

ISSN ONLINE 2782-1919

**УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



**Том 6
выпуск**

**2
2025**

**VOLUME 6
ISSUE 2**

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

Включен в апреле 2023 года в Перечень ВАК РФ

**Том 6
Выпуск 2**

Ярославль 2025

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор:	<i>С.В. ФЕДОСОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва)</i>
Заместитель главного редактора:	<i>П.Б. РАЗГОВОРОВ (д.т.н., проф., Ярославль)</i>
Ответственный секретарь:	<i>С.З. КАЛАЕВА (д.т.н., доцент., Ярославль)</i>

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), М.О. БАКАНОВ (советник РААСН, д.т.н., доц., Москва), В.В. БЕЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Тверь), А.М. БЕЛОСТОЦКИЙ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), Н.И. ВАТИН (советник РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), В.М. ГОТОВЦЕВ (д.т.н., проф., Ярославль), А.В. ЗАХАРОВ (советник РААСН, к. архитектуры, проф., Иваново), А.Б. КАПРАНОВА (д.ф.-м.н., проф., Ярославль), В.И. КОЛЧУНОВ (академик РААСН, д.т.н., проф., Москва), В.Г. КОТЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Йошкар-Ола), Н.Н. КУДРЯШОВ (к. архитектуры, проф., Ярославль), А.Е. ЛЕБЕДЕВ (д.т.н., доц., Ярославль), С.Н. ЛЕОНОВИЧ (иностранн. акад. РААСН, д.т.н., проф., Республика Беларусь, Минск), В.Л. МОНДРУС (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.И. МОХОВ (акад. РАЕН, д.т.н., проф., Москва), Т.А. НИЗИНА (советник РААСН, д.т.н., проф., Саранск), П.И. ПОСПЕЛОВ (д.т.н., проф., Москва), Ю.В. ПУХАРЕНКО (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), С.П. РУДОБАШТА (д.т.н., проф., Москва), В.Е. РУМЯНЦЕВА (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Иваново), В.П. СЕЛЯЕВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Саранск), М.Ю. ТАРШИС (д.т.н., доц., Ярославль), В.И. ТРАВУШ (вице-президент РААСН, акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.А. ТРЕЩЕВ (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Тула), В.Н. ФЕДОСЕЕВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Иваново), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD по техн. н., проф., Республика Сербия, Белград)

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет»

Адрес редакции: 150023, Россия, г. Ярославль, Московский проспект, 88

Телефон: +7 (4852) 44-32-75
E-mail: razgovorvpb@ystu.ru
Электронный адрес: <http://comincon.ru>

Журнал издается при содействии Российской академии архитектуры и строительных наук

Редактор:	В.Б. Доброхотов
Англ. перевод:	Л.А. Тюкина
Корректор:	И.А. Воронов
Компьютерная верстка:	А.С. Фролов

Зарегистрирован:	27 ноября 2020 (Свидетельство ЭЛ № ФС 77 - 79733)
Периодичность:	4 раза в год
Подписка и распространение:	Свободный доступ

PUBLISHED BY YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Established in November 2020, published quarterly

Included in April 2023 in the List
of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation

Volume 6

Issue 2

Yaroslavl 2025

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

«SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION»

EDITORIAL BOARD

Editor-in-Chief:	S.V. FEDOSOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow)
Deputy Editor-in-Chief:	P.B. RAZGOVOROV (doc.eng.sc., prof., Yaroslavl)
Executive secretary:	S.Z. KALAEVA (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl)

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

A.A. ABDYKALYKOV (doc.eng.sc., prof., Kyrgyzstan, Bishkek), P.A. AKIMOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), M.O. BAKANOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., doc., Moscow), V.V. BELOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tver), A.M. BELOSTOTSKY (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), N.I. VATIN (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saint-Petersburg), V.M. GOTOVTSEV (doc.eng.sc., prof., Yaroslavl), A.V. ZAKHAROV (adv. RAACS, cand. arch., prof., Ivanovo), A.B. KAPRANOVA (doc. phys. and math. sc., prof., Yaroslavl), V.I. KOLCHUNOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), V.G. KOTLOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Yoshkar-Ola), N.N. KUDRYASHOV (cand. arch., prof., Yaroslavl), A.E. LEBEDEV (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl), S.N. LEONOVICH (for. acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Belarus, Minsk), V.L. MONDRUS (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.I. MOKHOV (acad. RANS, doc.eng.sc., prof., Moscow), T.A. NIZINA (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saransk), P.I. POSPELOV (doc.eng.sc., prof., Moscow), Yu.V. PUKHARENKO (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saint-Petersburg), S.P. RUDOBASHTA (doc.eng.sc., prof., Moscow), V.E. RUMYANTSEVA (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), V.P. SELYAEV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saransk), M.Yu. TARSHIS (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl), V.I. TRAVUSH (Vice Pres. RAACS, acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.A. TRESHCHEV (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tula), V.N. FEDOSEEV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD eng.sc., prof., Serbia, Belgrade)

Founder:	Yaroslavl State Technical University
Editorial office address:	88, Moskovsky Prosp., Yaroslavl, 150023, Russia
Telephone:	+7 (4852) 44-32-75
E-mail:	razgovorovpb@ystu.ru
Website:	http://comincon.ru

Published with the assistance of Russian Academy of Architecture and Construction Sciences

Editor:	V.B. DobrokhotoV
English translator:	L.A. Tyukina
Proofreader:	I.A. Voronov
Layout designer:	A.S. Frolov

Registration:	27 November 2020 (Certificate EL No FS 77 - 79733)
Frequency:	Quarterly
Subscription and distribution:	Open Access

СОДЕРЖАНИЕ / TABLE OF CONTENTS

Строительные конструкции, здания и сооружения

А.Д. Рытов, А.А. Титунин

- 8 Исследование параметров звуко- и теплоизоляции для различных вариантов ограждающих конструкций из CLT-панелей

A.D. Rytov, A.A. Titunin

Investigation of sound and heat insulation parameters for different variants of CLT-panel enclosure structures

Ю. Херрати, Д.В. Ковалев, О.Н. Столяров

- 22 Нелинейный метод прогнозирования ползучести и релаксации напряжения конструктивных элементов текстильных фасадов

Kherrati Yu., Kovalev D.V., Stolyarov O.N.

Nonlinear method for predicting creep and stress relaxation of structural elements of textile facades

Строительные материалы и изделия

С.В. Федосов, М.О. Баканов, И.С. Грушко, И.А. Кузнецов

- 35 Динамика кристаллизации и структурно-механические свойства магниймодифицированного пеностекла в многокомпонентных силикатных системах

S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, I.S. Grushko, I.A. Kuznetsov

Dynamics of crystallization and structural and mechanical properties of magnesium modified foam glass in multicomponent silicate systems

В.Б. Доброхотов, Е.С. Егоров

- 53 Исследование паропроницаемости пленок на основе мастик различного состава

V.B. Dobrokhотов, E.S. Egorov

Investigation of vapour permeability of films based on mastics of different composition

**Проектирование и строительство дорог, метрополитенов,
аэродромов, мостов и транспортных тоннелей**

А.М. Бургонутдинов, П.Б. Разговоров, А.Д. Коровка, И.А. Викулин

- 66 Проектирование и устройство зарядных станций в условиях дорожной сети мегаполиса России

A.M. Burgonutdinov, P.B. Razgovorov, A.D. Korovka, I.A. Vikulin

Design and construction of charging stations in the conditions of street and road network of a megalopolis in Russia

Архитектура зданий и сооружений.

Творческие концепции архитектурной деятельности

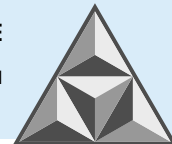
С.В. Расторгуев

- 81 Иммерсивные технологии в архитектуре

S.V. Rastorguev

Immersive technologies in architecture

- 97 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.011

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-8-21

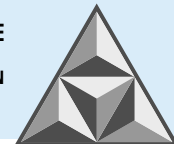
Исследование параметров звуко- и теплоизоляции для различных вариантов ограждающих конструкций из CLT-панелей

А.Д. Рытов, А.А. Титунин

Антон Дмитриевич Рытов¹, Андрей Александрович Титунин^{1,2*}

¹Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Кострома, Российская Федерация
antonrytov@yandex.ru

²Костромской государственный университет, Кострома, Российская Федерация
*a_titunin@ksgos.ru**



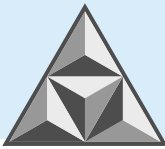
Для различных вариантов конструктивного исполнения наружных и внутренних стен из CLT-панелей исследованы параметры звукопоглощения и теплопроводности. При оценке эффективности применения звукопоглощающих материалов использован программный комплекс COMSOL Multiphysics, позволяющий моделировать процесс распространения звука через многослойную ограждающую конструкцию. Предложено использовать CLT-панели с внутренними слоями из тепло- и звукоизолирующих материалов, обеспечивающих высокий уровень заводской готовности конструкций. Изучена звукопоглощающая способность конструкций со вставками из минеральной ваты и вспененных полимеров. Рассмотрены варианты расположения вставок внутри CLT-панелей и описана их работа при различных частотах звука. Для условий Костромской области расчетным методом определены показатели теплопроводности ограждающих конструкций, основным элементом которых являются пяти- и семислойные деревянные панели. При этом в семислойных панелях толщиной 224 мм теплоизоляционный слой минеральной ваты должен составлять не менее 100 мм.

Ключевые слова: CLT-панели, деревянное домостроение, звукоизоляция, звукопроводность, теплопроводность

Для цитирования:

Рытов А.Д., Титунин А.А. Исследование параметров звуко- и теплоизоляции для различных вариантов ограждающих конструкций из CLT-панелей // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 2. С. 8-21. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-8-21



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-8-21

Investigation of sound and heat insulation parameters for different variants of CLT-panel enclosure structures

A.D. Rytov, A.A. Titunin

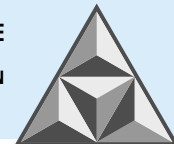
Anton Dmitrevich Rytov¹, Andrey Aleksandrovich Titunin^{1,2*}

¹Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russian Federation

antonrytov@yandex.ru,

²Kostroma State University, Kostroma, Russian Federation

*a_titunin@kosgos.ru**



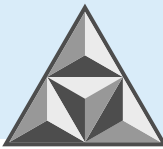
Sound absorption and thermal conductivity parameters were investigated for different variants of structural design of external and internal walls made of CLT-panels. The authors used the COMSOL Multiphysics software package to evaluate the effectiveness of sound-absorbing materials. It allows modelling the process of sound spreading through a multilayer enclosing structure. The authors recommend using CLT-panels with inner layers of heat- and sound-insulating materials. Such panels provide a high level of factory readiness of structures. The authors studied the sound absorption capacity of structures with mineral wool and polymer foam inserts. The paper considers variations in the arrangement of inserts within CLT-panels and describes their performance at different sound frequencies. The authors have determined the heat conductivity indices of the enclosing structures for the conditions of the Kostroma region by the calculation method. The main element of the structures are five- and seven-layer wooden panels. In this case, the heat insulation layer of mineral wool should be at least 100 mm in seven-layer panels with a thickness of 224 mm.

Keywords: CLT-panels, wooden house building, sound insulation, sound conductivity, thermal conductivity

For citation:

Rytov A.D., Titunin A.A. Investigation of sound and heat insulation parameters for different variants of CLT-panel enclosure structures // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 2. P. 8-21.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-8-21



ВВЕДЕНИЕ

Деревянное домостроение в начале 20-х годов XXI века получило дополнительный импульс к развитию в России благодаря совместным усилиям проектировщиков, конструкторов, разработчиков нормативной документации и принятию на федеральном уровне ряда стратегических документов, согласно которым стало возможным строительство многоэтажных деревянных зданий [1]. Многие эксперты связывают рост объемов ввода промышленных и гражданских зданий из древесины с появлением на рынке инновационных для России строительных конструкций – CLT-панелей (от англ. *Cross-Laminated Timber* – «перекрестно-клееная древесина») и LVL-бруса (от англ. *Laminated Veneer Lumber* – «пиломатериал из слоеного шпона»). Строительные материалы из древесины в большей мере, чем бетон, керамический кирпич и железобетон, отвечают критериям энергоэффективности зданий и «зеленых технологий» [2-5]. Однако существуют причины, сдерживающие рост объемов использования современных конструкций из древесины в жилищном строительстве [6].

Одной из причин низкого спроса на квартиры в многоэтажных домах из CLT-панелей называют относительно высокую стоимость жилья – от 80 тыс. руб. за 1 м² [7]. Такая цена 1 м² жилого фонда обусловлена высокой стоимостью самих панелей, затратами на обеспечение требований пожарной безопасности и устройство шумо- и теплоизоляции наружных и внутренних стен, а также междуэтажных перекрытий.

По показателям теплопроводности древесина относится к высокоэффективным материалам (коэффициент теплопроводности $\lambda = 0.102$ до 0.180 Вт·м⁻¹·К⁻¹) [8], но звук она проводит достаточно хорошо [9].

