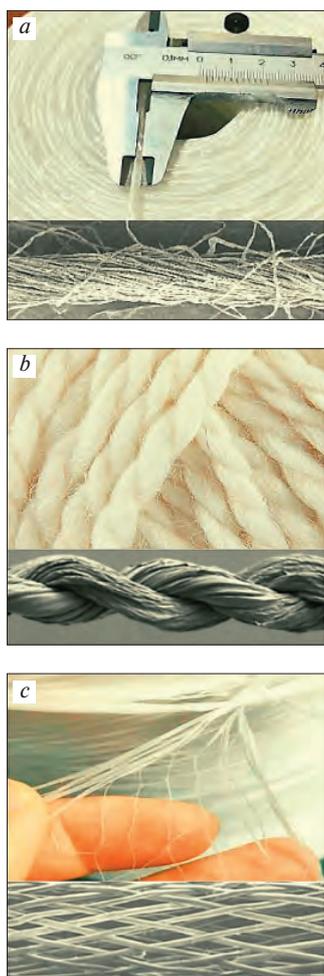


Рис. 1. Конструкция нити: а – филаментная нить; б – крученая двухпрядная нить; с – фибриллированная или сетчатая нить  
 Fig. 1. Yarn construction: a – filament yarn; b – bundled yarn; c – foil fibrillated or fish net yarn

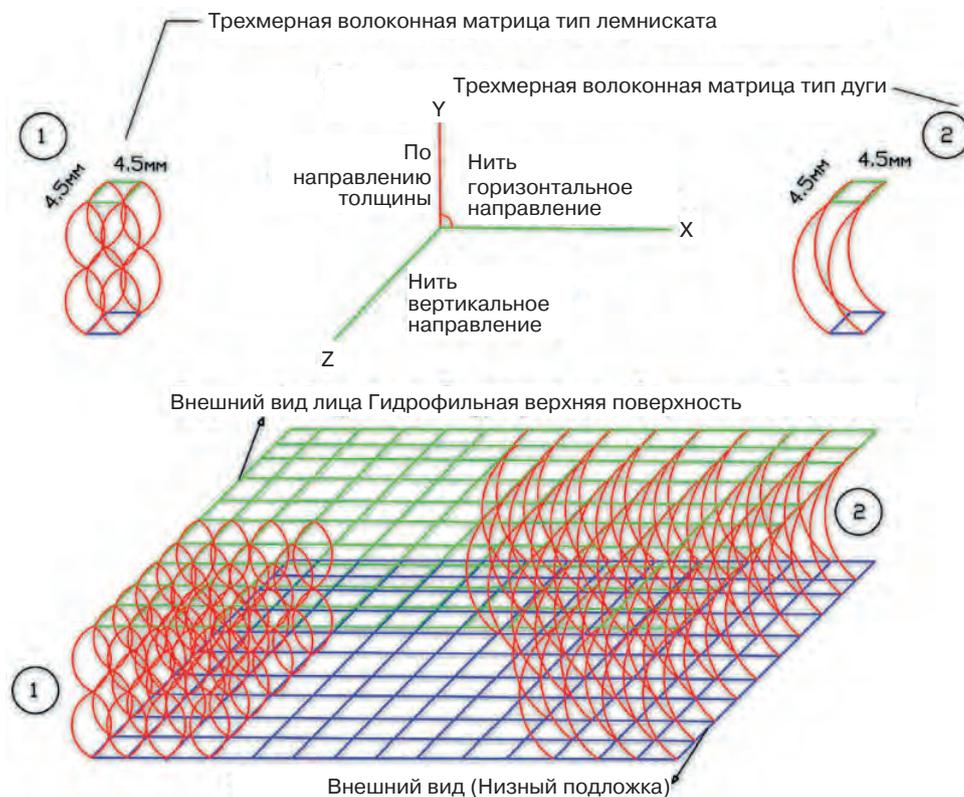


Рис. 2. Структура типичного 3D-армирования прокладочной тканью (бетонное полотно)  
 Fig. 2. Structure of a typical 3D spacer fabric reinforcement (concrete canvas)

Таблица 1  
 Table 1

средняя плотность ( $\gamma_3$ ). Условия эксперимента представлены в табл. 2.

Приготовление мелкозернистой бетонной смеси как основы бетонного полотна производили в бетономешалке. Сначала часть воды затворения в количестве 20–30% смешивали с пластификатором в количестве 0,5–0,75%, после чего добавляли тонкоизмельченные отходы переработки строительного лома с одновременным перемешиванием в течение 30 с. Затем в бетономешалку подавали заполнители и перемешивали смесь в течение 60 с. После чего подавали цемент и оставшуюся часть воды и перемешивали бетонную смесь в течение 90 с.

### Результаты и обсуждение

Анализ связи свойств и структуры армирующего компонента бетонного полотна представлен на рис. 4 и 5.

Для типа модель (A1) (рис. 4) два отдельных поверхностных слоя (а, с) провязываются на передней и задней игольницах, а затем соединяются соединительным слоем (b) вертикально. Для типа Б1 четыре отдельных слоя (а, b, с, d) вяжут на передней и задней игольницах (например, слои а и b на передней игольнице и слои с и d на задней игольнице), и, наконец, средние соединительные слои (b, d) соединя-

### Целевые 3D-модели Targeted 3D-models

3D-волоконная матричная модель	
Вид сбоку (a)	Вид спереди (b)
Внешний вид (c)	Нижняя подложка (d)
Модель А1	
1.	
Модель Б1	
2.	



Рис. 3. Образцы мелкозернистого бетона как основы бетонного полотна

Fig. 3. Samples of fine-grained concrete as the basis of a concrete canvas

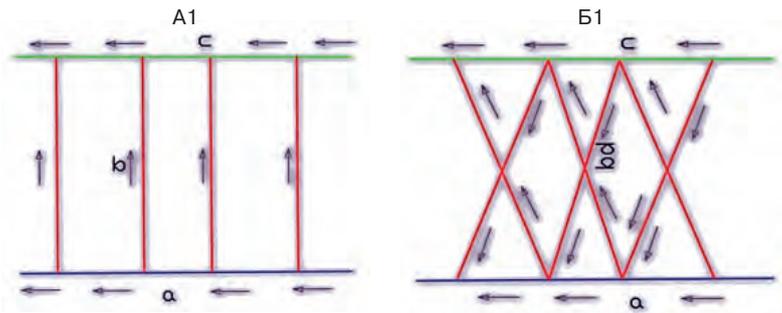


Рис. 4. Схематичное вязание фаз для снижения напряжений растяжения и изгиба  
Fig. 4. Schematic knitting of phases in order to reduce tensile and bending stresses

ются между собой, а затем с плоскими слоями (а, с) соответственно по очереди, сохраняя постоянную длину.

Специально разработанный тип дистанционирующей ткани (А1) пригоден против сжимающих, растягивающих и изгибающих напряжений, а также для поглощения энергии при ударе, тогда как тип дистанционирующей ткани (Б1) очень эффективен против сдвиговых и изгибающих напряжений в дополнение к поглощению энергии при ударе.

Анализ математических полиномов показывает, что на прочность при сжатии ( $Y_1$ ) наибольшее влияние оказывает расход портландцемента (коэффициент при  $X_1$ ); установлено наличие совместного эффекта от расхода портландцемента и модификатора (коэффициент при  $X_1X_2$ ). Вероятно, имеет место синергетический эффект. Влияние расхода армирующего компонента неоднозначно (коэффициенты при  $X_1$  и  $X_1^2$ ): при увеличении расхода более некоторого оптимального значения происходит снижение прочности образцов, что, видимо, связано с комкованием армирующего компонента при больших его расходах. Величина оптимума будет определена в процессе аналитической оптимизации.

Таблица 2  
Table 2

Условия эксперимента по оптимизации состава модифицированного бетона как основы бетонного полотна

Experimental conditions for optimizing the composition of modified concrete as the basis of a concrete canvas

Фактор	Символ $X_i$	Среднее значение фактора, $\bar{x}_i$	Интервал варьирования, $\delta x_i$	Значения фактора на уровнях	
				-1	+1
Расход вяжущего ( $p_B$ ), кг/м <sup>3</sup>	$X_1$	440	40	400	480
Расход пластификатора ( $p_n$ ), % к расходу воды	$X_2$	0,6	0,2	0,4	0,8
Расход армирующего компонента ( $p_a$ ), кг/м <sup>3</sup>	$X_3$	3,5	1,5	2	5

Прочность при изгибе ( $Y_2$ ) в наибольшей степени зависит от содержания армирующего компонента; это влияние монотонно снижается при увеличении его расхода сверх оптимальных значений (коэффициенты при  $X_1$  и  $X_1^2$ ). Средняя плотность мелкозернистого бетона ( $Y_3$ ) зависит от варьируемых факторов незначительно, но полученные результаты позволяют зафиксировать ее рост при увеличении расхода всех трех факторов.

Полученные полиномы в табл. 3 (1, 2, 3) являются как моделями, описывающими свойства мелкозернистого бетона, так и алгебраическими функциями нескольких переменных, к которым применимы методы математического анализа. Во-первых, путем дифференцирования функции (1) по  $X_3$  определяем оптимальное значение расхода армирующего компонента (как в формализованном, так и в натуральном виде). Во-вторых, полученное оптимальное значение в формализованном виде подставляем в полиномы (1, 2 и 3), решаем их и получаем оптимизированные по  $X_3$  функции. Осуществляем графическую интерпретацию полученных расчетным путем функций. Определяем оптимальное значение  $X_3$  в формализованном виде:

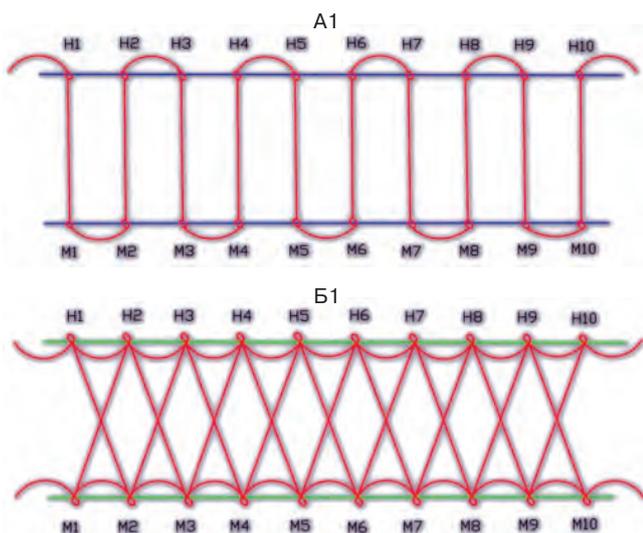


Рис. 5. Этапы вязания и приемы вязки (А1) и (Б1) с интегрированными армирующими уточными нитями в плоский и соединительный слой

Fig. 5. Knitting steps and knitting techniques (A1) and (B1) with integrated reinforcing weft threads in flat and connecting layers

Таблица 3  
Table 3

В результате активного эксперимента получены следующие математические модели (полиномы)  
As a result of the active experiment, the following mathematical models (polynomials) were obtained

Для прочности при сжатии	$Y_1=36,1+3,6X_1+1,5X_2+1,9X_3+1,2X_1X_2-1,0X_3^2$ (1)
Для прочности при изгибе	$Y_2=16,1+1,2X_1+1,1X_2+3,9X_3+0,8X_1X_2-0,8X_3^2$ (2)
Для средней плотности	$Y_3=1682+46X_1+24X_2+16X_3+19X_1X_2$ (3)

 Таблица 4  
Table 4

Выполнение оптимизации алгебраических полиномов из (1–3, табл. 3)  
Performing optimization of algebraic polynomials (1–3, table 3)

Для прочности при сжатии	$Y_1=37+3,6X_1+1,5X_2+1,2X_1X_2$ (3)
Для прочности при изгибе	$Y_2=19,1+1,2X_1+1,1X_2+0,8X_1X_2$ (4)
Для средней плотности	$Y_3=1696+46X_1+24X_2+19X_1X_2$ (5)

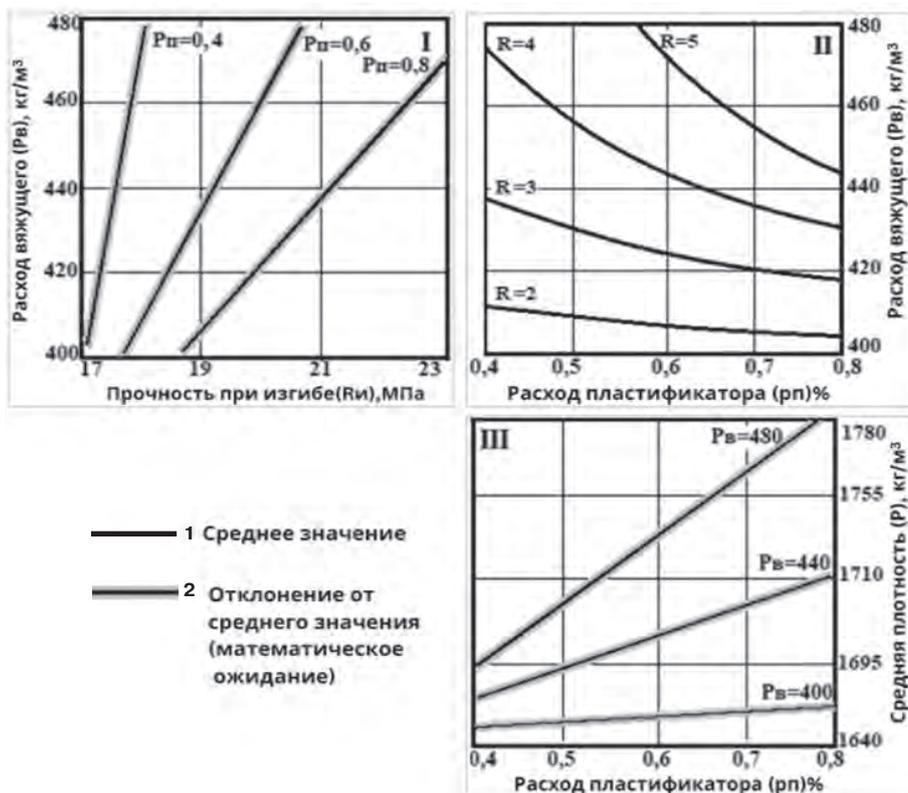


Рис. 6. Номограмма для подбора состава и прогнозирования свойств мелкозернистого модифицированного бетона как основы бетонного полотна (при расходе армирующего компонента 4,9–5%)  
Fig. 6. Nomogram for selecting the composition and predicting the properties of fine-grained modified concrete as the basis of a concrete canvas (with a reinforcing component consumption of 4.9–5%)

$$\frac{\partial Y_1}{\partial X_3} = 1,9 - 2X_3 = 0 \rightarrow X_3 = \frac{1,9}{2} = 0,95.$$

Определяем (с помощью табл. 2) натуральное значение расхода армирующего компонента:  $p_a = 3,5 + 0,95 \times 1,5 = 4,9 - 5\%$ .

Осуществляем графическую интерпретацию оптимизированных по  $X_3$  моделей (1, 2, 3) и объединяем их в номограмму (рис. 6).

Номограмма включает три сектора. В секторе I устанавливается графическая взаимосвязь между прочностью бетонного полотна при изгибе и факторами, варьируемыми в эксперименте (расходе гидравлического вяжущего и расходе пластификатора) при оптимальном значении расхода армирующего компонента 4,9–5%; в секторе II – между прочно-

стью при сжатии и варьируемыми факторами; в секторе III – между варьируемыми факторами и средней плотностью мелкозернистого бетона как основы бетонного полотна.

Номограмма может быть использована для решения прямой и обратной задач моделирования: прогнозирования свойств мелкозернистого бетона в зависимости от величин варьируемых факторов (характеристик расхода) и определения значений характеристик расхода компонентов, удовлетворяющих задаваемым параметрам свойств, что может быть использовано при разработке методики подбора состава мелкозернистого модифицированного бетона как основы бетонного полотна.

### Выводы

Бетонное полотно как разновидность текстиль-бетона может рассматриваться как инновационный материал, пришедший в практику отечественного строительства в первой четверти текущего века. К достоинствам этого материала относят возможность быстрого выполнения строительных работ и ремонта зданий и сооружений, в том числе и в сейсмоопасных районах, хорошие эксплуатационные показатели этого материала, возможность его использования в комбинации в системах изоляции.

Важным аспектом получения материала с высокими эксплуатационными характеристиками и долговечностью является изучение вопросов взаимодействия двух- и трехмерных тканых структур, создающих внешнюю оболочку и объемный каркас материала и мелкозернистого модифицированного бетона, формирующий средний слой бетонного полотна. Инструментами для изучения этих факторов являются структурное моделирование и статистическая об-

работка данных, полученных в активном эксперименте с последующей обработкой результатов с применением математического анализа функций нескольких переменных.

Номограмма, полученная в процессе графической интерпретации оптимизированных функций отклика, может быть использована для решения прямой и обратной задач моделирования: прогнозирования свойств мелкозернистого бетона в зависимости от величин варьируемых факторов и определения значений характеристик расхода компонентов, удовлетворяющих задаваемым параметрам свойств.

### Список литературы / References

- Gries T., Roye A., Offermann P., Peled A. Textile reinforced concrete-state-of-the-art report of RILEM TC 201-TRC. Bagneux: RILEM Publications SARL. 2006, pp. 11–27.
- Isley F. The Use of high performance textiles in construction projects. *Journal of industrial textiles*. 2002. Vol. 31 (3), pp. 205–217. doi:10.1106/152808302026619
- Tsesarsky M., Peled A., Katz A., Anteby I. Strengthening concrete elements by confinement within textile reinforced concrete (TRC) shells – static and impact properties. *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 44, pp. 514–523 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.031>
- Büsgen W.-A. Neue Verfahren zur Herstellung von dreidimensionalen Textilien für den Einsatz in Faserverbundwerkstoffen. Aachen: RWTH Publications. 1993. 157 p. (In German)
- Поудел Р.С., Бессонов И.В., Жуков А.Д., Гудков П.К., Горбунова Э.А., Михайлик Е.Д. Цифровые методы оптимизации составов бетонного полотна // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 20–24. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-20-24>
- Poudel R.S., Bessonov I.V., Zhukov A.D., Gudkov P.K., Gorbunova E.A., Mihaylik E.D. Digital methods for optimizing textile concrete technology. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 20–24. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-20-24>
- Hegger J, Voss S. Investigations on the bearing behaviour and application potential of textile reinforced concrete. *Engineering Structures*. 2008. Vol. 30 (7), pp. 2050–2056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.006>
- Koeckritz U, Cherif Ch, Weiland S, Curbach M. In-situ polymer coating of open grid warp knitted fabrics for textile reinforced concrete application. *Journal of Industrial Textiles*. 2010. Vol. 40 (2), pp. 157–169. doi:10.1177/1528083709102938
- Бессонов И.В., Жуков А.Д., Жук П.М., Демиссе Б.А., Говряков И.С., Минаева А.М. Вулканический туф как активная минеральная добавка для портландцемента // *Строительные материалы*. 2022. № 6. С. 25–29. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-25-29>
- Bessonov I.V., Zhukov A.D., Zhuk P.M., Demisse B.A., Govryakov I.S., Minaeva A.M. Volcanic tuff as an active mineral additive for Portland cement. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 6, pp. 25–29. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-803-6-25-29>
- Демиссе Б.А., Жуков А.Д., Поудел Р.С. Мелкозернистый бетон на модифицированном вяжущем // *Промышленное и гражданское строительство*. 2022. № 3. С. 31–36. DOI: 10.33622/0869-7019.2022.03.31-36.
- Demisse B.A., Zhukov A.D., Poudel R.S. Fine-grained concrete on a modified binder. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo*. 2022. No. 3, pp. 31–36. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.03.31-36>
- Colombo I.G., Magri A., Zani G., Colombo M., Prisco M. Textile Reinforced Concrete: Experimental investigation on design parameters. *Materials and Structures*. 2013. Vol. 46 (11), pp. 1933–1951. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0017-5>
- Peled A., Cohen Z., Pasder Y., Roye A., Gries T. Influences of textile characteristics on the tensile properties of warp knitted cement based composites. *Cement and Concrete Composites*. 2008. Vol. 30 (3), pp. 174–83. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2007.09.001>
- Alireza A., Seyed M.H.S., Farshad R. Quantifying the effects of crack width, tortuosity, and roughness on water permeability of cracked mortars. *Cement and Concrete Research*. 2012. Vol. 42 (2), pp. 313–320. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.10.002>
- Zhukov A.D., Bobrova E.U., Bessonov I.V., Medvedev A.A., Demissie B.A. Application of statistical methods for solving problems of construction materials science. *Nanotechnologies in construction*. 2020. Vol. 12 (6), pp. 313–319. DOI: <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2020-12-6-313-319>
- Zhukov A.D., Bessonov I.V., Demissie B.A., Zinoveva E.A. Analytical optimization of the dispersion-reinforced fine-grained concrete composition. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1083. 012037. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1083/1/012037>
- Жуков А.Д., Боброва Е.Ю., Попов И.И., Демиссе Б.А. Системный анализ технологических процессов. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Т. 17 (4). С. 73–82. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-4-73-82>
- Zhukov A.D., Bobrova E.Yu., Popov I.I., Demisse B.A. System analysis of technological processes. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2021. Vol. 17 (4), pp. 73–82. DOI: <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2021-17-4-73-82>

УДК 699.887

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-33-38>

В.И. РИМШИН<sup>1,2</sup>, проф., д-р техн. наук (v.rimshin@niisf.ru);  
А.В. КАЛАЙДО<sup>1,3</sup>, канд. техн. наук (kalaydo18@mail.ru);  
М.Н. СЕМЕНОВА<sup>1</sup>, вед. инженер (lor267gg@yandex.ru);  
В.А. БОРЩ<sup>2</sup>, бакалавр (empronee@gmail.com)

<sup>1</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

<sup>3</sup> Луганский государственный педагогический университет (ЛГПУ) (291011, г. Луганск, ул. Оборонная, 2)

## Строительные технологии обеспечения радонобезопасности зданий

Ионизирующее излучение, непрерывно воздействующее на человека, формирует годовую индивидуальную эффективную дозу облучения. Величина этой дозы пропорциональна вероятности возникновения у облучаемого онкологических заболеваний в будущем и поэтому должна быть снижена до минимального обоснованного значения. Дочерние продукты распада радона в воздухе помещений вносят наибольший вклад в облучение населения, при этом почти весь радон поступает в здание из грунтового основания. Для создания радиационно безопасной внутренней среды необходимо перекрытие путей переноса радона через подземные ограждающие конструкции, что возможно только средствами и технологиями строительства. Причиной повышенной концентрации радона в воздухе зданий чаще всего является выход на поверхность ураносодержащих грунтов, а также присутствие зон с активной микрогеодинамикой. Тем не менее, как показывают результаты исследований, отсутствие данных факторов еще не гарантирует благоприятной радоновой ситуации в зданиях региона. Такое предположение вытекает из результатов выполненного сотрудниками Научно-исследовательского института строительной физики РААСН мониторинга уровней радона в зданиях Луганска, который показал высокую радоноопасность зданий одного из городских районов. В это же время гамма-спектрометрический анализ почв из всех четырех районов не выявил статистически значимых различий в их удельных активностях. Все полученные значения были близки к среднемировому показателю и составляли около 30 Бк/кг. В представленной работе описаны наиболее распространенные подходы к решению данной проблемы и обоснованы преимущества пассивных технологий радоновой защиты.

**Ключевые слова:** радон, доза облучения, радиация, здание, грунт, подземная ограждающая конструкция, строительство, безопасность, внутренняя среда.

**Для цитирования:** Римшин В.И., Калайдо А.В., Семенова М.Н., Борщ В.А. Строительные технологии обеспечения радонобезопасности зданий // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 33–38. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-33-38>

V.I. RIMSHIN<sup>1,2</sup>, Professor, Doctor of Sciences (Engineering) (v.rimshin@niisf.ru);  
A.V. KALAYDO<sup>1,3</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (kalaydo18@mail.ru);  
M.N. SEMENOVA<sup>1</sup>, Leading engineer (lor267gg@yandex.ru);  
V.A. BORSCH<sup>2</sup>, Bachelor (empronee@gmail.com)

<sup>1</sup> Research Institute of Building Physics RAACS (21, Lokomotivny Proezd, Moscow, 127238, Russian Federation)

<sup>2</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavl'skoe Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

<sup>3</sup> Luhansk State Pedagogical University (LSPU) (2, Defense Oboronnaya, Lugansk, 291011, Russian Federation)

### Construction Technologies for Ensuring Radon Safety of Buildings

Ionizing radiation, continuously affecting a person, forms an annual individual effective dose of radiation. The value of this dose is proportional to the probability of the irradiated cancer in the future and therefore should be reduced to a minimum reasonable value. Daughter products of radon decay in indoor air make the greatest contribution to the irradiation of the population, while almost all radon enters the building from the ground base. To create a radiation-safe internal environment, it is necessary to block the ways of radon transfer through underground enclosing structures, which is possible only by means and technologies of construction. The reason for the increased concentration of radon in the air of buildings of these territories is most often the appearance of uranium-containing soils on the surface, as well as the presence of zones with active microgeodynamics. Nevertheless, as the research results show, the absence of these factors does not guarantee a favorable radon situation in the buildings of the region. This assumption follows from the results of the monitoring of radon levels in buildings in Lugansk carried out by the staff of the Research Institute of Building Physics of the RAASC, which showed a high radon hazard of buildings in one of the urban areas. At the same time, gamma-spectrometric analysis of soils from all four districts did not reveal statistically significant differences in their specific activity. All the values obtained were close to the global average and amounted to about 30 Bq/kg. The article describes the most common approaches to solving this problem and substantiates the advantages of passive radon protection technologies.

**Keywords:** radon, radiation dose, radiation, building, soil, underground enclosing structure, construction, safety, internal environment.

**For citation:** Rimshin V.I., Kalaido A.V., Semenova M.N., Borsch V.A. Construction technologies for ensuring radon safety of buildings. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 33–38. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-33-38>

Радиационное облучение (внешнее и внутреннее, естественное и искусственное) негативно влияет на человека на протяжении всей его жизни. Согласно принятой в настоящее время линейной беспороговой концепции увеличение дозы, поглощенной человеком, приводит к пропорциональному увеличению вероятности развития онкологических заболеваний в будущем [1]. Таким образом, сокращение коллективной дозы облучения населения актуально в контексте сохранения генофонда нации.

Годовая доза облучения населения формируется целым рядом источников естественной и техногенной природы. Но ее структура (рис. 1) приблизительно одинакова для подавляющего большинства регионов России, исключения составляют только аномально радоноопасные территории (Алтай, Кавказские Минеральные воды и др.).

Как видно из рис. 1, радон является основным дозобразующим фактором. При это радоновая экспозиция принадлежит к контролируемому компоненту радиационной нагрузки, т. е. ее можно изменять строительными технологиями в достаточно широких пределах.

Линейная беспороговая концепция в принципе не предусматривает безопасных доз облучения, так как радиация отнесена к классу канцерогенов Международной организацией здравоохранения. Но санитарное законодательство устанавливает уровни воздействия, которые приемлемы для населения на нынешней стадии развития технологий. В Российской Федерации это средняя индивидуальная доза облучения в течение пяти лет, не более 1 мЗв/год (но не более 5 мЗв/год). Одновременно приняты уровни для концентрации радона и его дочерних продуктов распада (ДПР) в воздухе помещений. В качестве характеристики содержания радона



Рис. 1. Приблизительная структура среднегодовой дозы облучения населения в Российской Федерации

Fig. 1. Approximate structure of the average annual dose of exposure of the population in the Russian Federation

в РФ принята эквивалентная равновесная объемная активность ДПР радона (ЭРОА). Она не должна превышать 200 Бк/м<sup>3</sup> для эксплуатируемых зданий и 100 Бк/м<sup>3</sup> – для зданий, построенных по современным технологиям (СП 2.6.1.2612–10 «Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010)»). Когда указанные уровни ЭРОА (эквивалентная равновесная объемная активность) в зданиях не превышаются, в подавляющем большинстве случаев обеспечивается удовлетворение требований по среднегодовой индивидуальной дозе облучения населения.

В настоящее время выявлено, что распределение помещений по величине ЭРОА имеет логарифмически нормальный характер (рис. 2). Из этого вытекает существование групп населения со значительно более высокими дозами облучения, чем в среднем по стране или региону.

Помимо однозначно радоноопасных регионов, в которых среднегодовая индивидуальная доза облучения превосходит 5 мЗв/год. (Алтай, Еврейский автономный округ и др.), ряд регионов характеризуется частичной опасностью территории. Так, значения ЭРОА радона в зданиях и сооружениях района Кавказских Минеральных Вод сопоставимы с алтайскими, хотя в среднем по Ставрополью ситуация с бытовым облучением природными источниками ионизирующего излучения куда более благоприятна (табл. 1).

Причиной повышенной концентрации радона в воздухе зданий указанных территорий чаще всего является выход на поверхность ураносодержащих грунтов, а также присутствие зон с активной микрогеодинамикой. Тем не менее, как показывают результаты исследований, отсутствие данных факторов еще не гарантирует благоприятной радоновой ситуации в зданиях региона.

Такое предположение вытекает из результатов выполненного сотрудниками Научно-исследовательского института строительной физики РААСН мониторинга уровней радона в зданиях Луганска, который показал высокую радоноопасность зданий одного из городских районов. В это же время гамма-спектрометрический анализ почв из всех четырех районов не выявил статистически значимых различий в их удельных активностях. Все полученные значения были близки к среднему показателю и составляли около 30 Бк/кг.

Средние уровни радона в помещениях районов Луганска  
Average levels of radon in the premises of Lugansk districts

Район Луганска	Среднее значение ЭРОА, Бк/м <sup>3</sup>	Доля частных домовладений, %
Каменнобродский	225,8	Более 90
Ленинский	37,5	Менее 5
Артемовский	29,5	Менее 10
Жовтневый	54,9	Менее 10

Следовательно, причина столь существенных различий в средней по району величине ЭРОА заключалась в структуре жилищного фонда. В наиболее радоноопасном Каменнобродском районе он практически полностью представлен частными одно- или двухэтажными зданиями, зачастую имеющими срок с момента постройки более 30–40 лет. Напротив, в центральном Ленинском районе и построенных последними Артемовском и Жовтневом доля частного сектора незначительна.

Таким образом, при оценке потенциальной радоноопасности участка планируемого строительства исключительно геофизической информации недостаточно. Формирование радоновой ситуации в зданиях и сооружениях должно рассматриваться в рамках системы «грунт–здание». Но физические характеристики грунта все-таки достаточно важны, потому что даже в традиционных равнинных областях, не являющихся радоноопасными, около 90% радона в воздух помещений поступает из грунтового основания.

Количество радона, поступающего в воздух помещений из грунта в единицу времени, полностью определяется конструкцией здания, а точнее, его подземной оболочкой. Высокие значения ЭРОА чрезвычайно редки в помещениях многоэтажных зданий, что связано с наличием монолитной плиты основания или буферного нежилого проветриваемого пространства между грунтом и помещениями нижнего этажа. Напротив, повышенные уровни радона более характерны для малоэтажных зданий, где грунтовое основание и жилая зона часто не разделены конструкцией с высокими радонозащитными характеристиками. Именно такие здания должны быть основными объектами мониторинга радиационной обстановки.

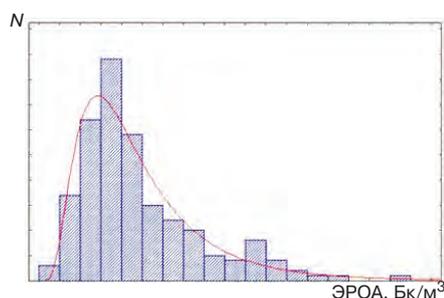
Текущий уровень развития строительной отрасли позволяет утверждать, что радоновая безопасность зданий может и должна обеспечиваться на любых грунтах, независимо от содержания в них радионуклидов уранового ряда. На радоноопасных территориях в любом случае потребуются дополнительные защитные мероприятия, но их стоимость приемлема

и составляет не более 3–5% общих затрат на строительство. Эффективность любых радонозащитных мероприятий наиболее высока на стадии проектирования, тогда как внесение изменений в существующую конструкцию здания менее эффективно и более затратно.

Однако в сфере технологий обеспечения радиационной безопасности внутренней среды пока не выработан единый подход. Причина тому многофакторность процесса формирования радоновой ситуации в здании. Невозможно, основываясь только на результатах измерений на участке планируемого строительства (как это делается на данный момент), надежно установить доминирующий механизм переноса радона в почвах и подземных ограждающих конструкциях. А его понимание необходимо на стадии проектирования здания, поскольку каждый из механизмов требует применения собственных строительных технологий. Так, конвективный перенос может быть полностью исключен герметизацией подземной оболочки сооружения, но это не позволит полностью устранить диффузионное поступление радона.