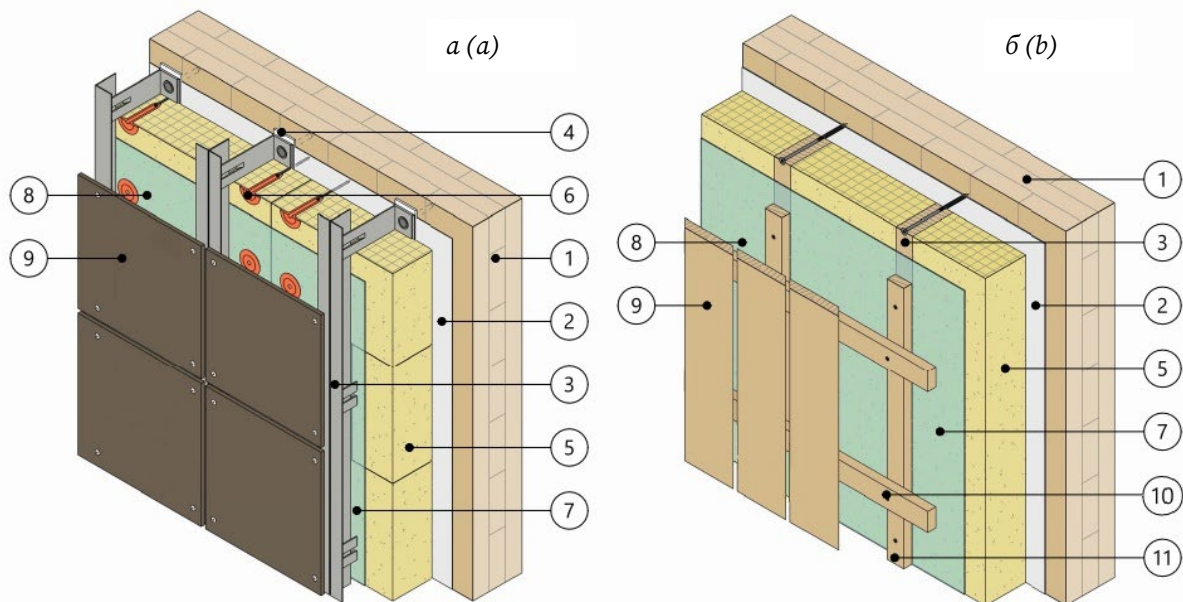
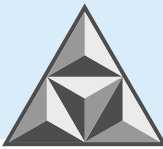


Рис. 1. Конструкция наружной стены: *a* – с навесным вентилируемым фасадом; *b* – с каркасно-обшивным фасадом и вентзазором; 1 – базовая стена из CLT-панели; 2 – пароизоляция; 3 – несущие элементы каркаса; 4 – теплоизоляционная прокладка; 5 – теплоизоляционный слой; 6 – телескопический дюбель с саморезом; 7 – гидроветрозащита; 8 – воздушный зазор; 9 – наружная облицовка; 10 – контробрешетка; 11 – обрешетка

Fig. 1. Exterior wall construction: *a* – with a hinged ventilated facade; *b* – with a frame-sheathed facade and vent; 1 – base wall made of CLT panel; 2 – vapor barrier; 3 – supporting frame elements; 4 – thermal insulation gasket; 5 – thermal insulation layer; 6 – telescopic dowel with self-tapping screw; 7 – hydraulic protection; 8 – air gap; 9 – exterior cladding; 10 – counter-grille; 11 – lattice



Поэтому одной из задач проектировщиков является разработка эффективных решений по обеспечению шумоизоляции жилых помещений [10, 11]. Как правило, устройство тепло- и звукоизоляции ограждающих конструкций выполняется после возведения каркаса здания и сопровождается значительными трудозатратами. В качестве примера на рис. 1, 2 приведены возможные варианты устройства наружных (рис. 1) и внутренних стен из CLT-панелей (рис. 2).

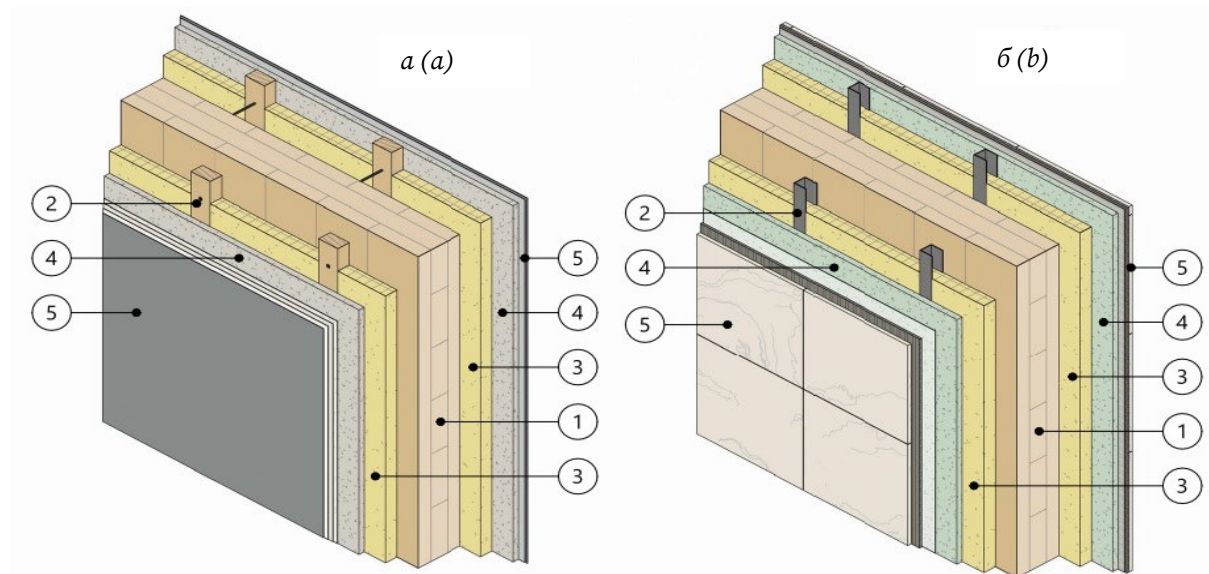
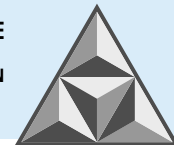


Рис. 2. Конструкция внутренней стены (перегородки): *а* – с обшивкой по деревянному каркасу; *б* – для использования в помещениях с влажным режимом; 1 – базовая стена из CLT-панели; 2 – деревянный (*а*) или металлический (*б*) каркас; 3 – тепло-звукоизоляционный материал; 4 – обшивка из листовых материалов; 5 – отделочные слои

Fig. 2. Construction of an internal wall (partition): *a* – with a wooden frame lining; *b* – for use in wet rooms; 1 – base wall made of CLT panels; 2 – wooden (*a*) or metal (*b*) frame; 3 – heat and sound insulation material; 4 – cladding made of sheet materials; 5 – finishing layers

Чтобы эффективно устранить посторонние звуки в помещении, необходимо качественно отделить одно пространство от другого. Это «базовое» утверждение не всегда выполняется в условиях современной жилой застройки. С одной стороны, высокая конкуренция заставляет застройщика снижать затраты на возведение жилья и предлагает минимальные условия акустического комфорта, а с другой стороны – сам владелец, ввиду высокой стоимости шумоизолирующих материалов, неохотно организует улучшение жилищных условий. При этом соседи нередко нарушают покой владельца, и шум, при определенных параметрах, негативно влияет на психику и состояние здоровья человека [12]. Выход из сложившейся ситуации – предложить рынку встроенную шумоизоляцию, которая позволит снизить итоговую стоимость 1м² жилья.

В настоящем исследовании авторы рассматривают новые варианты конструктивного исполнения стен, перегородок и перекрытий, отличающиеся от стандартных решений тем, что тепло- и шумоизоляционный материал предлагается располагать в слоях CLT-панелей. Такой конструктивный подход, предложенный учеными из Португалии [10], позволяет не только повысить сопротивление теплопередаче панелей и уменьшить распространение ударного шума, но и обеспечивает необходимую степень заводской готовности строительных конструкций, что в итоге приводит к снижению стоимости работ. В работах португальских, российских [11] и итальянских исследователей [12], а также ученых других стран отмечается, что при проектировании многослойных систем пока не существует единой методики, позволяющей с необходимой точностью описать процесс тепломассопереноса в конструкции



и одновременно прогнозировать конкретные показатели шумоизоляции, особенно в интервале низких частот. При этом ученые сходятся во мнении, что конечно-элементные методы более пригодны для моделирования процессов распространения тепла и звука в многослойных конструкциях из неоднородных материалов, чем поиск иных методических решений.

При использовании тепло- и шумоизолирующих вставок внутри CLT-панелей возникает задача по определению оптимального расположения этих вставок во внутренних слоях конструкции, а также их размеров, существенно не снижающих прочностные свойства панелей. Также требуется оценить эффективность предлагаемого варианта устройства тепло- и шумоизоляции по сравнению с теми, которые используются в российской практике промышленного строительства деревянных зданий (см. рис. 1) и выполняются на строительной площадке. Для решения указанных задач авторами проведены исследования с использованием метода моделирования звукопроводности панелей в программном комплексе *COMSOL Multiphysics*.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В ходе первого этапа экспериментальных исследований выполнен анализ влияния вида материала и расположения звукоизолирующих вставок на параметры шумоподавления внутренних перегородок из CLT-панелей.

С учетом ранее проведенных опытов [13] и в соответствии с технической документацией программного обеспечения *COMSOL Multiphysics* [14], созданы виртуальные модели ограждающих конструкций (аналог CLT-панелей) со вставками из тепло- и звукоизолирующих материалов. Рассмотрены пять вариантов расположения вставок внутри семислойной панели.

Материалы вставок подбирали не только исходя из соображений снижения звукопроводности, но и с учетом влияния на теплопроводность деревянной панели. Схемы расположения вставок представлены на рис. 3, а их конструктивные особенности и виды изоляционных материалов (минеральная вата, пенопласт, пенополистирол, армированный целлюлозными волокнами гипс) приведены в табл. 1.

Таблица 1. Варианты звукоизоляции стен из CLT-панелей

Table 1. Options for soundproofing walls made of CLT-panels

Номер варианта	Материал вставок				Количество слоев звукоизоляции	Слои, где располагаются вставки	Толщина каждого слоя, мм
	минеральная вата	пенопласт (EPS)	пенополистирол (XPS)	минеральная вата и гипсоволокнистый лист			
1	+	+	+	+	5	2-6	32
2	+	+	+	+	5	2-6	32
3	+	+	+	-	1	4	32
4	+	+	+	-	2	4	16
5	+	+	+	-	1	4	32

В первом варианте вертикальные и горизонтальные ряды вставок шириной, равной ширине деревянных ламелей, располагаются без смещения и образуют воздушные полости, которые проходят через пять внутренних слоев панели. Во втором варианте вставки в вертикальном и горизонтальном положении расположены друг к другу со смещением.

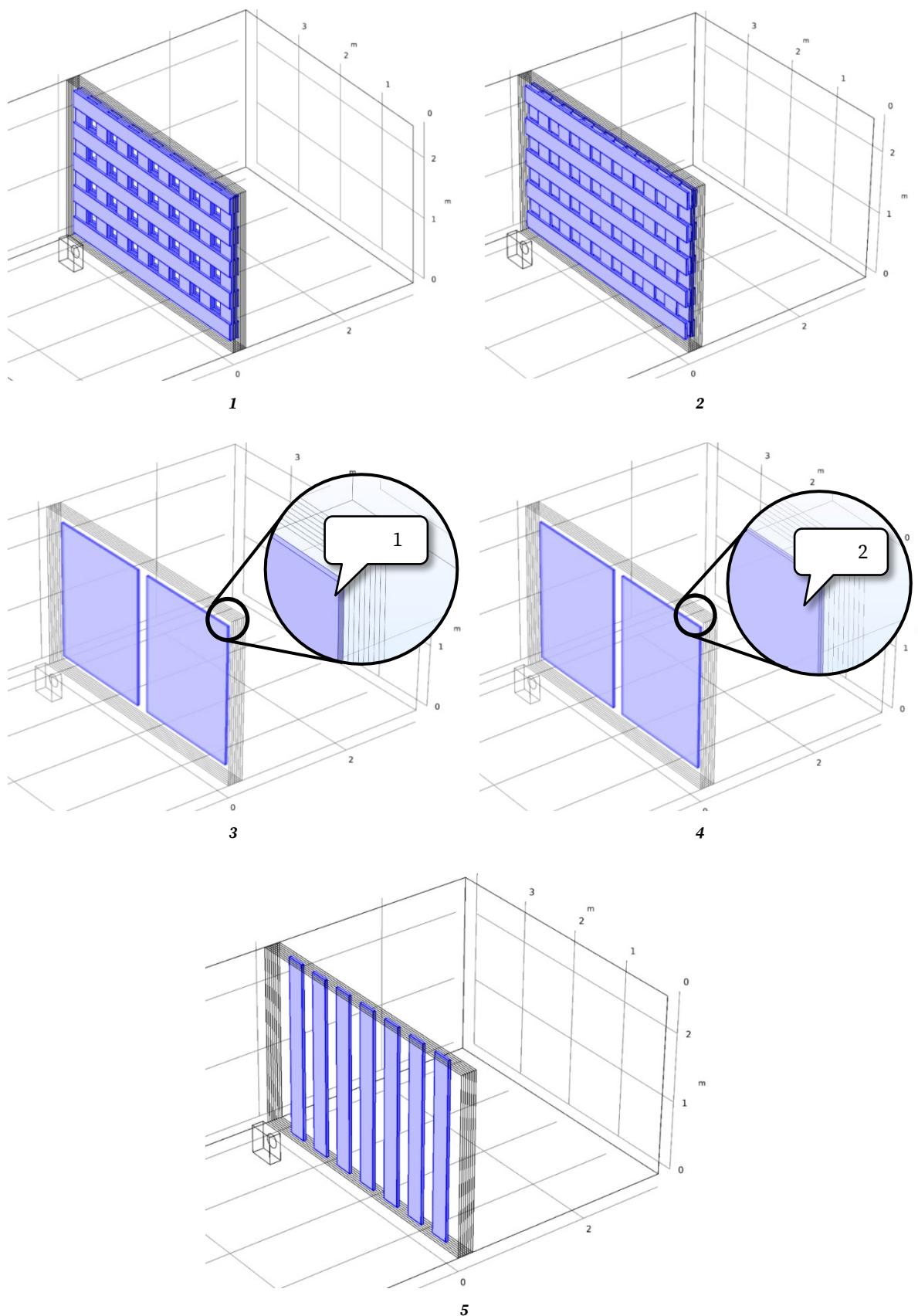
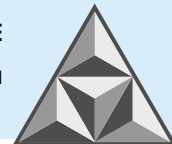
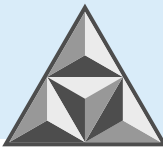


Рис. 3. Варианты расположения звукоизолирующих вставок в CLT-панелях: 1 – первый вариант; 2 – второй вариант; 3 – третий вариант; 4 – четвертый вариант; 5 – пятый вариант
Fig. 3. Variants of sound-proofing inserts in CLT-panels: 1 – first variant; 2 – second variant; 3 – third variant; 4 – fourth variant; 5 – fifth variant



В варианте 3 вставки в виде листовых материалов расположены в четвертом центральном слое CLT-панели. В варианте 4 в центральном слое расположены две вставки толщиной по 16 мм с воздушным зазором между ними. В варианте 5 использовали только вертикальные вставки, расположенные в центральном слое CLT-панели.

С целью определения параметра звукопоглощения для испытываемой конструкции нами выбран мультифизический интерфейс взаимодействия акустики с твердым телом в частотной области – «Acoustic-Solid Interaction, Frequency Domain». Чтобы технически грамотно построить виртуальные модели, необходимо обеспечить корректное мультифизическое взаимодействие между газообразной средой и твердыми (либо полутвердыми) материалами, применяемыми на практике.

Так, для варианта 4 внутри деревянной панели создавали воздушный промежуток, по аналогии с настройкой работы между воздушной средой помещения и твердой поверхностью CLT-панели. Постановка расчетных моделей осуществлялась по схеме двух реверберационных камер. Размеры каждой камеры составляли 4.0×3.0×2.6 м. Источником шума по выбранной схеме выступал условный диффузор диаметром 0.19 м с назначенным типичным ускорением 100 м·с⁻². Диффузор располагали на «закрытом деревянном ящике», имеющем размеры 0.36×0.16×0.39 м. Резонатор размещали параллельно исследуемой конструкции, на некотором расстоянии от нее.

В общем случае для всех моделей реализовали «частотный расчет», представляющий собой решение уравнения Гельмгольца относительно акустического давления:

$$\nabla \cdot \left(-\frac{1}{\rho_c} (\nabla p_t - q_d) \right) - \frac{k_{eq}^2 p_t}{\rho_c} = Q_m; \quad (1)$$

$$p_t = p + p_b; \quad (2)$$

$$k_{eq}^2 = \left(\frac{\omega}{c_c} \right)^2, \quad (3)$$

где ρ_c – плотность (постоянная величина) (кг·м⁻³);

p_t – общее давление (Па);

q_d – источник в дипольной области (Н·м⁻³);

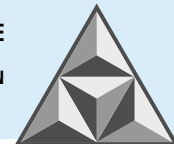
k_{eq} – эквивалентное волновое число (м⁻¹);

Q_m – источник в монопольной области (с⁻²); p – давление (Па);

p_b – фоновое давление (Па); c_c – скорость звука (м·с⁻¹); ω – частота (Гц).

На данном этапе в эксперименте с моделями конструкций фигурировали частоты: 31.5; 63; 125; 250; 500 Гц. Таковые отвечают требованиям ГОСТ 12090-80 «Частоты для акустических измерений» [15] и СП 51.13330.2011 «Защита от шума» [16], а также позволяют оценить звукоподавление на «определяющей» частоте [17]. Полученные из расчетных моделей данные об уровне звукового давления в помещении без резонатора (за конструкцией) обрабатывали методом «средней линии».

Целью второго этапа исследования являлось сравнение параметров теплоизоляции наружных стен зданий из CLT-панелей при использовании утеплителя из минеральной ваты толщиной в 100 мм. Рассмотрены две типовые ограждающие конструкции, которые аналогичны таковым, представленным на рис. 1. В качестве основного слоя принимали пяти- и семислойную CLT-панель толщиной 160 и 224 мм соответственно. Наружная отделка



здания была представлена в виде вентилируемого фасада из гранитных плит толщиной 1 см и воздушной прослойки 2 см.

Общепринятым в практике проектирования зданий и сооружений является соблюдение требований к ограждающим конструкциям в целях обеспечения [18]:

- заданных параметров микроклимата, необходимых для жизнедеятельности людей и работы технологического или бытового оборудования;
- тепловой защиты;
- защиты от переувлажнения ограждающих конструкций;
- эффективности расхода тепловой энергии на отопление и вентиляцию;
- необходимой надежности и долговечности конструкций.

Для расчета нами выбран район строительства в Костроме (Российская Федерация). Относительная влажность воздуха в жилом помещении составляла 55%; средняя температура в здании зафиксирована на отметке +20 °C.

Метод определения необходимой толщины утеплителя подбирали в соответствии с СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» [18], СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» [19] и СП 23-101-2004 «Проектирование тепловой защиты зданий» [20].

По результатам расчетов производили сравнение приведенного сопротивления теплопередаче с требуемым значением, а также оценивали распределение действительного и максимального парциального давления паров воды в конструкции.

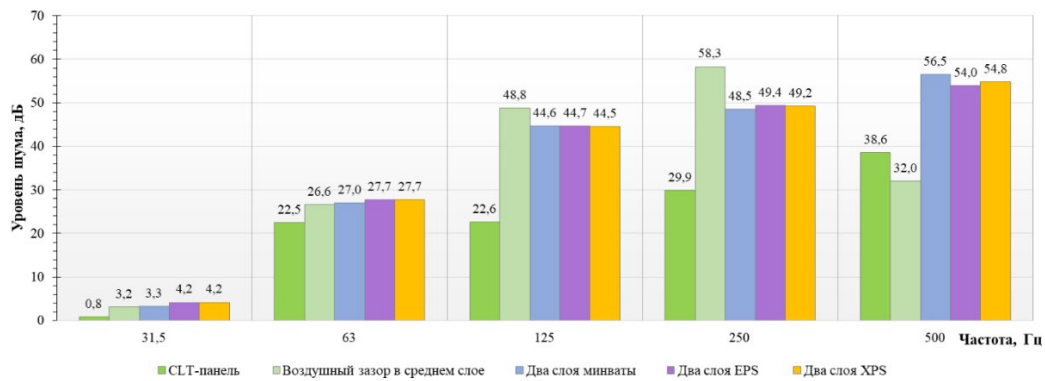
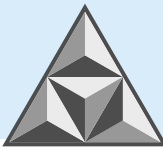
РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Одним из результатов анализа влияния шумоизолирующих слоев, расположенных внутри CLT-панелей по описанным выше пяти вариантам их расположения (см. табл. 1), явилось то, что в программном комплексе *COMSOL Multiphysics* нами получены значения уровня шума (dB) за перегородкой при различных частотах звука. Каждый вид вставки в отдельно взятом варианте сравнивается с исходным уровнем шума для цельнодеревянной семислойной CLT-панели. Для наглядности полученные результаты представлены на рис. 4. Все результаты не приводятся, поскольку получен отрицательный эффект от использования всех звукоизолирующих вставок и на всех частотах источника звука. Для варианта 4 (рис. 4, а) благодаря добавлению воздушного зазора в центральном слое панели удалось добиться снижения (на 6.6 дБ) шума на частоте 500 Гц. Хорошие результаты получены для варианта 5 расположения шумоизолирующих вставок (рис. 4, б): на частотах 31.5, 63, 125 и 250 Гц зарегистрированы близкие показатели шума с обычной цельнодеревянной панелью, а на частоте 500 Гц по всем видам вставок положительная разница в среднем достигала 6.0 дБ.

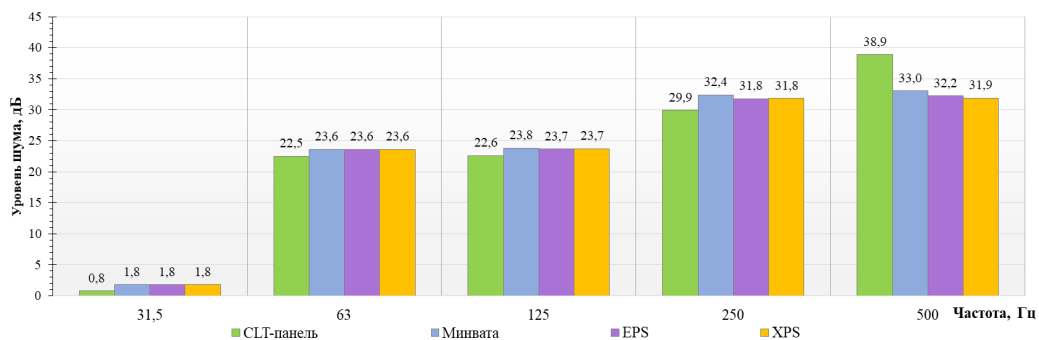
Очевидно, вставки, которые находятся непосредственно в теле панели, часто работают с отрицательным эффектом, снижая акустический комфорт. Проявляется эффект мембраны; вставки внутри панели, вне зависимости от материала, деформируются вместе с панелью, никак не препятствуя прохождению звуковых волн через конструкцию.

Напротив, те вставки, что полностью «рассекают/делят» панель на отдельные части, демонстрируют достаточную эффективность. Такие результаты согласуются с исследованиями [10, 21, 22], в которых отмечается, что для древесины наиболее проблемными с точки зрения звукоизоляции являются низкие частоты в интервале 50-250 Гц.

Особенно это характерно для легких конструкций, которые, по сравнению с массивными (тяжелыми) конструкциями, лучше проводят звук и не обеспечивают требуемых параметров звукоизоляции.



а (а)



б (b)

Рис. 4. Влияние частоты звука и вида материала на уровень шума в четвертом (а) и пятом (б) варианте вставок

Fig. 4. Impact of sound frequency and material type on the noise level in the fourth (a) and fifth (b) variant of inserts

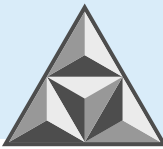
Таким образом, гипотеза о положительном эффекте от использования вставок из сравнительно легких материалов внутри CLT-панели не подтвердилась. Возможно, применение иных материалов с малой плотностью, обладающих хорошими показателями тепло- и звукоизоляции и одновременно более эластичных по сравнению с минеральной ватой, пенопластом или пенополистиролом, обеспечит снижение уровня шума. Для этого требуется проведение дополнительных исследований – как с использованием моделирования, так и в рамках натурных испытаний.

Согласно результатам теплотехнических расчетов, выявлено, что при строительстве зданий из семислойных CLT-панелей толщиной 224 мм достаточно применить утеплитель из минеральной ваты толщиной 100 мм.

Величина приведенного сопротивления теплопередаче $R_{0пр}$ больше требуемого $R_{0норм}$ ($3.28 > 3.18 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$). Следовательно, для Костромской области ограждающая конструкция из CLT-панелей с теплоизоляционным слоем из минеральной ваты, выполненная по традиционной схеме (см. рис. 1), будет обеспечивать требуемый температурный режим внутри помещения.

При строительстве зданий из пятислойных CLT-панелей толщиной 160 мм использование утеплителя из минеральной ваты толщиной 100 мм будет недостаточным.

Величина приведенного сопротивления теплопередаче $R_{0пр}$ меньше требуемого $R_{0норм}$ ($3.00 < 3.18 \text{ м}^2 \cdot \text{К} \cdot \text{Вт}^{-1}$); следовательно, данная ограждающая конструкция не соответствует требованиям по теплопередаче. Для использования таких панелей в реальных условиях необходимо увеличить толщину теплоизоляционного слоя.



Анализ распределения действительного и максимального парциального давления показал, что для обеих рассмотренных конструкций получены схожие результаты.

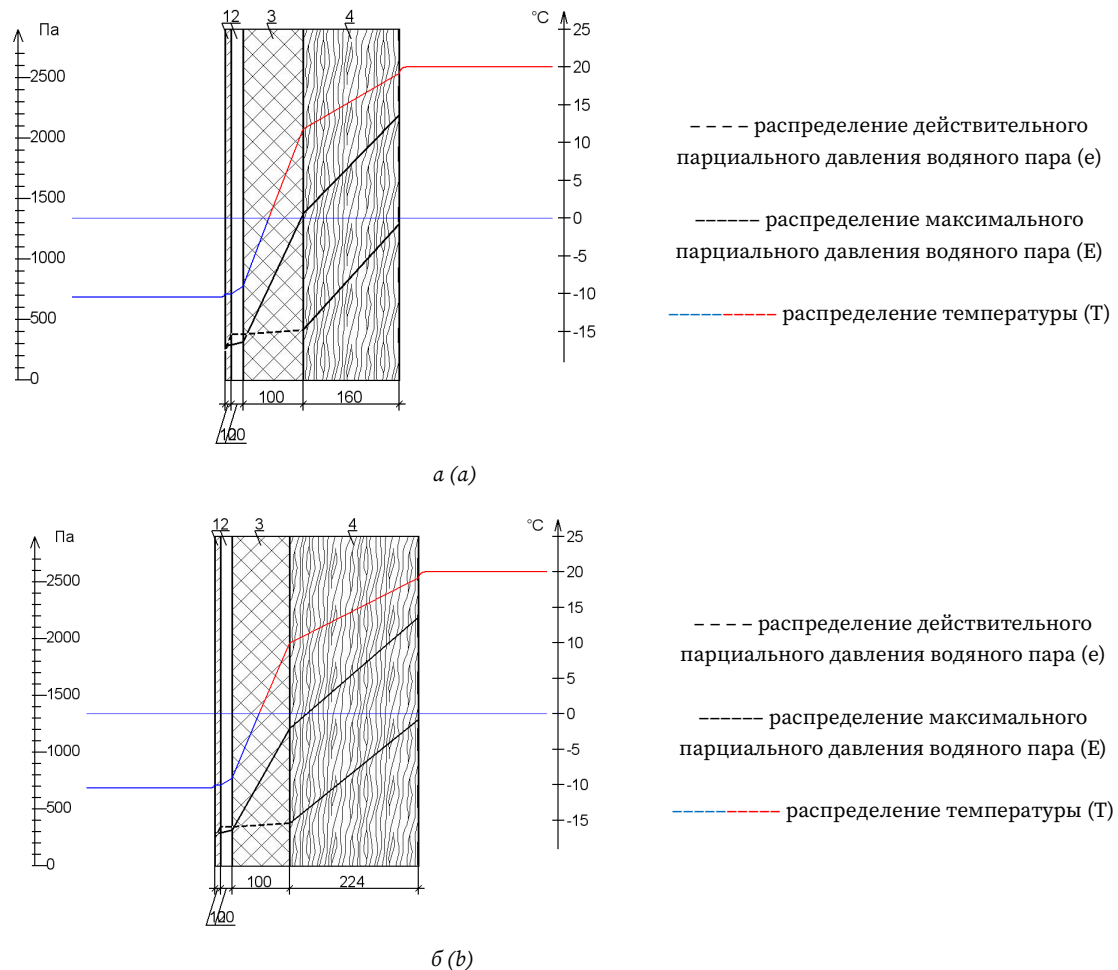


Рис. 5. График распределения давлений и температуры для пятислойной (а) и семислойной (б) CLT-панели

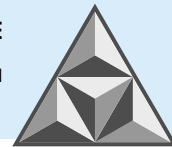
Fig. 5. Pressure and temperature distribution graph of a five-layer (a) and seven-layer (b) CLT-panel

Как видно из рис. 5, точка росы и в первом (рис 5, а), и во втором случае (рис. 5, б) приходится на наружную поверхность утеплителя.

ВЫВОДЫ

На основании проведенных исследований выявлена проблема несоответствия используемых теплоизоляционных материалов требованиям звукоизоляции и звукоподавления. Для обеспечения в зданиях из CLT-панелей комфортных условий для проживания, с учетом требований температурного режима и акустических условий, необходимо использовать материал, обладающий одновременно коэффициентом теплопроводности $\lambda \leq 0.04 \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$ и высокими показателями звукоизоляции. Для межквартирных ограждающих конструкций жилых зданий в качестве звукоизолирующего материала необходимо применять таковой с индексом изоляции воздушного шума не ниже $Rw_{\text{треб}} = 52 \text{ дБ}$, для межкомнатных конструкций $Rw_{\text{треб}} = 43 \text{ дБ}$.

Расчет теплоизоляции рассмотренных ограждающих наружных конструкций зданий показал преимущества использования семислойных CLT-панелей по сравнению с пятислойными CLT-панелями.