В настоящее время в мире существуют две противоположные стратегии обеспечения радоновой безопасности зданий – использование активных и пассивных технологий защиты. В основе активной технологии обеспечения радонобезопасности зданий, традиционно используемой в зарубежных странах, лежит устранение самой возможности сверхнормативного поступления радона из грунта (US Soil Gas Mitigation Standards for Existing Homes (SGM-SF 2017); AARST Consortium on national radon standards 80; World Health Organization, WHO Handbook on Indoor Radon: A Public Health Perspective WHO Geneva).

Этот принцип реализуется с помощью активной системы разрежения почвы (ASD). Снижение плотности потока радона через подземные ограждающие конструкции достигается за счет создания зоны пониженного давления в почве при помощи вентилятора. В процессе его работы появляются благоприятные условия для накопления радона в замкнутом



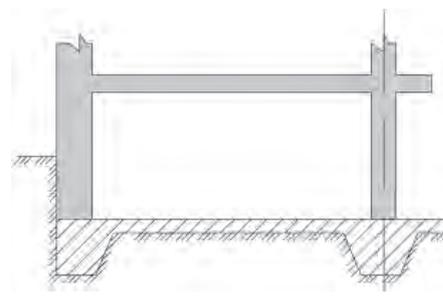
**Рис. 2.** Характерное распределение количества помещений  $N$  по величине ЭРОА на определенной территории

**Fig. 2.** Characteristic distribution of the number of rooms  $N$  according to the value of the equivalent equilibrium volumetric activity in a certain area



**Рис. 3.** Активная система разрежения грунта с использованием дренажного слоя в коллекторе радона

**Fig. 3.** Active system of soil dilution using a drainage layer in a radon collector



**Рис. 4.** Пассивная система защиты зданий от радона

**Fig. 4.** Passive building protection system from radon

объеме и его последующего удаления с помощью механической вентиляции. Один из вариантов конструкции подземной части здания для системы ASD с использованием дренажного слоя показан на рис. 3. (US Reducing Radon in New Construction of 1 and 2 Family Dwellings and Townhouses (ССАН 2020) AARST Consortium on national radon standards 33).

Активная концепция защиты зданий от радона утверждена Всемирной организацией здравоохранения и включена в ее рекомендации [2]. Безусловно, активные технологии защиты радона весьма эффективны, но они дороги и энергоемки. Их элементы являются источниками шумов и вибраций, а установка требует изменения в конструкции здания, из-за чего целесообразность их повсеместного использования пока вызывает определенные сомнения.

Альтернативный подход заключается в том, что приемлемые уровни радона в зданиях могут быть обеспечены рациональным проектированием подземных ограждающих конструкций, которые параллельно выполняют свои основные несущие функции (рис. 4). В этом случае необходимость удаления радона из жилой зоны с помощью вентиляции означает ошибки в проектировании подземной оболочки. Такие технологии защиты от радона называются пассивными, и они не требуют элементов, потребляющих электрическую энергию.

Проектирование на основе технологии пассивной защиты состоит в определении требуемой радонозащитной способности подземной оболочки в зависимости от степени потенциальной радиационной опасности площадки планируемого строительства. Но именно с последним и возникают наибольшие трудности ввиду отсутствия надежного критерия радоноопасности.

В настоящее время в РФ единственным критерием радоноопасности участка строительства принята плотность потока радона (ППР) с поверхности грунта. На начальном этапе исследования радоновой проблемы считалось, что данная величина является самой надежной характеристикой радоноопасности территории. В санитарном и строительном законодательстве было закреплено пороговое значение  $ППР \leq 80$  мБк/(м<sup>2</sup>·с), его непревышение однозначно характеризовало участок как нерадоноопасный. Позже выяснилось, что процесс переноса радона из грунта к дневной поверхности сильно зависит от характеристик грунта (пористость, плотность, влажность), а также абсолютных значений атмосферной температуры и давления и их производных по времени. Поскольку все эти параметры состояния находятся в непрерывном изменении, плотность потока радона с поверхности почвы часто способна изменяться в 5–10 раз в течение суток. В результате подобных вариаций участок планируемого строительства может быть классифицирован и как радоноопасный, и как нерадоноопасный.

Использование нерепрезентативной плотности потока радона в качестве критерия радоноопасно-

сти участка планируемого строительства полностью дискредитировало саму процедуру радиационно-экологических изысканий. Следствием этого стало введение в эксплуатацию зданий с недостаточной или излишней радонозащитной способностью. На необходимость исправления текущей ситуации и поиска более представительного критерия радоноопасности участка планируемого строительства не раз указывалось в работах ведущих специалистов в данной области, например Гулабянца Л.А. [3, 4], Микляева П.С., Петровой Т.Б. [5–7].

Стоит отметить, что данная проблема характерна не только для Российской Федерации [8–17]. В некоторых странах используются некие комплексные показатели, которые представляют суперпозицию данных о гамма-фоне территории, концентрации радона в близлежащих зданиях, проницаемости почвы, удельной активности радия в ней, конструктивных особенностях здания. Тем не менее ни один из этих показателей не является общепризнанным и не применяется за пределами одного или нескольких государств.

Одним из путей решения данной проблемы может стать внедрение в строительную практику расчетного метода определения оптимальных радонозащитных характеристик здания. В рамках его разработки в НИИСФ РААСН были выполнены теоретические исследования отдельных аспектов переноса радона в здании. В частности, для наиболее типичной проницаемости почвы было проведено сравнение вкладов конвективного и диффузионного потоков в общий процесс переноса радона. Исследования показали, что конвективный поток начинает играть значимую роль в переносе радона, если проницаемость пористой среды находится в диапазоне  $10^{-12}$  м<sup>2</sup>, а начиная со значений проницаемости порядка  $10^{-11}$  м<sup>2</sup> конвективный перенос становится доминирующим. Современные материалы, используемые при производстве подземных ограждающих конструкций, имеют проницаемость порядка  $10^{-14}$  –  $10^{-16}$  м<sup>2</sup>, и даже проницаемость любых глинистых грунтов менее  $10^{-12}$  м<sup>2</sup>. Все это позволяет нам предположить, что процесс переноса радона в системе «грунт–здание» можно рассматривать в чисто диффузионной постановке.

На основании приведенного выше предположения был разработан метод расчета пассивных радонозащитных конструкций, в котором не используется значение плотности потока радона, измеренное на участке планируемого строительства. В качестве альтернативного критерия радоноопасности была выбрана максимальная радоновая нагрузка на горизонтальную подземную ограждающую конструкцию  $A_{max}$ , рассчитываемая по формуле:

$$A = \frac{C_{Ra} \cdot \rho \cdot k}{\varepsilon_{max}}, \quad (1)$$

где  $C_{Ra}$  – удельная активность радия в грунте, Бк/кг;  $\rho$  – плотность грунта, кг/м<sup>3</sup>;  $k$  – коэффициент эманирования радона грунтом;  $\varepsilon$  – пористость грунта.

Как видно из (1), радоновая нагрузка на оболочку здания не содержит переменных значений, а удельная активность и коэффициент эманирования определяются в одном гамма-спектрометрическом анализе образцов грунта. Поэтому есть основания полагать, что данную величину можно рассматривать как критерий радоноопасности участка планируемого строительства и как замену плотности потока радона. Рассчитанная по (1) радоновая нагрузка на основание здания позволяет найти минимальное достаточное сопротивление радонопроницанию подземной горизонтальной ограждающей конструкции проектируемого здания:

$$R_{min} = \frac{A_{max}}{q_{dif}}. \quad (2)$$

В формуле (2) плотность диффузионного потока сквозь конструкцию пола  $q_{dif}$  однозначно определяется через ЭРОА продуктов распада радона в воздухе, которую мы хотели бы получить после введения здания в эксплуатацию.

На последней стадии проектирования общее сопротивление радонопроницанию подземной горизонтальной ограждающей конструкции может быть разделено между отдельными слоями (если они присутствуют) по формуле:

$$R_{min} \approx R_1 + R_1 + \dots + R_i, \quad (3)$$

#### Список литературы

1. Darby S, Hill D, Auvinen A, et al 2005 Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*. 2005. Iss. 29. Vol. 330 (7485). DOI: 10.1136/bmj.38308.477650.63
2. Гулабянц Л.А., Заболотский Б.Ю. Плотность потока радона как критерий оценки радоноопасности // *АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений*. 2004. № 3 (38). С. 16–20.
3. Гулабянц Л.А., Заболотский Б.Ю. Сезонная вариация потока радона из грунта и оценка радоноопасности площади застройки // *АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений*. 2004. № 4 (39). С. 46–50.
4. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Механизмы формирования потока радона с поверхности почв и подходы к оценке радоноопасности селитебных территорий // *АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений*. 2007. № 2. С. 2–17.
5. Микляев П.С., Петрова Т.Б., Цапалов А.А. Опыт применения изотопного геохимического метода для исследования условий переноса радона к дневной поверхности // *АНРИ: Аппаратура и новости радиационных измерений*. 2012. № 1. С. 15–20.
6. Микляев П.С., Петрова Т.Б. Исследования аномальных сезонных вариаций плотности потока радона в зоне разлома // *Геохимия*. 2021. Т. 66. № 4. С. 364–378.

где  $i$  – количество слоев в подземной оболочке здания.

Исходя из полученных значений  $R_i$ , далее определяются толщины каждого из слоев в подземной оболочке здания. Толщина конкретного слоя будет тем меньше, чем меньше длина диффузии радона в его материале.

#### Результаты исследования

Результаты представленного исследования позволяют говорить о том, что проблема радона и его продуктов распада в воздухе помещений актуальна не потому, что он образуется в грунте и поступает в здания, а потому, что пока отсутствуют надежные методы проектирования радонобезопасных зданий. Их развитию в РФ мешает использование в качестве критерия радоноопасности участка строительства переменной плотности потока радона с поверхности грунта.

#### Выводы

Выходом из данной ситуации может стать введение в качестве аналогичной характеристики радоновой нагрузки на подземную оболочку здания и разработка расчетного метода определения оптимальных радонозащитных характеристик здания на стадии его проектирования.

#### References

1. Darby S, Hill D, Auvinen A, et al 2005 Radon in homes and risk of lung cancer: collaborative analysis of individual data from 13 European case-control studies. *British Medical Journal*. 2005. Iss. 29. Vol. 330 (7485). DOI: 10.1136/bmj.38308.477650.63
2. Gulabyants L.A., Zabolotsky B.Y. Radon flux density as a criterion for assessing radon hazard. *ANRI: Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy*. 2004. No. 3 (38), pp. 16–20. (In Russian).
3. Gulabyants L.A., Zabolotsky B.Y. Seasonal variation of radon flow from the ground and assessment of radon hazard of the built-up area. *ANRI: Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy*. 2004. No. 4 (39), pp. 46–50. (In Russian).
4. Miklyaev P.S., Petrova T.B. Mechanisms of radon flux formation from the surface soils and approaches to assessing the radon hazard of residential territories. *ANRI: Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy*. 2007. No. 2, pp. 2–17. (In Russian).
5. Miklyaev P.S., Petrova T.B., Tsapalov A.A. The experience of using an isotopic geochemical method to study the conditions of radon transfer to the daytime surface. *ANRI: Apparatura i novosti radiatsionnykh izmereniy*. 2012. No. 1, pp. 15–20. (In Russian).
6. Miklyaev P.S., Petrova T.B. Studies of anomalous seasonal variations of radon flux density in the fault zone. *Geochemistry*. 2021. Vol. 66. No. 4, pp. 364–378. (In Russian).

7. Чеховский А.Л., Дроздов Д.Н. Картирование территории Гомельской, Могилевской и Витебской областей по комплексному радоновому показателю и объемной активности радона в жилых зданиях // *Радиация и риск*. 2016. Т. 25. № 4. С. 126–136.
8. Чунихин Л.А., Чеховский А.Л., Дроздов Д.Н. Методика по оценке радоновой опасности территории и определению критических зон радоноопасности // *Theoretical & Applied Science*. 2016. № 3 (35). С. 107–112.
9. Калайдо А.В., Римшин В.И., Семенова М.Н. Оценка вкладов диффузионного и конвективного поступления радона в здания // *Жилищное строительство*. 2021. № 7. С. 48–53. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-7-48-53>
10. Шубин И.Л., Бакаева Н.В., Калайдо А.В., Скринникова А.В. Ограничение поступления радона из грунта в здание посредством технологий строительства // *Строительные материалы*. 2019. № 6. С. 62–66. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-62-66>
11. Калайдо А.В., Римшин В.И., Семенова М.Н. Обеспечение приемлемых уровней облучения радона в зданиях пассивными радонозащитными технологиями // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. 2021. № 6 (1042). С. 20–22.
12. Калайдо А.В., Римшин В.И., Семенова М.Н., Быков Г.С. Пассивные технологии обеспечения радоновой безопасности воздушной среды проектируемых зданий // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2021. № 1. С. 28–35.
13. Римшин В.И., Шубин И.Л., Савко А.В. Ресурс силового сопротивления железобетонных конструкций инженерных сооружений // *Academia. Архитектура и строительство*. 2009. № 5. С. 483–491.
14. Kuzina E., Cherkas A., Rimshin V. Technical aspects of using composite materials for strengthening constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 365. Iss. 3. DOI: [10.1088/1757-899X/365/3/032053](https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032053)
15. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Rimshin V.I. The limiting values of moments and deformations ratio in strength calculations using specified material diagrams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 463. Iss. 3. DOI: [10.1088/1757-899X/463/3/032024](https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032024)
16. Telichenko V., Rimshin V., Ereemeev V., Kurbatov V. Mathematical modeling of groundwaters pressure distribution in the underground structures by cylindrical form zone B. *MATEC Web Conf. XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP) (TFoCE 2018)*. 2018. Vol. 196. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819602025>
17. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Orlov A., Kurbatov V.L. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with foundation in wooden frame buildings. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13, pp. 3851–3856.
7. Chekhov A.L., Drozdov D.N. Mapping the territory of Gomel, Mogilev and Vitebsk regions by the complex radon indicator and the volume activity of radon in residential buildings. *Radiatsiya i risk*. 2016. Vol. 25. No. 4, pp. 126–136. (In Russian).
8. Chunikhin L.A., Chekhov A.L., Drozdov D.N. The methodology for assessing the radon hazard of the territory and determining the critical zones of radon hazard. *Theoretical & Applied Science*. 2016. No. 3 (35), pp. 107–112. (In Russian).
9. Kalaydo A.V., Rimshin V.I., Semenova M.N. Assessment of the contributions of diffusive and convective radon entry into the buildings. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2021. No. 7, pp. 48–53. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2021-7-48-53>
10. Shubin I.L., Bakaeva N.V., Kalaydo A.V., Skrynnikova A.V. Limitation of radon inflow from the soil into the building due to construction technologies. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 6, pp. 62–66. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-62-66>
11. Kalaido A.V., Rimshin V.I., Semenova M.N. Ensuring acceptable levels of radon irradiation in buildings with passive radon-protective technologies. *BST: Byulleten' stroitel'noy tekhniki*. 2021. No. 6 (1042), pp. 20–22. (In Russian).
12. Kalaido A.V., Rimshin V.I., Semenova M.N., Bykov G.S. Passive technologies for ensuring radon safety of the air environment of projected buildings. *Vestnik of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies*. 2021. No. 1, pp. 28–35. (In Russian).
13. Rimshin V.I., Shubin I.L., Savko A.V. Resource of force resistance of reinforced concrete structures of engineering structures. *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo*. 2009. No. 5, pp. 483–491.
14. Kuzina E., Cherkas A., Rimshin V. Technical aspects of using composite materials for strengthening constructions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 365. Iss. 3. DOI: [10.1088/1757-899X/365/3/032053](https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/3/032053)
15. Karpenko N.I., Eryshev V.A., Rimshin V.I. The limiting values of moments and deformations ratio in strength calculations using specified material diagrams. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 463. Iss. 3. DOI: [10.1088/1757-899X/463/3/032024](https://doi.org/10.1088/1757-899X/463/3/032024)
16. Telichenko V., Rimshin V., Ereemeev V., Kurbatov V. Mathematical modeling of groundwaters pressure distribution in the underground structures by cylindrical form zone B. *MATEC Web Conf. XXVII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (27RSP) (TFoCE 2018)*. 2018. Vol. 196. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819602025>
17. Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Orlov A., Kurbatov V.L. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with foundation in wooden frame buildings. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2018. Vol. 13, pp. 3851–3856.

УДК 693.8

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-39-44>

Н.А. БУЗАЛО<sup>1</sup>, канд. техн. наук (buzalo\_n@mail.ru);  
С.И. ЕВТУШЕНКО<sup>2</sup>, д-р техн. наук (sergand1957@gmail.com);  
Б.А. ЧЕРНЫХОВСКИЙ<sup>1</sup>, аспирант (cbotms@gmail.com);  
О.В. НЕВЕЛЬСКИЙ<sup>3</sup>, главный инженер (7644996@mail.ru)

<sup>1</sup> Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) им. М.И. Платова (346428, г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132)

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

<sup>3</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

## Экспериментальное исследование фланцевых соединений элементов стального каркаса, получивших повреждения

Среди предприятий, действующих на данный момент в России, существует большая доля производственных зданий с несущим стальным каркасом, в которых есть разного рода повреждения, полученные за годы эксплуатации. Предотвратить появление подобных дефектов сложно, и с учетом продолжительного времени эксплуатации зданий, многие из которых были построены в середине прошлого века в эпоху индустриализации, количество накопленных повреждений увеличивается. Оценку несущей способности каркасов промышленных зданий и сооружений при наличии повреждений необходимо выполнять, принимая во внимание фактические ослабления сечений несущих элементов. Проверочные расчеты элементов и узлов в соответствии с нормативными документами надлежит выполнять по методикам, которые учитывают ослабление конструкции введением поправочных коэффициентов. Однако в этом случае информации о наличии концентрации напряжений в поврежденной зоне и о тенденции к развитию в ней пластических деформаций получить невозможно. Представлены результаты испытаний экспериментальных образцов фланцевых соединений, графики их перемещений и относительных деформаций. Эти данные могут быть использованы как для создания конечно-элементных моделей узлов и их расчета в нелинейной постановке, так и для анализа действительного распределения напряжений в узлах каркасов многоэтажных зданий.

**Ключевые слова:** фланцевые соединения элементов стальных каркасов, поврежденные конструкции, упругие деформации, механические испытания, пластические деформации, несущая способность.

**Для цитирования:** Бузало Н.А., Евтушенко С.И., Черныховский Б.А., Невельский О.В. Экспериментальное исследование фланцевых соединений элементов стального каркаса, получивших повреждения // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 39–44. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-39-44>

N.A. BUZALO<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (buzalo\_n@mail.ru); S.I. EVTUSHENKO<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (sergand1957@gmail.com); B.A. CHERNIKHOVSKY<sup>1</sup>, Graduate Student (cbotms@gmail.com); O.V. NEVELSKY<sup>3</sup>, Chief Engineer (7644996@mail.ru)

<sup>1</sup> South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov (132, Prosveshcheniya Street, Novocheerkassk, 346428, Russian Federation)

<sup>2</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation)

<sup>3</sup> Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivniy proezd, Moscow, 127238, Russian Federation)

### Experimental Study of Flanged Joints of Damaged Steel Frame Elements

Among the enterprises currently operating in Russia, there is a large proportion of industrial buildings with a load-bearing steel frame, in which there are various types of damage received over the years of operation. It is difficult to prevent the appearance of such defects, and given the long time of operation of buildings, many of which were built in the middle of the last century during the era of industrialization, the amount of accumulated damages is increasing. The assessment of the bearing capacity of frames of industrial buildings and structures in the presence of damages must be carried out taking into account the actual weakening of the sections of the bearing elements. Verification calculations of elements and assemblies in accordance with regulatory documents should be carried out according to methods that take into account the weakening of the structure by introducing correction factors. However, in this case, it is impossible to obtain information about the presence of stress concentration in the damaged zone and about the tendency for the development of plastic deformations in it. The results of tests of experimental samples of flange joints, graphs of their displacements and relative deformations are presented. These data can be used both to create finite element models of nodes and calculate them in a non-linear setting, and to analyze the actual stress distribution in the nodes of the frames of multi-storey buildings.

**Keywords:** flanged connections of steel frame elements, damaged structures, elastic deformations, mechanical tests, plastic deformations, bearing capacity.

**For citation:** Buzalo N.A., Evtushenko S.I., Chernikhovskiy B.A., Nevelsky O.V. Experimental study of flanged joints of damaged steel frame elements. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 39–44. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-39-44>

Нарушения правил технической эксплуатации металлических несущих конструкций каркасных зданий, штатные ситуации, вызванные техногенными или природными причинами, приводят к появлению и накоплению повреждений. Влияние силовых, механических, коррозионных повреждений на поведение элементов и узлов стальных каркасов изучалось многими авторами [1–6 и др.].

В своих работах Ю.И. Кудишин, Д.Ю. Дробот [7, 8] предлагают ввести, помимо двух групп предельных состояний (первая группа – невозможность дальнейшей эксплуатации вследствие потери несущей способности; вторая группа – затруднение нормальной эксплуатации вследствие больших деформаций), третью группу предельных состояний – с недопустимым уровнем повреждений, рассматри-

ваемых в контексте обобщенной проблемы живучести, связанной с сейсмостойкостью, огнестойкостью, выносливостью и т. п. Авторы определяют термин «живучесть» как отказоустойчивость, способность поврежденной системы адаптироваться к новым изменившимся ситуациям, противостоять вредным воздействиям, выполняя при этом полностью или частично свою целевую функцию, за счет соответствующего изменения структуры и поведения системы.

Аналогично трактуют понятие живучести и авторы работы [9]: живучесть – способность системы сохранять свойства, необходимые для выполнения требуемых функций при наличии неблагоприятных воздействий, не предусмотренных условиями нормальной эксплуатации, вызывающих повреждения эле-

ментов системы. В работах [10–12] исследуется структурная живучесть расчетных схем сооружений, в качестве критерия живучести рассматривается условие геометрической неизменяемости системы при выходе из строя отдельных элементов. В диссертационной работе И.И. Ведякова [13] за критерий живучести принято условие: живучесть конструкции обеспечена, если первичные отказы элементов не приводят к разрушению других элементов, на которые перераспределяется нагрузка. Так как аварийные условия оправдывают допущение в поврежденной конструкции деформаций, близких к предельным, то в качестве критерия надежности для несущих элементов можно принять наибольшие допустимые пластические деформации на стадии разрушения материала с коэффициентом запаса 0,8.

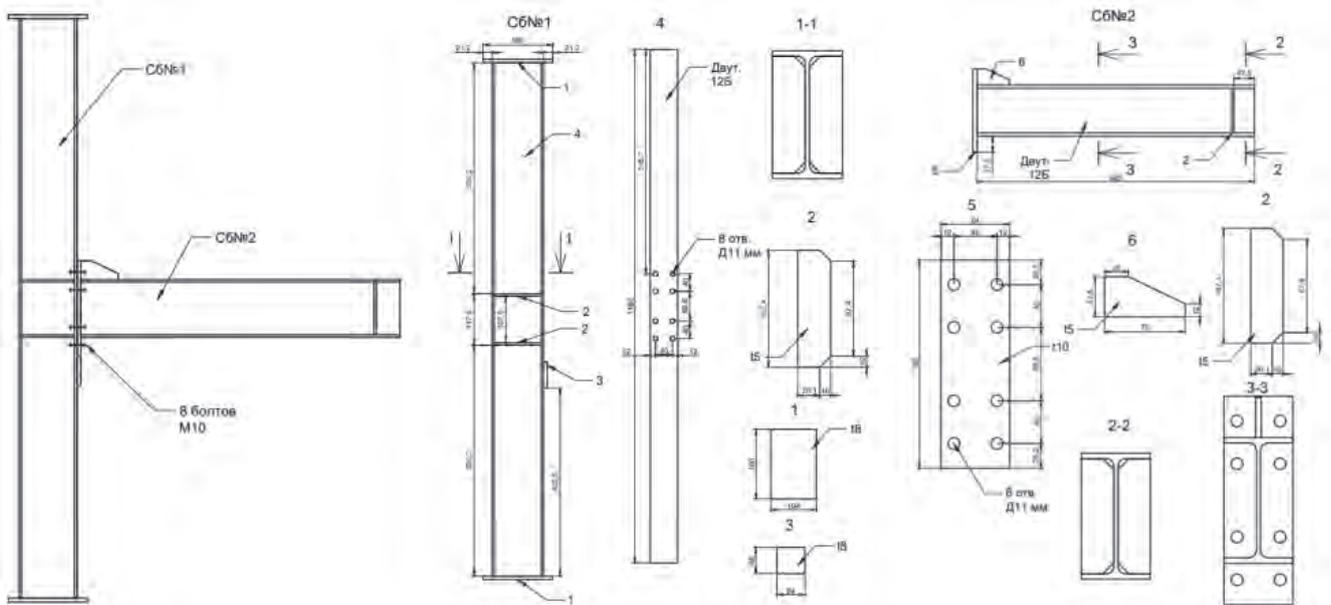


Рис. 1. Фрагменты конструкторской документации на экспериментальные образцы  
Fig. 1. Fragments of design documentation for experimental samples



Рис. 2. Искусственно нанесенные дефекты узла, имитирующие характерные повреждения: *a* – вырез участка полки и стенки ригеля; *b* – локальный погиб полки ригеля  
Fig. 2. Artificially applied assembly defects imitating characteristic damage: *a* – cutout of a section of the shelf and the wall of the crossbar; *b* – local defect of the crossbar flange



Рис. 3. Характерные повреждения, полученные стальными элементами при эксплуатации: *a* – вырез стенки, поперечного ребра и нижней полки подкрановой балки; *b* – механическое локальное повреждение колонны крановой эстакады  
Fig. 3. Typical damages received by steel elements during operation: *a* – cutout of the wall, transverse rib and lower flange of the crane beam; *b* – mechanical local damage to the crane trestle column

Уточнение расчетной модели конструкции, получившей повреждения, создание ее цифровой модели базируются на результатах экспериментальных исследований, изучении действительной ее работы и характера действующих нагрузок. Результаты экспериментальных и натурных исследований дают представление о реальной физической модели деформирования и разрушения конструкции, позволяют обоснованно выбирать пределы идеализации расчетной модели, создавать цифровую модель в соответствии с реальной физической моделью работы конструкции в условиях эксплуатации.

Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) фланцевых соединений стального каркаса многоэтажного здания, получивших повреждения вследствие природных или техногенных аварий, выполнены для верификации созданных с применением программно-вычислительных комплексов цифровых моделей.

Испытания конструкций сопряжены с финансовыми затратами, возможностью обеспечить достаточную техническую и приборную оснащенность эксперимента, получить достоверные результаты, поэтому для проведения экспериментальных исследований необходимо:

– использование теории планирования эксперимента;

– применение автоматизированных информационно-измерительных систем;

– разработка методик проведения испытаний на основе существующих отработанных унифицированных методик.

Испытания образцов фланцевых узлов, получивших повреждения, были выполнены в испытательной лаборатории ЦНИИСК им. Кучеренко в 2022 г. с целью:

– определения фактических напряжений в установленных зонах исследуемых образцов с различными видами повреждений;

– определения перемещений в установленных точках исследуемых образцов;

– сопоставления данных эксперимента с КЭ расчетами;

– анализа соответствия НДС цифровых моделей и экспериментальных образцов.

Экспериментальные модели были выполнены в заводских условиях по разработанным авторами чертежам (рис. 1).

Изготовленные для испытаний образцы представляют собой фрагмент рамного узла стального каркаса здания в месте примыкания горизонтальной балки к колонне (рис. 2). Колонна и балка выполнены из горячекатаных двутавров с параллельными гранями полки № 12Б1 по ГОСТ Р 57837–2017

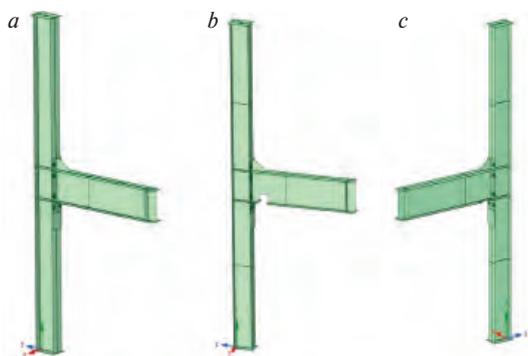


Рис. 4. Образцы фланцевого узла стального каркаса здания: *a* – без повреждений; *b* – с вырезом участка полки и стенки ригеля; *c* – с локальным погибом полки ригеля

Fig. 4. Samples of the flange assembly of the steel frame of the building: *a* – without damage; *b* – with a cutout of a part of the shelf and the wall of the crossbar; *c* – with a local defect of the crossbar flange

Спецификация тензометрирующего оборудования  
Specification of strain gauge equipment

Номер типа образца	Наименование	Количество образцов	Количество тензорезисторов	
			На один образец	На все образцы
1	Без повреждений	2	3	6
2	С вырезом полки	1	3	3
3	С погибом полки	1	3	3
Итого:		4		12

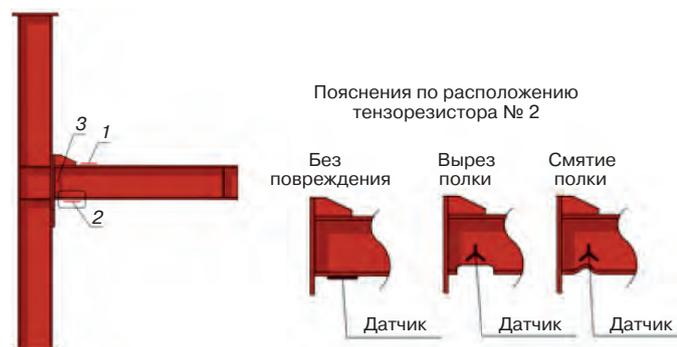


Рис. 5. Расположение тензорезисторов  
Fig. 5. Location of strain gauges

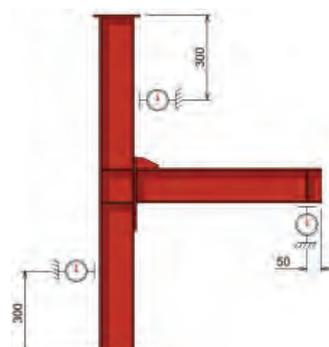


Рис. 6. Расположение индикаторов перемещений  
Fig. 6. Location of movement indicators

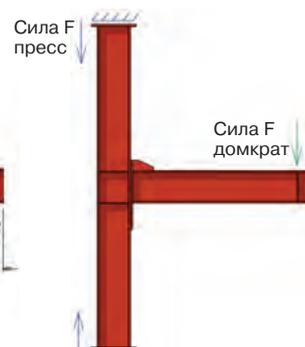


Рис. 7. Схема закрепления и нагружения образца  
Fig. 7. Scheme of fastening and loading of the sample



Рис. 8. Фактическое исполнение расчетной схемы в испытательной лаборатории  
Fig. 8. Actual execution of the design scheme in the testing laboratory

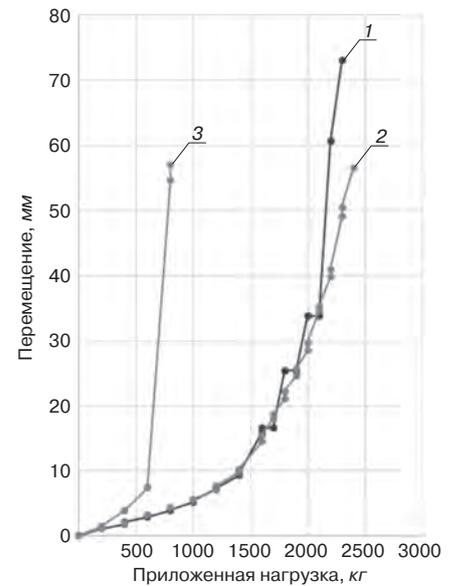


Рис. 9. Графики перемещений крайней точки консоли испытываемых конструкций: 1 – образец 1; 2 – образец 2; 3 – образец 3  
Fig. 9. Graphs of displacements of the far point of the console of the tested structures: 1 – sample 1; 2 – sample 2; 3 – sample 3

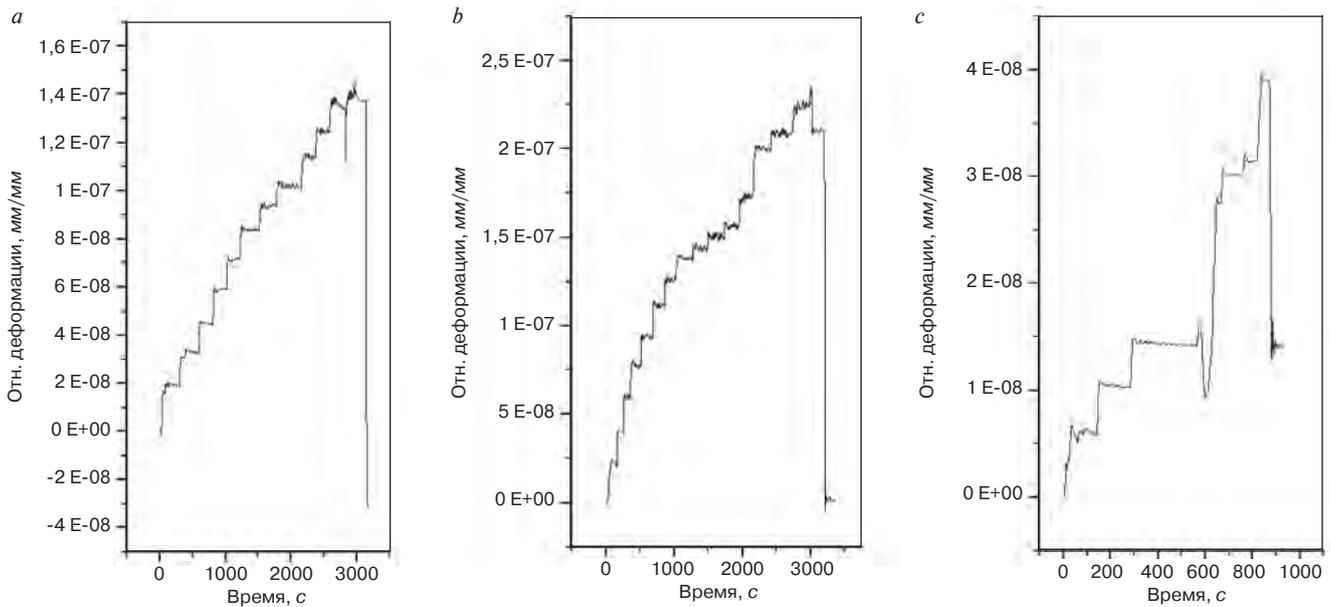


Рис. 10. Графики относительных деформаций по тензодатчику «1» испытываемых фланцевых узлов: а – без повреждений; б – с вырезом участка полки и стенки ригеля; с – с локальным погибом полки ригеля  
Fig. 10. Graphs of strain of the far point of the console of the tested structures: а – without damage; б – with a cutout of a part of the shelf and the wall of the crossbar; с – with a local defect of the crossbar flange

«Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия» из стали марки СтЗсп ГОСТ 535–2005 «Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия». Механизированная сварка выполнялась сварочной проволокой Св08-Г2С, фланцевое соединение на болтах М10. Все образцы имеют высоту стойки 1200 мм, длину ригеля 650 мм. По торцам колонны приварены квадратные пластины толщиной 8 мм для возможности установки образца в закрепляющие конструкции.