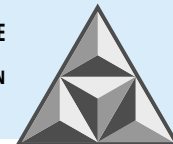
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Об утверждении Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства РФ на период до 2030 г. с прогнозом до 2035 г.: Распоряжение Правительства РФ от 31 октября 2022 г. № 3268-р // Правительство Российской Федерации. 2022. № 1. – Ст. 3268-р.
2. **Арзиманов Д.И., Гаевская З.А.** Сравнительный анализ энергоэффективности CLT панелей для жилой многоэтажной застройки Санкт-Петербурга // *Инженерные исследования*. 2023. № 2 (12). С. 11-18.
3. **Jones K., Stegemann J., Sykes J., Winslow P.** Adoption of unconventional approaches in construction: The case of cross-laminated timber // *Construction and Building Materials*. 2016. 125. P. 690-702.
4. **Булгакова И.А.** Повышение энергоэффективности в сфере жилищно-коммунального комплекса как путь снижения углеродного следа // *Энергосбережение*. 2022. № 7. С. 1-13.
5. **Есауленко И.В.** Перспективы развития высотного деревянного домостроения в России на примере зарубежного опыта // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2021. № 4. С. 17-25. DOI 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25.
6. РИА Новости: сайт. // Новый взгляд на дом из дерева. Деревянное домостроение в России – URL: <https://ria.ru/20180907/1510231385.html> (дата обращения: 12.01.2025).
7. CLT RUS: сайт. – URL: <https://clt-rus.ru/> (дата обращения: 12.01.2025).
8. **Титунин А.А.** Определение коэффициента теплопроводности деревянных клееных конструкций с учетом макроструктуры и плотности древесины // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 1. С. 8-18.
9. **Боровиков А.М., Углев Б.Н.** Справочник по древесине: справочник. М.: Лесная пром-сть, 1989. 296 с.
10. **Santos P., Sousa L., Godinho L., Correia J.R., Dias A.M.P.G.** Acoustic and thermal behavior of cross-insulated timber panels // *Journal of Building Engineering*. 2021, 44, 103309.
11. **Овсянников С.Н.** Проблемы обеспечения теплозащиты и звукоизоляции в зданиях из древесины // Инвестиции, градостроительство, недвижимость как драйверы социально-экономического развития территории и повышения качества жизни населения: мат. XIII Межд. науч.-практ. конф., Томск, 28 февраля – 02 марта 2023 года. Ч. 1. Томск: Томский гос. арх.-строит. ун-т, 2023. С. 15-24.
12. **Caniatoa M., Bettarellob F., Ferlugaa A., Marsicha L., Schmida C., Faustic P.** Acoustics of lightweight timber buildings: A rev. // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. 80. P. 585-596.
13. **Рытов А.Д., Титунин А.А.** Анализ влияния толщины CLT-панелей на изоляцию воздушного шума в жилых зданиях // *Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК)*. 2024. № 1. С. 410-411.
14. COMSOL Multiphysics — это программное обеспечение для мультифизического моделирования, разработанное компанией COMSOL. // COMSOL Multiphysics URL: <https://www.comsol.ru>.
15. ГОСТ 12090-80 Частоты для акустических измерений. Предпочтительные ряды : дата введения 1981-01-01. М.: Изд-во стандартов, 1980. 2 с.
16. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с изменениями № 1, 2, 3): дата введения 2011-05-20. М.: ОАО «ЦПП», 2010. – 40 с.
17. **Виноградов Д.В., Пресс М.Р.** Исследование звукоизоляции ограждающих конструкций, выполненных из стеновых бетонных камней «Besser» // *Вестник МГСУ*. 2010. № 1. С. 304-311.
18. Свод правил СП 50.13330.2012 Тепловая защита зданий Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003: дата введения 2013-07-01. М.: Росстандарт, 2012. 95 с.
19. Свод правил СП 131.13330.2020 Строительная климатология Актуализированная редакция СНиП 23-01-99: дата введения 2020-12-24. М.: Росстандарт, 2020. 146 с.
20. Свод правил СП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий: дата введения 2004-06-01. М.: ФГУП ЦПП, 2004. 139 с.

Поступила в редакцию 22.01.2025

Одобрена после рецензирования 29.04.2025

Принята к опубликованию 15.05.2025



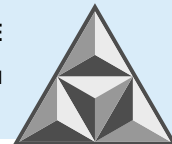
REFERENCES

1. Government of the Russian Federation. (2022), On approval of the Strategy for the Development of the Construction industry and Housing and Communal Services of the Russian Federation for the period up to 2030 with a forecast up to 2035: Decree of the Government of the Russian Federation dated October 31, 2022, no. 3268-r (in Russian).
2. **Arzimanov, D.I. and Gaevskaya, Z.A.** (2023), "Comparative analysis of energy efficiency of CLT panels for residential multi-storey buildings in St. Petersburg", *Inzhenernye issledovaniya*, vol. 2, no. 12, pp. 11-18 (in Russian).
3. **Jones, K., Stegemann, J., Sykes, J. and Winslow, P.** (2016), "Adoption of unconventional approaches in construction: The case of cross-laminated timber", *Construction and Building Materials*, vol. 125, pp. 690-702. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.088>
4. **Bulgakova, I.A.** (2022), "Improving energy efficiency in the housing and communal complex as a way to reduce the carbon footprint", *Energobezhazhenie*, no. 7, pp. 1-13 (in Russian).
5. **Esaulenko, I.V.** (2021), "Prospects for the development of high-rise wooden housing construction in Russia on the example of foreign experience", *Arkhitktura, stroitel'stvo, transport*, no. 4, pp. 17-25, DOI: 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25 (in Russian).
6. RIA Novosti. (2018), A new look at a house made of wood. Wooden house construction in Russia [online]. Available at: <https://ria.ru/20180907/1510231385.html> (accessed 12.01.2025) (in Russian).
7. CLT RUS. (2024) Available at: <https://clt-rus.ru> (accessed 12.01.2025) (in Russian).
8. **Titunin, A.A.** (2024), "Determination of the coefficient of thermal conductivity of wooden glued structures, taking into account the macrostructure and density of wood", *Smart Composite in Construction*, vol. 5, no. 1, pp. 8-18 (in Russian).
9. **Borovikov, A.M. and Uglev, B.N.** (1989), Handbook of Antiquitie. Moscow: Forest Industry (in Russian).
10. **Santos, P., Sousa, L., Godinho, L., Correia, J.R. and Dias, A.** (2021), "Acoustic and thermal behaviour of cross-insulated timber panels", *Journal of Building Engineering*, vol. 44, 103309. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103309>
11. **Ovsyannikov, S.N.** (2023), "Problems of providing thermal protection and sound insulation in buildings made of wood", Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference, Tomsk, Russia, pp. 15-24 (in Russian).
12. **Caniato, M., Bettarello, F., Ferluga, A., Marsich, L., Schmid, C. and Fausti, P.** (2017), "Acoustic of lightweight timber buildings: A rev", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 80, pp. 585-596. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.110>
13. **Rytov, A.D. and Titunin, A.A.** (2024), "Analysis of the effect of the thickness of CLT panels on the insulation of air noise in residential buildings", *Young Scientists for the Development of the National Technological Initiative (POISK)*, no. 1, pp. 410-411 (in Russian).
14. COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics is a multiphysical modeling software developed by COMSOL [online]. Available at: <https://www.comsol.com> (accessed 03.01.2025).
15. State Standard 12090-80 Frequencies for acoustic measurements. Preferred series. Moscow, Publishing House of Standards, 1980. 2 p. (in Russian)
16. Code of Rules 51.13330.2011 Noise protection. Updated version of SNiP 23-03-2003 (with Amendments no. 1, 2, 3). Moscow, JSC «TSPP», 2010. 40 p. (in Russian).
17. **Vinogradov, D.V. and Press, M.R.** (2010), "Study of sound insulation of enclosing structures made of concrete wall stones «Besser»", *Vestnik MGSU*, 1, pp. 304-311 (in Russian).
18. Code of Rules 50.13330.2012 Thermal protection of buildings Updated edition of SNiP 23-02-2003. Moscow, Rosstandart, 2012. 95 p. (in Russian).
19. Code of Rules 131.13330.2020 Building climatology Updated edition of SNiP 23-01-99. Moscow, Rosstandart, 2020. 146 p. (in Russian).
20. Code of Rules 23-101-2004 Design of thermal protection of buildings. Moscow, FSUE CCP, 2004. 139 p. (in Russian).

Received 22.01.2025

Approved 29.04.2025

Accepted 15.05.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ¹

УДК 624.011

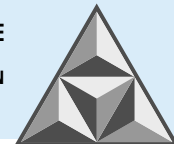
DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-22-34

Нелинейный метод прогнозирования ползучести и релаксации напряжения конструктивных элементов текстильных фасадов

Ю. Херрати, Д.В. Ковалев, О.Н. Столяров

Юнес Херрати, Дмитрий Вячеславович Ковалев, Олег Николаевич Столяров*

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация
*kherratighazouaniyounes@gmail.com, kovalevm1tya@yandex.ru, stolyarov_on@spbstu.ru**



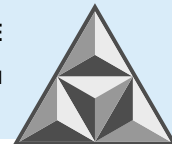
Рассмотрены основные параметры, влияющие на механические свойства и долговечность конструктивных элементов текстильных фасадов. Предлагается математическая модель, представляющая нелинейный метод прогнозирования указанных параметров. Результаты расчета позволяют создать общую функцию ползучести и релаксации напряжения для определенного срока службы текстильного фасада. Проведены исследования ползучести и релаксации напряжения ограждающих конструкций зданий, изготовленных из текстильных материалов.

Ключевые слова: текстильные фасады, тканые материалы, нелинейный метод, прогнозирование ползучести, релаксация напряжения

Для цитирования:

Ю. Херрати, Д.В. Ковалев, О.Н. Столяров. Нелинейный метод прогнозирования ползучести и релаксации напряжения конструктивных элементов текстильных фасадов // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 2. С. 22-34. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-22-34



SCIENTIFIC ARTICLE²

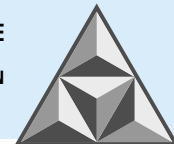
DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-22-34

Nonlinear method for predicting creep and stress relaxation of structural elements of textile facades

Y. Kherrati, D.V. Kovalev, O.N. Stolyarov

Younes Kherrati, Dmitriy Vyacheslavovich Kovalev, Oleg Nikolaevich Stolyarov*

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russian Federation,
*kherratighazouaniyounes@gmail.com, kovalevm1tya@yandex.ru, stolyarov_on@spbstu.ru**



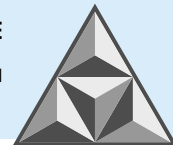
The paper considers the main parameters affecting the mechanical properties and durability of structural elements of textile facades. The authors propose a mathematical model representing a non-linear method for predicting the above parameters. The calculation results allow the creation of a general creep and stress relaxation function for a certain lifetime of the textile facade. The authors conducted creep and stress relaxation research on building enclosures made of textile materials.

Keywords: textile facades, woven materials, nonlinear method, creep prediction, stress relaxation

For citation:

Kherrati Y., Kovalev D.V., Stolyarov O.N. Nonlinear method for predicting creep and stress relaxation of structural elements of textile facades // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 2. P. 22-34. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-22-34



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время приобретает популярность использование мягких оболочек в ограждающих строительных конструкциях. Основной причиной является простота их монтажа и невысокая стоимость, по сравнению с таковой для ограждающих конструкций из традиционных строительных материалов. Однако, наряду с активным применением различных напряженных мягких оболочек, для тентовых конструкций зданий характерно существенное отставание нормативной базы, регламентирующей методы их испытаний и способы определения долговечности. Среди действующих документов известны лишь СП 384.1325800.2018 Конструкции строительные тентовые. Правила проектирования. Характерно, что данный документ распространяется только на мягкие напряженные оболочки отрицательной кривизны. В то же время все чаще используются тентовые конструкции с плоскими оболочками.

На рис. 1 показан металлический каркас спортивного комплекса (фото слева) и текстильный фасад (фото справа). Эти ограждающие конструкции могут монтироваться как с предварительным напряжением, так и без него.



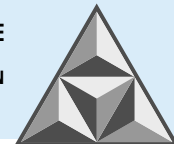
Рис. 1. Металлическая конструкция с текстильным фасадом

Fig. 1. Metal construction with textile facade

В качестве текстильной оболочки используются различные материалы, включая полотна с покрытием специальными эмульсиями. Основными материалами для изготовления полотен являются синтетические (полиэфирные и полиамидные нити), натуральные (хлопок, джут, сизаль и др.) и неорганические (стекловолокно). Наибольшую популярность приобрели текстильные фасады из полиэфирных материалов ввиду их высокой прочности на растяжение и увеличенного срока службы. В качестве защитного покрытия используются поливинилхлорид, политетрафторэтилен и полиуретан. Такая комбинация позволяет получить уникальные строительные конструкции с высокими механическими свойствами (испытание на растяжение) и долговечностью.

В последние два десятилетия многие ученые посвятили свои исследования изучению свойств текстильных фасадов [1-5], а также проблем их старения и оценки жизненного цикла [6-8], вопросам повышения их энергоэффективности [9-13] и разработки экологически чистых конструкций из биопластиков [14].

В [1] акцентируется внимание на свойствах материалов для проектирования напряженных текстильных конструкций. Авторы проводят анализ взаимосвязи между формой и функцией сооружения, показывая, как базовые характеристики материалов влияют на эксплуатационные характеристики конструкции. Подчеркивается, что правильно

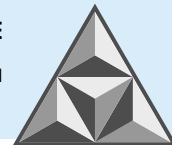


подобранный материал может значительно повысить долговечность и устойчивость сооружения. В [2] исследуется сдвиговое поведение архитектурных тканей при двухосном растяжении; при этом авторы [2] используют экспериментальные и численные методы для анализа деформаций и выявляют ключевые параметры, определяющие устойчивость ткани. В [3] детально исследовано напряженно-деформированное состояние фасадных тканей с покрытием; используются традиционные методы исследований текстильных материалов. В [4] исследованы вязанные полотна под воздействием ветровых нагрузок. Показано, что специально разработанные вязанные структуры способны не только эстетически преобразовать фасад, но и обеспечить определенную степень прочности при динамических нагрузках, создаваемых ветром. Подробно описана экспериментальная методика и проведен анализ, на основании которого становится ясно, каким образом различные режимы нагрузки влияют на деформационное поведение текстиля.

При оценке жизненного цикла текстильных фасадов в отдельных работах [6] рассмотрены проблемы старения материалов и предлагаются методики, позволяющие проектировщикам оценить изменение свойств таких фасадов с течением времени. За основу при разработке методик берутся данные длительных экспериментов, что позволяет сформировать рекомендации по учету эффектов старения при проектировании. Работа подчеркивает важность интеграции механизмов компенсации в расчет прочности материалов. Эти выводы способствуют формированию надежных и долговечных проектов фасадов зданий. Аналогичные рекомендации для анализа жизненного цикла предложены в [7]. В [8] выполнен анализ нагружения и ультрафиолетового облучения, схожий с эксплуатационным режимом, и предложен метод оценки долговечности материалов текстильных конструкций.

Одной из проблем успешного применения таких материалов в качестве ограждающих конструкций зданий и сооружений является увеличенный срок их службы. Согласно СП 384.1325800.2018, определяется надежность материала, с учетом вероятностного разброса прочностных характеристик и коэффициентов, связанных с долговечностью (коэффициент длительной прочности, коэффициент старения материала, коэффициент старения сварных швов). В руководстве по проектированию натяжных мембранных конструкций [15] рассматриваются следующие факторы, влияющие на прочность: длительное нагружение, ультрафиолетовое воздействие и осадки, температура. Ползучесть находится в корреляции с понижающим коэффициентом, который определяется как отношение кратковременной прочности при растяжении к сохраненной прочности после длительного нагружения. Она должна учитываться при необходимом повышении заданного усилия или деформации. Это обеспечивает достижение требуемого номинального уровня предварительного напряжения. Все элементы конструкции текстильного фасада должны быть спроектированы таким образом, чтобы совместно противостоять приложенным напряжениям.

При рассмотрении элементов конструкции текстильного фасада, помимо полиэфирной ткани с покрытием, можно выделить следующие напряженные элементы: стяжки, тросы, веревочные приводы, стропы, стяжки [16, 17]. Указанные элементы должны совместно работать для обеспечения надлежащей эксплуатации конструкции. По своей структуре эти конструктивные элементы могут быть получены путем плетения (например, тросы и веревочные приводы) и ткачества (ограждающие полотна, стропы, стяжки). Последние два элемента из указанных выше представляют собой аналогичное основному материалу тканое переплетение и изготавливаются, как правило, из синтетических нитей; основное отличие заключается в структуре переплетения и размерах. Так, если основные полотна с покрытием испытывают двуосное, то стропы и стяжки – одноосное напряжение. Указанные конструктивные элементы представляют собой синтетические нити, ориентированные в



одном направлении для обеспечения необходимых механических характеристик. В условиях эксплуатации они подвергаются механическим нагрузкам, которые часто изменяются. Поэтому при решении ряда практических задач, связанных с оптимальным предварительным напряжением конструкций и прогнозированием их остаточной прочности, возникает необходимость моделирования длительных процессов деформирования, таких как ползучесть и релаксация напряжения при различных режимах нагружения.

Процессы деформирования должны совпадать с теми, которые испытывает основной материал конструкции. В противном случае несогласованная работа элементов конструкций может привести к появлению нежелательных последствий на основном ограждающем полотне (складки, провисы).

В настоящей работе нами проведено исследование ползучести и релаксации напряжения на узкой тканой ленте полотняного переплетения. Такая структура используется в элементах типа стропы и стяжки.

Ключевая задача заключается в прогнозировании изменений усилий/деформаций во времени для оптимизации нагрузки и расчета срока службы указанных конструкций. Для большинства исследований элементов текстильных фасадов, предшествующих авторским, как правило, характерно упрощенное описание механического поведения и предполагается, что их свойства во времени практически неизменны, что фактически означает игнорирование вязкоупругой природы. В связи с этим в данной работе произведена попытка решить задачу, связанную с учетом фактора времени на деформационное поведение конструктивных элементов текстильных фасадов, что является необходимым для их проектирования и эксплуатации.

Таким образом, цель данной работы формулируется как исследование вязкоупругого поведения текстильного фасада путем проведения экспериментов по изучению ползучести и релаксации напряжения и разработка подходящего метода прогнозирования изменения во времени его физико-механических свойств.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В работе объектом исследования являлась тканая лента полотняного переплетения шириной 25 мм (табл. 1).

Таблица 1. Основные характеристики тканой ленты

Table 1. Main characteristics of woven tape

Характеристика	Соответствие
Материал	Полиамид
Переплетение	Полотняное
Плотность по основе (нити на 10 см)	520
Линейная плотность нитей (текс)	99

Испытания на растяжение, ползучесть и релаксацию напряжения проводили на универсальной измерительной установке. Начальная (зажимная) длина образца составляла 100 мм, скорость растяжения равнялась 20 мм·мин⁻¹. Диаграмма растяжения тканой ленты приведена на рис. 2.

Прочностные характеристики ленты при растяжении:

- прочность при растяжении, Н: 6670±184;
- удлинение при максимальной нагрузке, %: 32.30±0.66.

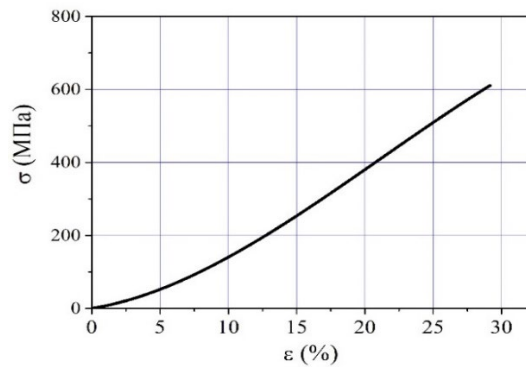
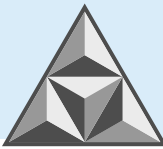


Рис. 2. Диаграмма растяжения тканой ленты

Fig. 2. Tensile diagram of woven tape

Расчет напряжений, возникающих в конструкциях текстильных фасадов, производили по формуле:

$$\sigma = \frac{F \cdot \rho}{n \cdot T} \quad (1)$$

где σ – напряжение МПа;

ρ – удельная плотность вещества нити, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$;

F – растягивающее усилие, Н;

T – линейная плотность нити, текс;

n – количество нитей в поперечном сечении ткани.

Для определения вязкоупругих характеристик тканой ленты проводили испытания на ползучесть и релаксацию напряжений. В первом случае они включали измерение роста деформации при постоянной нагрузке, а во втором – фиксировали снижение напряжения при постоянной деформации.

Процесс ползучести изучали в начальной стадии деформирования при различных уровнях нагрузки, Н (МПа): 200 (17.7); 400 (35.4); 600 (53.1); 800 (70.8); и 1000 (88.6). Образцы растягивали до заданного уровня нагрузки, фиксировали ползучесть в течение 10 мин. Экспериментальные кривые процесса ползучести тканой ленты для различных уровней заданного напряжения представлены на рис. 3, а.

В свою очередь, процесс релаксации напряжения изучали в начальной стадии деформирования образцов при различных уровнях начальной деформации (%): 2; 4; 6; 8; 10. Образцы растягивали при заданном уровне деформации, после чего фиксировали снижение внутренних напряжений в течение 10 мин (600 с).

Экспериментальные кривые, отвечающие процессу релаксации напряжения тканой ленты для различных уровней деформации, представлены на рис. 3, б.

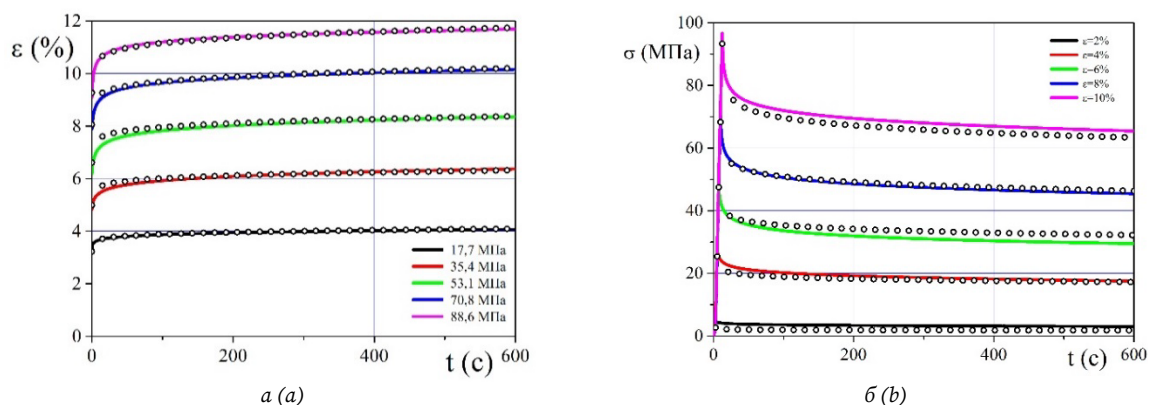
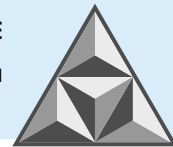


Рис. 3. Кривые ползучести (а) и релаксации (б) тканой ленты

Fig. 3. Creep (a) and relaxation curves (b) of woven tape



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 4 представлена вязкоупругая модель, используемая для расчетов. Для описания процессов ползучести и релаксации напряжения использовали формулу Прони (Prony) [18]. Ряд Прони представляет собой математическую модель, пригодную для описания зависящего от времени поведения материалов. С помощью данной модели можно описывать вязкоупругое поведение различных полимерных материалов, включая текстиль. Ряд Прони представляет модуль релаксации через сумму экспоненциальных членов затухания. При этом модель включает как упругие (мгновенные), так и вязкие (зависимые от времени) отклики. Используя серию элементов Прони, мы создаем базу для прогнозирования вязкоупругого поведения текстильного элемента при длительном воздействии. Полученные данные могут использоваться для оптимизации конструкций текстильных фасадов.

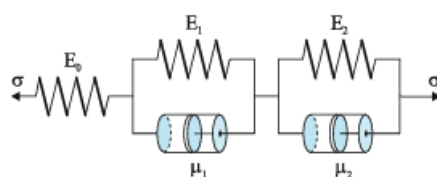


Рис. 4. Модель для описания вязкоупругих свойств текстильного фасада

Fig. 4. A model for describing the viscoelastic properties of a textile facade

Математическая модель, описывающая механическое поведение текстильных материалов – ряд Прони, представлена формулами (2-5).

Для прогнозирования ползучести нами использована формула:

$$D(\sigma, t) = \left(D_{0,10} + D_{1,10} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{1,10}}} \right) + D_{2,10} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{2,10}}} \right) \right) f(\sigma), \quad (2)$$

где D – податливость материала, МПа^{-1} ;

t – время, с.

$$f(\sigma) = b_3 \sigma^3 + b_2 \sigma^2 + b_1 \sigma + b_0, \quad (3)$$

где b_i и $D_{i,10}$ и τ'_i – константы материала.

Для прогнозирования релаксации напряжения использовали формулу:

$$E(\varepsilon, t) = \left(E_{0,10} - E_{1,10} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{1,10}}} \right) - E_{2,10} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_{2,10}}} \right) \right) g(\varepsilon), \quad (4)$$

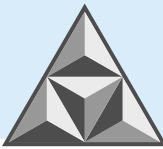
где E – модуль релаксации, МПа ;

при этом

$$g(\varepsilon) = a_3 \varepsilon^3 + a_2 \varepsilon^2 + a_1 \varepsilon + a_0, \quad (5)$$

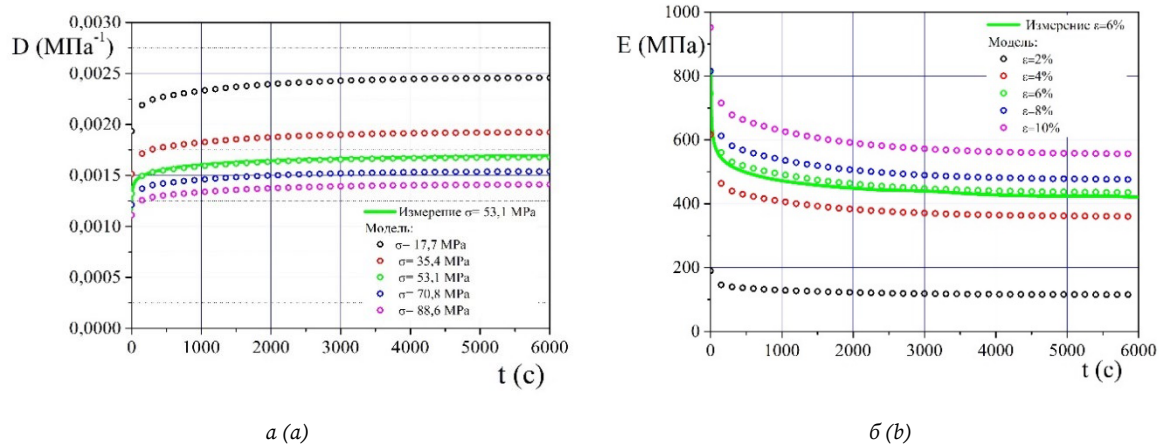
где a и $E_{i,10}$ и τ_i – константы материала (см. табл. 2).

В результате моделирования получены расчетные кривые ползучести и релаксации напряжения для тканой ленты. Данные значения в виде точек дополнительно нанесены на рис. 3, а и 3, б соответственно (для ползучести и релаксации напряжения). Кривые ползучести и релаксации напряжения спрогнозированы нами на один порядок.

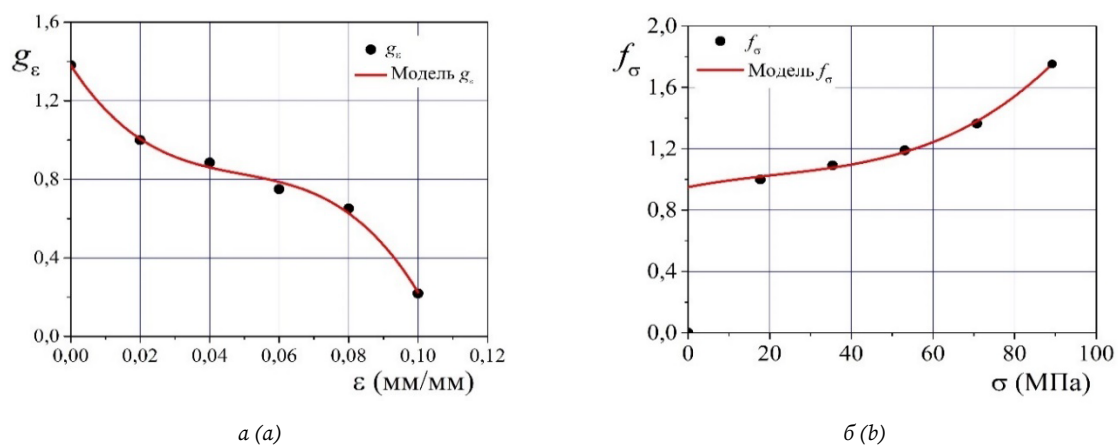
**Таблица 2.** Константы материала для элементов текстильных фасадов**Table 2.** Material constants for textile facade elements

Для ползучести				
$D_{0.10}$ (МПа ⁻¹)	$D_{1.10}$ (МПа ⁻¹)	$D_{2.10}$ (МПа ⁻¹)	τ'_1 (с)	τ'_2 (с)
0.00111	0.00016	0.00015	76.92600	1481.04600
b_3	b_2	b_1	b_0	
1.64E-06	-1.0400E-04	0.0052	0.9500	
Для релаксации напряжения				
$E_{0.10}$ (МПа)	$E_{1.10}$ (МПа)	$E_{2.10}$ (МПа)	τ_1 (с)	τ_2 (с)
871.03	212,154	134.883	66.67	1423.08
a_3	a_2	a_1	a_0	
-3279.1667	483.1964	-27.0894	1.3809	

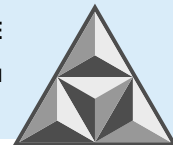
Для подтверждения результатов прогнозирования дополнительно проведены два испытания длительностью 6000 с. Испытание на ползучесть проведено при напряжении в 53.1 МПа. Для релаксации напряжения измерения осуществляли при заданном уровне 6%. На рис. 5 показаны общие функции податливости и релаксирующего модуля для длительности 6000 с.