Искусственно нанесенные дефекты узла (рис. 2) имитируют характерные повреждения, которые могут получить элементы узла несущих конструкций зданий. Повреждения стальных элементов реальных эксплуатируемых конструкций в виде выреза металла, локального погиба вследствие механического воздействия показаны на рис. 3.

Перед проведением испытаний был выполнен визуальный осмотр экспериментальной установки в соответствии с ГОСТ 23118–99 «Конструкции стальные строительные. Общие технические условия» и образцов. Отмечено удовлетворительное качество сварных

швов, соединяющих фланец и ребра с ригелем, горизонтальных диафрагм со стенкой и полками колонны.

Для изучения поведения узла в виде цифровых моделей были выполнены геометрические модели образцов с повреждениями в ПВК Ansys с использованием CAD-модуля SpaceClaim (рис. 4).

Для определения напряженно-деформированного состояния элементов образца при испытании устанавливаются тензодатчики согласно схемам, представленным на рис. 5. Два тензорезистора устанавливаются на горизонтальном элементе около места примыкания к стойке, и один устанавливается непосредственно на фланце.

На высоте 1/4 и 3/4 колонны устанавливаются измерители деформаций часового типа для контроля горизонтальных перемещений модели. Также измеритель устанавливается под местом приложения нагрузки к консольной части образца для определения деформаций ригеля. Схема расположения измерителей указана на рис. 6.

Статические испытания проводились последовательно с образцом без повреждений и образцами с имитацией повреждений. Испытуемый образец по торцам стойки закреплялся в прессе, моделирующем сжимающую нагрузку на стойку до 3000 кг (рис. 7).

Также к крайней точке консоли прикладывалась сосредоточенная нагрузка до 2500 кг с помощью гидравлического домкрата (рис. 8). Нагружение от гидравлического домкрата для каждой модели разбивалось на равные шаги. На каждом шаге приращение нагрузки составляло не более 200 кг. Показания приборов фиксировались на каждом этапе нагружения.

#### Список литературы

1. Евтушенко С.И., Крахмальный Т.А. Дефекты и повреждения столбчатых фундаментов производственных зданий // *Строительство и архитектура*. 2019. Т. 7. № 4. С. 36–40.
2. Евтушенко С.И., Крахмальный Т.А. Дефекты и повреждения металлических колонн производственных зданий // *Строительство и архитектура*. 2021. Т. 9. № 2. С. 11–15.
3. Масляев А.В. Допустимые повреждения в зданиях и сооружениях с различной ответственностью при землетрясении // *Жилищное строительство*. 2008. № 11. С. 8–10.
4. Жур В.Н., Прокопов А.Ю., Романов П.С. Оценка степени повреждения жилых зданий при совместном воздействии вертикальных и горизонтальных деформаций в основании фундаментов. *Актуальные проблемы науки и техники. Материалы национальной научно-практической конференции*. 2019. Ростов н/Д. С. 263–265.
5. Добромислов А.Н. Диагностика повреждений зданий и инженерных сооружений. М.: МГСУ, 2008. 301 с.
6. Смоляго Г.А., Фролов Н.В., Дронов А.В. Анализ коррозионных повреждений эксплуатируемых из-

В результате проведенных экспериментальных исследований получены массивы данных, содержащие относительные деформации  $\varepsilon$  (мм/мм) в зависимости от времени  $t$  (с) и величины приложенной гидравлическим домкратом нагрузки  $F$  (кг) по показаниям тензодатчиков, а также таблицы перемещений конструкции в контрольных точках (рис. 5) в зависимости от величины приложенной гидравлическим домкратом нагрузки  $F$  (кг) по показаниям измерителей деформации часового типа. Структурированные и приведенные к графическому изображению данные представлены на рис. 9, 10.

#### Выводы

Результаты выполненных комплексных экспериментальных исследований фланцевых узлов стального каркаса из элементов двутаврового сечения, получивших повреждения при эксплуатации, позволили проанализировать работу узла на всех этапах нагружения на реальных образцах в линейной и нелинейной стадиях. В результате проведенной работы получена сформированная методика испытания экспериментальных образцов фланцевых соединений стального каркаса. Выполнено описание напряженно-деформированного состояния рассматриваемых образцов по результатам натурных испытаний. Исследовано влияние механических повреждений узлов в различных зонах с учетом реальной геометрии повреждений, что позволяет дать более точные рекомендации по дальнейшей эксплуатации и проведению планово-восстановительных ремонтов на практике.

#### References

1. Evtushenko S.I., Krakhmalny T.A. Defects and damage to the columnar foundations of industrial buildings. *Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2019. Vol. 7. No. 4, pp. 36–40. (In Russian).
2. Evtushenko S.I., Krakhmalny T.A. Defects and damage to metal columns of industrial buildings. *Stroitel'stvo i arkhitektura*. 2021. Vol. 9. No. 2, pp. 11–15. (In Russian).
3. Maslyayev A.V. Permissible damage in buildings and structures with different liability during an earthquake. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2008. No. 11, pp. 8–10. (In Russian).
4. Zhur V.N., Prokopov A.Yu., Romanov P.S. Assessment of the degree of damage to residential buildings under the combined effect of vertical and horizontal deformations in the base of foundations. *Actual problems of science and technology. Materials of the national scientific-practical conference*. 2019. Rostov-on-Don, pp. 263–265. (In Russian).
5. Dobromyslov A.N. Diagnostika povrezhdeniy zdaniy i inzhenernykh sooruzheniy [Diagnosis of damage to buildings and engineering structures]. Moscow: MSTU. 2008. 301 p.
6. Smolyago G.A., Frolov N.V., Dronov A.V. Analysis of corrosion damage in exploited bent reinforced con-

- гибаемых железобетонных конструкций зданий и сооружений // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2019. № 1. С. 52–57.
7. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. К вопросу о живучести строительных конструкций // *Строительная механика и расчет сооружений*. 2008. № 2 (217). С. 36–43.
  8. Кудишин Ю.И., Дробот Д.Ю. Живучесть конструкций в аварийных ситуациях // *Металлические здания*. Ч. 1. 2008. № 4 (8). С. 20–22.
  9. Уткин В.С., Плотникова О.С. Живучесть – основной показатель качества зданий и сооружений // *Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века*. 2006. № 6. С. 22–25.
  10. Перельмутер А.В., Кабанцев О.В., Пичугин С.Ф. Основы метода предельных расчетных состояний. М.: АСВ, 2019. 240 с.
  11. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. 3-е изд. М.: АСВ, 2007. 255 с.
  12. Пичугин С.Ф. Надежность стальных конструкций производственных зданий. М.: АСВ, 2011. 457 с.
  13. Ведяков И.И. Выявление резервов несущей способности стальных строительных конструкций на основе совершенствования методов их расчета и рационального применения современных материалов: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2000. 370 с.
- crete structures of buildings and structures. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after Shukhov V.G.* 2019. No. 1, pp. 52–57. (In Russian).
7. Kudishin Yu.I., Drobot D.Yu. To the question of the survivability of building structures. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzheniy*. 2008. No. 2 (217), pp. 36–43. (In Russian).
  8. Kudishin Yu.I., Drobot D.Yu. Structural survivability in emergency situations. *Metallicheskiye zdaniya*. P. 1. 2008. No. 4 (8), pp. 20–22. (In Russian).
  9. Utkin B.C., Plotnikova O.S. Vitality is the main indicator of the quality of buildings and structures. *Stroitel'nyye materialy, oborudovaniye i tekhnologii XXI veka*. 2006. No. 6, pp. 22–25. (In Russian).
  10. Perelmuter A.V., Kabantsev O.V., Pichugin S.F. Osnovy metoda predel'nykh raschetnykh sostoyaniy [Fundamentals of the method of limit design states]. Moscow: ASV. 2019. 240 p.
  11. Perelmuter A.V. Izbrannyye problemy nadezhnosti i bezopasnosti stroitel'nykh konstruksiy [Selected problems of reliability and safety of building structures]. Moscow: ASV. 2007. 255 p.
  12. Pichugin S.F. Nadezhnost' stal'nykh konstruksiy proizvodstvennykh zdaniy [Reliability of steel structures of industrial buildings]. Moscow: ASV. 2011. 457 p.
  13. Vedyakov I.I. Identification of the reserves of the bearing capacity of steel building structures based on the improvement of methods for their calculation and the rational use of modern materials. Doctor Diss. (Engineering). Moscow. 2000. 370 p. (In Russian).



**20–21  
сентября  
2023 г.**

**п. Архыз (п. Романтик),  
Карачаево-Черкесская  
Республика**

**Оргкомитет:  
140050, Московская обл.  
п. Красково  
ул. К. Маркса, д. 117,  
РГА**

**Телефон:  
+7 8-916-501-36-56  
E-mail: rga-service@mail.ru  
www.rosgips.ru**

Российская гипсовая ассоциация  
Российская академия архитектуры и строительных наук  
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Научно-исследовательский институт строительной физики  
при поддержке Правительства Карачаево-Черкесской Республики

**Одиннадцатая Международная конференция  
«Повышение эффективности производства  
и применения гипсовых материалов и изделий»**

---

**ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ПРОГРАММА:**

- 19.09 — заезд участников, организованный трансфер из аэропорта «Минеральные воды», экскурсия на горный перевал.
- 20.09 — пленарное заседание, доклады и сообщения, дружеский ужин.
- 21.09 — производственная экскурсия на Хабезский гипсовый завод, посещение музея и пикник на обочине.

Проведение конференции намечено в МФК «Романтик» ([https://hotelromantik.ru/korp\\_places/](https://hotelromantik.ru/korp_places/)).

Для размещения участников предлагаются гостиницы: «Романтик 1», «Романтик 2», «Вертикаль», «Axis apart hotel», «Arkhyz Royal Resort», «Grizzly», «Баринь» и др. Гостиницы бронируются самостоятельно. Проживание в стоимость участия в конференции не входит.

---

**ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ:**

Технический прогресс в области гипсовых материалов и изделий (исследования, производство и применение); ангидритовые вяжущие; гипсовые материалы в малозэтажном строительстве; привлекательность и механизмы инноваций в гипсовой отрасли; современное оборудование для производства гипсовых вяжущих, материалов и изделий на их основе; лаборатории, менеджмент качества, экологический менеджмент и их роль в обеспечении качества и долговечности гипсовых материалов; нормативно-техническая документация в соответствии с современными требованиями.

---

**Генеральный спонсор:** 

**Генеральный информационный спонсор: журнал** 

УДК 624.046.5

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-45-50>

С.А. СОЛОВЬЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук (solovevsa@vogu35.ru),  
 А.А. СОЛОВЬЕВА<sup>1</sup>, инженер (аспирант) (solovevaa@vogu35.ru);  
 Н.П. УМНЯКОВА<sup>2,3</sup>, д-р техн. наук (n.umniakova@mail.ru);  
 А.А. КОЧКИН<sup>1</sup>, д-р техн. наук (kochkinaa@vogu35.ru)

<sup>1</sup> Вологодский государственный университет (160000, г. Вологда, ул. Ленина, 15)

<sup>2</sup> Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН (127238, г. Москва, Локомотивный пр., 21)

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (129337, г. Москва, Ярославское ш., 26)

## Вероятностная оценка надежности элементов строительных конструкций при эпистемологической неопределенности данных

В практических задачах вероятностного анализа надежности возникает необходимость одновременного учета и моделирования алеаторной и эпистемологической неопределенностей данных. Моделирование алеаторной неопределенности, как правило, основано на известных вероятностно-статистических методах теории надежности строительных конструкций, в то время как для эффективного и достоверного моделирования эпистемологической неопределенности возникает необходимость в использовании новых математических теорий анализа данных. В представленной работе демонстрируется модель р-блока (p-box) как инструмента описания случайной величины в задачах анализа надежности строительных конструкций. При большом количестве случайных величин, представленных р-блоками, аналитическое решение задачи усложняется. Для решения этой проблемы в статье представлены два численных подхода к решению данных задач: дискретизация р-блоков на структуры типа Демпстера–Шефера и интервальный метод Монте–Карло (IMC). Вероятностный анализ надежности элементов строительных конструкций позволяет получить количественную оценку уровня безопасности эксплуатации строительных конструкций, выполнить прогноз остаточного ресурса конструкций по критерию надежности, а также решить задачи оценки риска обрушения и оптимизации.

**Ключевые слова:** надежность, эпистемологическая неопределенность, теория свидетельств, вероятность отказа, вероятностное проектирование, метод Монте–Карло.

**Для цитирования:** Соловьев С.А., Соловьева А.А., Умнякова Н.П., Кочкин А.А. Вероятностная оценка надежности элементов строительных конструкций при эпистемологической неопределенности данных // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-45-50>

S.A. SOLOVEV<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (solovevsa@vogu35.ru),

A.A. SOLOVEVA<sup>1</sup>, Engineer (Graduate Student) (solovevaa@vogu35.ru);

N.P. UMNIKOVA<sup>2,3</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (n.umniakova@mail.ru);

A.A. KOCHKIN<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (kochkinaa@vogu35.ru)

<sup>1</sup> Vologda State University (15, Lenin Street, Vologda, 160000, Russian Federation)

<sup>2</sup> Scientific-Research Institute of Building Physics of RAACS (21, Lokomotivnyy Driveway, Moscow, 127238, Russian Federation)

<sup>3</sup> National Research Moscow State University of Civil Engineering (26, Yaroslavskoye Highway, Moscow, 129337, Russian Federation)

### Structural Reliability Analysis with Epistemic Uncertainty of Data

In practical problems of probabilistic reliability analysis, there is a need for accounting and modeling of aleatory and epistemic uncertainties of data. Modeling of aleatory uncertainty, as a rule, is based on well-known probabilistic and statistical methods of the structural reliability theory, while for effective and reliable modeling of epistemic uncertainty, it becomes necessary to use new mathematical theories of data analysis. The article demonstrates the p-box model as a tool for describing a random variable in the problems of structural reliability analysis. With a large number of random variables represented by p-boxes, the analytical solution of the problem becomes more complicated. To deal with this problem, the article presents two numerical approaches to solving it: the discretization of p-boxes into the Dempster-Shafer structures and the Interval Monte Carlo method (IMC). Probabilistic analysis of the structural reliability allow to obtain a quantitative assessment of the safety level of buildings and structures, to forecast the residual life of structures according to the reliability criterion, as well as to solve the problems of risk assessing and optimization problems.

**Keywords:** reliability, epistemic uncertainty, evidence theory, failure probability, probabilistic design, Monte Carlo method.

**For citation:** Solovov S.A., Soloveva A.A., Umniakova N.P., Kochkin A.A. Structural reliability analysis with epistemic uncertainty of data. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 45–50. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-45-50>

Надежность строительного объекта – это его способность выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации. В соответствии с ГОСТ 27751–2014 «Надежность строительных конструкций и оснований» основным условием надежности строительных объектов является выпол-

нение требований (критериев) для всех учитываемых предельных состояний при действии наиболее неблагоприятных сочетаний расчетных нагрузок в течение расчетного срока службы. Такой подход позволяет проверить требование выполнения некоторого заданного нормами уровня надежности,

но не позволяет получить его количественную оценку. Как отмечает д-р техн. наук, профессор О.В. Мкртычев в актуальной научной работе [1], «метод предельных состояний позволяет обеспечить необходимый уровень надежности зданий и сооружений, что подтверждается опытом проектирования, строительства и эксплуатации. Однако данный метод имеет ряд недостатков, например, невозможно сказать, какой уровень надежности в количественном измерении формируется в результате применения норм проектирования, одинаков ли этот уровень надежности для зданий и сооружений различных конструктивных схем и выполненных из различных материалов».

В международном стандарте Eurocode 0 «Basis of Structural Design» отмечено, что надежность обычно выражается в вероятностных показателях. В зависимости от технической отрасли существуют различные количественные меры надежности, приведенные в ГОСТ Р 27.102–2021 «Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения». В инженерно-строительной практике наиболее распространенным показателем надежности является вероятность безотказной работы или вероятность отказа.

Вероятностные методы оценки и анализа надежности строительных конструкций получили широкое распространение и развитие в середине XX в., в том числе благодаря фундаментальным исследованиям в теории надежности строительных конструкций Н.В. Стрелецкого и А.Р. Ржаницына [2]. Классические методы вероятностного анализа надежности основаны на использовании подходов теории вероятностей и математической статистики для вычисления вероятности наступления события отказа элемента конструкции или обратного ему события.

Одной из главных задач в теории надежности строительных конструкций является эффективное моделирование неопределенности данных. Существует множество источников возникновения неопределенностей, но в общем виде неопределенности можно классифицировать на два вида: алеаторная и эпистемологическая [3]. Неопределенность характеризуется как эпистемологическая, если существует возможность ее уменьшить путем сбора большего количества данных (проведения дополнительных испытаний и измерений) или уточнения моделей случайных величин. Неопределенность характеризуется как алеаторная, если снижение данного типа неопределенности не представляется возможным.

Известные и распространенные вероятностно-статистические методы позволяют эффективно моделировать лишь алеаторную неопределенность. Для формирования достоверных моделей учета эпистемологической неопределенности необходимо вовлечение в теорию надежности строительных конструкций новых теорий анализа данных. На те-

кущий момент широкое внимание уделяется р-блокам (probability box) [4] как моделям случайных величин, позволяющим учесть как алеаторную, так и эпистемологическую неопределенность. В данной статье рассмотрим алгоритмы вычисления вероятности безотказной работы при использовании р-блоков в качестве моделей случайных величин в задачах анализа надежности строительных конструкций.

### Материалы и методы

Надежность элемента строительной конструкции выражается в виде вероятности реализации события исчерпания резерва несущей способности элемента по заданной математической модели предельного состояния (для различных критериев работоспособности) в виде:

$$\tilde{g} = R(\tilde{y}_1, \tilde{y}_2, \dots, \tilde{y}_k) - S(\tilde{x}_1, \tilde{x}_2, \dots, \tilde{x}_n) \leq 0, \quad (1)$$

где  $S$  – функция, характеризующая обобщенную нагрузку ( $S$  – stress);  $R$  – функция, характеризующая обобщенную несущую способность ( $R$  – resistance);  $\tilde{x}_i$  – случайная величина (переменная функции  $S$ ),  $i=1, 2, \dots, n$ , где  $n$  – число случайных величин в функции  $S$ ;  $\tilde{y}_j$  – случайная величина (переменная функции  $R$ ),  $j=1, 2, \dots, k$ , где  $k$  – число случайных величин в функции  $R$ .

Пусть известна функция  $f_g(g)$  плотности распределения вероятностей для резерва несущей способности  $g$ . Исходя из свойства функции плотности вероятности вида  $\Pr(\xi \in [a; b]) = \int_a^b f_x(x) dx$ , можно записать выражение для оценки вероятности отказа  $P_f$  элемента конструкции:

$$P_f = \Pr(g \leq 0) = \int_{-\infty}^0 f_g(g) dg. \quad (2)$$

При использовании гипотезы о принадлежности распределения резерва несущей способности к нормальному распределению вероятностей вероятность отказа можно вычислить по формуле:

$$P_f = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{S_g \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(m_g - g)^2}{2 \cdot S_g^2}\right] dg, \quad (3)$$

где  $m_g$  – математическое ожидание функции резерва прочности  $\tilde{g}$ ;  $S_g$  – среднеквадратическое отклонение функции резерва прочности  $\tilde{g}$ .

Например, для математической модели предельного состояния общего вида  $X \leq Y$ , где  $X$  – нагрузка на элемент;  $Y$  – несущая способность элемента, можно принять следующие параметры в (3):  $m_g = m_y - m_x$ ,  $S_g = \sqrt{S_y^2 + S_x^2}$ , где  $m_i$  и  $S_i$  – математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение  $i$ -й случайной величины.

В практических задачах вероятностного анализа надежности строительных конструкций крайне затруднительно получить объективную точную оценку математического ожидания и среднеквадратического отклонения для случайной величины. Как

правило, используются доверительные интервалы  $m_g \in [m_g; \bar{m}_g]$  и  $S_g \in [S_g; \bar{S}_g]$  для оценки математического ожидания и среднеквадратического отклонения. Причем, как показано в исследовании [5], данные интервалы могут оставаться довольно широкими даже при проведении 100 испытаний/измерений.

Таким образом, выражение для вероятности отказа может быть представлено в интервальной форме:

$$P_f = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{S_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(\bar{m}_g - g)^2}{2 \cdot S_g^2} \right] dg; \quad (4)$$

$$\bar{P}_f = \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\bar{S}_g \sqrt{2\pi}} \exp \left[ \frac{-(m_g - g)^2}{2 \cdot \bar{S}_g^2} \right] dg.$$

Как было отмечено ранее, многие задачи анализа надежности строительных конструкций решаются в предположении о нормальном распределении вероятностей случайных величин в математических моделях предельных состояний. Как отмечается в работе [6], «широко распространена вера в то, что статистические данные часто подчиняются нормальному распределению. Между тем анализ конкретных результатов наблюдений, в частности погрешностей измерений, приводит всегда к одному и тому же выводу: в подавляющем большинстве случаев реальные распределения существенно отличаются от нормальных. Некритическое использование гипотезы нормальности часто приводит к значительным ошибкам, например при отбраковке резко выделяющихся результатов наблюдений (выбросов), при статистическом контроле качества и в других случаях».

Проблема выбора и обоснования закона распределения случайной величины является предметом исследования актуальных зарубежных работ. Так, в исследовании [7] отмечается, что «вероятности отказа конструкций обычно очень малы и чувствительны к выбору распределений вероятностей. Однако доступные данные о прочности конструкции и нагрузках, как правило, ограничены, и конкурирующие распределения часто невозможно отличить с помощью стандартных статистических тестов. Когда данные наблюдений ограничены, аналитик может быть не в состоянии определить тип распределения случайной величины или точные значения параметров распределения, или могут существовать конкурирующие вероятностные модели. Выбор распределения для вероятностных входных данных, как правило, осуществляется на основе неоднозначной информации. Это может привести к неправильному выбору модели и сильной переоценке надежности конструкции, что приведет к принятию критических решений с серьезными последствиями».

В качестве альтернативных моделей случайных величин активно применяются модели р-блоков [8].

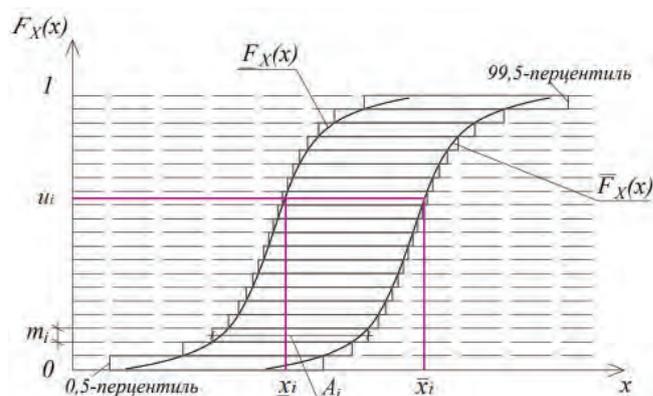


Рис. 1. Дискретизация р-блока на фокальные элементы в рамках теории свидетельств Демпстера–Шефера

Fig. 1. Discretization of the p-box into focal elements in the framework of the evidence theory

Р-блок – модель случайной величины, образованная двумя граничными функциями распределения вероятностей, формирующими область неопределенности, внутри которой находится действительная, но наперед неизвестная функция распределения.

Одной из вычислительных проблем в анализе надежности с использованием р-блоков является задача оценки надежности при наличии в математической модели случайных величин р-блоков различных видов. Например, при наличии большого числа статистических данных можно использовать параметрический р-блок с интервальной оценкой параметров распределения. В то же время информация об отдельных случайных величинах может быть крайне ограничена по ряду причин: невозможность отбора большого количества контрольных образцов из индивидуального объекта, высокая стоимость или трудозатратность проведения отдельных испытаний и т. д. В этом случае, например, можно использовать р-блок на основе положений теории нечетких множеств [9]. Далее рассмотрим эффективные методики анализа надежности при наличии разных типов р-блоков в математической модели предельного состояния.

### Результаты исследования

Математические операции с р-блоками вследствие их различной природы производятся после их трансформации в структуры Демпстера–Шефера [10] путем дискретизации на фокальные элементы (рис. 1).

Распределения при дискретизации ограничиваются 0,5 и 99,5 – перцентильми [11].

Шаг дискретизации  $m_i$  обычно принимают 0,01 с учетом  $\sum_{i=1}^n m_i = 1$ . В данном случае мы получаем 100 интервальных оценок  $A_i$  случайной величины  $X$ . Следовательно, проводя дискретизацию р-блоков, можно получить 100 интервалов вида  $[x_1; \bar{x}_1]$ ,  $[x_2; \bar{x}_2]$ , ...  $[x_{100}; \bar{x}_{100}]$ . Аналогично можно получить 100 интервалов для данной модели р-блока случайной величины  $Y$ :  $[y_1; \bar{y}_1]$ ,  $[y_2; \bar{y}_2]$ , ...  $[y_{100}; \bar{y}_{100}]$ .

Табличная форма для вычисления разности двух р-блоков  
Tabular form for subtraction of two p-boxes

	$[y_1; \bar{y}_1], 0,01$	$[y_2; \bar{y}_2], 0,01$	...	$[y_{100}; \bar{y}_{100}], 0,01$
$[x_1; \bar{x}_1], 0,01$	$g_{1,1} = [y_1 - \bar{x}_1; \bar{y}_1 - x_1], 0,0001$	$g_{2,1} = [y_2 - \bar{x}_1; \bar{y}_2 - x_1], 0,0001$	...	$g_{100,1} = [y_{100} - \bar{x}_1; \bar{y}_{100} - x_1], 0,0001$
$[x_2; \bar{x}_2], 0,01$	$[y_1 - \bar{x}_2; \bar{y}_1 - x_2], 0,0001$	$[y_2 - \bar{x}_2; \bar{y}_2 - x_2], 0,0001$	...	$[y_{100} - \bar{x}_2; \bar{y}_{100} - x_2], 0,0001$
...	...	...	...	...
$[x_{100}; \bar{x}_{100}], 0,01$	$[y_1 - \bar{x}_{100}; \bar{y}_1 - x_{100}], 0,0001$	$[y_2 - \bar{x}_{100}; \bar{y}_2 - x_{100}], 0,0001$	...	$[y_{100} - \bar{x}_{100}; \bar{y}_{100} - x_{100}], 0,0001$

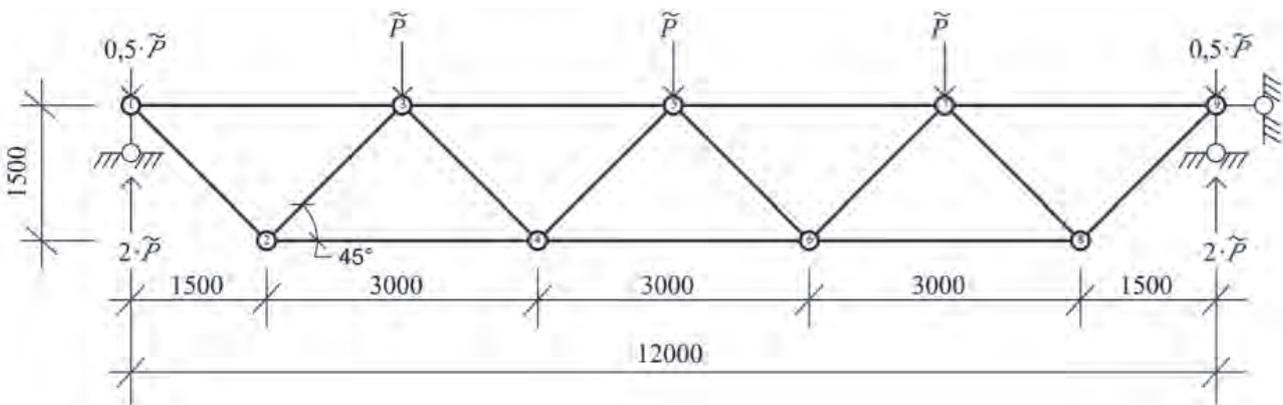


Рис. 2. Расчетная схема фермы  
Fig. 2. Design scheme of a truss

Более подробная информация о том, как сформировать единую модель нагрузки по типу структуры Демпстера–Шефера, приведена в исследовании [10].

Функция предельного состояния с двумя моделями р-блоков (трансформированных в структуры Демпстера–Шефера) будет иметь вид:

$$g = Y - X \leq 0. \quad (5)$$

Функция распределения по модели предельного состояния  $g$  будет представлять собой разность двух структур типа Демпстера–Шефера. Для вычисления подмножества значений функции необходимо составить табличную форму (см. таблицу). Так как р-блоки  $Y$  и  $X$  дискретизируются на 100 фокальных элементов, то функция предельного состояния  $g$  будет иметь подмножество в 10000 интервальных значений:

$$g_{i,j} = [g_{i,j}, \bar{g}_{i,j}]. \quad (6)$$

Расчет вероятности безотказной работы  $P$  по данным таблицы сводится к простому алгоритму:

$$P \in [P, \bar{P}], \text{ где } \begin{aligned} P &= \frac{\text{количество } [g_{i,j} < 0]}{10000}; \\ \bar{P} &= \frac{\text{количество } [\bar{g}_{i,j} < 0]}{10000}. \end{aligned} \quad (7)$$

Вторым вариантом оценки вероятности безотказной работы или вероятности отказа на основе р-блоков является интервальный метод Монте-Карло (ИМС) [7, 12]. Вероятность безотказной работы на основе классического метода Монте-Карло определяется как:

$$P_f \approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(x_j) \leq 0], \quad (8)$$

где  $I[\cdot]$  – это функция индикатора, имеющая значение 1, если  $I[\cdot]$  равно «истина», и значение 0, если  $I[\cdot]$  равно «ложь»;  $N$  – число генераций случайных величин.