**Рис. 5.** Прогнозирование ползучести (а) и релаксации напряжения (б) тканой ленты**Fig. 5.** Prediction of creep (a) and relaxation curves (b) of woven tape

Функции f и g определены нами по выражениям (4) и (6). Итоги расчетов представлены на рис. 6.

**Рис. 6.** Прогнозируемая нелинейная функция деформации $g(\varepsilon)$ и напряжения $f(\sigma)$ тканых конструкций**Fig. 6.** Predicted nonlinear strain $g(\varepsilon)$ and stress function of $f(\sigma)$ woven structures

Результаты прогнозирования находятся в хорошей корреляции с экспериментальными кривыми.



Из полученных зависимостей видно, что исследуемый материал изменяет свойства нелинейно – как по деформации, так и по уровню напряжения. Кроме того, материал конструкции демонстрирует изменение характеристик во времени, которое хорошо описывается моделью *Prony*.

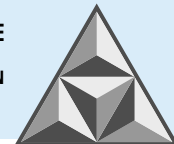
ВЫВОДЫ

Получены расчетные кривые ползучести и релаксации напряжения для исследуемого конструктивного элемента текстильного фасада. Материал конструкции демонстрирует изменение свойств во времени эксплуатации, описываемое моделью *Prony*.

Представленные экспериментальные данные, в сочетании с таблицей констант материала и предлагаемыми методами моделирования, дают ценную информацию для прогнозирования долгосрочного поведения конструкций текстильных фасадов при воздействии внешних факторов, что имеет высокую научную и практическую значимость в контексте их проектирования, обслуживания и повышения устойчивости.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Bridgens B., Birchall M.** Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures // *Engineering Structures*. 2012. Vol. 44. P. 1-12.
2. **Colman G., Bridgens B., Gosling P. et al.** Shear behaviour of architectural fabrics subjected to biaxial tensile loads // *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2014. Vol. 66. P. 163-174. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.07.015.
3. **Bridgens B., Gosling P.** Direct stress-strain representation for coated woven fabrics // *Computers & Structures*. 2004. № 82 (23-26). P. 1913-1927. DOI: 10.1016/j.compstruc.2003.07.005
4. **Hörteborn E., Zboinska M.** Exploring expressive and functional capacities of knitted textiles exposed to wind influence // *Frontiers of Architectural Research*. 2021. № 10 (3). P. 669-691. DOI: 10.1016/j.foar.2021.02.003
5. **Heinzelmann F., Bristogianni T., Teuffel P.** Functional-layered textiles in architecture // Llorens J. (Ed.). *Fabric Structures in Architecture*. Woodhead Publishing. 2015. P. 159-186. DOI: 10.1016/B978-1-78242-233-4.00005-X
6. **Lilley D., Bridgens B., Davies A., Holstov A.** Ageing (dis)gracefully: Enabling designers to understand material change // *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 220. P. 417-430. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.304
7. **Monticelli C., Zanelli A., Campioli A. et al.** Life cycle assessment of textile façades, beyond the current cladding systems // *Proceedings of the TensiNet Symposium*. Istanbul, Turkey. 2013. P. 467-476.
8. **Кущенко Т.В., Бъядовский Д.А., Блинов С.А., Сулейманов А.М.** Расчет долговечности материалов тентовых конструкций с учетом факторов эксплуатации // *Актуальные проблемы военно-научных исследований*. 2019. № 3 (4). С. 283-292.
9. **Bueno B., Wilson H., Sunkara S. et al.** Simulation-based design of an angle-selective and switchable textile shading system // *Building and Environment*. 2020. Vol. 184. Art. 107227. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107227
10. **Procaccini G., Prieto A., Knaack U. et al.** Textile Membrane for Facade Retrofitting: Exploring Fabric Potentialities for the Development of Innovative Strategies // *Buildings*. 2024. № 14 (1). Art. 86. DOI: 10.3390/buildings14010086
11. **Li Q., Monticelli C., Kutlu A., Zanelli A.** Environmental performance analysis of textile envelope integrated flexible photovoltaic using life cycle assessment approach // *Journal of Building Engineering*. 2024. Vol. 89. Art. 109348. DOI: 10.1016/j.jobe.2024.109348
12. **Srisuwan T.** Fabric Façade: An Intelligent Skin // *International Journal of Building, Urban, Interior and Landscape Technology*. 2017. Vol. 9. P. 7-13. URL: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/BUILT/article/view/110714> (дата обращения 12.03.2025).
13. **Чесноков А.В., Михайлов В.В.** Каркасно-тентовые конструкции покрытия шедового типа // *Изв. высш. учеб. заведений. Строительство*. 2022. № 5 (761). С. 41-56.



14. **Friedrich D.** How building experts evaluate the sustainability and performance of novel bioplastic-based textile façades: An analysis of decision making // *Building and Environment*. 2022. Vol. 207. Part B. Art. 108485. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108485.
15. **Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures.** Luxembourg: Publications Office of the European Union. 2023. DOI: 10.2760/94647.
16. **ГОСТ Р 56439-2015.** Комплекты каркасно-тентовых укрытий для спортивных площадок. М.: Стандартинформ, 2015. 24 с.
17. **Удлер Е.М.** Некоторые аспекты тентовой терминологии // *Изв. Казанского гос. арх.-строит. ун-та*. 2017. № 4 (42). С. 196-203.
18. **Sorvari J., Malinen M.** Numerical interconversion between linear viscoelastic material functions with regularization // *International Journal of Solids and Structures*. 2007. №. 44 (3-4). P. 1291-1303. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.06.029.

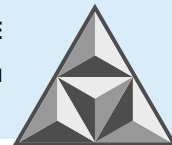
Поступила в редакцию 12.04.2025

Одобрена после рецензирования 29.04.2025

Принята к опубликованию 15.05.2025

REFERENCES

1. **Bridgens, B.N. and Birchall, M.** (2012), "Form and function: The significance of material properties in the design of tensile fabric structures", *Engineering Structures*, vol. 44, pp. 1-12.
2. **Colman, G., Bridgens, B.N., Gosling, P.D. et al.** (2014), "Shear behaviour of architectural fabrics subjected to biaxial tensile loads", *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 66, pp. 163-174. DOI: 10.1016/j.compositesa.2014.07.015
3. **Bridgens, B.N. and Gosling, P.D.** (2004), "Direct stress-strain representation for coated woven fabrics", *Computers & Structures*, vol. 82, no. 23-26, pp. 1913-1927. DOI: 10.1016/j.compstruc.2003.07.005
4. **Hörteborn, E. and Zboinska, M.A.** (2021), "Exploring expressive and functional capacities of knitted textiles exposed to wind influence", *Frontiers of Architectural Research*, vol. 10, no. 3, pp. 669-691. DOI: 10.1016/j.foar.2021.02.003
5. **Heinzelmann, F., Bristogianni, T. and Teuffel, P.** (2015), "Functional-layered textiles in architecture", in Llorens, J.I. (Ed.), *Fabric Structures in Architecture*, Woodhead Publishing, pp. 159-186. DOI: 10.1016/B978-1-78242-233-4.00005-X
6. **Lilley, D., Bridgens, B., Davies, A. and Holstov, A.** (2019), "Ageing (dis)gracefully: Enabling designers to understand material change", *Journal of Cleaner Production*, vol. 220, pp. 417-430. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.304
7. **Monticelli, C., Zanelli, A., Campioli, A., et al.** (2013), "Life cycle assessment of textile façades, beyond the current cladding systems", *Proceedings of the TensiNet Symposium, Istanbul, Turkey*, pp. 467-476.
8. **Kutsenko, T.V., Byadovsky, D.A., Blinov, S.A., Sulejmanov, A.M.** (2019), "Durability assessment of tent materials considering operational factors", *Current Issues in Military Science Research*, vol. 3, no. 4, pp. 283-292 (in Russian).
9. **Bueno, B., Wilson, H.R., Sunkara, S., Sepúlveda, A. and Kuhn, T.E.** (2020), "Simulation-based design of an angle-selective and switchable textile shading system", *Building and Environment*, vol. 184, art. 107227. DOI: 10.1016/j.buildenv.2020.107227
10. **Procaccini, G., Prieto, A., Knaack, U., Monticelli, C. and Konstantinou, T.** (2024), "Textile Membrane for Façade Retrofitting: Exploring Fabric Potentialities for the Development of Innovative Strategies", *Buildings*, vol. 14, no. 1, art. 86. DOI: 10.3390/buildings14010086
11. **Li, Q., Monticelli, C., Kutlu, A. and Zanelli, A.** (2024), "Environmental performance analysis of textile envelope integrated flexible photovoltaic using life cycle assessment approach", *Journal of Building Engineering*, vol. 89, art. 109348. DOI: 10.1016/j.job.2024.109348
12. **Srisuwan, T.** (2017), "Fabric Facade: An Intelligent Skin", *International Journal of Building, Urban, Interior and Landscape Technology*, vol. 9, pp. 7-13. Available at: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/BUILT/article/view/110714> (accessed 12.03.2025).

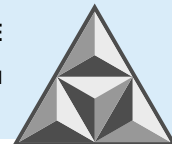


13. **Chesnokov, A.V. and Mikhailov, V.V.** (2022), "Frame-tent structures of shed-type coverings", *News of Higher Educational Institutions. Construction*, vol. 5, no. 761, pp. 41-56 (in Russian).
14. **Friedrich, D.** (2022), "How building experts evaluate the sustainability and performance of novel bioplastic-based textile façades: An analysis of decision making", *Building and Environment*, vol. 207, part B, art. 108485. DOI: 10.1016/j.buildenv.2021.108485
15. **Prospect for European Guidance for the Structural Design of Tensile Membrane Structures** (2023), Publications Office of the European Union, Luxembourg. DOI: 10.2760/94647
16. GOST R 56439-2015 (2015) "Frame-tent shelter kits for sports grounds", Moscow: Standartinform, 24 p. (in Russian).
17. **Udler, E.M.** (2017), "Some aspects of tent terminology", *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*, vol. 4, no. 42, pp. 196-203 (in Russian).
18. **Sorvari, J. and Malinen, M.** (2007), "Numerical interconversion between linear viscoelastic material functions with regularization", *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, no. 3-4, pp. 1291-1303. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2006.06.029

Received 12.04.2025

Approved 29.04.2025

Accepted 15.05.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.3

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-35-52

Динамика кристаллизации и структурно-механические свойства магниймодифицированного пеностекла в многокомпонентных силикатных системах

С.В. Федосов, М.О. Баканов, И.С. Грушко, И.А. Кузнецов

Сергей Викторович Федосов¹, Максим Олегович Баканов^{1,*}

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Российская Федерация

*fedosov-academic53@mail.ru, mask-13@mail.ru**

Ирина Сергеевна Грушко²

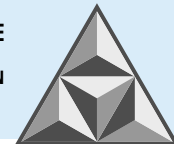
²Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова,
Новочеркасск, Российская Федерация

grushkois@gmail.com

Илья Александрович Кузнецов³

³Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Российская Федерация

ikuz1999@list.ru



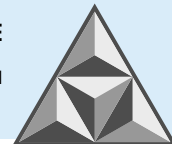
Исследовано влияние оксида магния на динамику кристаллизации и структурно-механические свойства пеностекла в системе «стекломасса – газ – кристаллиты». С использованием методов термодинамического моделирования, растровой электронной микроскопии и энергодисперсионного микроанализа установлено, что введение MgO индуцирует формирование $MgFe_2O_4$ и Mg-Са-силикатов, при этом доля кварца снижается на 18%. Оптимизация концентрации MgO (7.5 мас%) обеспечивает рост прочности на изгиб до 86.5 МПа и микротвердости до 7.2 ГПа. Системный подход к управлению температурными режимами синтеза позволяет стабилизировать диссипативные структуры расплава и минимизировать внутренние напряжения. Результаты подтверждают возможность направленного регулирования морфологии кристаллитов (50-200 нм) для создания материалов с прогнозируемыми теплоизоляционными и механическими характеристиками, согласно ГОСТ 33949-2016.

Ключевые слова: пеностекло, оксид магния, динамика кристаллизации, структурно-механические свойства, термодинамическое моделирование, стеклокерамические системы, микроструктурная гетерогенность

Для цитирования:

Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С., Кузнецов И.А. Динамика кристаллизации и структурно-механические свойства магниймодифицированного пеностекла в многокомпонентных силикатных системах // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 2. С. 35-52. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-35-52



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-35-52

Dynamics of crystallization and structural and mechanical properties of magnesium modified foam glass in multicomponent silicate systems

S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, I.S. Grushko, I.A. Kuznetsov

Sergey V. Fedosov¹, Maksim O. Bakanov^{1,*}

¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

*fedosov-academic53@mail.ru, mask-13@mail.ru**

Irina S. Grushko²

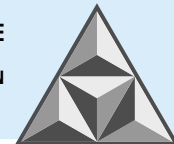
²South-Russian State Polytechnical University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation

grushkois@gmail.com

Ilya A. Kuznetsov³

³Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Ivanovo, Russia

ikuz1999@list.ru



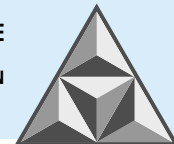
The authors investigate the impact of magnesium oxide on the dynamics of crystallisation and structural-mechanical properties of foam glass in the system "glass mass – gas – crystallites". The authors have established by methods of thermodynamic modelling, scanning electron microscopy and energy dispersive microanalysis that the introduction of MgO induces the formation of MgFe_2O_4 and Mg-Ca-silicates, reducing the proportion of quartz by 18%. Optimisation of MgO concentration (7.5 wt%) provided an increase in bending strength up to 86.5 MPa and microhardness up to 7.2 GPa. A systematic approach to controlling the temperature conditions of synthesis allowed us to stabilise the dissipative structures of the melt and minimise internal stresses. The results confirm the possibility of directional control of crystallite morphology (50-200 nm) to create materials with predicted thermal insulation and mechanical characteristics, according to GOST 33949-2016.

Keywords: foam glass, magnesium oxide, dynamics of crystallisation, structural and mechanical properties, thermodynamic modelling, glass-ceramic systems, microstructural heterogeneity

For citation:

Fedosov S.V., Bakanov M.O., Grushko I.S., Kuznetsov I.A. Dynamics of crystallization and structural and mechanical properties of magnesium modified foam glass in multicomponent silicate systems // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 2. P. 35-52.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-35-52



ВВЕДЕНИЕ

Пеностекло представляет собой сложную гетерофазную систему, где доминирующая газообразная компонента ($\approx 90\%$) формирует дисперсную среду, а твердая фаза образует матричную основу. Структурная организация материала соответствует замкнуто-ячеистому композиту с выраженной пространственной однородностью морфологических параметров ячеек (размеры, геометрия и топология распределения). Представленная структура детерминирует ключевые эксплуатационные характеристики – минимальное водопоглощение и оптимальное соотношение плотность - прочность, обусловленное синергетическим взаимодействием фаз [1].

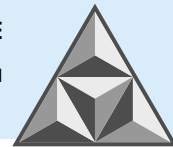
Химический состав твердофазной матрицы, согласно традиционной парадигме, соответствует натрий-кальций-силикатным стеклам, аналогичным по компонентному составу листовым стеклам. Однако роль кристаллизационных процессов в формировании системных свойств материала остается дискуссионной. Экспериментальные исследования И.И. Китайгородского и Т.Л. Ширкевич [2] демонстрируют совместимость ограниченной кристаллизации расплава с формированием гомогенной ячеистой структуры. С другой стороны, в работах З. Червинского [3, 4], Ф. Шилла [5] и Н.П. Садченко [6] показано негативное влияние кристаллообразования на кинетику вспенивания и функциональные параметры конечного продукта, и данный феномен связывается с нарушением реологических свойств расплава и возникновением структурных дефектов, описанных в [7].

Вместе с тем модели кинетики структурообразования пеностекла [8, 9] не включают кристаллизационные факторы в систему уравнений, учитывающих динамику пенообразования. Данный методологический пробел актуализирует необходимость комплексного исследования межфазных взаимодействий в системе «стекломасса - газ - кристаллиты», где процессы зародышеобразования и роста кристаллов оказывают влияние на управление структурной эволюцией материала. Уточнение роли кристаллической фазы требует применения методов многомасштабного моделирования, учитывающего влияние термодинамических, реологических и диффузионных факторов в ходе фазовых превращений.

При рассмотрении процессов структурообразования пеностекла особое значение приобретает исследование кристаллизационных явлений в условиях пористой матрицы, где синергетическое взаимодействие фазовых компонентов определяет функциональные характеристики материала. Технологические добавки, выступающие элементами управления в системе пеностекольной шихты, определяют кинетику синтеза, что актуализирует изучение роли оксида магния как структурного модификатора.

С позиции химии силикатных систем, модификаторы – это компоненты, не формирующие непрерывную каркасную сетку, но занимающие промежуточное положение в структурной матрице. К данной категории относятся оксиды I-II групп Периодической системы Д.И. Менделеева, включая щелочноземельные элементы (Mg, Ca, Sr, Ba), катионы которых, обладая повышенным зарядом, компенсируют электростатический дисбаланс анионного каркаса. В отличие от щелочных аналогов, ионы Mg^{2+} , интегрируясь в структурные полости, частично восстанавливают связность сети за счет образования «мостиков» между разорванными кремнекислородными цепочками [10].

Термодинамический анализ системы «MgO – стекломасса» показывает неоднозначность влияния оксида магния на реологические параметры: при высокотемпературном синтезе наблюдается значительное снижение вязкости расплава, тогда как в низкотемпературной



области этот эффект минимизируется [11, 12]. С позиции теории кристаллизации стекол, MgO выступает каталитическим агентом, инициирующим процессы зародышеобразования и роста кристаллических фаз. Данный тезис подтверждается исследованиями стеклокерамических систем, где введение MgO приводило к увеличению степени кристалличности и оптимизации иммобилизационных свойств по отношению к тяжелым металлам [13, 14].

Кинетические особенности кристаллизационных процессов, регулируемых MgO , раскрыты в работе [15]: рост концентрации оксида магния индуцирует переход от объемного к поверхностному механизму кристаллизации с одновременным увеличением энергии активации. Микроструктурный анализ выявил корреляцию между содержанием MgO и морфологией кристаллитов – от сферических пироксеновых образований до стержневидных форстеритовых фаз. Эти наблюдения согласуются с концепцией управления структурной эволюцией материала путем варьирования состава модифицирующих добавок.

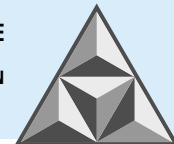
В границах производственных процессов добавка MgO выполняет двойную функцию: с одной стороны, выступает регулятором реакционной способности твердого раствора [16, 17], а с другой – служит фактором управления морфогенезом кристаллической составляющей. Подобная многокомпонентность воздействия требует интегрального подхода при проектировании состава пеностекельных шихт, учитывающего как термодинамические ограничения, так и кинетические закономерности фазовых превращений.

В рамках исследования системной оптимизации стеклокерамических композитов на основе техногенных компонентов (зола-унос, экранное стекло, шлак полировки керамики) установлено, что вариация концентрации MgO в диапазоне 1.1-7.5 мас% индуцирует перестройку механизмов кристаллизации. Кинетический анализ выявил доминирование поверхностной кристаллизации над объемной, сопровождаемое монотонным снижением температурных параметров системы – температуры стеклования (T_g) и пика кристаллизации (T_p). Фазовые трансформации демонстрируют четкую корреляцию с химическим составом: в присутствии 1.1% MgO формируется пластинчатый β -воластонит ($CaSiO_3$), тогда как увеличение концентрации модификатора до 3.3-7.5% вызывает перераспределение фазового состава в пользу пироксена ($CaMgSi_2O_6$) и форстерита (Mg_2SiO_4) [18].

Рентгенофазовый анализ зафиксировал прогрессирующий рост интенсивности дифракционных пиков, свидетельствующий об усилении дальнего порядка в системе. Микроструктурная эволюция, изученная методами электронной микроскопии, проявилась в переходе от дискретных кристаллитов (0.2-0.5 мкм) к консолидированной субмикронной матрице с улучшенной морфологической однородностью. Оптимизация функциональных характеристик достигает экстремума при 7.5% MgO : плотность 2.77 г·см⁻³, водопоглощение 0.03%, прочность на изгиб 86.5 МПа, микротвердость 7.2 ГПа, и это отвечает требованиям, предъявляемым к конструкционным теплоизоляционным материалам.

Системно-ориентированный подход к формулировке цели работы предполагает установление взаимосвязей между параметрами модификации (путем введения оксида магния), структурной организацией пеностекла и его эксплуатационными свойствами. Для реализации данной целевой функции сформулирован следующий комплекс задач:

- проектирование многокомпонентных шихт с включением MgO , учитывающее принципы синергетического взаимодействия в системе «стеклообразователь-модификатор-поризатор»;
- синтез лабораторных образцов пеностекла с контролируемыми режимами термообработки, обеспечивающими управляемую кристаллизацию;



– анализ микроструктурных особенностей методом растровой электронной микроскопии с энергодисперсионной спектроскопией, направленный на установление топологии распределения кристаллических фаз и их морфометрических параметров;

– комплексная оценка функциональных свойств, включая механические, гидрофизические и термические характеристики, с последующим построением корреляционных моделей «состав – структура – свойство».

Предлагаемая структура исследований базируется на принципах многомасштабного моделирования материалов, где варьирование состава модификаторов рассматривается как инструмент управления эволюцией диссипативных структур в процессе пенообразования и кристаллизации.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В рамках оптимизации компонентного состава шихт для синтеза пеностекла (табл. 1) нами реализован принцип синергетического сочетания функциональных модулей.

Таблица 1. Оксидный состав шихт пеностекла

Table 1. Oxide composition of cellular glass charges

№ образца	Оксидный состав, масс. %							
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O
1	62.57	0.25	7.45	3.25	0.04	3.19	7.17	11.25
2	61.88	0.25	7.29	3.18	0.04	3.12	8.53	11.00
№ образца	Оксидный состав, масс. %							
	K ₂ O	P ₂ O ₅	BaO	SO ₃	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	B ₂ O ₃	
1	1.29	0.04	0.05	0.03	0.02	0.02	3.46	
2	1.25	0.04	0.04	0.03	0.02	–	3.40	

Стеклобой выступает матричным стеклообразователем, золошлаковая смесь (ЗШС) – техногенным источником полиоксидных компонентов, а Na₂B₄O₇·10H₂O играет роль сплавляющего агента, снижающего температуру синтеза. Введение антрацита как газообразователя и технического мела в качестве минерализатора согласуется с концепцией управления реологическими и порообразующими характеристиками системы [19].

Ключевым элементом модификации структурно-функциональных свойств выступил оксид магния, интегрированный в состав шихты в рамках подхода целенаправленного управления кристаллизационными процессами. С позиции управления производственными процессами, каждый компонент шихты представляет собой подсистему с определенной целевой функцией:

- стеклобой обеспечивает формирование силикатного каркаса;
- ЗШС вносит оксиды железа и алюминия, модифицирующие термическую стабильность;
- антрацит генерирует газовую фазу при термическом разложении;
- MgO выступает каталитическим агентом для контролируемой кристаллизации.

Согласно принципам управления термодинамическими параметрами структурообразования, разработан многостадийный температурный режим синтеза (рис. 1), интегрирующий фазовые превращения и релаксационные процессы [20].

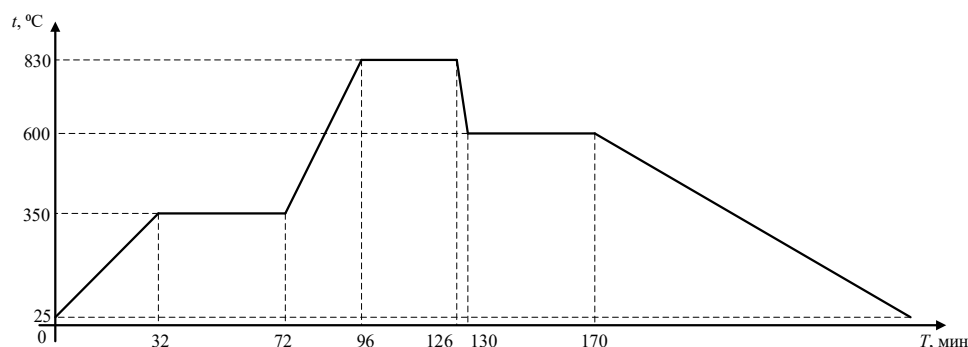
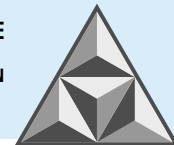


Рис. 1. Температурно-временной режим синтеза образцов пеностекла

Fig. 1. Temperature and time mode of synthesis for foam glass images

Иницирующая стадия предполагает загрузку образцов в печь при температуре 25°C с последующим нестационарным нагревом ($20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$) до 350°C, где 40-минутная изотермическая выдержка обеспечивает активацию газообразователей и формирование первичных зародышей пор.

Последующий переход в высокотемпературную область (830°C , $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$) и экспозиция 30 мин направлены на оптимизацию кинетики порообразования и стабилизацию диссипативных структур расплава. Резкое охлаждение до 600°C инициирует процессы стеклования с параллельным управлением кристаллизационной кинетикой посредством введения 40-минутной изотермической стадии, что минимизирует внутренние напряжения в формируемой матрице.

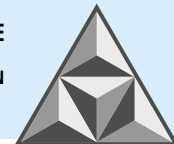
Заключительный этап контролируемого отжига ($2^{\circ}\text{C}\cdot\text{мин}^{-1}$, снижение температуры до 25°C) реализует принцип постепенной релаксации остаточных напряжений, обеспечивая гомогенизацию микроструктуры. Данный алгоритм термообработки представляет собой последовательность взаимосвязанных подпроцессов, где каждый температурный интервал выполняет целевую функцию:

- низкотемпературный диапазон – активация газогенерирующих реакций;
- высокотемпературная зона – управление вязкостными характеристиками и морфологией пор;
- промежуточное охлаждение – стабилизация кристаллической составляющей;
- отжиг – формирование равновесной микроструктуры.

Представленная многоуровневая организация циклов термической обработки, основанная на предшествующих исследованиях [20], демонстрирует взаимосвязь между кинетическими ограничениями и термодинамическими возможностями системы, обеспечивая воспроизводимое получение материала с заданными функциональными характеристиками.

Анализ микроструктурных особенностей и элементного состава пеностекла осуществлен с применением комплекса растровой электронной микроскопии (РЭМ) *VEGA II LMU (Tescan)* и энергодисперсионного микроанализа (EDS) *INCA ENERGY 450/XT*, оснащенного детектором *Silicon Drift (SDD)*. Интеграция указанных инструментов обеспечивает многоуровневое исследование морфологии, фазового распределения и химической гетерогенности материала. Детектор обратнорассеянных электронов (BE), используемый для визуализации, позволяет дифференцировать фазы по среднему атомному весу: области с повышенной плотностью атомных ядер визуализируются в светлых тонах, что коррелирует с локальными вариациями химического состава [1].

Отмечаем, что анализ ограничен пространственным разрешением аппаратуры, обусловленным локальным взаимодействием электронного пучка с образцом.



Наличие стеклофазы в зоне сканирования создает артефакты сигнала, затрудняющие количественную оценку состава микровключений. Дополнительным системным ограничением выступает неспособность EDS-детектора идентифицировать легкие элементы (B, N, Li), что связано с поглощением их характеристического рентгеновского излучения в углеродном покрытии образца, нанесенном для минимизации поверхностного заряжения [2].

В рамках теории кристаллизации стекла полученные данные микроструктурного анализа позволяют установить взаимосвязь между морфологией кристаллитов, распределением модифицирующих оксидов, включая MgO, и термодинамическими условиями синтеза. Результаты РЭМ-исследований, представленные ниже, включают топографию поверхности, пространственное распределение фаз и корреляцию элементного состава с эксплуатационными свойствами материала.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Образец 1

Структурная организация стеклофазы демонстрирует иерархическую гетерогенность, выраженную в формировании мозаичных блоков (сотни микрометров) с четкими границами (рис. 2, 3), интегрированных в матрицу с дифференцированным химическим составом (рис. 4; табл. 2, участок 1). Количественное соотношение блоков и межфазной матрицы в пространстве образца варьируется (при визуальной оценке доли блоков $\approx 70\%$). Внутриблоковые зоны характеризуются минимальной химической дисперсией, за исключением железа, неоднородная концентрация которого связана с локальными колебаниями оксидного состояния (рис. 3, а). Межфазные области проявляют выраженную композиционную нестабильность, обусловленную градиентами диффузии компонентов.