При наличии двух граничных функций распределения вероятностей в р-блоке выражение (8) будет представлено в интервальной форме:

$$\begin{aligned} P_f &\approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[g(x_j) \leq 0]; \\ \bar{P}_f &\approx \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[\bar{g}(x_j) \leq 0]. \end{aligned} \quad (9)$$

Значения случайных величин для (9) получают по следующему алгоритму: генерируется  $N$  значений равномерно распределенной случайной величины  $u_i$  в пределах от  $[0; 1]$ . Значения случайной величины в виде интервала  $[x_i; \bar{x}_i]$  получают методом обратного преобразования (преобразование Н.В. Смирнова):  $x_i = F^{-1}(u_i)$ ,  $\bar{x}_i = F^{-1}(u_i)$  (рис. 1). Сгенерированные интервалы случайных величин

подставляют в функции предельных состояний  $\underline{g}(x_j)$  и  $\bar{g}(x_j)$ . Для обработки интервальных данных могут быть использованы положения интервальной арифметики [13]:

$$\begin{aligned} [a] + [b] &= [a, \bar{a}] + [b, \bar{b}] = [\underline{a} + \underline{b}, \bar{a} + \bar{b}] \\ [a] - [b] &= [a, \bar{a}] - [b, \bar{b}] = [\underline{a} - \bar{b}, \bar{a} - \underline{b}] \\ [a] \cdot [b] &= [\min\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}\}, \max\{\underline{a}\underline{b}, \underline{a}\bar{b}, \bar{a}\underline{b}, \bar{a}\bar{b}\}] \\ [a]/[b] &= a \cdot [1/\bar{b}, 1/\underline{b}], \text{ для } b \neq 0. \end{aligned} \quad (10)$$

Два вышеизложенных алгоритма вероятностного анализа надежности элементов строительных конструкций легко автоматизируются в различном программном обеспечении. Выражения (10) также могут быть использованы в табл. 1 для арифметических действий с р-блоками.

Рассмотрим анализ надежности стержня фермы с расчетной схемой по рис. 2.

Пусть выполняется расчет надежности растянутого стержня 4–6 по критерию прочности стали. В этом случае математическую модель предельного состояния можно записать в виде:

$$\tilde{N}_{4-6}(\tilde{P})/A_{4-6} \leq \tilde{\sigma}_{s,ult}, \quad (11)$$

где  $\tilde{N}_{4-6}(\tilde{P})$  – усилие в стержне 4–6 от случайной нагрузки  $\tilde{P}$ ;  $A_{4-6}$  – площадь поперечного сечения стержня 4–6;  $\tilde{\sigma}_{s,ult}$  – предельное напряжение в стали стержня 4–6.

В связи с комплексностью нагрузки на узел фермы, в которую включаются различные случайные величины с различными видами неопределенностей, для моделирования случайной величины  $\tilde{N}_{4-6}(\tilde{P})$  могут быть использованы граничные функции на основе теории возможностей [9]:

$$\underline{F}_x(x) = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right], & \text{если } x < a_x; \\ 1, & \text{если } x \geq a_x; \end{cases} \quad (12)$$

$$\bar{F}_x(x) = \begin{cases} 0, & \text{если } x < a_x; \\ 1 - \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right], & \text{если } x \geq a_x, \end{cases} \quad (13)$$

где  $a_x = 0,5 \cdot (x_{\max} + x_{\min})$  – условное «среднее»;  $b_x = 0,5 \cdot (x_{\max} - x_{\min}) / \sqrt{-\ln \alpha}$  – мера «рассеяния», где  $x_{\max}$  и  $x_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значения во множестве значений  $\{x\}$  нечеткой переменной  $X$ , полученных из результатов измерений (испытаний);  $\alpha \in [0; 1]$  – уровень среза (риска), значением которого задаются.

Введем обозначения  $\tilde{N}_{4-6}(\tilde{P})/A_{4-6} = X$ ,  $\tilde{\sigma}_{s,ult} = Y$ . Тогда математическую модель предельного состояния (11) можно записать в виде:

$$X \leq Y. \quad (14)$$

Так как в левой и правой частях неравенства (14) приведено по одной случайной величине, вероятность безотказной работы можно вычислить по формуле:

$$\begin{cases} \underline{P} = \int_0^{+\infty} \underline{f}_y(x) \cdot \bar{F}_x(x) dx \\ \bar{P} = \int_0^{+\infty} \bar{f}_y(x) \cdot \underline{F}_x(x) dx \end{cases} \quad (15)$$

В случае, если нагрузка описывается функциями распределения возможностей (12)–(13), а прочность стали описывается плотностью нормального распределения с интервальными параметрами  $m_y \in [m_y; \bar{m}_y]$  и  $S_y \in [S_y; \bar{S}_y]$ , уравнения для расчета вероятности безотказной работы могут быть представлены в виде:

$$\begin{aligned} \underline{P} &= \int_{a_x}^{m_y} \left[ 1 - \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right] \right] \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \cdot \\ &\cdot \exp\left[\frac{-(m_y - x)^2}{2 \cdot S_y^2}\right] dx + \int_{m_y}^{+\infty} \left[ 1 - \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right] \right] \cdot \\ &\cdot \frac{1}{S_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(m_y - x)^2}{2 \cdot S_y^2}\right] dx; \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \int_0^{a_x} \frac{1}{\bar{S}_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(\bar{m}_y - x)^2}{2 \cdot \bar{S}_y^2}\right] \cdot \exp\left[-\left(\frac{a_x - x}{b_x}\right)^2\right] \cdot \\ &\cdot dx + \int_{a_x}^{\bar{m}_y} \frac{1}{\bar{S}_y \sqrt{2\pi}} \exp\left[\frac{-(\bar{m}_y - x)^2}{2 \cdot \bar{S}_y^2}\right] dx + \int_{\bar{m}_y}^{+\infty} \frac{1}{\bar{S}_y \sqrt{2\pi}} \cdot \\ &\cdot \exp\left[\frac{-(\bar{m}_y - x)^2}{2 \cdot \bar{S}_y^2}\right] dx. \end{aligned} \quad (17)$$

Пусть по результатам сбора и анализа статистической информации установлено:  $x_{\max} = 300$  МПа;  $x_{\min} = 280$  МПа;  $m_y \in [315; 320]$  МПа;  $S_y \in [5; 7]$  МПа. Тогда по формулам (16) и (17) надежность стержня 4–6 составит  $P \in [0,99331; 0,99999]$ .

Сгенерируем 10000 значений интервалов по интервальному методу Монте-Карло (9). Из 10000 пар значений по нижней границе произошло 76 отказов – расчетных случаев, когда предельное напряжение было ниже расчетного. По верхней границе превышений предельного состояния не было. На основании частотной характеристики вероятности можно записать надежность в виде:  $P_{IMC} \in [0,99240; 1,00000]$ .

Как видно из результатов расчета, аналитическое и численное решения получаются очень близкими. Разница в результатах обусловлена выбором метода генерирования случайных чисел и количеством генерируемых значений.

### Выводы

1. Существует множество источников возникновения неопределенностей, но в общем виде неопределенности можно классифицировать на два вида: алеаторная и эпистемологическая. Неопределенность характеризуется как эпистемологическая, если существует возможность ее уменьшить путем сбора большего количества данных (проведения дополнительных испытаний и измерений) или уточнения моделей случайных величин. Неопределенность характеризуется как алеаторная, если снижение данного типа неопределенности не представляется возможным.

2. Эффективной моделью случайной величины, позволяющей учесть алеаторную и эпистемологическую неопределенности, является р-блок. В статье описаны два алгоритма вычисления вероятности безотказной работы с использованием р-блоков различного типа, которые являются эффективными моделями учета эпистемологической неопределенности данных.

3. Рост количества статистических данных и повышение их качества ведут к снижению эпистемологической неопределенности. Необходимость снижения уровня эпистемологической неопределенности данных в задачах анализа надежности строительных конструкций зависит от информативности интервала вероятности безотказной работы и целевого уровня надежности.

### Список литературы / References

1. Мкртычев О.В., Щедрин О.С., Лохова Е.М. Определение коэффициентов надежности по ответственности для отдельных несущих элементов на основе вероятностного анализа // *Вестник МГСУ*. 2022. Т. 17. Вып. 10. С. 1331–1346. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346.
1. Mkrtychev O.V., Shchedrin O.S., Lkhova E.M. Determination of individual coefficients on the basis of probabilistic analysis. *Vestnik MSTU*. 2022. Vol. 17 (10), pp. 1331–1346. (In Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2022.10.1331-1346
2. Ржаницын А.Р. Применение статистических методов в расчетах сооружений на прочность и безопасность // *Строительная промышленность*. 1952. № 6. С. 22–25.
2. Rzhantsyn A.R. Application of statistical methods in calculations of structures for strength and safety. *Stroitel'naya promishlennost*. 1952. No. 6, pp. 22–25. (In Russian).
3. Der Kiureghian A., Ditlevsen O. Aleatory or epistemic? Does it matter? *Structural safety*. 2009. Vol. 31. Iss. 2, pp. 105–112. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2008.06.020>
3. Xie H., Li J., Liao D. A new structural reliability analysis method under non-parameterized probability box variables. *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 2022. Vol. 65. No. 11. 322. <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03408-5>
5. Соловьев С.А., Соловьева А.А., Умнякова Н.П., Кочкин А.А. Анализ проблем оценки индекса надежности элементов строительных конструкций // *Жилищное строительство*. 2022. № 7. С. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-7-32-39>
5. Soloviev S.A., Solovieva A.A., Umnyakova N.P., Kochkin A.A. Analysis of the problems of assessing the reliability index of elements of building structures. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2022. No. 7, pp. 32–39. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2022-7-32-39>
6. Орлов А.И. Современное состояние непараметрической статистики // *Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета*. 2015. № 106. С. 239–269.
6. Orlov A.I. Current status of nonparametric statistics. *Politematicheskij setevoy elektronnyj nauchnyj zhurnal Kubanskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta*. 2015. No. 106, pp. 239–269. (In Russian).
7. Zhang H., Dai H., Beer M., Wang W. Structural reliability analysis on the basis of small samples: an interval quasi-Monte Carlo method. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2013. Vol. 37 (1–2), pp. 137–151. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2012.03.001>
8. Faes M.G., Daub M., Marelli S., Patelli E., Beer M. Engineering analysis with probability boxes: a review on computational methods. *Structural Safety*. 2021. Vol. 93. 102092. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2021.102092>
9. Соловьев С.А. Вероятностная оценка промышленной безопасности при неполной статистической информации // *Безопасность труда в промышленности*. 2020. № 9. С. 88–93. DOI: 10.24000/0409-2961-2020-9-88-93.
9. Soloviev S.A. Probabilistic estimation of industrial safety with incomplete statistic data. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2020. No. 9, pp. 88–93. (In Russian). DOI: 10.24000/0409-2961-2020-9-88-93
10. Ferson S., Kreinovich V., Grinzburg L., Myers D., Sentz K. Constructing probability boxes and Dempster-Shafer structures (No. SAND-2015-4166J). Sandia National Lab (SNL-NM), Albuquerque, 2003. 132 p. DOI: 10.2172/809606
11. Karanki D.R., Kushwaha H.S., Verma A.K., Ajit S. Uncertainty analysis based on probability bounds (p-box) approach in probabilistic safety assessment. *Risk Analysis: An International Journal*. 2009. Vol. 29 (5). pp. 662–675. DOI: 10.1111/j.1539-6924.2009.01221.
12. Zhang H., Mullen R.L., Muhanna R.L. Interval Monte Carlo methods for structural reliability. *Structural Safety*. 2010. Vol. 32. Iss. 3, pp. 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2010.01.001>
13. Timothy H., Ju Q., Van Emden M.H. Interval arithmetic: From principles to implementation. *Journal of the ACM (JACM)*. 2001. Vol. 48. No. 5, pp. 1038–1068. DOI: 10.1145/502102.502106

УДК 622-032.5

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-51-56>

С.В. ВАВРЕНЮК<sup>1</sup>, д-р техн. наук, член-корр. РААСН, заслуженный строитель России, зам. директора по научной работе (svvn59@mail.ru);  
 В.Г. ВАВРЕНЮК<sup>2</sup>, канд. техн. наук (svvn59@mail.ru),  
 Р.С. ФЕДЮК<sup>2</sup>, д-р техн. наук (roman44@yandex.ru);  
 А.А. КИМ<sup>3</sup>, канд. техн. наук, ген. директор (svvn59@mail.ru);  
 А.А. БОГОМАЗОВА<sup>3</sup>, геолог (svvn59@mail.ru)

<sup>1</sup> Филиал ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» Дальневосточный научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт по строительству (690033, г. Владивосток, ул. Бородинская, 14)

<sup>2</sup> Дальневосточный федеральный университет (690922, г. Владивосток, о. Русский, п. Аякс, 10)

<sup>3</sup> ООО «Базальт» (684003, г. Петропавловск-Камчатский, ул. Ленинградская, 33а, оф. 408)

## Анализ и обобщение свойств горных скальных пород месторождений Камчатского края

В настоящее время на Камчатке идет интенсивное развитие туристско-рекреационного кластера «Три вулкана», инженерной и социальной инфраструктуры, и в условиях активного строительства отмечается резкий спрос на строительные материалы, в частности на строительный камень и инертные заполнители для бетонов: щебень, песок, а также пескогравийные смеси. Разрабатываемые запасы общераспространенных полезных ископаемых, включая скальные горные породы для производства строительного камня и инертных заполнителей, не в полной мере удовлетворяют прогнозируемой потребности строительного комплекса на ближайшие годы. В связи с этим ведутся крупномасштабные исследования по изучению недр Камчатки, направленные на расширение действующей минерально-сырьевой базы полуострова, а также работы по расширению лицензионного фонда добычи общераспространенных полезных ископаемых в строительных целях. Публикация содержит краткий анализ и обобщение свойств магматических горных скальных пород (интрузивных, эффузивных) разрабатываемых в настоящее время месторождений Камчатского края, используемых для получения инертных заполнителей, а также содержит основные характеристики месторождений пескогравийных смесей полуострова. Приведены свежие (2022–2023) результаты исследований свойств горных скальных пород месторождения «Пионерское-4»: туфов, диоритов, гранодиоритов, базальтов, андезитобазальтов, выполненные в рамках детальной разведки и уточнения балансовых запасов месторождения, а также результаты исследований физико-механических характеристик щебня различных фракций, получаемого из гранодиоритов и туфов данного месторождения.

**Ключевые слова:** общераспространенные полезные ископаемые (ОПИ), породы горные скальные, строительный камень, щебень, песчано-гравийная смесь (ПГС), физико-механические характеристики, прочность, морозостойкость, коэффициент размягчения.

**Для цитирования:** Вавренюк С.В., Вавренюк В.Г., Федюк Р.С., Ким А.А., Богомазова А.А. Анализ и обобщение свойств горных скальных пород месторождений Камчатского края // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 51–56.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-51-56>

S.V. VAVRENYUK<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering), Corresponding Member of RAACS, Honored Builder of Russia, Deputy Director for Scientific Work (svvn59@mail.ru); V.G. VAVRENYUK<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (svvn59@mail.ru), R.S. FEDYUK<sup>2</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (roman44@yandex.ru);

A.A. KIM<sup>3</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), General Director (svvn59@mail.ru), A.A. BOGOMAZOVA<sup>3</sup>, Geologist (svvn59@mail.ru)

<sup>1</sup> Branch of the Federal State Budgetary Institution "TsNIIP of the Ministry of Construction of Russia" Far Eastern Research, Design and Technological Institute for Construction (14, Borodinskaya Street, Vladivostok, 690033, Russian Federation)

<sup>2</sup> Far Eastern Federal University (10, p. Ayaks, Russky Island, Vladivostok, 690922, Russian Federation)

<sup>3</sup> ООО "Bazalt" (33a, off. 408, Leningradskaya Street, Petropavlovsk-Kamchatsky, 684003, Russian Federation)

### Analysis and Generalization of the Properties of Mountain Rock Formations of the Deposits of the Kamchatka Territory

Currently in Kamchatka there is an intensive development of the tourist and recreational cluster "Three Volcanoes", engineering and social infrastructure, and in the conditions of active construction, there is a sharp demand for building materials, in particular for building stone and inert aggregates for concrete: crushed stone, sand, as well as sand and gravel mixtures. Developed reserves of common minerals, including hard rocks for the production of building stone and inert aggregates, do not fully satisfy the projected demand of the construction industry for the coming years. In this connection, large-scale studies are underway to study the bowels of Kamchatka, aimed at expanding the existing mineral resource base of the peninsula, as well as work to expand the license fund for the extraction of common minerals for construction purposes. The publication contains a brief analysis and generalization of the properties of igneous rocks (intrusive, effusive), currently being developed deposits of the Kamchatka Territory, and used to obtain inert aggregates, and also contains the main characteristics of the deposits of sand and gravel mixtures of the peninsula. The latest (2022–2023) results of studies of the properties of rocks of the Pionerskoye-4 deposit: tufts, diorites, granodiorites, basalts, andesite-basalts, carried out as part of detailed exploration and clarification of the balance reserves of the deposit, as well as the results of studies of physical and mechanical characteristics of crushed stone of various fractions obtained from granodiorites and tufts of this deposit are presented.

**Keywords:** common minerals (CM), mountain rocks, building stone, crushed stone, sand-gravel mixture (SGM), physical and mechanical characteristics, strength, frost resistance, softening coefficient.

**For citation:** Vavrenyuk S.V., Vavrenyuk V.G., Feduyuk R.S., Kim A.A., Bogomazova A.A. Analysis and generalization of the properties of mountain rock formations of the deposits of the Kamchatka territory. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 51–56. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-51-56>

Камчатский край знаменит своими природно-географическими особенностями: неповторимой первозданной природой, вулканами, горячими источниками, рыбными ресурсами, что является основой для развития туризма на полуострове. В рамках концепции федеральной целевой программы «Развитие внутреннего и въездного туризма в Российской Федерации», а также государственной программы «Социально-экономическое развитие Дальнего Востока и Байкальского региона» на Камчатке идет расширенное строительство туристско-рекреационного кластера «Три вулкана», инженерной и социальной инфраструктуры: аэровокзального комплекса, новых взлетно-посадочных полос, гостиниц, баз и парков отдыха, объектов жилья, дорог, больниц и тепловых электростанций.

В условиях активного строительства отмечается резкий спрос строительной отрасли на строительный камень и инертные заполнители: щебень, песок, песчано-гравийную смесь и др. Однако разведанные запасы общераспространенных полезных ископаемых не в полной мере удовлетворяют прогнозируемую потребность строительного комплекса на бли-

жайшие годы. В связи с этим, идет масштабное наращивание объемов добычи общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ), уточняются их балансовые запасы, а также расширяется лицензионный фонд минерального сырья [1–6].

Анализ деятельности предприятий по добыче общераспространенных полезных ископаемых показал, что на 2013 г. количество лицензий на право пользования недрами, содержащими ОПИ, в Камчатском крае составляло 49; по состоянию на 01.10.2021 г. количество выданных лицензий составляло 75. При этом большая часть участков недр, содержащих общераспространенные полезные ископаемые [7], находится в пределах городской агломерации Петропавловск-Камчатский – Елизово – ЗАТО Вилючинск (табл. 1).

На отдаленные районы Камчатского края приходится 34 месторождения общераспространенных полезных ископаемых, из которых четыре относятся к месторождениям строительного камня; остальные – песок и песчано-гравийные смеси. Причем большинство минеральных ресурсов, необходимых стройиндустрии для производства строительных материалов, сосредоточено вблизи вулканов.

В табл. 2 приведены физико-механические характеристики горных скальных пород разрабатываемых месторождений Камчатского края (базальты, андезиты, диориты, диабазы, гранодиориты, туфы), используемых для получения строительного камня и заполнителей в бетоны. Представленные горные породы имеют марку по прочности 400–1400, марку по морозостойкости F50–F300.

В табл. 3 представлены физико-механические характеристики разведанных, промышленно-разрабатываемых месторождений гравийно-песчаных смесей для целей строительства.

Качество природных ПГС характеризуется содержанием гравия от 30 до 70%, остальное – песок. Содержание пылеватых и глинистых веществ в песчано-гравийных смесях находится на относительно низком уровне.

**Таблица 1**  
**Table 1**

**Расположение месторождений общераспространенных полезных ископаемых (ОПИ) на территории Камчатского края**  
**Location of common mineral deposits on the territory of the Kamchatka Krai**

№	Муниципальный район	Количество лицензионных участков ОПИ
1	Петропавловск-Камчатский городской округ	9
2	Елизовский муниципальный район (далее – ЕМП)	29
3	ЗАТО Вилючинск	4
4	Отдаленные районы края	34

**Таблица 2**  
**Table 2**

**Физико-механические характеристики скальных горных пород месторождений Камчатского края**  
**Physical and mechanical characteristics of rock mountain deposits of the Kamchatka Krai**

Месторождение, наименование горной породы	Технический показатель				
	Марка по прочности	Марка по истираемости/ морозостойкости, F	Коэффициент пористости, %	Водопоглощение, %	Средняя плотность в естественном состоянии (в целике)
УНМЗ «Южнодолиновский», туфы	600	I1/ F50	6,77	2,4	2,68
Петровская сопка, диабазы	1000	I1/ F150	0,2	–	2,9
Ольховое, гранодиориты	1400	I1/ F300	4,19	0,76	2,7
Пионерский-1, диориты, габбро-диориты	400–1400	I1	2,06/5,3		2,77/2,66
Приморское, базальты	1400	I1/ F300	–	0,39/1,75	2,72
УНМЗ «Вилючинский Придорожный-1», базальты, андезиты	1400	I1/ F150	3,26	1,5	2,68

**Таблица 3  
Table 3**

**Физико-механические характеристики месторождений песчано-гравийной смеси (ПГС) Камчатского края  
Physical and mechanical characteristics of sand-gravel mixture (SGM) in the Kamchatka Krai**

Месторождение	Технический показатель		
	Зерновой состав	Содержание пылевых и глинистых частиц, %	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>
Месторождения «Николаевка-2», «Николаевка-3», «Николаевка-5», ПГС	Валуны – 11,1%; гравий – 66%; песок – 22,9%	до 6,3	1794
УМНЗ «ПрК-Дальний», валунно-галечные ледниковые отложения	Галька – 30–40%; гравий – 15–20%	2,61–4,29	1737–1749
УМНЗ «Пиначевский», ПГС с включениями валунов	Валуны – 8,32%; гравий – 60%; песок – 28,33%	1,31–1,97	1624–1849
УМНЗ «Заречный-1» «Заречный-2», ПГС	Валуны – 10,5%; гравий – 59,52%; песок – 26,81%	1,27	1830
Участок недр «Южнохуторской-1», ПГС	Валуны – 1,22%; гравий – 66,16%; песок – 32,52%	2,7	1830
УМНЗ «Быстринский-4», ПГС	Гравий – 71%; песок – 29%	1,7	1460
гора Шлаковая, ПГС, вулканические шлаки	ПГС 0,1–40 мм, вулканические бомбы 40–200 мм	0,5–2,5	900–1100
Авачинское, ПГС, пемза и пемзовый песок	Гравий – 31,9%; песок – 68%	0,3–4,3	550–900
УМНЗ «Быстринский-1» «Быстринский-2» «Быстринский-5», ПГС (гравий из базальтов, андезитов, диоритов)		1,7	1460

**Таблица 4  
Table 4**

**Физико-механические показатели скальных горных пород. Месторождение «Пионерский-4» (Камчатский край)  
Physico-mechanical indicators of rocky rocks. Field “Pionersky-4” (Kamchatka Krai)**

Наименование показателя	Наименование горной породы				
	Туфы	Диориты	Гранодиориты	Базальты	Андезитобазальты
Средняя плотность в целике, г/см <sup>3</sup>	2,55–2,75	2,61–2,76	–	–	2,63–2,81
Средняя плотность в сухом состоянии, г/см <sup>3</sup>	2,53–2,74	2,6–2,73	2,77	2,82	2,56–2,81
Истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,67–2,79	2,63–2,82	2,83	2,83	2,67–2,82
Пористость, %	2,16–4,49	0,76–3,91	2,12	0,35	0,35–2,94
Прочность при сжатии, МПа: – в сухом состоянии – в водонасыщенном	75,1–188,9 64,8–152,7	98,9–228,33 89,43–219,44	225,69	287,66	60,9–229,64 32,53–224,38
Коэффициент размягчаемости	0,71–0,86	0,61–0,98	–	–	0,46–0,98
Водопоглощение, %	0,67–2,46	0,34–2,7	0,25	0,12	0,14–3,1
Марка по истираемости	II–III	II–III	–	–	II
Марка по морозостойкости	F15-F150	HM-F400	F400	F400	HM-F300

**Таблица 5  
Table 5**

**Физико-механические показатели щебня из гранодиоритов. Месторождение «Пионерский-4» (Камчатский край)  
Physical and mechanical parameters of crushed stone from granodiorites. Field «Pionersky-4» (Kamchatka Krai)**

Технический показатель	Наименование горной породы				
	Гранодиориты				Туфы
	Фракция, мм				
	5–20	10–20	20–40	40–70	10–20
Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	1412,5	1370	1360	1355	1340
Марка по истираемости	И1	И1	И1	И1	И1
Марка по дробимости	1400	1400	1400	1400	1200
Содержание пылевидных и глинистых частиц, %	0,23	0,28	0,18	0,33	0,47
Марка по морозостойкости	F400	F400	F400	F200	F25
Потеря массы при распадах, %	0,32	8,93	0,1	0,1	7,56

Лидерами в отрасли добычи скальных горных пород и производства строительного камня, щебня, песчано-гравийных, строительных и дорожных смесей на Камчатке являются компании ООО «Базальт», ОАО «Елизовский карьер», АО «Камчаткестрой-материалы».

Для наращивания объемов производства строительного камня и инертных материалов предприятия проводят постоянные целенаправленные инженерно-геологические исследования скальных горных пород разрабатываемых месторождений с изучением их свойств на различных участках залегания.

В 2021–2023 гг. филиалом ФГБУ «ЦНИИП Минстроя России» ДальНИИС совместно с ООО «Базальт» выполнен большой объем работ по исследованию свойств магматических скальных горных пород (туфов, диоритов, гранодиоритов, базальтов, андезитобазальтов) месторождения «Пионерский-4» в г. Петропавловск-Камчатский с целью наращивания объемов производства строительного камня и заполнителей для бетонов.

В результате исследований (табл. 4) было установлено, что андезитобазальты, туфы и диориты месторождения «Пионерский-4» характеризуются значительной технологической неоднородностью. В зависимости от участка и глубины залегания горной породы отмечается большой разброс по показателям морозостойкости и прочности при сжатии [8, 9]. Так, например, морозостойкость андезитобазальтов, в зависимости от участка залегания, может колебаться от F25 до F300, диоритов от F150 до F400, туфов от F15 до F150. Прочность при сжатии диоритов и туфов колеблется в пределах 75–145 МПа, андезитобазальтов 60–230 МПа.

Установлено, что стабильно высокие физико-механические показатели горных пород месторождения «Пионерский-4» имеют базальты и гранодиориты. Морозостойкость базальтов составляет не менее F400, гранодиоритов F300–F400. При этом прочность при сжатии базальтов доходит вплоть до 300 МПа, гранодиоритов до 250 МПа.

По результатам исследований горные скальные породы месторождения «Пионерский-4» относительно марки по морозостойкости и прочности при сжатии по убыванию можно выстроить в следующей последовательности: базальты → гранодиориты, диориты → андезитобазальты, туфы.

Наряду с исследованием физико-механических свойств горных пород месторождения «Пионерский-4» проведена оценка возможности получения щебня различных фракций для бетонов и дорожного строительства из гранодиоритов и туфов [10–13].

Исследовался щебень фракции 5–20, 10–20, 20–40, 40–70 мм. Исследования проводились по показателям морозостойкости, дробимости, истираемости, устойчивости структуры ко всем видам распадов, а также по содержанию пылевидных частиц.

Исследования показали (табл. 5), что марка щебня из гранодиоритов по дробимости составляет 1400, морозостойкость – F400, за исключением щебня фракции 40–70 мм, у которого морозостойкость составила F200, что является следствием трещиноватости исходной горной породы, добытой колонковым бурением.

Марка щебня по дробимости щебня из туфов составляет 1200, морозостойкость – F25, что ограничивает его применение в бетонах с требованиями по морозостойкости более F50.

Установлено, что истираемость щебня из гранодиоритов и туфов соответствует марке И1, содержание пылевидных и глинистых не превышает 0,5%, устойчивость структуры против всех видов распадов соответствует марке по дробимости более 1000.

Результаты исследований дали основание рекомендовать щебень из гранодиоритов месторождения «Пионерский-4» для применения в ответственных бетонных конструкциях с повышенными требованиями по долговечности (морозостойкости, коррозионной стойкости), включая применение в бетонах гидротехнических сооружений [14–17].

## Список литературы

1. Назаренко Н.В., Петин А.Н., Фурманова Т.Н. Воздействие разработки месторождений по добыче общераспространенных полезных ископаемых на окружающую природную среду // *Современные проблемы науки и образования*. 2012. № 6. С. 610. URL: <https://science-education.ru/ru/article/viewid=7401>
2. Богдасаров М.А., Маевская А.Н., Шешко Н.Н. Методические особенности прогноза и оценки общераспространенных полезных ископаемых // *Разведка и охрана недр*. 2023. № 3. С. 45–52. DOI: 10.53085/0034-026X\_2023\_03\_45
3. Гавришев С.Е., Бурмистров К.В., Заляднов В.Ю., Михайлова Г.В. Обоснование схемы вскрытия и направления развития горных работ при реконструкции карьеров по добыче строительного камня // *Горный журнал*. 2018. № 1. С. 27–32. DOI: 10.17580/gzh.2018.01.0.4
4. Чебан А.Ю., Секисов Г.В., Соболев А.А. Типизация строительных горных пород и перспективы развития их добычи в Дальневосточном регионе // *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2017. № S24. С. 75–81. DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-24-75-81
5. Салихов В.А. Разведка и разработка полезных ископаемых. Москва; Берлин, 2021. DOI: 10.23681/618661
6. Кузин А.М. Месторождения полезных ископаемых, землетрясения и методология интерпретации сейсмических данных. *Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН*. 2019. № 16. С. 323–327. DOI: 10.31241/FNS.2019.16.065
7. Вавренюк С.В., Кораблёва Г.А., Антропова В.А. Бетоны на пористых заполнителях из вулканических горных пород Дальнего Востока. Владивосток: Издательский дом Дальневосточного федерального университета, 2012. 100 с.
8. Лесовик В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее // *Вестник МГСУ*. 2017. № 1. С. 9–16.
9. Лесовик В.С. Геоника (геомиметика). Примеры реализации в строительном материаловедении. Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016. 287 с.
10. Розенталь Н.К., Степанова В.Ф., Любарская Г.В. Требования к заполнителям будущего // *Строительные материалы*. 2006. № 8. С. 14–15.
11. Сафаров К.Б. Применение реакционноспособных заполнителей для получения бетонов, стойких в агрессивных средах // *Строительные материалы*. 2015. № 7. С. 17–20.
12. Степанова В.Ф. Долговечность бетона. Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2023. 124 с.
13. Sehlar M., Simkova Z. Once again on the question of the economic assessment of mineral deposits // *Экономика и управление инновациями*. 2021. № 3 (18). С. 87–98. DOI: 10.26730/2587-5574-2021-3-87-98

## References

1. Nazarenko N.V., Petin A.N., Furmanova T.N. The impact of the development of deposits for the extraction of common minerals on the environment. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2012. No. 6, p. 610. URL: <https://science-education.ru/ru/article/viewid=7401>
2. Bogdasarov M.A., Mayevskaya A.N., Sheshko N.N. Methodological features of forecasting and evaluation of common minerals. *Razvedka i okhrana nedr*. 2023. No. 3, pp. 45–52. (In Russian). DOI: 10.53085/0034-026X\_2023\_03\_45
3. Gavrishov S.E., Burmistrov K.V., Zalyadnov V.Yu., Mikhailova G.V. Substantiation of the opening scheme and directions of development of mining operations during the reconstruction of quarries for the extraction of building stone. *Gornyy zhurnal*. 2018. No. 1, pp. 27–32. (In Russian). DOI: 10.17580/gzh.2018.01.0.4
4. Cheban A.Yu., Sekisov G.V., Sobolev A.A. Typification of building rocks and prospects for the development of their extraction in the Far Eastern region. *Gornyy informatsionno-analiticheskii byulleten'*. 2017. No. S24, pp. 75–81. (In Russian). DOI: 10.25018/0236-1493-2017-11-24-75-81
5. Salikhov V.A. *Razvedka i razrabotka poleznykh iskopayemykh [Exploration and development of minerals]*. Moscow, Berlin. 2021. DOI: 10.23681/618661
6. Kuzin A.M. Mineral deposits, earthquakes and methodology of interpretation of seismic data. *Trudy Fersmanovskoy nauchnoy sessii GI KNTs RAN*. 2019. No. 16, pp. 323–327. (In Russian). DOI: 10.31241/FNS.2019.16.065
7. Vavrenyuk S.V., Korableva G.A., Antropova V.A. *Concretes on porous aggregates from volcanic rocks of the Far East*. Vladivostok: Publishing House of the Far Eastern Federal University, 2012. 100 p.
8. Lesovik V.S. Building materials. Present and future. *Vestnik MGSU*. 2017. No. 1, pp. 9–16. (In Russian).
9. Lesovik V.S. *Geonika (geomimetika). Primery realizatsii v stroitel'nom materialovedenii [Geonics (geomimetics). Examples of implementation in building materials science]*. Belgorod: V.G. Shukhov BSTU, 2016. 287 p.
10. Rosenthal N.K., Stepanova V.F., Lyubarskaya G.V. Requirements for fillers of the future. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2006. No. 8, pp. 14–15. (In Russian).
11. Safarov K.B. Application of reactive aggregates for the production of concretes resistant in aggressive environments. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2015. No. 7, pp. 17–20. (In Russian).
12. Stepanova V.F. *Dolgovechnost' betona [Durability of concrete]*. Moscow, Vologda: Infra-engineering. 2023. 124 p.
13. Kelar M., Simkova Z. Once again to the question of the economic assessment of mineral deposits. *Ekonomika i upravlenie innovatsiyami*. 2021. No. 3 (18), pp. 87–98. (In Russian). DOI: 10.26730/2587-5574-2021-3-87-98

14. Зайцева Л.Р., Луцык Е.В., Латыпова Т.В., Латыпов В.М., Федоров П.А., Попов В.П. Влияние вида заполнителя из отходов производств на коррозионную стойкость бетона // *Строительные материалы*. 2021. № 11. С. 23–29. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-23-29>
15. Соколов Н.С. Технология увеличения несущей способности основания // *Строительные материалы*. 2019. № 6. С. 67–72. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-67-71>
16. Мalyuk В.Д. О нормировании требований по морозостойкости бетона для морских сооружений // *Транспортное строительство*. 2010. № 3. С. 32–34.
17. Guo H., Wang J., Wu J. Research on the intelligent detection technology of multi-objective coarse aggregates // *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 363. 129273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129273>
14. Zaitseva L.R., Lutsyk E.V., Latypova T.V., Latypov V.M., Fedorov P.A., Popov V.P. Influence of the type of filler from industrial waste on the corrosion resistance of concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2021. No. 11, pp. 23–29. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-797-11-23-29>
15. Sokolov N.S. Technology for increasing the bearing capacity of the base. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2019. No. 6, pp. 67–71. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-771-6-67-71>
16. Malyuk V.D. On rationing requirements for frost resistance of concrete for marine structures. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2010. No. 3, pp. 32–34. (In Russian).
17. Guo H., Wang J., Wu J. Research of intelligent detection technology for multi-purpose coarse-grained aggregates. *Construction and building materials*. 2022. Vol. 363. 129273. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129273>



**БАЗАЛЬТ**

## ООО «БАЗАЛЬТ»

Основана в 2011 г. С 2012 г. ведет разработку карьера «Пионерский-4», который находится недалеко от пос. «Южные Коряки» (Камчатский край). На данном карьере ведется добыча строительного камня, дробление и сортировка щебня.

С 2011 г. на карьере «Пионерский-4» произведено более 800 тыс. м<sup>3</sup> щебня и отсева различной фракции. В 2020 г. компания оформила лицензию на разработку карьера «Заозерный» и к настоящему времени добыто 25 тыс. м<sup>3</sup> скального грунта.

В 2023 г. компания ввела в эксплуатацию две новые дробильно-сортировочные установки, что позволит увеличить производительность, как минимум в два раза.

В планах компании реализовать инвестиционную программу на сумму не менее 200 млн р. и выйти на производительность более 400 тыс. м<sup>3</sup> инертных материалов в год. В рамках инвестиционного проекта планируется запуск производства бетона.

Щебень соответствует ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия», что гарантирует высокое качество выпускаемой продукции. Это позволяет использовать продукцию компании при строительстве значимых объектов в Камчатском крае.

### Контакты:

**683003, г. Петропавловск-Камчатский,  
ул. Ленинградская, д. 33а, оф. 303  
Тел.: 8 (4152) 21-50-50, 8 (4152) 34-09-00  
[info@bazalt41.ru](mailto:info@bazalt41.ru)**

УДК 691.554

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-57-64>

В.Е. РУМЯНЦЕВА<sup>1</sup>, д-р техн. наук (varrym@gmail.com);  
 Д.А. ПАНЧЕНКО<sup>2</sup>, инженер (panchenkoda@tyuiu.ru),  
 Ю.Ф. ПАНЧЕНКО<sup>2</sup>, канд. техн. наук (panchenkojf@tyuiu.ru);  
 В.С. КОНОВАЛОВА<sup>1</sup>, канд. техн. наук (kotprotiv@ya.ru);  
 Э.Н. ХАФИЗОВА<sup>2</sup>, канд. техн. наук (medvedevaen1@tyuiu.ru)

<sup>1</sup> Ивановский государственный политехнический университет (153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, 21)

<sup>2</sup> Тюменский индустриальный университет (625000, г. Тюмень, ул. Володарского, 38)

## Разработка состава сухой штукатурной смеси на основе высокодисперсной извести

Проведены исследования влияния дисперсности гашеной извести на свойства штукатурной смеси и штукатурного раствора. Установлено, что высокая дисперсность частиц  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  способствует повышению пластичности и водоудерживающей способности штукатурной смеси и прочности затвердевшего раствора. При гашении извести «в тесто» частицы  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  получаются более мелкие, чем при гашении извести в пушонку. Поэтому для получения высокодисперсного гидрата окиси кальция в штукатурном растворе желательнее приблизить условия гашения извести к условиям приготовления теста. Это может быть реализовано путем совместного гашения извести с песком в силосах или реакторах на заводах по производству силикатного кирпича. Результаты дифференциально-термического и рентгенофазового анализа подтверждено, что штукатурный раствор на основе известково-песчаной смеси завода по производству силикатного кирпича к 28 сут твердения имеет более высокую степень карбонизации извести по сравнению с раствором на основе пушонки, при этом приобретает равномерно распределенную мелкокристаллическую структуру карбоната кальция, что способствует повышению прочности раствора.

**Ключевые слова:** известь-пушонка, штукатурный раствор, дисперсность извести, карбонизация, прочность, известковый раствор.

**Для цитирования:** Румянцева В.Е., Панченко Д.А., Панченко Ю.Ф., Коновалова В.С., Хафизова Э.Н. Разработка состава сухой штукатурной смеси на основе высокодисперсной извести // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 57–64.

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-57-64>

V.E. RUMYANCEVA<sup>1</sup>, Doctor of Sciences (Engineering) (varrym@gmail.com);  
 D.A. PANCHENKO<sup>2</sup>, Engineer (panchenkoda@tyuiu.ru),  
 Yu.F. PANCHENKO<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering), (panchenkojf@tyuiu.ru);  
 V.S. KONOVALOVA<sup>1</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (kotprotiv@ya.ru),  
 E.N. KHAFIZOVA<sup>2</sup>, Candidate of Sciences (Engineering) (medvedevaen1@tyuiu.ru)

<sup>1</sup> Ivanovo State Polytechnic University (21, Sheremetyevo Avenue, 153000, Ivanovo, Russian Federation)

<sup>2</sup> Industrial University of Tyumen (2, Lunacharskogo Street, 625001, Tyumen, Russian Federation)

### Composition Development of a Dry Plaster Based on High-Dispersity Lime

Influence of hydrated lime dispersity on the properties of plaster mix and plaster mortar have been carried out in the article. It was concluded that high dispersion of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  particles makes an increase of plasticity and water-retaining capacity of the plaster mix and the hardened mortar strength.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  particles are getting smaller when lime is hydrated into paste than slaking lime into air-slaked lime. Therefore in order to obtain high-dispersity calcium hydrate in plaster mortar it is desirable to have conditions of slaking mortar closer to the process of making paste. It can be done by co-slaking lime with sand in silos or reactors on silicate brick plants. The results of differential thermal and X-ray phase analysis supported that plaster mortar based on lime-sand mixture of the silicate brick plant by 28 days of hardening has higher degree of carbonization of lime compared to the mortar based on air-slaked lime while it has uniformly distributed fine-crystalline structure of carbonate calcium which increases the strength of mixture.

**Keywords:** air-slaked lime, plaster mortar, dispersity of lime, carbonation, strength, lime mortar.

**For citation:** Rumyanceva V.E., Panchenko D.A., Panchenko Yu.F., Konovalova V.S., Khafizova E.N. Composition development of a dry plaster based on high-dispersity lime. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 57–64. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-57-64>

С давних времен известковые растворы применялись не только для кладки стен [1], но и в качестве штукатурки [2, 3]. Наиболее древние находки следов применения известковой штукатурки относятся к эпохе неолита и обнаруживаются практически на всей территории Ближнего Востока [4, 5]. Позднее широкое распространение чистые известковые растворы получили в качестве грунтов под фресковую живопись [6–12]. И в древнерусской и в древнеегипетской живописи обнаружены известковые штукатурные растворы, содержащие в качестве заполнителя солому и пеньку. Исследования специалистов университета в Теннесси доказывают, что живопись Древнего Египта, датированная 1550–1069 гг. до н. э., выполнена на штукатурном основании, состоящем в основном из карбонизированной извести. Позднее, в V–I вв. до н. э. в известковые растворы стали добавлять наполнители, в основном известняковые [13].

петской живописи обнаружены известковые штукатурные растворы, содержащие в качестве заполнителя солому и пеньку. Исследования специалистов университета в Теннесси доказывают, что живопись Древнего Египта, датированная 1550–1069 гг. до н. э., выполнена на штукатурном основании, состоящем в основном из карбонизированной извести. Позднее, в V–I вв. до н. э. в известковые растворы стали добавлять наполнители, в основном известняковые [13].

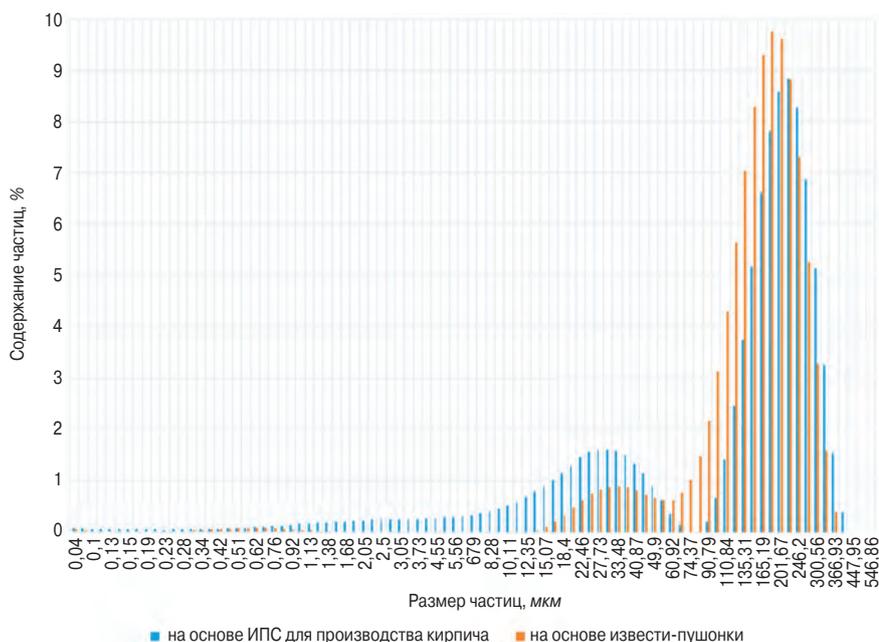


Рис. 1. Дисперсный состав сухих штукатурных смесей  
Fig. 1. Dispersed composition of dry plasters

Штукатурные растворы на основе извести широко применялись вплоть до начала XX в., но, с развитием массового промышленного производства и ускоренными темпами строительства они уступили место цементным и гипсовым.

В настоящее время все большее значение приобретают вопросы комфортной и безопасной для человека среды, особенно в условиях мировой пандемии. Большую часть времени человек проводит в собственных жилых помещениях, поэтому к выбору строительных материалов, обеспечивающих комфортные условия жизнедеятельности и способствующих сохранению здоровья человека, необходимо подходить особенно ответственно. Штукатурные покрытия на основе извести обладают оптимальной паропроницаемостью, а следовательно, регулируют микроклимат в помещении, обеспечивают комфортную для человека влажность и температурный режим в помещении [14]. Кроме того,

известь обладает антисептическими свойствами, препятствует развитию болезнетворных микроорганизмов, грибов и плесени [15–17].

Наиболее агрессивным и разрушительным воздействием на материалы обладает грибковая коррозия [18]. Для большинства грибов и грибоподобных организмов оптимальной для развития и размножения является кислая среда с рН, равным 4–5 [19]. В результате своей жизнедеятельности грибы выделяют широкий спектр органических кислот, тем самым увеличивая кислотность среды и создавая благоприятные условия для своего развития и размножения до определенного предела. В бетонах продукты жизнедеятельности грибов в первую очередь вступают в химическое взаимодействие с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  [20].

Процесс взаимодействия органических кислот с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – это первый этап грибковой коррозии; на втором этапе происходит увеличение пористости бетона вследствие вымывания продуктов взаимодействия и, как следствие, потеря прочности и разрушение [21]. В штукатурном покрытии вымывание продуктов реакции будет происходить вследствие капиллярного водопоглощения и высушивания. Вопросы производства штукатурных растворов на основе извести необходимо решать в совокупности, снижая их капиллярное водопоглощение, например за счет применения гидрофобизаторов [22, 23].

Подробный анализ существующих известь содержащих штукатурных смесей, представленный в [24], свидетельствует о том, что, во-первых, большинство из них на основе комплексного цементно-известкового вяжущего; во-вторых, они представлены в основном зарубежными производителями. Существуют и российские штукатурные

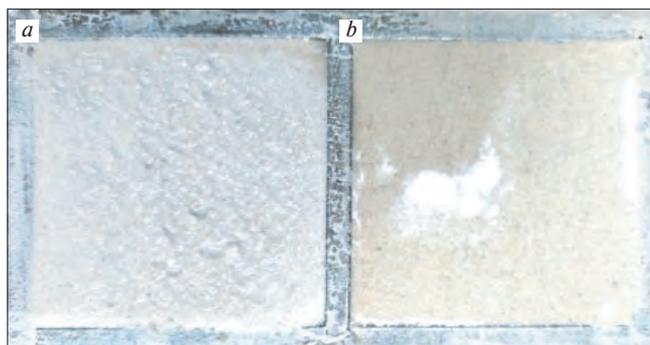


Рис. 2. Внешний вид растворной смеси: а – на основе ИПС; б – на основе извести-пушонки

Fig. 2. Surface appearance of mortar mix: a – based on sand-lime mortar; b – based on air-slaked lime

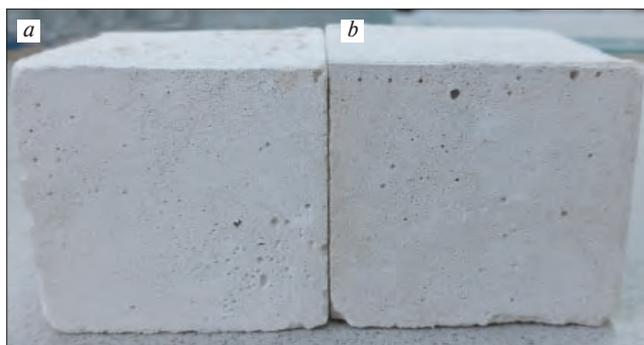


Рис. 3. Внешний вид затвердевшего раствора: а – на основе ИПС; б – на основе извести-пушонки

Fig. 3. Surface appearance of mortar stone: a – based on sand-lime mortar; b – based on air-slaked lime

составы на основе гидратной извести, но они позиционируются как материалы для реставрационных работ [3, 17, 25, 26]. Следовательно, разработка состава сухой штукатурной смеси на основе извести и ее промышленное производство позволят одновременно решить актуальную проблему импортозамещения и улучшения микроклимата в жилых помещениях.

На свойства штукатурной смеси и затвердевшего раствора в большой степени будет влиять содержание извести и ее дисперсность, при этом дисперсность частиц гидратной извести также будет определять ее расход. Исследованиями [27, 28] подтверждено, что при гашении извести в пушонке зерна  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  получаются более крупные, чем при приготовлении теста. Так, Уэльс [27] приводит данные о том, что средний вес частиц извести-пушонки приблизительно равен 6 мкм, ее удельная поверхность составляет  $4000 \text{ см}^2/\text{г}$ , а в тесте – 1 мкм и  $20000 \text{ см}^2/\text{г}$  соответственно.

Поэтому желательно приблизить условия гашения извести к условиям приготовления теста. Кроме того, дисперсность частиц  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  тем выше, чем тоньше помол исходной негашеной извести. Осуществить гашение молотой извести в тесте с последующим ее высушиванием и помолом технологически не только очень сложно, но и требует колоссальных энергозатрат. Условия гашения молотой извести в смеси с песком в стесненных условиях, исключающих свободное удаление пара, например в силосах, способствуют образованию частиц гидрата окиси кальция с большей удельной поверхностью, чем при получении извести-пушонки, традиционно используемой при производстве сухих строительных смесей. Это может быть реализовано за счет применения в качестве основы для производства сухой штукатурной смеси, полуфабриката, применяемого для формования силикатного кирпича на силикатных заводах, – известково-песчаной смеси (ИПС).

Результаты исследования размера частиц извести-пушонки на приборе ПСХ-11 (рис. 1) показали, что ее удельная поверхность составляет  $4100 \text{ см}^2/\text{г}$ , а средний размер частиц 5,8 мкм, что сходится с данными Уэльса. Известь из ИПС, полученную пу-

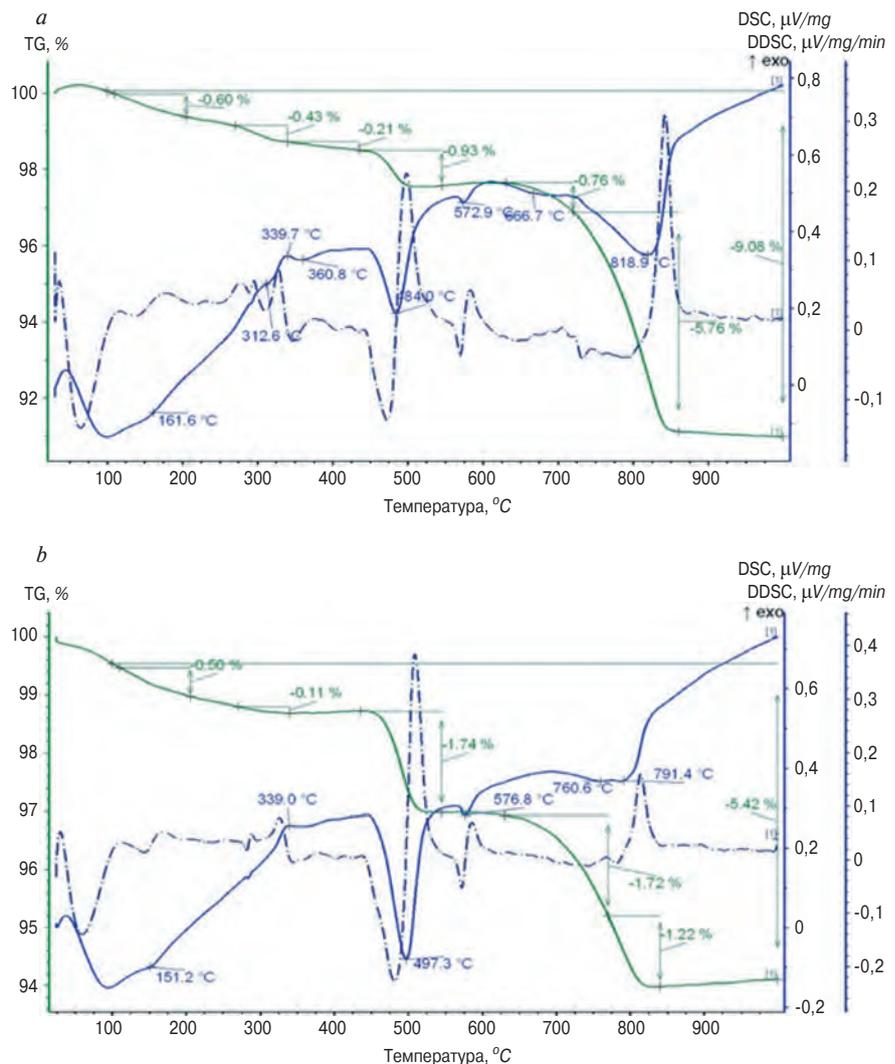


Рис. 4. Кривые ДТА штукатурного раствора: а – на основе ИПС; б – на основе извести-пушонки  
Fig. 4. Differential thermal analysis of plaster mortar: a – based on sand-lime mortar; b – based on air-slaked lime

тем совместного гашения известково-кремнеземистого вяжущего с песком в силосе, выделить для исследования ее удельной поверхности и размера частиц достаточно сложно. Поэтому для подтверждения данной гипотезы было приготовлено две пробы ИПС с одинаковой активностью 9% по  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , одна – с применением извести-пушонки, другая – с применением известково-кремнеземистого вяжущего (ИКВ) и гашением в силосе (ИПС для производства силикатного кирпича на предприятии ООО «ВЗКГ»).

Исследования дисперсного состава данных проб на лазерном анализаторе частиц (рис. 1) показали, что смесь на основе извести-пушонки имеет некоторое количество частиц размером от 0,36 до 1 мкм, которые могут быть образованы в результате гашения известковой пыли, и зерна размером более 14 мкм, которые, вероятно, образованы при гашении комовой извести с поверхности. Большое количество частиц с размерами зерен от 60 до 200 мкм может

Таблица 1  
Table 1

Изменение массы и энергии образцов при дифференциально-термическом анализе  
Mass and energy change of samples during differential thermal analysis

t ДТА, °С	Характер эффекта	Процесс, вызывающий эффект	Изменение массы, %, для образца	
			на основе ИПС	на основе извести-пушонки
430–480	Эндотермический	Дегидратация гидроксида кальция $\text{Ca(OH)}_2 \rightarrow \text{CaO} + \text{H}_2\text{O}$	0,93	1,74
600–760	Эндотермический	Диссоциация $\text{CaCO}_3$ первичного (арагонит) на $\text{CaO}$ и $\text{CO}_2$	0,76	1,72
760–850	Эндотермический	Диссоциация вторичного $\text{CaCO}_3$ (кальцит) на $\text{CaO}$ и $\text{CO}_2$	5,76	1,22

Таблица 2  
Table 2

Содержание гидроксида кальция и карбоната кальция в образцах  
Calcium hydroxide and calcium carbonate content in the samples

Штукатурный раствор	Содержание $\text{Ca(OH)}_2$ , %	Содержание $\text{CaCO}_3$ , %	
		первичный	вторичный
На основе ИПС	3,8	1,7	13,1
На основе извести-пушонки	7,2	3,9	2,8

быть обусловлено наличием недожога в комовой извести, применяемой для производства извести-пушонки, т. е. представлено зернами известняка. ИПС, гашенная в силосе, содержит частицы размером от 0 до 14 мкм, которые, вероятно, представлены частицами  $\text{Ca(OH)}_2$ , а большое количество частиц с размерами от 14 до 60 мкм объясняется наличием в смеси тонкомолотого песка, присутствующего в составе ИКВ.

Для подтверждения указанных выводов было изучено влияние способа подготовки ИПС на свойства растворной смеси и затвердевшего раствора. Установлено, что смесь на основе ИПС требует большего количества воды для получения той же подвижности (Пк3), по сравнению со смесью на основе извести-пушонки, но при этом обладает большей водоудерживающей способностью. Также отмечено, что при одинаковой активности смесей как свежеприготовленный (рис. 2), так и затвердевший растворы (рис. 3) имеют разные оттенки. Раствор на основе ИПС имеет более светлый тон,

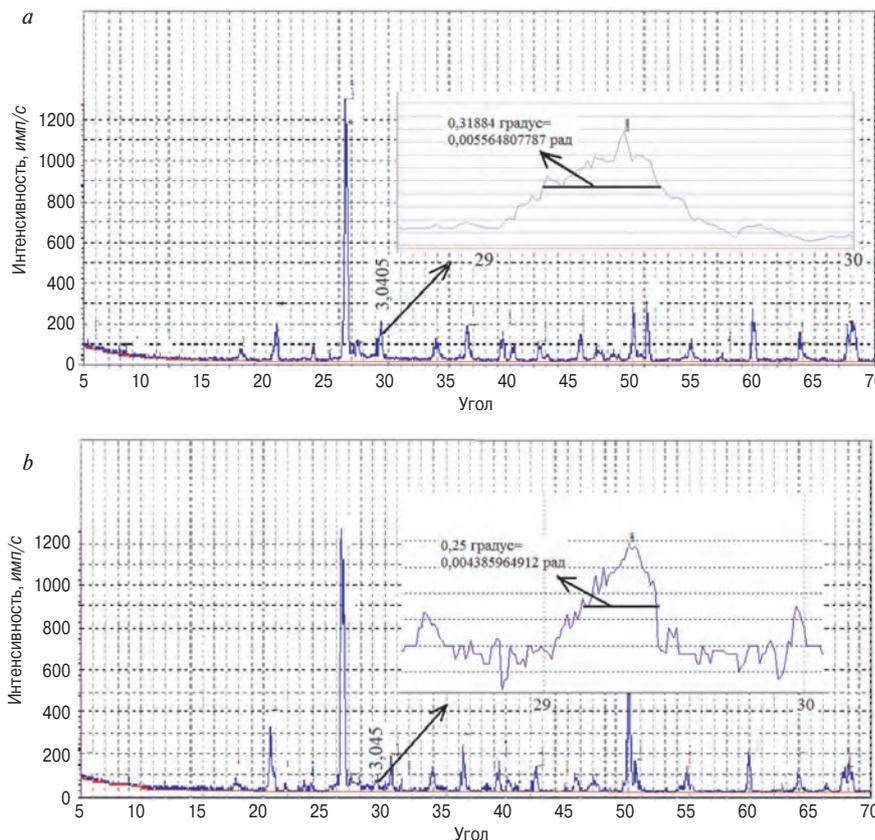


Рис. 5. Дифрактограммы штукатурного раствора: а – на основе ИПС; б – на основе извести-пушонки

Fig. 5. X-ray diffraction pattern of plaster mortar: a – based on sand-lime mortar; b – based on air-slaked lime

что, во-первых, еще раз подтверждает гипотезу о том, что при гашении в силосе частицы извести имеют меньший размер; во-вторых, это может быть причиной того, что слой извести при совместном гашении с песком тонким слоем покрывает частицы песка, забеливая их.

Способ гашения извести также оказывает влияние и на прочность затвердевшего раствора. Образцы из раствора на основе ИПС имели прочность 0,86 МПа, а раствор на основе извести-пушонки – 0,33 МПа, т. е. в 2,5 раза меньше.

Результаты дифференциально-термического анализа образцов штукатурного раствора (рис. 4), нанесенного на силикатный кирпич слоем 10 мм в возрасте 28 сут, свидетельствуют, что большая прочность штукатурного раствора на основе ИПС обусловлена степенью их карбонизации. Несмотря на то что образцы находились в одинаковых условиях, степень их карбонизации значительно отличается. Это еще раз подтверждает, что кроме влажности, температуры и содержания  $\text{CO}_2$  на протекание реакции карбонизации оказывает влияние дисперсность частиц извести [24] и влияние это весьма значительное.

На прочность известкового раствора влияет не только степень карбонизации, но и величина кристаллов и степень их срастания [29]. При формировании крупнокристаллической структуры возникающие напряжения значительно выше в сравнении с мелкокристаллической. Срастанию кристаллов в материалах способствует возникновение кристаллизационного давления за счет насыщения системы центрами кристаллизации и сближения расстояний между ними, что повышает прочность материала. Следовательно, для достижения большей прочности необходимо стремиться к созданию условий для формирования как можно большего количества центров кристаллизации, к их быстрому росту, сближению и срастанию.

Размер кристаллитов может быть оценен по величине физического уширения пика, соответствующего данному соединению на дифрактограмме (рис. 5).

Размер кристаллита по направлению  $h-k-l$  можно определить по формуле Шеррера–Селякова [30]:

$$D_{hkl} = \frac{n \cdot \lambda}{\beta \cdot \cos\theta}, \quad (1)$$

где  $D$  – размер кристаллита по направлению  $h-k-l$ , Å;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $\theta$  – угол рассеяния;  $\beta$  – физическое уширение линии на дифрактограмме в радианах (в шкале  $2\theta$ ).

По представленным данным можно сделать вывод, что кристаллы  $\text{CaCO}_3$  в образце штукатурного раствора на основе извести-пушонки более крупные (рис. 5, *b*), хотя общее количество вторичного карбоната кальция меньше (табл. 2).

Химическая реакция карбонизации происходит на поверхности известковых зерен. Поэтому, чем

больше частиц  $\text{Ca(OH)}_2$ , тем большее количество центров кристаллизации  $\text{CaCO}_3$  возникает в определенный момент времени. Образование зародышей на готовой поверхности происходит легче, чем в объеме раствора, потому, что работа их образования на границе раздела фаз меньше работы, требующейся для возникновения зародыша в объеме раствора [29]. Поэтому дальнейший рост кристаллов  $\text{CaCO}_3$  происходит на уже возникших центрах кристаллизации. При большом количестве более мелких центров кристаллизации рост кристаллов будет происходить равномернее. В растворе на основе извести-пушонки частицы извести более крупные, при возникновении первоначального слоя карбоната кальция на их поверхности происходит дальнейший рост кристаллов на этих частицах, этим и объясняется больший размер кристаллов  $\text{CaCO}_3$  в образце штукатурного раствора на основе извести-пушонки. Низкое содержание вторичного  $\text{CaCO}_3$  в образце штукатурного раствора на основе извести-пушонки обусловлено меньшим количеством центров кристаллизации.

### Выводы

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. На свойства известковой растворной смеси и затвердевшего раствора оказывает влияние дисперсность частиц гашеной извести. Чем выше дисперсность  $\text{Ca(OH)}_2$ , тем выше пластичность и водоудерживающая способность смеси и выше прочность затвердевшего раствора. Достичь высокой дисперсности частиц  $\text{Ca(OH)}_2$  можно путем совместного гашения негашеной извести с песком в силосах или реакторах, т. е. в условиях, препятствующих свободному удалению пара. Данным условиям соответствуют известково-песчаные смеси заводов по производству силикатного кирпича.

2. Доказана целесообразность применения ИПС заводов по производству силикатного кирпича в качестве основы для производства известковых штукатурных смесей. Оптимальное содержание  $\text{Ca(OH)}_2$  в составе известкового раствора составляет 9–10%, что соответствует активности ИПС заводов по производству силикатного кирпича.

3. Установлено, что прочность раствора на основе ИПС выше прочности раствора на основе извести-пушонки в возрасте 28 сут в 2,5 раза. Большая прочность раствора на основе ИПС объясняется его более высокой степенью карбонизации, что подтверждено результатами дифференциально-термического анализа.

4. На основании рентгенофазового анализа установлено, что в штукатурном растворе на основе извести-пушонки формируются более крупные кристаллы  $\text{CaCO}_3$ , это приводит к возникновению механических напряжений, дефектов, образованию зональности, чем и объясняется его меньшая прочность по сравнению с раствором на основе ИПС.

**Список литературы**

1. Тур Э.А., Басов С.В. Исследование минеральных материалов, использованных при постройке дворцового комплекса Сапегов в Ружанах // *Вестник Брестского государственного технического университета. Строительство и архитектура*. 2014. № 1 (85). С. 88–91.
2. Любомирский Н.В., Федоркин С.И., Бахтин А.С., Хмельницкий А.Л. Петрографическая характеристика материалов отделки зданий культурного наследия г. Севастополя послевоенной постройки 40–50-х годов XX века // *Строительство и техногенная безопасность*. 2020. № 19 (71). С. 45–64.
3. Логанина В.И. Сухие строительные смеси для реставрации зданий исторической застройки // *Региональная архитектура и строительство*. 2015. № 3 (24). С. 34–42.
4. Gourdin W.H., Kingery W.D. The Beginnings of pyrotechnology: neolithic and egyptian lime plaster // *Journal of Field Archaeology*. 1975. Vol. 2:1–2, pp. 133–150. DOI: 10.1179/009346975791491277
5. Ullman M., Brailovsky L., Schechter H.C., Weissbrod L., Zuckerman-Cooper R., Toffolo M.B., Caracuta V., Boaretto E., Weineri S., Abramov J., Bar-Yosef Mayer D.E., Wolff Avrutis V., Kol-Ya'kov S., Frumkin A. The early Pre-Pottery Neolithic B site at Neshar-Ramla Quarry, Israel. *Quaternary International*. 2022. Vol. 624, pp. 148–167 <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.04.019>
6. Лобода А.Ю., Трунькин И.Н., Светогоров Р.Д. и др. Исследование пигментов и связующих красочных слоев росписей храма X–XIII вв. на плато Эски-Кермен // *Материалы по археологии, истории и этнографии Таврии*. 2021. № 26. С. 156–174. DOI: 10.37279/2413-189X.2021.26.156-174
7. Наср Несрин. Настенная живопись Карфагена. *Образовательные стратегии и инициативы в этнокультурном развитии регионов Большого Алтая: Материалы международной научно-практической конференции*. / Под ред. И.Р. Лазаренко. Барнаул: Алтайский государственный педагогический университет, 2016. С. 112–119.
8. Винокуров Н.И. Новые данные о конструкции ранней цитадели городища Артезиан в Крымском Приазовье // *Боспорские исследования*. 2017. № 35. С. 180–207.
9. Лукьянова Т.А. Технологические особенности фресковой живописи XVI века на примере росписей собора Успения Пресвятой Богородицы Успенского монастыря г. Свяжска // *Наука и современность*. 2011. № 13–1. С. 83–94.
10. Исаева О.А. Технические и стилистические особенности монументальной живописи Мезоамерики. В сборнике: *Актуальные проблемы монументального искусства: Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической*

**References**

1. Tur E.A., Basov S.V. Research of mineral materials used in the construction of the Sapieha palace complex in Ruzhany. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2014. No. 1 (85), pp. 88–91. (In Russian).
2. Lyubomirsky N.V., Fedorkin S.I., Bakhtin A.S., Khmel'nitsky A.L. Petrographic characteristics of materials for finishing buildings of cultural heritage of Sevastopol of post-war construction of the 40–50s of the twentieth century. *Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost'*. 2020. No. 19 (71), pp. 45–64. (In Russian).
3. Loganina V.I. Dry building mixtures for the restoration of buildings of historical buildings. *Regional'naya arhitektura i stroitel'stvo*. 2015. No. 3 (24), pp. 34–42. (In Russian).
4. Gourdin W.H., Kingery W.D. The Beginnings of pyrotechnology: neolithic and egyptian lime plaster. *Journal of Field Archaeology*. 1975. Vol. 2:1–2, pp. 133–150. DOI: 10.1179/009346975791491277
5. Ullman M., Brailovsky L., Schechter H.C., Weissbrod L., Zuckerman-Cooper R., Toffolo M.B., Caracuta V., Boaretto E., Weineri S., Abramov J., Bar-Yosef Mayer D.E., Wolff Avrutis V., Kol-Ya'kov S., Frumkin A. The early Pre-Pottery Neolithic B site at Neshar-Ramla Quarry, Israel. *Quaternary International*. 2022. Vol. 624, pp. 148–167 <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2021.04.019>
6. Loboda A.Yu., Trunkin I.N., Svetogorov R.D. et al. A study of the pigments and cohesive colour layers of the paintings in a church from the tenth to thirteenth centuries on the plateau of Eski-Kermen. *Materialy po arheologii, istorii i etnografii Tavrii*. 2021. No. 26, pp. 156–174. (In Russian). DOI: 10.37279/2413-189X.2021.26.156-174
7. Nasr Nesrin. Wall painting of Carthage. *Educational strategies and initiatives in the ethno-cultural development of the regions of greater Altai: materials of the international scientific and practical conference*. Ed. by I.R. Lazarenko. Barnaul: Altai State Pedagogical University. 2016, pp. 112–119. (In Russian).
8. Vinokurov N.I. New data on the construction of the early citadel of the artezian settlement in the Crimean Priozovye. *Bosporskie issledovaniya*. 2017. No. 35, pp. 180–207. (In Russian).
9. Lukyanova T.A. Technological features of fresco painting of the XVI century on the example of paintings of the Cathedral of the Dormition of the Mother of God of the Assumption monastery of Sviyazhsk. *Nauka i sovremennost'*. 2011. No. 13–1, pp. 83–94. (In Russian).
10. Isaeva O.A. Technical and stylistic features of monumental painting of Mesoamerica. *In the collection: Actual problems of monumental art. Collection of scientific works on the materials of the international scientific and practical conference*. Edited by D.O. Antipina. Saint Petersburg. 2021, pp. 123–130. (In Russian).

- конференции. / Под ред. Д.О. Антипиной. СПб., 2021. С. 123–130.
11. Кукс Ю.М., Лукьянова Т.А. История развития фрески (Часть 1. Древнерусская фреска. Две трансформации) // *Перспективы науки и образования*. 2014. № 4 (10). С. 127–135.
  12. Иванова Ю.В. Нuzальская часовня в Северной Осетии. История исследования и реставрации архитектуры и стенописи. В сборнике: *II Международный форум реставраторов «Реставрация: теоретические проблемы и практическая деятельность»: Коллективная монография на основе материалов международной научной конференции*. М., 2020. С. 105–110.
  13. Кукс Ю.М., Лукьянова Т.А. История развития фрески (Часть 2. Происхождение технологии чисто известковых штукатурных оснований фрески) // *Перспективы науки и образования*. 2014. № 5 (11). С. 127–136.
  14. Пухаренко Ю.В., Харитонов А.М., Шангина Н.Н., Сафонова Т.Ю. Реставрация исторических объектов с применением современных сухих строительных смесей // *Вестник гражданских инженеров*. 2011. № 1 (26). С. 98–103.
  15. Франке Р. Пригласите природу в ваш дом. Известковая штукатурка для машинного нанесения – МКЕ // *Сухие строительные смеси*. 2011. № 1. С. 10–11.
  16. Хуторской С.В., Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. Биокоррозия и биостойкость известковых композитов // *Вестник Волжского регионального отделения Российской академии архитектуры и строительных наук*. 2011. № 14. С. 132–135.
  17. Логанина В.И., Куимова Е.И., Учаева Т.В. Применение метода нечеткого отношения предпочтения при оценке конкурентоспособности известковой сухой строительной смеси // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2015. № 1. С. 36–40.
  18. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Исследование процессов массопереноса при биокоррозии бетона. В сборнике: *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2020 году: Сборник научных трудов РААСН: В 2 т.* М., 2021. С. 299–303.
  19. Храмов А.К., Стефанович А.И. Микология: метод. указания к спецкурсу по разделу «Экология грибов и грибоподобных организмов». Минск: БГУ, 2011. 45 с.
  20. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Касьяненко Н.С. Исследование начального этапа кислотной коррозии цементного камня: В сборнике: *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в*
  11. Kuks Yu.M., Lukyanova T.A. History of the fresco paintings (Part 1. Old Russian fresco. Two transformations). *Perspektivy nauki i obrazovaniya*. 2014. No 4 (10), pp. 127–135. (In Russian).
  12. Ivanova Yu.V. Nuzal chapel in North Ossetia. History of research and restoration of architecture and wall painting. *In the collection: II International Forum of Restorers «Restoration: theoretical problems and practical activities». Collective monograph based on the materials of the international scientific conference*. Moscow. 2020, pp. 105–110. (In Russian).
  13. Kuks Yu.M., Lukyanova T.A. History of the development of frescoes (Part 2. Origin of technology of purely calcareous plastering foundations of the fresco). *Perspektivy nauki i obrazovaniya*. 2014. No. 5 (11), pp. 127–136. (In Russian).
  14. Pukharencov Yu.V., Kharitonov A.M., Shangina N.N., Safonova T.Yu. Restoration of historical objects with the use of modern dry building mixtures. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2011. No. 1 (26), pp. 98–103. (In Russian).
  15. Franke R. Invite nature into your home. lime plaster for machine application – MKE. *Suhie stroitel'nye smesi*. 2011. No. 1, pp. 10–11. (In Russian).
  16. Khutorskoy S.V., Erofeev V.T., Smirnov V.F. Biocorrosion and bio-resistance of lime composites. *Vestnik of the Volga Regional Branch of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences*. 2011. No. 14, pp. 132–135. (In Russian).
  17. Loganina V.I., Kuimova E.I., Uchaeva T.V. Application of the method of fuzzy preference ratio in assessing the competitiveness of lime dry construction mixture. *Vestnik of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov*. 2015. No. 1, pp. 36–40. (In Russian).
  18. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Loginova S.A. Study of mass transfer processes in biocorrosion of concrete. *In the collection: Fundamental, exploratory and applied research of the RAACS on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2020*. Collection of scientific works of RAACS: in 2 volumes. Moscow. 2021, pp. 299–303. (In Russian).
  19. Khramtsov A.K., Stefanovich A.I. Mikologiya: metod. ukazaniya k spetskursu po razdelu «Ekologiya gribov i gribopodobnykh organizmov». [Mycology: method. instructions for the special course on the section «Ecology of fungi and mushroom-like organisms»]. Minsk: BGU. 2011. 45 p.
  20. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Konovalova V.S., Kasyanenko N.S. Study of the initial stage of acid corrosion of cement stone. *In the collection: Fundamental, exploratory and applied research of the RAACS on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2019*. Collection of scientific papers RAACS. Moscow. 2020, pp. 454–460. (In Russian).

- 2019 году: Сборник научных трудов РААСН. М., 2020. С. 454–460.
21. Чеснокова Т.В., Румянцева В.Е., Логинова С.А. Моделирование процесса биоразрушения бетона на предприятиях текстильной промышленности // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. 2020. № 1 (385). С. 206–212.
  22. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Коновалова В.С., Евсяков А.С. Кольматация пор цементных бетонов при гидрофобизации. В сборнике: *Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2018 году*. М., 2019. С. 563–572. DOI: 10.22337/9785432303134-563-572
  23. Pavlíková M, Pavlík Z, Pernicová R, Černý R. The influence of inner hydrophobisation on water transport properties of modified lime plasters // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Iss. 1738. 280005. <https://doi.org/10.1063/1.4952065>
  24. Строкова В.В., Сивальнева М.Н., Неровная С.В., Второв Б.Б. Штукатурные покрытия как регулятор параметров микроклимата в помещении: Обзор теоретических и экспериментальных исследований // *Строительные материалы*. 2021. № 7. С. 32–72. DOI: 10.31659/0585-430X-2021-793-7-32-72.
  25. Антоненко Н.Н., Орехов С.А., Сериков С.В., Мазепа А.К. Известь как вяжущее в ремонтных составах. В сборнике: *Современные научные исследования. Теория, методология, практика: Сборник научных статей по материалам VI Международной научно-практической конференции*. Уфа, 2021. С. 279–284.
  26. Шангина Н.Н., Харитонов А.М. Особенности производства и применения сухих строительных смесей для реставрации памятников архитектуры // *Сухие строительные смеси*. 2011. № 4. С. 16–19.
  27. Хавкин Л.М. Технология силикатного кирпича. Репринтное воспроизведение издания 1982 г. М.: ЭКОЛИТ, 2011. 384 с.
  28. Хинт Й.А. Основы производства силикатных изделий. М.; Л.: Государственное издательство литературы по строительству, архитектуре и строительным материалам, 1962. 642 с.
  29. Любомирский Н.В., Федоркин С.И., Бахтин А.С., Бахтина Т.А., Николаенко Е.Ю., Николаенко В.В. Конструкционные и теплоизоляционные строительные материалы принудительного карбонатного твердения из вторичного сырья: Монография. Симферополь: ИТ «АРИАЛ», 2021. 408 с.
  30. Мамыкин Н.А. Определение средних размеров ОКР и средних микродеформаций методом аппроксимации. Челябинск, 1991. 16 с.
  21. Chesnokova T.V., Rumyantseva V.E., Loginova S.A. Modeling of the process of biodisastruction of concrete at the enterprises of the textile industry. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Tekhnologiya tekstil'noj promyshlennosti*. 2020. No. 1 (385), pp. 206–212. (In Russian).
  22. Fedosov S.V., Rumyantseva V.E., Krasilnikov I.V., Konovalova V.S., Evsyakov A.S. Colmatation of pores of cement concretes at hydrophobization. *In the collection: Fundamental, exploratory and applied research of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences on scientific support for the development of architecture, urban planning and the construction industry of the Russian Federation in 2018*. Moscow. 2019, pp. 563–572. (In Russian). DOI: 10.22337/9785432303134-563-572
  23. Pavlíková M, Pavlík Z, Pernicová R, Černý R. The influence of inner hydrophobisation on water transport properties of modified lime plasters // *AIP Conference Proceedings*. 2016. Iss. 1738. 280005. <https://doi.org/10.1063/1.4952065>
  24. Strokova V.V., Sivalneva M.N., Nerovnaya S.V., Vtorov B.B. Plaster coverings as a regulator of indoor microclimate parameters: an overview of theoretical and experimental research. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2021. No. 7, pp. 32–72. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2021-793-7-32-72>
  25. Antonenko N.N., Orekhov S.A., Serikov S.V., Mazepa A.K. Lime as a binder in repair mix. *In the collection: Modern scientific research. Theory, methodology, practice. Collection of scientific articles based on materials of the VI International Scientific and Practical Conference*. Ufa. 2021, pp. 279–284. (In Russian).
  26. Shangina N.N., Kharitonov A.M. Features of production and application of dry building mixtures for the restoration of architectural monuments. *Suhie stroitel'nye smesi*. 2011. No. 4, pp. 16–19. (In Russian).
  27. Khavkin L.M. *Tekhnologiya silikatnogo kirpicha. Reprintnoye vosproizvedeniye izdaniya 1982 g. [Silicate brick technology. Reprint reproduction of the 1982 edition]*. Moscow: EKOLIT, 2011. 384 p.
  28. Hint Y.A. *Osnovy proizvodstva silikatnykh izdeliy [Fundamentals of the production of silicate products]*. Moscow-Leningrad: State publishing house of literature on construction, architecture and building materials. 1962. 642 p.
  29. Lyubomirsky N.V., Fedorkin S.I., Bakhtin A.S., Bakhtina T.A., Nikolaenko E.Yu., Nikolaenko V.V. *Konstruksionnye i teploizolyatsionnye stroitel'nye materialy prinuditel'nogo karbonatnogo tverdeniya iz vtorichnogo syr'ya: monografiya. [Structural and heat-insulating building materials of forced carbonate hardening from secondary raw materials: monograph]*. Simferopol: ARIAL. 2021. 408 p.
  30. Mamykin N.A. *predeleniye srednikh razmerov OKR i srednikh mikrodeformatsiy metodom approksimatsii [Determination of the average sizes of CSR and average microdeformations by the approximation method]*. Chelyabinsk: 1991. 16 p.

УДК 681.6:681.9

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-65-69>

М.Р. БЕКМАНСУРОВ, инженер (аспирант) (bekmansurov2@mail.ru),  
 Г.И. ЯКОВЛЕВ, д-р техн. наук (gyakov@istu.ru),  
 А.Ф. ГОРДИНА, канд. техн. наук (gism56@mail.ru),  
 Н.В. КУЗЬМИНА, инженер (аспирант) (oosila22a@mail.ru),  
 З.С. САИДОВА, канд. техн. наук (zarinasaidova@mail.ru),  
 А.М. АЛЕКСАНДРОВ, инженер (аспирант) (aleksandrov2332@yandex.ru),  
 А.Н. ЖУКОВ, инженер (аспирант) (alexej.zhukov7@gmail.com)

Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова (426069, г. Ижевск, ул. Студенческая, 7)

## Быстротвердеющий состав на основе фторангидрита для послойной экструзии (3D-печати)

Представлены результаты исследования, посвященного разработке быстротвердеющего состава на основе фторангидрита для послойной экструзии (3D-печати). В ходе разработки было определено оптимальное содержание основных компонентов – фторангидрита, портландцемента, сухого порошка растворимого натриевого стекла, замедлителя твердения – фосфата натрия, а также микроармирующего хризотил-асбестового волокна. Прочность образцов в сухом состоянии при сжатии составила 6,9 МПа, во влажном состоянии – 4,6 МПа. Исследования микроструктуры материала показали, что в составе матрицы преобладают кристаллические новообразования, покрывающие волокна хризотил-асбеста, равномерно распределенные в структуре композиции. ИК-спектральный анализ и дифференциально-термический анализ композиции показали формирование двуводного гипса в структуре композиции в сочетании с гидросиликатами кальция, обеспечивающими необходимую водостойкость композиции.

**Ключевые слова:** фторангидрит, аддитивные технологии, экструзия, 3D-печать.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента РФ (МК-3391.2022.4).

**Для цитирования:** Бекмансуров М.Р., Яковлев Г.И., Гордина А.Ф., Кузьмина Н.В., Саидова З.С., Александров А.М., Жуков А.Н. Быстротвердеющий состав на основе фторангидрита для послойной экструзии (3D-печати) // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 65–69. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-65-69>

M.R. BEKMANSUROV, Engineer (postgraduate student) (bekmansurov2@mail.ru),  
 G.I. YAKOVLEV, Doctor of Sciences (Engineering) (gyakov@istu.ru),  
 A.F. GORDINA, Candidate of Sciences (Engineering) (gism56@mail.ru),  
 N.V. KUZMINA, Engineer (postgraduate student) (oosila22a@mail.ru),  
 Z.S. SAIDOVA, Candidate of Sciences (Engineering) (zarinasaidova@mail.ru),  
 A.M. ALEXANDROV, Engineer (postgraduate student) (aleksandrov2332@yandex.ru)  
 A.N. ZHUKOV, Engineer (postgraduate student) (alexej.zhukov7@gmail.com)  
 Kalashnikov Izhevsk State Technical University (7, Studencheskaya Street, 426069, Izhevsk, Russian Federation)

### Fast Curing Fluoroanhydrite Composition for Layer-by-Layer Extrusion (3D printing)

The results of a study on the development of a fast-curing composition based on fluoroanhydrite for layer-by-layer extrusion (3D printing) are presented. In the process of composition development, the optimal content of the main components – fluoroanhydrite, Portland cement, dry powder of a soluble sodium glass, hardening retardant – sodium phosphate, as well as micro-reinforcing chrysotile-asbestos fiber was determined. The compressive strength of the specimens was measured to be 6.9 MPa in the dry state and 4.6 MPa in the wet state. Studies of the microstructure of the material showed that the composition of the matrix is dominated by crystalline hydration products covering the fibers of chrysotile asbestos, which are evenly distributed in the structure of the composition. IR spectral analysis and differential thermal analysis of the composition showed the formation of gypsum dihydrate in the structure of the composition in combination with calcium silicate hydrates, which provide the necessary water resistance of the composition.

**Keywords:** fluoroanhydrite, additive technologies, extrusion, 3D printing.

The work was supported by the Grant of the President of the Russian Federation (MK-3391.2022.4).

**For citation:** Bekmansurov M.R., Yakovlev G.I., Gordina A.F., Kuzmina N.V., Saidova Z.S., Alexandrov A.M., Zhukov A.N. Fast curing fluoroanhydrite composition for layer-by-layer extrusion (3D printing). *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 65–69. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-65-69>

Благодаря развитию цифровых технологий во всем мире отмечается динамическое развитие различных отраслей промышленности, сопровождающееся наращиванием производственного потенциала предприятий и автоматизацией процессов создания объектов. В строительной отрасли популярность набирает 3D-печать, т. е. процесс создания трехмерных объектов по алгоритмам, заданным в цифровой

форме. Преимуществами данной аддитивной технологии являются сокращение сроков строительства, снижение отходов материалов, повышение экологичности, обеспечение более разумных трудовых и материальных затрат, а также исполнение требований производственной безопасности [1–7].

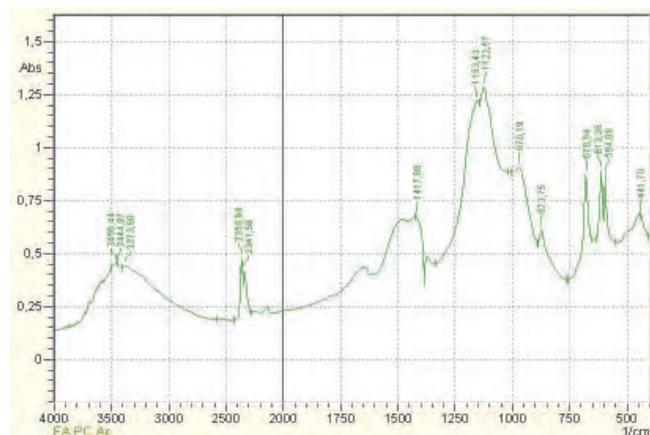
Однако, несмотря на все преимущества 3D-печати, на сегодняшний день развитие данной технологии

несколько сдерживается сложностью разработки материалов, пригодных для создания объектов методом послойной экструзии, что обусловлено низкими реологическими характеристиками смесей, а также их недостаточными эксплуатационными свойствами и низкой долговечностью полученных изделий. Самыми распространенными дефектами изделий, созданных с помощью 3D-печати, являются искажение формы из-за растекания слоев, наличие разрывов, полостей и трещин, повышенная пористость, низкая устойчивость к трещинам, большие деформации при усадке, неравномерное отверждение и т. д. [8, 9]. Кроме того, для обеспечения стабильности слоев необходимы длительные технологические перерывы, которые, в свою очередь, могут негативно сказаться на прочности и конструкционной стабильности конечного объекта [10, 11].

На основании вышеописанного очевидно, что приоритетным направлением развития технологии 3D-печати в строительстве является разработка материалов различной химической природы с улучшенными физико-механическими свойствами, способных к быстрому схватыванию и формированию прочной структуры матрицы, а также обеспечивающих достаточную адгезию между слоями. Поэтому целью данной работы явилась разработка быстротвердеющего состава на основе фторангидрита для послойной экструзии (3D-печати) с оптимальными реологическими характеристиками и улучшенными физико-механическими свойствами. К задачам исследования относятся оптимизация состава смеси для обеспечения требуемых реологических и механических характеристик материала, изучение физико-механических и физико-химических свойств полученных композиций, а также изучение микроструктуры материала для оценки влияния отдельных компонентов смеси на формирование структуры матрицы.

**Материалы и методы исследования**

При оптимизации состава смеси менялось соотношение между содержанием фосфата натрия, натриевого стекла и портландцемента. Исследова-



**Рис. 1.** ИК-спектральный анализ композиции  
**Fig. 1.** IR spectral analysis of the composition

ния проводились на образцах-кубиках размером 20×20×20 мм.

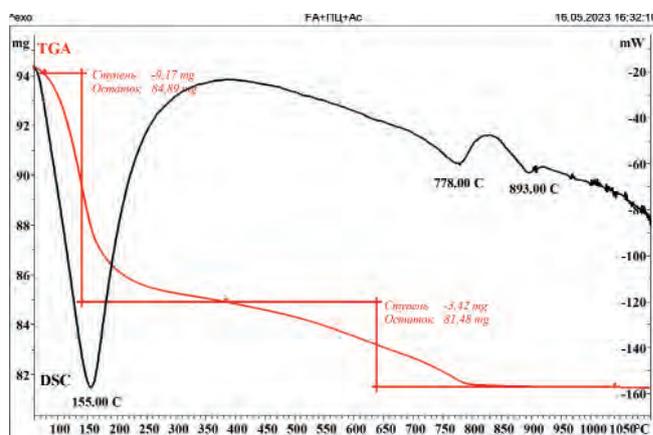
Основу разработанной смеси составляет фторангидрит производства ООО «Галоген» (г. Пермь), который представляет рыхлый однородный материал с постоянным химическим составом и размерами частиц от 1 до 20 мм с добавлением портландцемента ПЦ500 Д0 (ГОСТ 31108–2020 «Цементы общестроительные. Технические условия») производства АО «Мордовцемент» (р. п. Комсомольский, Республика Мордовия). Введение в состав смеси портландцемента повышает прочность материала за счет гидратации минералов цемента. Соотношение фторангидрита и портландцемента в композиции было принято 3:1.

Также основным компонентом является сухой порошок для получения жидкого натриевого стекла HISOL-Na производства фирмы Sil-EX, соответствующий ТУ 20.13.62-001-06051139–2020. Порошок с силикатным модулем 2,9–3,2 вводился в состав композиции в количестве 10% от общей массы фторангидрита и портландцемента.

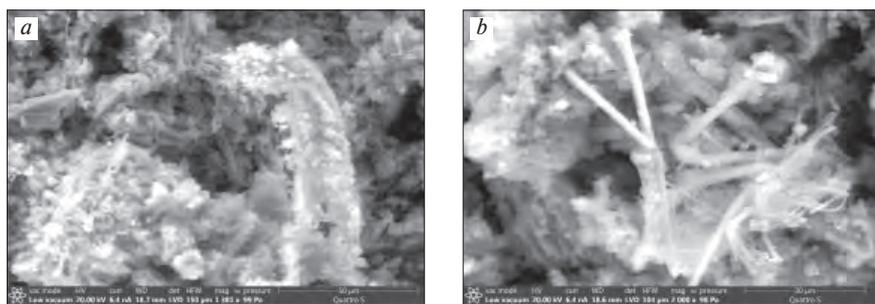
Фторангидрит с портландцементом являются хорошим отвердителем жидкого стекла. Данные компоненты приводят к быстрой коагуляции и отверждению смеси. Это связано с поглощающей способностью частиц, приводящих к обезвоживанию жидкого стекла. Использование этих трех компонентов (фторангидрита, портландцемента и натриевого стекла) без замедлителя не является целесообразным ввиду быстрого и неконтролируемого схватывания смеси, что непригодно для использования при послойной экструзии.

Поэтому для регулирования процесса твердения композиции добавлялся замедлитель – фосфат натрия  $Na_3PO_4$  в количестве 3% от массы смеси фторангидрита и портландцемента.

Для обеспечения микроармирования матрицы в состав материала вводился асбест 7-го сорта Баженовского месторождения (Ураласбест) в количестве 5% от общей массы смеси фторангидрита и портландцемента.

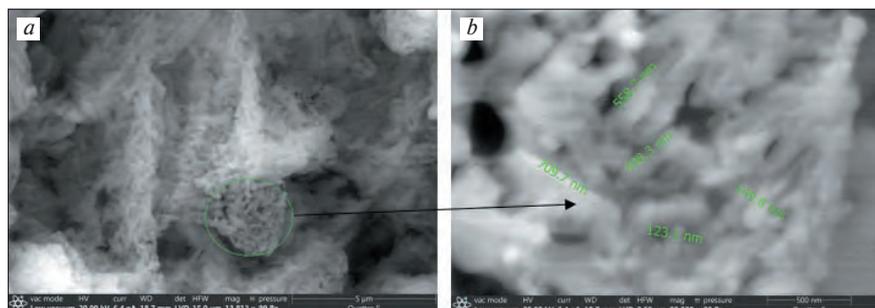


**Рис. 2.** Дифференциально-термический анализ композиции  
**Fig. 2.** Differential thermal analysis of the composition



**Рис. 3.** Структура волокон хризотил-асбеста в вяжущей матрице композиции: *a* – 1381× увеличение; *b* – 2000×увеличение

**Fig. 3.** Structure of chrysotile asbestos fibers in the binder matrix of the composition: *a* – 1381× magnification; *b* – 2000×magnification



**Рис. 4.** Микроструктура волокон вторичного гидросульфалоумината кальция в структуре поры: *a* – 13813× увеличение; *b* – 80000×увеличение

**Fig. 4.** Microstructure of secondary calcium hydrosulfoaluminate fibers in the pore structure: *a* – 13813× magnification; *b* – 80000×magnification

Для затворения смеси использовалась вода, соответствующая требованиям ГОСТ 23732–2011 «Вода для бетонов и строительных растворов». Водовяжущее отношение составляло  $V/V=0,45$ .

Для идентификации минералогического состава проводился дифференциально-термический анализ и ИК-спектроскопия.

Дифференциально-сканирующая калориметрия (ДСК) и термогравиметрический анализ выполнялись на дериватографе TGA/DSC1 Starsystem производства Mettler Toledo в интервале температуры от 20 до 1100°C. ИК-спектральный анализ проводился на спектрометре IR Affinity-1 производства Shimadzu.

Для испытаний образцов на прочность использовался пресс серии ПГМ-100МГ4, снабженный электрическим приводом (сеть 220 В, 50 Гц) и тензометрическим силоизмерителем. Механические испытания образцов проводились в возрасте 3 сут после затвердения их в условиях 100% влажности.

### Результаты и обсуждения

Испытания на прочность образцов-кубиков размеров 20×20×20 мм в возрасте 3 сут в сухом состоянии показали прочность при сжатии 6,9 МПа, во влажном состоянии – 4,6 МПа. Коэффициент размягчения составил 0,67, что связано с низкой водостойкостью фторангидритовой матрицы. Сроки схватывания композиции составили 90 с от начала затворения.

Результаты ИК-спектрального анализа композиции показали наиболее интенсивные линии поглощения, соответствующие двумодному гипсу

$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , включая: валентные колебания  $\text{OH}^-$  групп 3373,5; 3444,87; 3455,44  $\text{cm}^{-1}$ ; деформационные колебания воды 1600–1650  $\text{cm}^{-1}$ ; сульфатные группы 1122,57 и 1153,43; 613,35 и 594,08  $\text{cm}^{-1}$ ; оксид кальция 441,7  $\text{cm}^{-1}$ . Линии поглощения 1417,68 и 873,75  $\text{cm}^{-1}$  связаны с карбонизацией компонентов вяжущей матрицы с образованием карбоната кальция  $\text{CaCO}_3$ . Группировка  $-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-$  представлена линиями поглощения 970,18 и 678,94  $\text{cm}^{-1}$ .

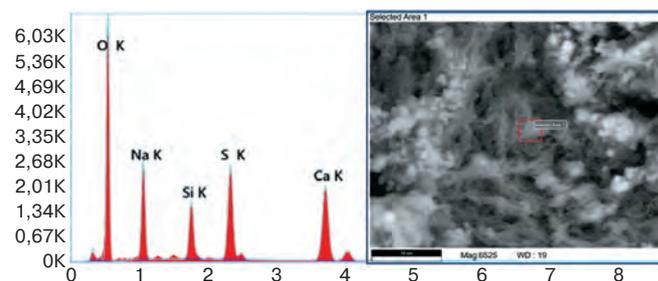
Линии поглощения в области 620  $\text{cm}^{-1}$  связаны с наличием сульфата натрия, образование которого происходит вследствие обменных реакций между фосфатом натрия и сульфатом кальция [12].

Спектр дифференциально-термического анализа показал эндотермический эффект при температуре 155°C, связанный с удалением кристаллогидратной влаги из гипсовой матрицы [13]. При температуре 778°C отмечена дегидратация гидросиликатов кальция в составе гидратированных минералов портландцемента; эндотермический эффект при температуре 893°C обусловлен разложением карбоната кальция, образование которого отмечено также на ИК-спектре. В интервале температуры 800–850°C происходит формирование волластонита, сопровождающееся экзотермическим эффектом [14].

Микроструктура композиции представлена кристаллическими новообразованиями, покрывающими волокна хризотил-асбеста (рис. 3, *a*), которые равномерно распределены в структуре композиции (рис. 3, *b*).

В процессе гидратации составляющих композиции поризованная первоначальная структура заполняется вторичными кристаллами гидросульфалоумината кальция (рис. 4), формирование которых обусловлено наличием в составе композиции гидро-

дратация гидросиликатов кальция в составе гидратированных минералов портландцемента; эндотермический эффект при температуре 893°C обусловлен разложением карбоната кальция, образование которого отмечено также на ИК-спектре. В интервале температуры 800–850°C происходит формирование волластонита, сопровождающееся экзотермическим эффектом [14].



**Рис. 5.** Рентгеновский микроанализ волокнистых новообразований в порах композиции

**Fig. 5.** X-ray microanalysis of fibrous neoplasms in the pores of the composition

силикатов кальция, двуводного гипса и щелочной среды, поддерживаемой активатором фторангидри- та в виде фосфата натрия. Образующаяся вторичная кристаллическая фаза способствует уплотнению твердеющей композиции.

Проведенный рентгеновский микроанализ (рис. 5) показал наличие гелей силиката натрия на поверхности волокнистых новообразований гидросульфалюмината кальция (Ca, Si, O, S).

Таким образом, процесс уплотнения структуры и ускорение схватывания композиции можно объяснить формированием вторичного гидросульфалюмината кальция, заполняющего поровое пространство в твердеющей композиции.

### Выводы

В данной работе был представлен состав быстро- твердеющей композиции для послойной экструзии (3D-печати). В основе композиции были использо- ваны фторангидрит и портландцемент в соотноше- нии 3:1. Также в композицию вводился порошок для

получения жидкого натриевого стекла, замедлитель твердения – фосфат натрия  $\text{Na}_3\text{PO}_4$  и микроармиру- ющее волокно хризотил-асбеста в количестве соот- ветственно 10, 5 и 3% от массы вяжущего.

Исследования показали, что сроки схватывания при водовяжущем соотношении В/В=0,45 разрабо- танной композиции составили 90 с от начала за- творения; для регулирования сроков схватывания при увеличении водовяжущего соотношения до В/В=0,6 начало схватывания составило 4,5 мин, конец схватывания 17 мин, при этом прочность при сжатии образцов в возрасте 3 сут в сухом со- стоянии составила 6,9 МПа, а во влажном состоя- нии – 4,6 МПа.

ИК-спектральный анализ и дифференциально- термический анализ композиции показали форми- рование двуводного гипса в структуре композиции в сочетании с гидросиликатами кальция, обеспечива- ющими необходимую водостойкость композиции. Данные результаты подтвердились исследованиями микроструктуры полученного материала.

### Список литературы

1. Ghafur H.A. A review of «3D concrete printing»: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 66. 105863. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105863>
2. Robayo-Salazar R., de Gutiérrez R.M., Villaquirán-Cacedo M.A., Arjona S.D. 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in Construction*. 2023. Vol. 146. 104693, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>
3. Özalp F., Yılmaz H.D. Fresh and hardened properties of 3d high-strength printing concrete and its recent applications. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2020. Vol. 44. DOI: 10.1007/s40996-020-00370-4
4. Славчева Г.С., Артамонова О.В. Разработка принципов создания армированных композитов для строительных 3D-аддитивных технологий // *Строительные материалы*. 2022. № 12. С. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-809-12-52-58>
5. Монастырев П.В., Мищенко Е.С., Азауи Дубла Б., Овсянникова В.А., Овсянников О.А. Анализ технологий возведения зданий с помощью 3D-принтеров // *Жилищное строительство*. 2019. № 9. С. 53–59. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-9-53-59>
6. Славчева Г.С., Акулова И.И., Вернигора И.В. Концепция и эффективность применения 3D-печати для дизайна городской среды // *Жилищное строительство*. 2020. № 3. С. 49–55. DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-3-49-55>

### References

1. Ghafur H.A. A review of «3D concrete printing»: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 66. 105863. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105863>
2. Robayo-Salazar R., de Gutiérrez R.M., Villaquirán-Cacedo M.A., Arjona S.D. 3D printing with cementitious materials: Challenges and opportunities for the construction sector. *Automation in Construction*. 2023. Vol. 146. 104693, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104693>
3. Özalp F., Yılmaz H.D. Fresh and hardened properties of 3d high-strength printing concrete and its recent applications. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*. 2020. Vol. 44. DOI: 10.1007/s40996-020-00370-4
4. Slavcheva G.S., Artamonova O.V. Development of principles for the creation of reinforced composites for 3D additive construction technologies. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2022. No. 12, pp. 52–58. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-809-12-52-58>
5. Monastirev P.V., Mishchenko E.S., Azaui Dubla B., Ovsiannikova V.A., Ovsiannikov O.A. Analysis of building construction technologies using 3D-printers. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 9, pp. 54–59. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-9-53-59>
6. Slavcheva G.S., Akulova I.I., Vernigora I.V. Concept and effectiveness of 3D printing for urban environment design. *Zhilishchnoe Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2020. No. 3, pp. 49–55. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2020-3-49-55>
7. Akulova I.I., Slavcheva G.S., Makarova T.V. Technical and economic estimate of efficiency of using 3D printing in housing construction. *Zhilishchnoe*

7. Акулова И.И., Славчева Г.С., Макарова Т.В. Технико-экономическая оценка эффективности применения 3D-печати в жилищном строительстве // *Жилищное строительство*. 2019. № 12. С. 52–56.
8. Зиганшина Л.В. Мелкозернистые бетоны в технологии аддитивного производства (3D-печати): Дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2022. 282 с.
9. Шеремет А.А. Бетонные смеси для трехслойной параллельной 3D-печати: Дис. ... канд. техн. наук. Белгород, 2023. ...с.
10. Золотарева С.В. Развитие и применение 3D-технологий в строительстве: *Сборник трудов VII Международного молодежного форума «Образование, наука, производство»*. 2016. С. 1033–1037.
11. Лунева Д.А., Кожевникова Е.О., Калошина С.В. Технология 3D-печати с использованием метода послойного экструдирования в строительстве // *Современные технологии в строительстве. Теория и практика*. 2017. № 2. С. 251–261.
12. Зинюк Р.Ю., Балыков А.Г., Гавриленко И.Б. и др. ИК-спектроскопия в неорганической технологии. Л.: Химия, 1983. 111 с.
13. Горшков В.С., Тимашев З.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. М.: Высшая школа, 1981. 197 с.
14. Taylor H.F.W. Cement chemistry. 2 nd ed. London. 1977. 459 p.
7. *Stroitel'stvo* [Housing Construction]. 2019. No. 12, pp. 52–56. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2019-12-52-56>
8. Ziganshina L.V. Fine-grained concretes in additive manufacturing technology (3D printing): Diss... Candidate of Sciences (Engineering). Kazan. 2022. 282 p. (In Russian).
9. Sheremet A.A. Concrete mixtures for three-layer parallel 3D printing. Diss... Candidate of Sciences (Engineering). Belgorod. 2023. ...p. (In Russian).
10. Zolotareva S.V. Development and application of 3D technologies in construction *Proceedings of the VII International Youth Forum «Education, Science, Production»*. 2016, pp. 1033–1037. (In Russian).
11. Luneva D.A., Kozhevnikova E.O., Kaloshina S.V. 3D printing technology using layer-by-layer extrusion in construction. *Modern technologies in construction. Theory and practice*. 2017. No. 2, pp. 251–261. (In Russian).
12. Zinyuk R.Yu. Balykov A.G., Gavrilenko I.B. et al. IR-spektroskopiya v neorganicheskoj tekhnologii [IR spectroscopy in inorganic technology]. Leningrad: Khimiya. 1983. 111 p.
13. Gorshkov V.S., Timashev Z.V., Saveliev V.G. Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv [Methods of physical and chemical analysis of binders]. Moscow: Vysshaya shkola. 1981. 197 p.
14. Taylor H.F.W. Cement chemistry. 2 nd ed. London. 1977. 459 p.



Немецкий стандарт

ОБЪЕДИНЕНИЕ ПИРС

**КОНКУРС**

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ**



РОССИЙСКАЯ ГИПСОВАЯ АССОЦИАЦИЯ

**НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИХ СТАТЕЙ**

**Технологическая безопасность гипсовой отрасли:**

результаты научных исследований  
развитие технологии и оборудования  
применение гипсовых материалов в строительстве



Редакция научно-технического журнала «Строительные материалы» и Российская гипсовая ассоциация объявляют конкурс научных и научно-практических статей по гипсовой тематике.

В конкурсе принимают участие статьи, опубликованные в течение года с № 8-2022 г. по № 8-2023 г. по темам:

- Результаты научных исследований в области создания новых и оптимизации существующих гипсовых материалов
- Развитие технологии производства гипсовых материалов и изделий
- Техногенные гипсовые отходы и возможность их вовлечения в производство
- Применение гипсовых материалов в строительстве

**Объявление итогов конкурса и награждение победителей состоится в рамках 11-й Международной научно-практической конференции «Повышение эффективности производства и применения гипсовых материалов и изделий»**

**К участию в конкурсе приглашаются:** магистранты, аспиранты, докторанты, соискатели ученой степени кандидата и доктора наук, сотрудники производственных предприятий и научно-производственные коллективы.

Рукописи статей необходимо представлять в редакцию в соответствии с техническими требованиями (см. раздел «Авторам» на сайте журнала <https://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>) с пометкой «На конкурс статей по гипсу».

Крайний срок подачи конкурсных статей 1 июля 2023 г.

**Конкурсная комиссия определяет лучшие статьи и объявляет победителей конкурса.**

Победители конкурса награждаются ценными подарками, годовой подпиской на журнал «Строительные материалы» на 2024 г. и дипломами лауреата.

Авторам всех конкурсных статей вручаются дипломы участников конкурса.



**www.rifsm.ru    www.journal-cm.ru    www.rosgips.ru**

**(499) 976-20-36, 976-22-08**

Б.А. БОНДАРЕВ, д-р техн. наук (Lnsp-48@mail.ru), А.Б. БОНДАРЕВ, канд. техн. наук (ialex-86@mail.ru), П.В. БОРКОВ, канд. техн. наук (borkovpv@mail.ru), С.К. ШУЛЕПОВ, канд. техн. наук (svsk57@yandex.ru), В.К. ЖИДКОВ, студент (gidkov\_vova\_1999@mail.ru), Д.А. КОПАЛИН, аспирант (terminato948@mail.ru)

Липецкий государственный технический университет (398055, г. Липецк, ул. Московская, 30)

## Анализ дефектов и повреждений материалов в конструкциях дорожных одежд автомобильных дорог промышленных предприятий и способы их устранения

Затронуты проблемы образования и распространения дефектов и повреждений на поверхности покрытия автомобильных дорог промышленных предприятий с жесткой дорожной одеждой. Результаты экспериментальных исследований показали, что верхние слои дорожной одежды (слои покрытия) зачастую имеют признаки недоуплотнения и повышенного водонасыщения, это говорит о несоблюдении норм в процессе укладки дорожной одежды, а также разуплотнении смеси в процессе эксплуатации автомобильной дороги, вызванном высокими нагрузками. Расчетные показатели остаточного ресурса обследуемой автодороги говорят о значительном снижении долговечности конструкций дорожных одежд. Предлагаемое решение проблемы состоит в снятии верхнего слоя асфальтобетонного покрытия, заделке трещин, каверн и прочих повреждений нижнего слоя и укладке слоя геосинтетического материала с последующей закаткой под асфальтобетон. Этот метод уже неоднократно доказывал свою эффективность и способность значительно продлить долговечность конструкции дорожной одежды в целом.

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, асфальтобетон, дорожная одежда, геосинтетический материал, продольные и поперечные трещины.

**Для цитирования:** Бондарев Б.А., Бондарев А.Б., Борков П.В., Шулепов С.К., Жидков В.К., Копалин Д.А. Анализ дефектов и повреждений материалов в конструкциях дорожных одежд автомобильных дорог промышленных предприятий и способы их устранения // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 70–74. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-70-74>

B.A. BONDAREV, Doctor of Sciences (Engineering) (Lnsp-48@mail.ru), A.B. BONDAREV, Candidate of Sciences (Engineering), (ialex-86@mail.ru), P.V. BORKOV, Candidate of Sciences (Engineering), (borkovpv@mail.ru), S.K. SHULEPOV, Candidate of Sciences (Engineering), (svsk57@yandex.ru), V.K. GIDKOV, Student (gidkov\_vova\_1999@mail.ru), D.A. KOPALIN, Postgraduate (terminato948@mail.ru)  
Lipetsk State Technical University (30, Moskovskaya Street, Lipetsk, 398055, Russian Federation)

### Analysis of Defects and Damages of Materials in the Pavement Structures of Highways of Industrial Enterprises and Methods for their Elimination

The problems of the formation and spread of defects and damages on the surface of the pavement of roads of industrial enterprises with rigid pavement are touched upon. The results of experimental studies have shown that the upper layers of the pavement (pavement layers) often have signs of under-compaction and increased water saturation, which indicates non-compliance with the rules during the laying of the pavement, as well as decompaction of the mixture during the operation of the road, caused by high loads. The calculated indicators of the residual resource of the surveyed road indicate a significant decrease in the durability of pavement structures. The proposed solution to the problem consists in removing the top layer of the asphalt concrete pavement, repairing cracks, cavities and other damage to the bottom layer, and laying a layer of geosynthetic material, followed by rolling under asphalt concrete. This method has repeatedly proven its effectiveness and the ability to significantly extend the durability of the pavement structure as a whole.

**Keywords:** autoroad, asphalt concrete, pavement, geosynthetic material, longitudinal and transverse cracks.

**For citation:** Bondarev B.A., Bondarev A.B., Borkov P.V., Shulepov S.K., Gidkov V.K., Kopalin D.A. Analysis of defects and damages of materials in the pavement structures of highways of industrial enterprises and methods for their elimination. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 70–74. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-70-74>

Автомобильные дороги промышленных предприятий — достаточно сложные конструктивные системы, состоящие из покрытия, выполненного из асфальтобетона, жесткого цементобетонного основания и щебеночной подушки, передающей нагрузку на грунт земляного полотна [1, 2]. Для промышленных автомобильных дорог различного назначения, как правило, предусматривают индивидуальную конструкцию дорожной одежды, рассчитанной под конкретные нагрузки (с учетом роста интенсивности грузоперевозок). Такое становится возможным благодаря частному характеру владений этими линейными сооружениями [3–6]. Однако в ряде случаев

конструкция дорожной одежды неспособна воспринять действующие нагрузки, в связи с чем возникают дефекты, ярко выраженные на поверхности покрытия проезжей части, такие как продольные и поперечные трещины, а также трещины над конструкцией стыка бетонных плит основания, наплывы, колейность [7–12]. Из-за наличия даже самых мелких повреждений конструктивных слоев дорожной одежды в перспективе сильно снижается долговечность, а также транспортно-эксплуатационные показатели автодороги, в связи с чем на предприятиях, учитывая постоянный и непрерывный цикл работы крупных заводов Российской Федерации, необходимо произ-

водить планово-предупредительный ремонт дорожной одежды с применением геосинтетических материалов [13, 14]. Одна из таких автодорог промышленного предприятия Липецкой области рассмотрена в настоящей статье.

Конструкция автомобильной дороги представляет собой многоуровневую систему, состоящую из материалов с различными физико-механическими свойствами (рис. 1). Верхний слой дорожной одежды выполнен из асфальтобетона типа В марки П различной толщины на всем участке автодороги (от 35 до 50 мм). Последующие слои асфальтобетона, коих на различных участках автодороги от двух до трех, выполнены из асфальтобетонной смеси типа Б и Д марки П. Цементобетонное основание же выполнено из бетона класса В12,5 и имеет толщину от 105 до 160 мм.

Таблица 1  
Table 1

**Физико-механические характеристики слоев дорожной одежды**  
**Physical and mechanical characteristics of pavement layers**

№ пробы	№ слоя	Толщина слоя, мм	Тип и марка асфальтобетона	Коэффициент уплотнения	Показатель водонасыщения, %
27	1 (верхний)	165	Тип Г марки П	0,87	12,3
28	1 (верхний)	130	Тип В марки П	0,95	5,2
29	1 (верхний)	50	Тип В марки П	1	1,3
	2 (нижний)	125	Тип Г марки П	0,93	7,6
30	1 (верхний)	45	Тип В марки П	0,97	2,9%
	2 (нижний)	65	Тип Г марки П	0,89	12,6
31	1 (верхний)	45	Тип В марки П	1	0,9
	2 (нижний)	35	Тип Г марки П	0,91	6,2
	3 (дополнительный)	50	Тип Г марки П	0,91	5,1
	4 (дополнительный)	45	Тип Г марки П	0,91	5
32	1 (верхний)	35	Тип Б марки П	0,94	8,3
	2 (нижний)	35	Тип Г марки П	1	0,8
	3 (дополнительный)	60	Тип Г марки П	0,99	1
33	1 (верхний)	40	Тип Б марки П	0,94	8,2
	2 (нижний)	40	Тип Г марки П	0,99	1,1
	3 (дополнительный)	40	Тип Г марки П	1	0,7
34	1 (верхний)	45	Тип Б марки П	0,93	10,1
	2 (нижний)	35	Тип Г марки П	0,89	13,4
	3 (дополнительный)	50	Тип Г марки П	1	0,6

**Примечание.** Курсивом выделены характеристики, не удовлетворяющие требованиям ГОСТ 9128-2013 «Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия», СП 78.13330.2012 «Автомобильные дороги. Актуализированная редакция СНиП 3.06.03-85».

Результаты определения коэффициента уплотнения и водонасыщения в слоях, выполненных из асфальтобетона, приведены в табл. 1.

Как видно из результатов лабораторного исследования (табл. 1), верхние слои дорожной одежды обследуемой автодороги (слои покрытия) по большей части недоуплотнены и имеют повышенное водонасыщение, что говорит о несоблюдении норм в процессе укладки дорожной одежды, а также о вызванном разуплотнении смеси в процессе эксплуатации автомобильной дороги под высокими нагрузками.

Модуль упругости верхних слоев покрытия является одной из важнейших характеристик, влияющих на долговечность всей конструкции дорожной одежды в целом. Результаты измеренного модуля упругости верхнего слоя дорожной одежды приведены в табл. 2.

На основании методики, описанной в СТО АВТОДОР 2.4-2013, был рассчитан остаточный ресурс дорожной одежды (табл. 3) исследуемого участка автодороги.

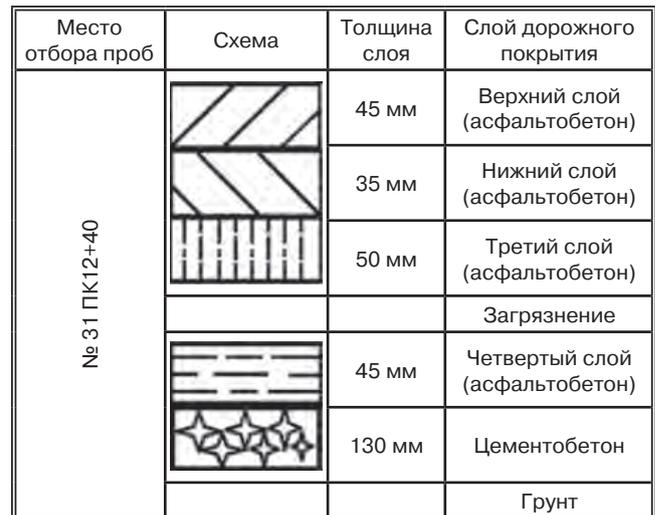


Рис. 1. Конструкция дорожной одежды  
Fig. 1. Road pavement design

Таблица 2  
Table 2

**Деформативно-прочностные характеристики верхнего слоя дорожной одежды**  
**Deformation and strength characteristics of the upper layer of road pavement**

Начало участка, км	Конец участка, км	Модуль упругости, МПа		Коэффициент запаса прочности
0	0,3	163	150	1,09
0,3	0,6	156	150	1,04
0,6	0,9	155	150	1,03
0,9	1,2	160	150	1,07
1,2	1,5	181	150	1,21
1,5	1,8	182	150	1,21
1,8	2,1	181	150	1,21
2,1	2,414	181	150	1,21

Таблица 3  
Table 3

Остаточный ресурс дорожной одежды  
Residual road pavement life

Начало участка	Конец участка	Модуль упругости фактический, МПа	Модуль упругости требуемый, МПа	Коэффициент запаса прочности	Остаточный ресурс, %
0	0,3	163	150	1,09	18
0,3	0,6	156	150	1,04	7
0,6	0,9	155	150	1,03	5
0,9	1,2	160	150	1,07	7
1,2	1,5	181	150	1,21	50
1,5	1,8	182	150	1,21	50
1,8	2,1	181	150	1,21	50
2,1	2,414	181	150	1,21	50

Результаты расчета показывают, что остаточный ресурс на участке 0–1200 м обследуемой автодороги равен 10%, а на участке 1200–2414 м – 50%, это говорит о значительном снижении долговечности конструкции автодороги.

На поверхности покрытия дорожной одежды на всем протяжении автодороги наблюдаются характерные повреждения, а именно: сеть разнонаправленных трещин с шириной раскрытия до 30 мм, выбоины глубиной до 35 мм, просадки покрытия. Многие из этих дефектов имеют отраженный характер, т. е. передаются на вышележащие слои покрытия от основания дорожной одежды. Проведя вскрытие дорожной одежды (рис. 2, 3), получив результаты о физико-механических характеристиках материалов дорожной одежды и проведя расчет дорожной одежды в программе «Топоматик Robur», стало понятно, что несущая способность конструктивных слоев дорожной одежды, исходя из интенсивности автомобильного движения на предприятии, не обеспечена.

Класс бетона испытанных бетонных образцов, взятых из основания дорожной одежды размером

10×10×10,5 см составил В12,5, что не соответствует нормативным требованиям, так как минимальный класс бетона, применяемый в конструктивных слоях жестких дорожных одежд, должен быть не менее В15. Однако это справедливо для городских автодорог и улиц, рассчитанных, как правило, под нагрузку А11,5, и должно корректироваться при проектировании автодороги на предприятии.

Современные промышленные предприятия обеспечивают колоссальный объем производства материалов и изделий, а следовательно, столь же колоссальный объем грузоперевозок внутри предприятий. Этот факт непременно должен учитываться при проектировании дорожной одежды и подборе прочностных характеристик материалов. На рис. 2 видно, что цементобетонное основание дорожной одежды классом по прочности В12,5 неспособно воспринять действующие нагрузки. Даже наличие трех и более слоев асфальтобетонного покрытия, что должно способствовать уменьшению напряжений в слоях основания, не исправляет ситуацию. Особенно сильно эта проблема обостряется после проявления (отражения) дефектов основания на верхнем слое покрытия дорожной одежды, когда образующиеся трещины, сквозь которые просачивается вода, вызывают интенсификацию уже имеющихся повреждений (рис. 4).

Для предотвращения дальнейшего развития повреждений вплоть до полного отказа автодороги необходимо произвести ремонтные работы. Однако, как уже упоминалось выше, промышленную автодорогу крайне затруднительно полностью закрыть для выполнения всех необходимых мероприятий: вскрытие дорожной одежды, замена бетона основания, устройство нижнего и верхнего слоя асфальтобетонного покрытия из горячих асфальтобетонных смесей. Поэтому в ряде случаев принимается решение о снятии верхнего слоя асфальтобетонного покрытия, заделке трещин, каверн и прочих повреждений нижнего слоя и укладке слоя геосинтетического материала с последующей закаткой под асфальтобетон. Этот метод уже неоднократно доказал свою эффективность и хоть он и не устраняет причину про-



Рис. 2. Измерение толщины асфальтобетонного слоя дорожной одежды  
Fig. 2. Measurement of asphalt concrete pavement thickness



Рис. 3. Разрушение цементобетонного слоя дорожной одежды  
Fig. 3. Destruction of cement concrete layer of road pavement



Рис. 4. Повреждения на поверхности асфальтобетонного покрытия  
Fig. 4. Damage on the surface of asphalt concrete pavement

блемы, но способен значительно продлить долговечность конструкции дорожной одежды в целом [9–15].

Как показали исследования [12, 13], сетки из полимерных материалов способствуют замедлению образования трещин на асфальтобетонных покрытиях, вызванных динамическими воздействиями колес автомобильного транспорта. Что также немаловажно, сетки из полимерных материалов предотвращают образование отраженных трещин на поверхности покрытия.

Расположенные в слоях асфальтобетона геосетки также значительно повышают общий модуль упругости асфальтобетонного покрытия, что положительно сказывается на долговечности конструкции в целом. Геосинтетический материал, расположенный в слоях

асфальтобетонного покрытия, также заметно препятствует колееобразованию.

Необходимо обратить внимание, что результат ремонта подобного типа напрямую зависит от качества применяемых материалов и соблюдения всех технологических норм при устройстве конструктивных слоев. В случае использования некачественных материалов или несоответствующей техники результат будет диаметрально противоположным, и вместо купирования имеющихся проблем получим лишь проявление новых. Поэтому при осуществлении ремонтных мероприятий необходимо неукоснительно следовать рабочей документации или использовать технологические карты, разработанные под данную автомобильную дорогу.

### Список литературы

1. Горшкова Н.Г. Изыскания и проектирование дорог промышленного транспорта. Саратов: Профобразование, 2017. 257 с.
2. Федоров Б.А., Королев А.С. Конструкции промышленных автомобильных дорог на болотах // *Торфяная промышленность*. 1989. № 7. С. 25–28.
3. Бондарев Б.А., Курочкин А.В., Коста А.А., Корнеева А.О. Методы капитального ремонта и реконструкции дорожных одежд с цементобетонными покрытиями. В сборнике: *Современная наука: теория, методология, практика. Материалы III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции*. Тамбов, 2021. С. 206–207.
4. Миренков П.С., Малявко Д.А., Молодцова Е.А., Музалев Д.В. Об использовании монолитных цементобетонных смесей в покрытиях автомобильных дорог. *Современные тенденции молодежной науки: Сборник научных трудов национальной конференции, Брянск, 06–08 февраля 2020 г.* Брянск: Брянский государственный инженерно-технологический университет, 2020. С. 402–403.
5. Золин Р.Н., Заббарв А.Ш., Зиганшин И.И., Зарипов А.М. Улучшение технико-эксплуатационных характеристик дорожного покрытия // *Наука и образование сегодня*. 2017. № 2 (13). С. 31–33.
6. Клековкина М.П. Нормативное назначение и реальная роль швов в жестких дорожных одеждах // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 2 (61).
7. Челушкин И.А. Влияние сил от колес автомобиля при движении по криволинейным участкам дорог на образование колеи в асфальтобетонном покрытии. Ч. 1. Поперечные силы // *Наукоедение*. 2015. Т. 7. № 6 (31). С. 150.
8. Корочкин А.В. Сдвигоустойчивость автомобильных слоев жесткой дорожной одежды // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 65–67.
9. Корочкин А.В. Анализ сцепных качеств дорожных покрытий из асфальтобетона и цементобетона // *Строительные материалы*. 2019. № 7. С. 21–27. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-21-27>

### References

1. Gorshkova N.G. Izyskaniya i proektirovanie dorog promyshlennogo transporta [Surveys and design of industrial transport roads]. Saratov: Profobrazovanie. 2017. 257 p.
2. Fedorov B.A., Korolev A.S. Constructions of industrial highways in swamps. *Torfyanaya promyshlennost'*. 1989. No. 7, pp. 25–28. (In Russian).
3. Bondarev B.A., Kurochkin A.V., Kosta A.A., Korneeva A.O. Methods of capital repairs and reconstruction of road coverings with cement concrete coatings. *Modern science: theory, methodology, practice. Materials of the III All-Russian (National) Scientific and Practical Conference*. Tambov. 2021, pp. 206–207. (In Russian).
4. Mirenkov P.S., Malyavko D.A., Moloduova E.A., Muzalev D.V. About the use of monolithic cement-concrete mixtures in road coverings. *Modern trends of youth science: Collection of scientific papers of the National Conference, Bryansk, 06–08 February 2020*. Bryansk: Bryansk State University of Engineering and Technology. 2020, pp. 402–403. (In Russian).
5. Zolin R.N., Zabbarv A.Sh., Ziganshin I.I., Zaripov A.M. Improvement of technical and operational characteristics of the pavement. *Nauka i obrazovanie segodnya*. 2017. No. 2 (13), pp. 31–33. (In Russian).
6. Klekovkina M.P. Normative purpose and the real role of seams in rigid road clothes. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov*. 2017. No. 2 (61). (In Russian).
7. Chelushkin I.A. The influence of forces from the wheels of a car when driving along curved sections of roads on the formation of a track in asphalt concrete pavement. Part 1. Transverse forces. *Naukovedenie*. 2015. Vol. 7. No. 6 (31), p. 150. (In Russian).
8. Korochkin A.V. Shear resistance of automotive layers of rigid road clothing. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2014. No. 1–2, pp. 65–67. (In Russian).
9. Korochkin A.V. Analysis of coupling qualities of asphalt concrete and cement concrete road surfaces. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*. 2019.

10. Корочкин А.В. Влияние армирующих геосинтетических материалов на прочность жестких дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием // *Строительные материалы*. 2020. № 1–2. С. 82–87. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-82-87>
11. Ушаков В.В. Об эффективности геосинтетиков в конструкциях дорожных одежд // *Инновации в строительстве. Дороги. Геосинтетические материалы*. 2019. № 75. С. 22–24.
12. Штабинский В.В. Ремонт асфальтобетонных покрытий с применением геосеток // *Инновации в строительстве. Дороги. Геосинтетические материалы*. 2019. № 75. С. 75–81.
13. Александров А.С., Сячкин О.В. Проектирование армированных асфальтобетонных слоев усиления трещиновато-балочных покрытий дорожных одежд. В сборнике: *Совершенствование конструкций, технологий строительства и ремонта дорог в условиях Сибири*. Омск: СИБАДИ, 2008. С. 59–67.
14. Sokolov N., Ezhov S., Ezhova S. Preserving the natural landscape on the construction site for sustainable ecosystem // *Journal of applied engineering science*. 2017. Vol. 15. No. 4, pp. 518–523.
15. Левашов Г.М., Сиротюк В.В. Проектирование дорожных одежд с армированным асфальтобетонным покрытием // *Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии*. 2011. № 2 (20). С. 21–28.
- No. 7, pp. 21–27. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-21-27>
10. Korochkin A.V. Influence of reinforcing geosynthetic materials on the strength of rigid road clothes with asphalt concrete coating. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2020. No. 1–2, pp. 82–87. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-778-1-2-82-87>
11. Ushakov V.V. On the effectiveness of geosynthetics in the constructions of road clothes. *Innovatsii v stroitel'stve. Dorogi. Geosinteticheskie materialy*. 2019. No. 75, pp. 22–24. (In Russian).
12. Shtabinsky V.V. Repair of asphalt concrete coatings using geogrids. *Innovatsii v stroitel'stve. Dorogi. Geosinteticheskie materialy*. 2019. No. 75, pp. 75–81. (In Russian).
13. Alexandrov A.S., Syachkin O.V. Design of reinforced asphalt concrete layers of reinforcement of cracked-beam road coverings. *Improvement of structures, technologies of construction and repair of roads in Siberia*. Omsk: SibADI. 2008, pp. 59–67. (In Russian).
14. Sokolov N., Ezhov S., Ezhova S. Preserving the natural landscape on the construction site for sustainable ecosystem. *Journal of applied engineering science*. 2017. Vol. 15. No. 4, pp. 518–523.
15. Levashov G.M., Sirotyuk V.V. Design of road clothes with reinforced asphalt concrete coating. *Vestnik Sibirskoi gosudarstvennoi avtomobil'no-dorozhnoi akademii*. 2011. No. 2 (20), pp. 21–28. (In Russian).



ООО «ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ «ИСТЕХ»



**Выполнение работ по обследованию строительных конструкций зданий и сооружений.**

**Разработка технического задания, обследование строительных конструкций зданий и сооружений, как гражданского, так и промышленного назначения.**

**Составление и оформление технического заключения с рекомендациями и техническими предложениями по обеспечению эксплуатационной надёжности объектов.**

**Экспертиза заключений по обследованию, услуги технического заказчика по обследованию, консультации.**

398600, г. Липецк, ул. Ленина, 23. Тел. 8(4742) 27-32-20. Тел./факс 8(4742) 27-32-20. E-mail: [mmvv46@rambler.ru](mailto:mmvv46@rambler.ru).

РЕКЛАМА

УДК 667

DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-75-80>

Н.П. ЛУКУТЦОВА, д-р техн. наук (natluk58@mail.ru),  
 А.А. ПЫКИН, канд. техн. наук (alexem87@yandex.ru),  
 Е.Ю. ГОРНОСТАЕВА, канд. техн. наук (egornostay@mail.ru),  
 С.Н. ГОЛОВИН, инженер, аспирант (s.n.golovin@mail.ru),  
 И.В. МОСЬКИНА, инженер (moskina.ira99@gmail.com)

Брянский государственный инженерно-технологический университет (241037, г. Брянск, пр-т Станке Димитрова, 3)

## Фотолюминесцентный материал для защитно-декоративных покрытий строительных конструкций и элементов эвакуационных систем

Представлены результаты экспериментальных исследований фотометрических свойств фотолюминесцентного материала (ФЛМ) для защитно-декоративных покрытий и элементов эвакуационных систем, полученного на основе структурированного водного раствора высокомолекулярного силиката калия и фотолуминофора (ФЛ). Выполнен электронно-микроскопический, энергодисперсионный, рентгеновский и гранулометрический анализ структуры, элементного химического состава и распределения по размерам частиц ФЛ. Методом ортогонального центрального композиционного планирования построена математическая модель зависимости начальной яркости свечения фотолюминесцентного материала от массовой концентрации ФЛ, цветовой температуры искусственного источника света и времени засветки. По критериям Стьюдента и Фишера проведена оценка статистической значимости и адекватности математической модели, позволяющей определять рациональные значения рецептурно-технических факторов при изготовлении и эксплуатации ФЛМ с яркостью свечения до 1800 мкд/м<sup>2</sup> через 10 мин и до 600 мкд/м<sup>2</sup> через 60 мин после прекращения засветки, длительностью послесвечения более 10 ч.

**Ключевые слова:** фотолюминесцентный материал, фотолуминофор, силикат калия, математическая модель, фотометрические свойства, яркость свечения, длительность послесвечения, защитно-декоративные покрытия, элементы эвакуационных систем.

**Для цитирования:** Лукутцова Н.П., Пыкин А.А., Горностаева Е.Ю., Головин С.Н., Моськина И.В. Фотолюминесцентный материал для защитно-декоративных покрытий строительных конструкций и элементов эвакуационных систем // *Строительные материалы*. 2023. № 6. С. 75–80. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-75-80>

N.P. LUKUTTSOVA, Doctor of Sciences (Engineering) (natluk58@mail.ru), A.A. PYKIN, Candidate of Sciences (Engineering) (alexem87@yandex.ru), E.Yu. GORNOSTAEVA, Candidate of Sciences (Engineering) (egornostay@mail.ru), S.N. GOLOVIN, Engineer (Graduate student) (s.n.golovin@mail.ru), I.V. MOSKINA, Engineer (moskina.ira99@gmail.com)

Bryansk state engineering-technological university (3, Stanke Dimitrova Avenue, Bryansk, 241037, Russian Federation)

### Photoluminescent Material for Protective and Decorative Coatings of Building Constructions and Elements of Evacuation Systems

The results of experimental studies of photometric properties of photoluminescent material (PLM) for protective and decorative coatings and elements of evacuation systems obtained on the basis of a structured aqueous solution of high-modulus potassium silicate and photoluminophore (PL) are presented. Electron microscopic, energy dispersive X-ray and granulometric analysis of the structure, elemental chemical composition and size distribution of PL particles were determined. A mathematical model of the dependence of the initial luminance of the photoluminescent material on the mass concentration of the PL, the color temperature of the artificial light source and the illumination time is constructed by the method of orthogonal central composite planning. According to the criteria of the Student and Fischer, an assessment of the statistical significance and adequacy of the mathematical model was performed, which allows determining the rational values of prescription and technical factors in the manufacture and operation of PLM with a luminescence brightness of up to 1800 mcd/m<sup>2</sup> after 10 min and up to 600 mcd/m<sup>2</sup> after 60 min after the cessation of illumination, with an afterglow duration of more than 10 h.

**Keywords:** photoluminescent material, photoluminophore, potassium silicate, mathematical model, photometric properties, luminescence brightness, afterglow duration, protective and decorative coatings, elements of evacuation systems.

**For citation:** Lukutsova N.P., Pykin A.A., Gornostaeva E.Yu., Golovin S.N., Moskina I.V. Photoluminescent material for protective and decorative coatings of building constructions and elements of evacuation systems. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2023. No. 6, pp. 75–80. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-814-6-75-80>

В настоящее время фотолюминесцентные материалы (ФЛМ) становятся все более востребованными для получения защитно-декоративных покрытий строительных конструкций и элементов эвакуационных систем (сигнальных знаков, разметок безопасности), эксплуатируемых в условиях нормальной и ограниченной видимости, полной темноты, аварийного отключения освещения, возникновения чрезвычайной ситуации.

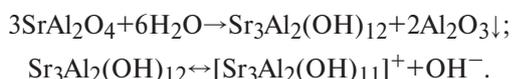
Материалы с фотолюминесцентным эффектом могут быть изготовлены двумя основными способами: объемным введением и поверхностным осаждением фотолуминофоров (ФЛ) – соединений, способных к длительному свечению (люминесценции) после прекращения возбуждения оптическим излучением в видимой, ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра. При этом свечение ФЛ обусловлено как свойствами основного вещества (ма-

трицы), так и наличием в нем активирующей примеси (активатора), образующих люминесцентные центры.

Объемный способ имеет весьма ограниченную область применения в связи с тем, что оптические центры люминесценции формируются, как правило, в приповерхностных слоях, а их концентрация снижается с увеличением глубины залегания частиц ФЛ в объеме материала [1, 2].

Современные фотолуминофоры основаны на алюминатах щелочно-земельных металлов (ЩЗМ) (стронция Sr, кальция Ca, бария Ba и др.), активированных редкоземельными элементами (РЗЭ): европием (Eu), диспрозием (Dy), тербием (Tb) и др. [3, 4]. Они обладают высокой яркостью и длительностью послесвечения, однако характеризуются гидrolитической неустойчивостью матриц в водной среде и влажном воздухе, что без изменения структуры или модификации поверхности (капсулированием, обработкой кислотами и др.) исключает их использование при получении и эксплуатации водно-дисперсионных и гидратационных фотолуминесцентных материалов [5, 6].

Установлено, что известный ФЛ с матрицей из алюмината стронция ( $SrAl_2O_4$ ) при контакте с водой (влажгой) теряет свои фотометрические свойства, подвергаясь деструкции в процессе гидролиза [7–9] по следующей схеме (рис. 1):



Повысить гидrolитическую устойчивость ФЛ на основе алюминатов ЩЗМ возможно за счет внедрения в структуру матриц водонерастворимых соединений РЗЭ [10].

В данном направлении большой научно-практический интерес представляет оксид иттрия ( $Y_2O_3$ ), обладающий химической стойкостью по отношению к воде и агрессивным средам, а также высоким светопропусканием в интервале длин волн от 280 нм до 8 мкм.

На базе оксидов иттрия и алюминия создаются оптически прозрачные материалы, такие как фотолуминофоры и сцинтилляторы [11–13].

Целью работы являлось исследование фотометрических свойств (яркости свечения и длительности послесвечения) фотолуминесцентного материала с содержанием водостойкого ФЛ для защитно-декоративных покрытий строительных конструкций и элементов эвакуационных систем.

#### **Материалы и методы исследования**

Получение ФЛМ осуществлялось смешиванием водного раствора высокомолекулярного структурированного силиката калия плотностью 1400 кг/м<sup>3</sup>, кремнеземистым модулем 3,8 по ГОСТ 18958–73 «Краски силикатные» с водостойким фотолуминофором желто-зеленого цвета послесвечения с матрицей из алюмината иттрия ( $YAlO_3$ ), активированного прометием (Pm) (Россия).

Электронно-микроскопический анализ структуры ФЛ проводился методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе TESCAN MIRA 3 LMU (Чехия) со встроенным энергодисперсионным рентгеновским спектрометром (ЭДС) X-MAX 50 Oxford Instruments NanoAnalysis для исследования элементного химического состава.

Удельная поверхность и распределение по размерам частиц ФЛ определялись методом лазерной гранулометрии на анализаторе Analysette 22 NanoTec Plus (Германия).

Измерение яркости свечения фотолуминесцентного материала проводилось в условиях полной темноты по ГОСТ 34428–2018 «Системы эвакуационные фотолуминесцентные. Общие технические условия» на тест-образцах отвержденных покрытий толщиной 1 мм, сформированных нанесением ФЛМ на подложку размером 100×100 мм, с помощью яркомера «Аргус–02–1». Принцип работы прибора основан на преобразовании светового потока, создаваемого тест-образцом, в непрерывный электрический сигнал, пропорциональный яркости объекта в заданном угле поля зрения, преобразуемый в цифровой код.

В фотометрической головке яркомера установлен первичный преобразователь излучения – полупроводниковый кремниевый фотодиод с системой коррегирующих светофильтров и оптических элементов, формирующих угол поля зрения прибора. Расстояние между головкой яркомера и тест-образцом равнялось 10 мм.

Для засветки тест-образцов применялся светодиодный осветитель Falcon Eyes V-LED 120 RGB с регулируемой цветовой температурой (ЦТ), близкой к ЦТ солнечного света в разное время суток (6500 К – день, 5000 К – полдень, 3500 К – восход и закат) [14].

Уровень освещенности, создаваемой светодиодным осветителем на поверхности тест-образцов в месте последующего измерения яркости свечения, контролировался люксметром DT-1309 и составлял (1000±25) лк.

За длительность послесвечения принималось время, в течение которого яркость свечения тест-образцов после прекращения засветки снижалась до 0,3 мкд/м<sup>2</sup> (значение, превышающее порог чувствительности человеческого глаза в 100 раз).

Построение математической модели зависимости начальной (по истечении 10 мин) яркости свечения ( $y$ ) фотолуминесцентного материала от массовой концентрации фотолуминофора ( $x_1$  – 6–10%), ЦТ источника света ( $x_2$  – 3500–6500 К) и времени засветки ( $x_3$  – 5–15 мин) выполнялось методом ортогонального центрального композиционного планирования с помощью компьютерных программ PlanExp V-D13, Excel, Sigma Plot.

Выбор факторов и интервалов их варьирования обусловлен поиском рациональных значений, обеспечивающих получение и эксплуатацию ФЛМ с улучшенными фотометрическими свойствами.

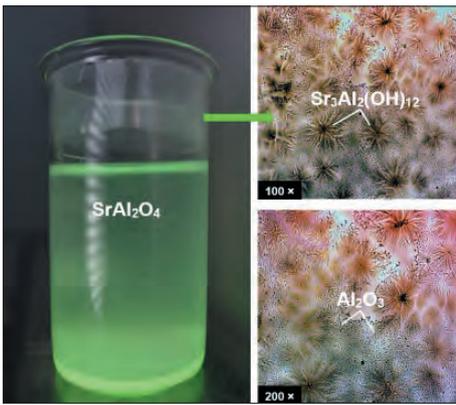


Рис. 1. Деструкция фотолуминофора с матрицей из алюмината стронция в процессе гидролиза (данные оптической микроскопии)

Fig. 1. Destruction of photoluminophor with a matrix of strontium aluminate during hydrolysis (optical microscopy data)

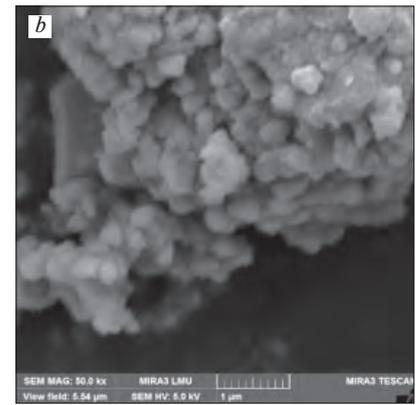
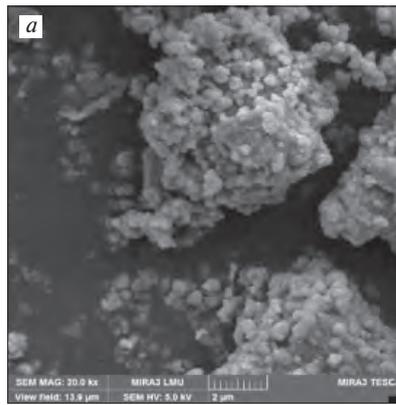


Рис. 2. Микрофотографии фотолуминофора: а – увеличение 20000×; б – увеличение 50000×

Fig. 2. Micrographs of photoluminophor: a – an increase of 20000×; b – an increase of 50000×

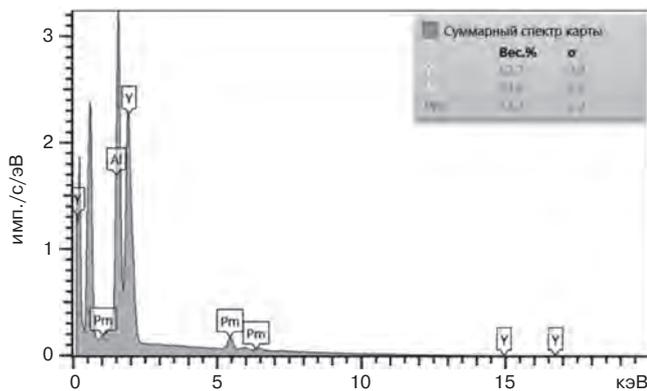


Рис. 3. Спектр ЭДС фотолуминофора  
Fig. 3. EDS spectrum of photoluminophor

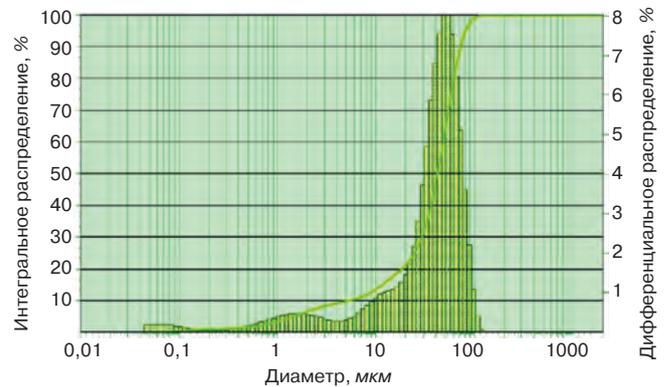


Рис. 4. Гистограмма распределения частиц фотолуминофора по размерам

Fig. 4. Particle distribution histogram of photoluminophor by size

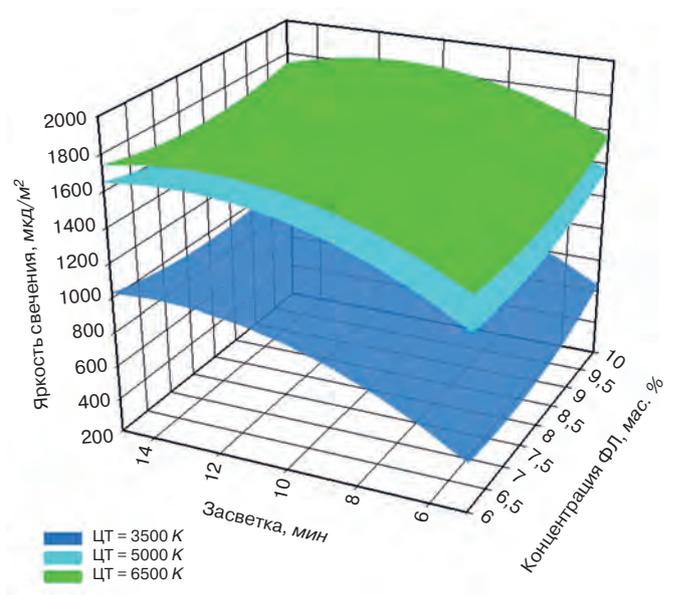
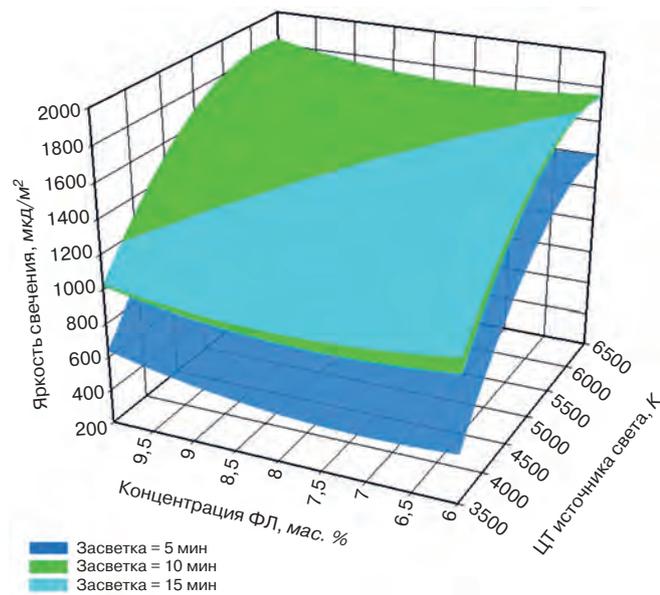


Рис. 5. Номограммы зависимости начальной яркости свечения ФЛМ от варьируемых факторов  
Fig. 5. Nomograms of dependence of initial brightness of PLM glow on varying factors

Таблица 1  
Table 1

Статистические характеристики математической модели зависимости начальной яркости свечения ФЛМ от варьируемых факторов  
Statistical characteristics of mathematical model of dependence of initial brightness of PLM glow on varying factors

Статистические характеристики	Значение
Дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах ( $S_v^2$ )	1210
Число степеней свободы	10
Табличное значение критерия Стьюдента ( $t_{табл}$ )	2,23
Расчетное значение критерия Стьюдента ( $t_i$ ) коэффициентов: $b_0$ $b_1, b_2, b_3$ $b_{11}, b_{22}, b_{33}$ $b_{12}, b_{13}, b_{23}$	48,51 2,76; 29,44; 13,03 2,97; 9,85; 6,85 0,47; 2,31; 3,15
Незначимый коэффициент модели ( $t_i$ менее $t_{табл}$ )	«b» $\rightarrow$ 12»
Дисперсия адекватности ( $S_{ад}^2$ )	1299
Число степеней свободы при значимых коэффициентах	1
Табличное значение критерия Фишера ( $F_{табл}$ )	4,96
Расчетное значение критерия Фишера ( $F$ )	1,07
Адекватность модели ( $F$ менее $F_{табл}$ )	адекватная

Результаты исследования

Методом СЭМ установлено, что исследуемый фотолюминофор в составе ФЛМ для защитно-декоративных покрытий строительных конструкций и элементов эвакуационных систем представлен частицами округлой формы (рис. 2), что обеспечивает яркость и продолжительность свечения [15].

Энергодисперсионный рентгеновский анализ показал наличие в составе ФЛ до 63% иттрия, 25% алюминия, 12% прометия (рис. 3).

Гранулометрический состав ФЛ характеризуется одномодальным распределением частиц по размерам

в диапазоне 0,1–100 мкм со средним диаметром 50 мкм (рис. 4). На долю частиц размерами 0,1–1 мкм приходится 3%; 1–10 мкм – 11%; 10–100 мкм – 86%. Удельная поверхность частиц ФЛ по объему составляет 11280 см<sup>2</sup>/см<sup>3</sup>.

Зависимость начальной яркости свечения ФЛМ от массовой концентрации фотолюминофора, ЦТ светодиодного осветителя и времени засветки представлена математической моделью в виде адекватного уравнения регрессии со значимыми коэффициентами:

$$y = 1572,2 + 38,3x_1 + 408,4x_2 + 180,7x_3 + 79,7x_1^2 - 264,1x_2^2 - 183,7x_3^2 - 38,1x_1x_3 - 52,1x_2x_3. \quad (1)$$

Значимость коэффициентов модели определялась по критерию Стьюдента:

$$t_i = |b_{ij}| / S \{b_{ij}\}, \quad (2)$$

где  $b_i$  –  $i$ -й коэффициент ( $b_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{22}, b_{33}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ );  $S \{b_{ij}\}$  – среднеквадратическое отклонение в определении  $b_i$ .

Для выбранного уровня значимости (5%) и данного числа степеней свободы расчетное значение  $t_i$  сравнивалось с табличным  $t_{табл}$ . Коэффициент модели  $b_i$  считается незначимым, если  $t_i$  менее  $t_{табл}$  (табл. 1).

Адекватность модели оценивалась по критерию Фишера:

$$F = S_{ад}^2 / S_v^2, \quad (3)$$

где  $S_{ад}^2$  – дисперсия адекватности;  $S_v^2$  – дисперсия воспроизводимости в параллельных опытах.

Значения  $S_{ад}^2$  и  $S_v^2$  рассчитывались по формулам:

$$S_{ад}^2 = \frac{m}{N - n_3} \sum_{u=1}^N (\bar{y}_u - \hat{y}_u)^2, \quad (4)$$

$$S_v^2 = \frac{1}{N(m-1)} \sum_{u=1}^N \sum_{j=1}^m (y_{uj} - \bar{y}_u)^2, \quad (5)$$

где  $N$  – количество опытов в плане эксперимента ( $N=10$ );  $m$  – число параллельных измерений в каждом опыте ( $m=3$ );  $n_3$  – количество значимых коэффициентов;  $\bar{y}_u$  – среднее значение яркости свечения в  $u$ -м опыте;  $\hat{y}_u$  – яркость свечения, предсказанная по

Таблица 2  
Table 2

Фотометрические свойства ФЛМ  
Photometric properties of PLM

Концентрация фотолюминофора, мас. %	Время засветки, мин	Яркость свечения, мкд/м <sup>2</sup> , через, мин, после прекращения засветки		Длительность послесвечения, ч:мин
		10	60	
ЦТ светодиодного осветителя – 6500 К (дневной солнечный свет)				
10	10	1800	600	10:50
ЦТ светодиодного осветителя – 5000 К (полуденный солнечный свет)				
10	10	1690	550	9:30
ЦТ светодиодного осветителя – 3500 К (солнечный свет на восходе и закате)				
10	10	1020	370	8:30

уравнению;  $u_{ij}$  — яркость свечения в  $i$ -м опыте,  $j$ -м параллельном измерении.

Расчетное значение  $F$  сравнивалось с табличным  $F_{\text{табл}}$  при значимых коэффициентах. При  $F$  менее  $F_{\text{табл}}$  модель является адекватной (табл. 1).

Из уравнения математической модели (1) и номограмм (рис. 5) следует, что максимальное значение начальной яркости свечения ФЛМ достигается при массовой концентрации фотолуминофора 10%, ЦТ светодиодного осветителя 6500 К и времени засветки 10 мин.

Анализ фотометрических свойств фотолуминесцентного материала показал, что при установленных рациональных значениях варьируемых факторов его яркость свечения составляет до 1800 мкд/м<sup>2</sup> через 10 мин и до 600 мкд/м<sup>2</sup> через 60 мин после прекращения засветки, длительность послесвечения более 10 ч (табл. 2).

При изменении цветовой температуры светодиода от 6500 до 3500 К яркость свече-

ния ФЛМ снижается до 43% через 10 мин и до 38% через 60 мин после отключения источника света, длительность послесвечения сокращается на 140 мин.

### Выводы

Исследованы фотометрические свойства фотолуминесцентного материала для защитно-декоративных покрытий строительных конструкций и элементов эвакуационных систем, полученного на основе структурированного водного раствора высокомолекулярного силиката калия и водостойкого фотолуминофора с матрицей из алюмината иттрия, активированного прометием. При рациональных значениях концентрации фотолуминофора, цветовой температуры искусственного источника света и времени засветки яркость свечения фотолуминесцентного материала составляет до 1800 и 600 мкд/м<sup>2</sup> через 10 и 60 мин соответственно, а длительность послесвечения более 10 ч.

### Список литературы

1. Селиверстов Д.И., Нурмухаметов Р.Н., Сергеев А.М., Клименко В.Г., Хатипов С.А. Формирование оптических центров окраски и флуоресценции в политетрафторэтилене при  $\gamma$ -облучении // *Журнал прикладной спектроскопии*. 2011. № 4. С. 547–552.
2. Wang Y., Zheng H., Hu R., Luo X. Modeling on phosphor sedimentation phenomenon during curing process of high power LED packaging // *Journal of Solid State Lighting*. 2014. Vol. 1 (2), pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1186/2196-1107-1-2>
3. Kim D. Recent developments in lanthanide-doped alkaline earth aluminate phosphors with enhanced and long-persistent luminescence // *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11 (3):723, pp. 1–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/nano11030723>
4. Барановская В.Б., Карпов Ю.А., Петрова К.В., Короткова Н.А. Актуальные тенденции применения редкоземельных металлов и их соединений в производстве магнитных и люминесцентных материалов // *Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия*. 2020. № 6. С. 4–23. DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-6-4-23>
5. Патент РФ 2371464. *Способ повышения интенсивности свечения алюминатных люминофоров* / Андриевский А.М. Заявл. 18.01.2008. Опубл. 27.10.2009. Бюл. № 30.
6. Патент РФ 2217467. *Стабильный фотолуминофор с длительным послесвечением* / Азаров А.Д., Большухин В.А., Левонович Б.Н., Личманова В.Н. Заявл. 14.12.2001. Опубл. 27.11.2003.
7. Томилин О.Б., Мурюмин Е.Е., Щипакин С.Ю., Фадин М.В., Куприянов Г.С. Исследование повышения влагостойкости люминофора SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup>, Dy<sup>3+</sup> // *Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения*. 2016. № 2. С. 167–170.

### References

1. Seliverstov D.I., Nurmukhametov R.N., Sergeev A.M., Klivenko V.G., Khatipov S.A. Formation of optical color and fluorescence centers in polytetrafluoroethylene under  $\gamma$ -irradiation. *Zhurnal prikladnoi spektroskopii*. 2011. No. 4, pp. 547–552. (In Russian).
2. Wang Y., Zheng H., Hu R., Luo X. Modeling on phosphor sedimentation phenomenon during curing process of high power LED packaging. *Journal of Solid State Lighting*. 2014. Vol. 1 (2), pp. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1186/2196-1107-1-2>
3. Kim D. Recent developments in lanthanide-doped alkaline earth aluminate phosphors with enhanced and long-persistent luminescence. *Nanomaterials*. 2021. Vol. 11 (3):723, pp. 1–27. DOI: <http://dx.doi.org/10.3390/nano11030723>
4. Baranovskaya V.B., Karpov Yu.A., Petrova K.V., Korotkova N.A. Topical trends in the application of rare-earth metals and their compounds in the production of magnetic and luminescent materials. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Tsvetnaya metallurgiya*. 2020. No. 6, pp. 4–23. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.17073/0021-3438-2020-6-4-23>
5. Patent RF 2371464. *Sposob povysheniya intensivnosti svecheniya alyuminatnykh lyuminoforov* [Method of increasing luminous intensity of aluminate lumino-phores] / Andrievskii A.M. Declared 18.01.2008. Published 27.10.2009. Bulletin No. 30. (In Russian).
6. Patent RF 2217467. *Stabil'nyi fotolyuminoфор s dli-tel'ny'm poslesvecheniem* [Stable photolumino-phor with long-lived afterglow] / Azarov A.D., Bol'shukhin V.A., Levonovich B.N., Lichmanova V.N. Declared 14.12.2001. Published 27.11.2003. (In Russian).
7. Tomilin O.B., Muryumin E.E., Shchipakin S.Yu., Fadin M.V., Kupriyanov G.S. Study of increasing moisture resistance of phosphor SrAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>:Eu<sup>2+</sup>, Dy<sup>3+</sup>. *Fundamental'nye problemy radioelektron-nogo pri-borostroeniya*. 2016. No. 2, pp. 167–170. (In Russian).

8. Голота А.Ф., Селезнев С.А. Влияние жидких сред на поверхность кристаллов люминофоров на основе сульфидов стронция и кальция // *Известия высших учебных заведений. Сер. Химия и химическая технология*. 2015. № 2. С. 38–41.
9. Zhang J.Y., Zhang Z.T., Tang Z.L., Wang T.M. Hydrolysis Mechanism and Method to Improve Water Resistance of Long-After-Glow Phosphor // *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 423–425, pp. 147–150. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.423-425.147>
10. Смагин В.П., Худяков А.П. Фотолюминесценция европийсодержащих композиций на основе фторированных оксидов иттрия и алюминия // *Неорганические материалы*. 2020. № 10. С. 1100–1106. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002337X20100140>
11. Асатрян Г.Р., Шакуров Г.С., Ильин И.В., Петросян А.Г., Ованесян К.Л., Дердзян М.В. Широкополосная ЭПР-спектроскопия ионов  $Tb^{3+}$  и  $Fe^{2+}$  в монокристаллах  $YAlO_3$  // *Физика твердого тела*. 2021. № 10. С. 1612–1616. DOI: <https://doi.org/10.21883/FTT.2021.10.51456.131>
12. Ju M., Yuan H., Zhong M., Liang H., Zhu Y., Yeung Y.Y., Dai W., Lu C. Insights into the microstructures and energy levels of  $Pr^{3+}$ -doped  $YAlO_3$  scintillating crystals // *Inorganic Chemistry*. 2021. Vol. 60 (7), pp. 5107–5113. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c00021>
13. Muresan L.E., Popovici E.J., Perhaita I., Indrea E., Oro J., Casan Pastor N. Rare earth activated yttrium aluminate phosphors with modulated luminescence // *Luminescence*. 2016. Vol. 31 (4), pp. 929–936. DOI: <https://doi.org/10.1002/bio.3051>
14. Asim K.R.C. Characteristics of light sources // *Principles of Colour and Appearance Measurement*. 2014. Vol. 1, pp. 1–52. DOI: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857099242.1>
15. Михайлов М.М. Влияние размерного фактора на интенсивность люминесценции фотолюминофоров для светодиодов видимого диапазона спектра // *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2014. № 11. С. 67–73. DOI: <https://doi.org/10.7868/S0207352814110110>
8. Golota A.F., Seleznev S.A. Influence of liquid media on the surface of crystals of phosphors based on strontium and calcium sulfides. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Seriya: Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*. 2015. No. 2, pp. 38–41. (In Russian).
9. Zhang J.Y., Zhang Z.T., Tang Z.L., Wang T.M. Hydrolysis mechanism and method to improve water resistance of long-after-glow phosphor. *Materials Science Forum*. 2014. Vol. 423–425, pp. 147–150. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.423-425.147>
10. Smagin V.P., Khudyakov A.P. Photoluminescence of europium-containing materials based on fluorinated yttria and alumina. *Neorganicheskie materialy*. 2020. No. 10, pp. 1100–1106. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002337X20100140>
11. Asatryan G.R., Shakurov G.S., Il'in I.V., Petrosyan A.G., Ovanesyan K.L., Derdzian M.V. Wideband epr spectroscopy of  $Tb^{3+}$  and  $Fe^{2+}$  ions in single crystals  $YAlO_3$ . *Fizika tverdogo tela*. 2021. No. 10, pp. 1612–1616. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.21883/FTT.2021.10.51456.131>
12. Ju M., Yuan H., Zhong M., Liang H., Zhu Y., Yeung Y.Y., Dai W., Lu C. Insights into the microstructures and energy levels of  $Pr^{3+}$ -doped  $YAlO_3$  scintillating crystals. *Inorganic Chemistry*. 2021. Vol. 60 (7), pp. 5107–5113. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.inorgchem.1c00021>
13. Muresan L.E., Popovici E.J., Perhaita I., Indrea E., Oro J., Casan Pastor N. Rare earth activated yttrium aluminate phosphors with modulated luminescence. *Luminescence*. 2016. Vol. 31 (4), pp. 929–936. DOI: <https://doi.org/10.1002/bio.3051>
14. Asim K.R.C. Characteristics of light sources. *Principles of Colour and Appearance Measurement*. 2014. Vol. 1, pp. 1–52. DOI: <http://dx.doi.org/10.1533/9780857099242.1>
15. Mikhailov M.M. Influence of the size factor on the luminescence intensity of photoluminophores for LED in the visible range of the spectrum // *Poverkhnost'. Rentgenovskie, sinkhrotronnye i neitronnye issledovaniya*. 2014. No. 11, pp. 67–73. (In Russian). DOI: <https://doi.org/10.7868/S0207352814110110>



**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 Телеграмм-каналу:**

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

# 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 [www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf](http://www.rifsm.ru/files/avtoru.pdf)

**Подробнее можно ознакомиться с требованиями на сайте издательства**

<http://rifsm.ru/page/7/>

**или журнала <http://journal-cm.ru/index.php/ru/avtoram>**



V МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

# «МОСТОВЫЕ СООРУЖЕНИЯ: СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕКОНСТРУКЦИИ»

20–22  
СЕНТЯБРЯ 2023



МОСКВА  
ОТЕЛЬ HOLIDAY INN SUSCHEVSKY

Организатор конференции



INTERNATIONAL  
ASSOCIATION OF  
FOUNDATION  
CONTRACTORS

МЕЖДУНАРОДНАЯ АССОЦИАЦИЯ  
ФУНДАМЕНТОСТРОИТЕЛЕЙ

Официальная поддержка



АО ЦНИИТС



ЦНИИПСК | stako  
им. Мельникова  
с 1880 года



НИЦ строительство  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ | СТРОИТЕЛЬСТВО | ЭКСПЛУАТАЦИЯ

с 1927 ГОДА  
95  
ЛЕТ

Генеральный спонсор  
конференции



Генеральные информационные партнеры



ФУНДАМЕНТЫ  
научно-практический журнал для проектировщиков и строителей



ОРОЖНАЯ  
ШЕРЖАВА



АВТОМОБИЛЬНЫЕ  
ДОРОГИ



СТС  
100



ДРОГИ



СТРОИТЕЛЬНАЯ  
ОРБИТА

[www.fc-union.com](http://www.fc-union.com), [info@fc-union.com](mailto:info@fc-union.com), +7 (495) 66-55-014, +7 925 57-57-810

12+