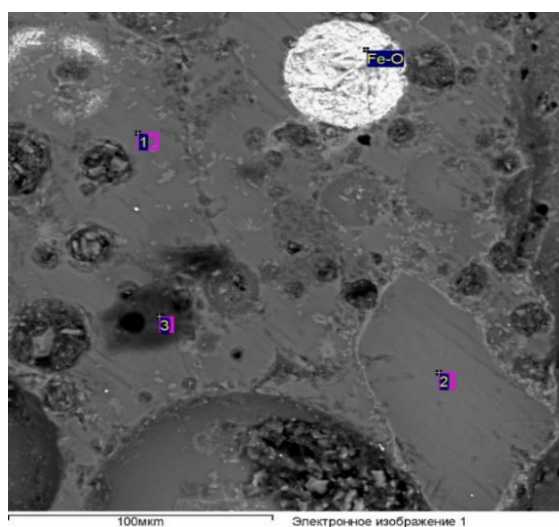


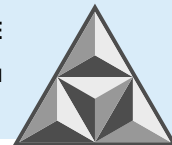
Рис. 2. Вариации состава участков стеклофазы, демонстрирующие мозаичное строение стекломассы:

1 – «цементирующая» масса; 2 – типичные включения; 3 – редкие участки, обогащенные легкими элементами (предположительно B, C). Fe-O – оксид железа (возможно, магнетит)

Fig. 2. Variations in the composition of glass phase sections, demonstrating the mosaic structure of the glass mass: 1 – “cementing” mass, 2 – typical inclusions, 3 – rare sections enriched in light elements (presumably B, C). Fe-O – iron oxide (possibly magnetite)

Микрофазовый анализ выявил гетерогенную систему включений:

– силикатные фазы (рис. 4, а, б) – кластеры пироксенов диопсид-геденбергитового ряда (рис. 4, в, г) и Mg-Ca-силикаты волластонитового типа (рис. 4, б), локализованные на границах блоков и внутренних поверхностях пор;



– оксидные системы – магнетит-хромшпинелевые фазы и субмикронные включения металлического железа (рис. 5, а);

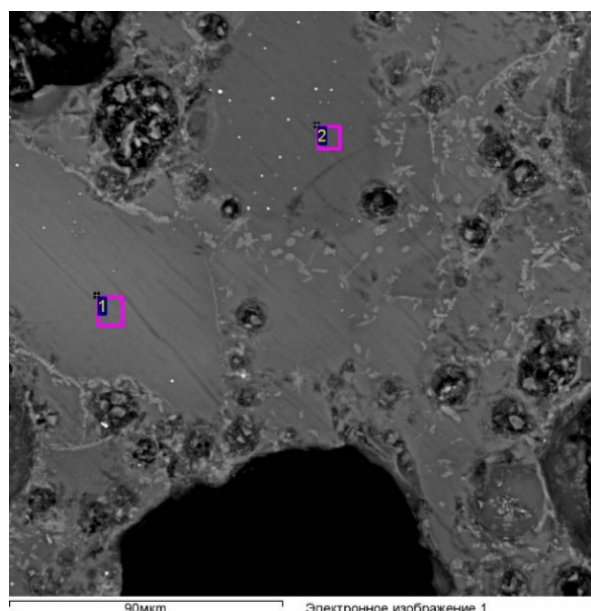
– кремнеземистые образования – кристаллы и агрегаты SiO_2 , преобладающие в межблоковых зонах (рис. 3, б).

Морфология включений указывает на взаимосвязь поверхностной и граничной кристаллизации, где тесное срастание зерен со стеклофазой, подтвержденное микроанализом, требует применения кристаллохимического моделирования для полной идентификации.

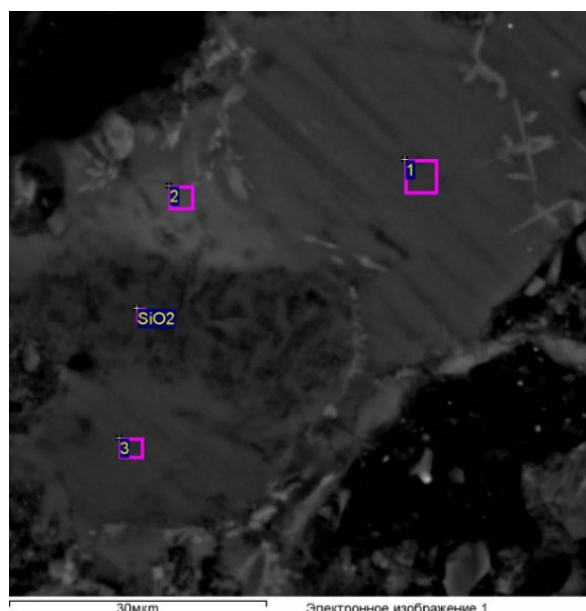
Таблица 2. Вариации состава участков стеклофазы, мас. %. (рис. 2)

Table 2. Variations in the composition of glass phase sections, wt. %. (Fig. 2)

Участок	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Cl	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	Итого
1	12.10	3.00	2.12	66.09	–	–	1.21	8.47	0.07	0.32	2.13	95.51
2	4.66	1.29	23.39	55.68	–	–	1.35	1.91	1.10	–	8.80	98.17
3	5.67	1.49	5.43	44.43	1.49	0.10	1.24	4.79	0.22	0.15	0.71	65.72



а (а)



б (б)

Рис. 3. Примеры строения образца 1: а – пример обычного строения стеклофазы: обедненные Na₂O и обогащенные Al₂O₃ «блоки» (1, 2) и цементирующая масса; по границам «блоков» развиты кристаллы силикатов. В «блоке» 2 железо находится в составе оксидных (возможно, магнетитовых) частиц; б – вариации состава в зоне между «блоками»; SiO₂ – фаза кремнезема

Fig. 3. Examples of the sample 1 structure: а – an example of the usual glass phase structure: Na₂O-depleted and Al₂O₃-enriched 'blocks' (1, 2) and cementing mass; silicate crystals are developed along the boundaries of the 'blocks'. Iron in 'block' 2 is in the composition of oxide (probably magnetite) particles; б – variations of composition in the zone between 'blocks'; SiO₂ – silica phase

Таблица 3. Количественный состав участков, мас%

Table 3. Quantitative composition of sections, wt. %

Участок	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	Итого
рис. 3, а										
1	4.26	1.69	19.89	57.70	1.50	1.96	1.00	-	7.68	95.68
2	5.29	1.40	27.89	58.32	2.15	0.51	0.88	0.03	0.38	96.85
рис. 3, б										
1	11.06	3.18	1.49	69.24	1.07	9.97	0.01	0.32	0.81	97.15
2	8.34	0.38	13.31	54.42	2.20	0.41	0.57	-	16.64	96.27
3	6.71	0.65	28.03	53.94	2.15	0.12	1.19	-	3.24	96.03

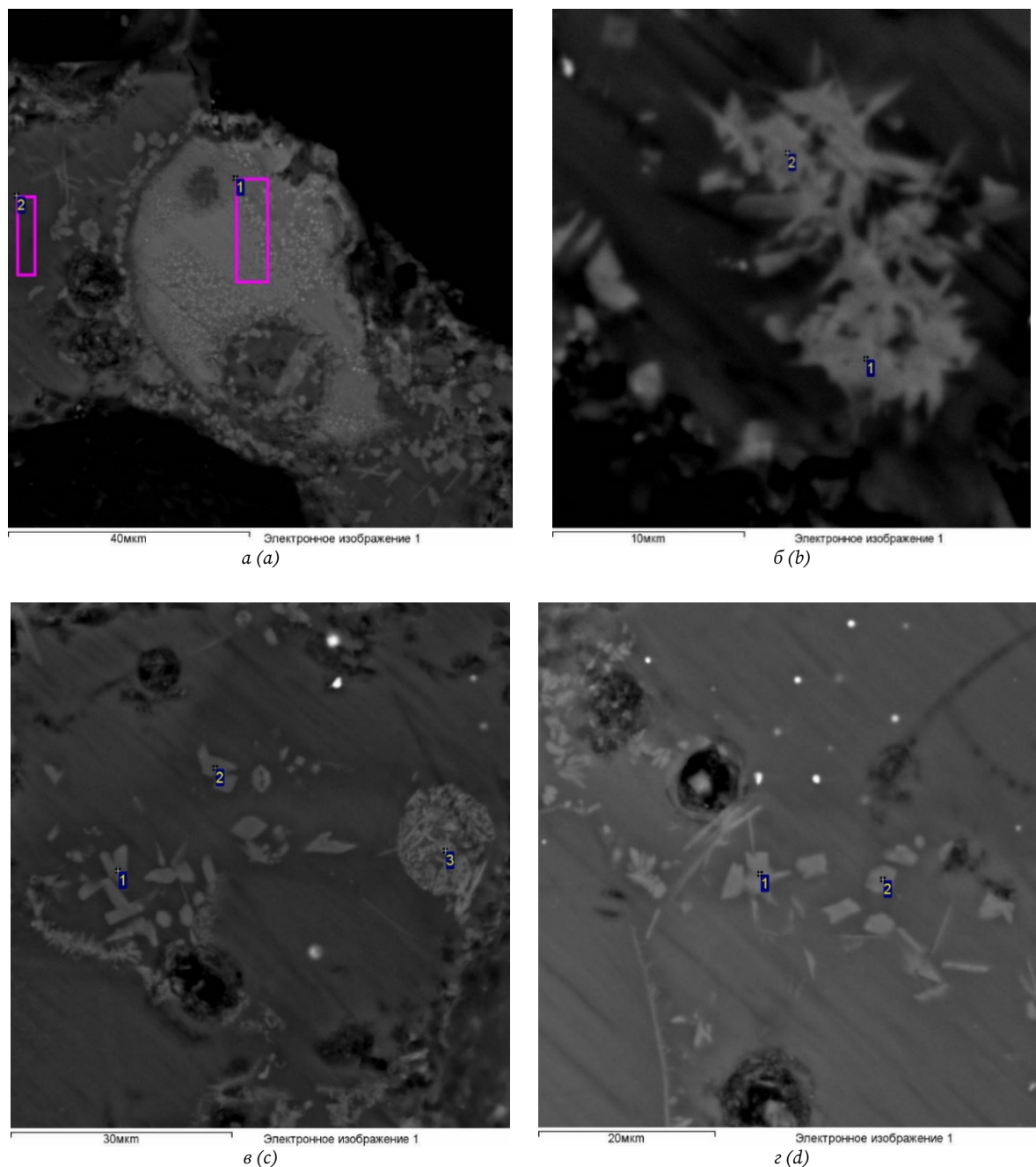
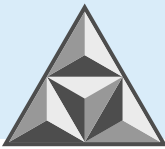


Рис. 4. Примеры строения микрофаз: *a* – на участке, насыщенном Fe-Ca-силикатами (1), и с включением стекла (2); *б* – агрегаты Mg-Ca-силикатами состава, близкого к wollastonиту; *в* – типичные фазы: Mg-Ca-силикаты пироксенового состава (1 и 2) и агрегат силиката титана (предположительно), образующего тесное срастание со стеклофазой; *г* – фазы пироксенового состава

Fig. 4. Examples of microphase structure: *a* – in the area saturated with Fe-Ca-silicates (1) and with glass inclusion (2); *b* – aggregates of Mg-Ca-silicates of composition close to wollastonite; *c* – typical phases: Mg-Ca-silicates of pyroxene composition (1 and 2) and aggregate of titanium silicate (presumably), forming close aggregation with glass phase; *d* – phases of pyroxene composition

Таблица 4. Количественный состав участков, мас%

Table 4. Quantitative composition of sections, wt. %

Участок	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Cr ₂ O ₃	FeO	Итого
1	1.96	12.38	1.69	55.10	0.22	18.63	0.73	0.58	5.95	97.25
2	2.25	12.07	1.62	55.44	0.35	18.58	0.59	0.43	6.04	97.37
3	2.86	0.40	5.01	28.98	0.28	9.78	50.41	-	1.13	98.85

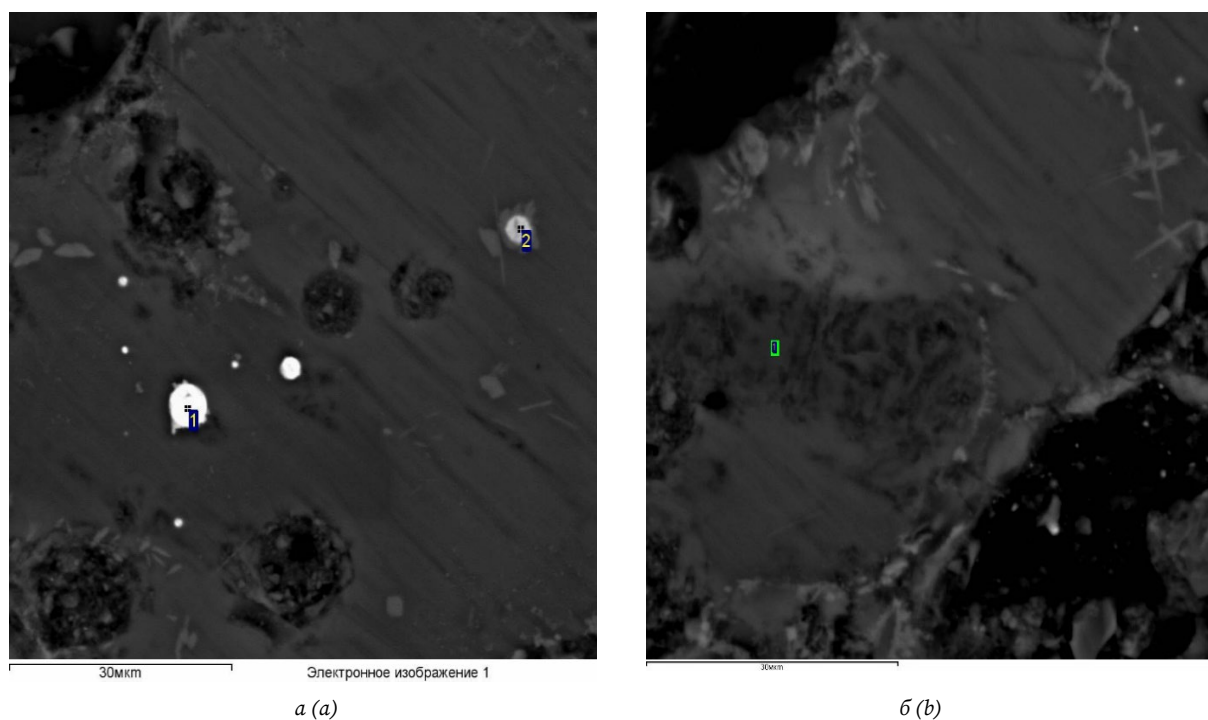
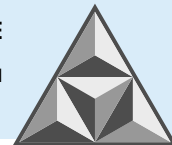


Рис. 5. Новые образцы микрофаз: *а* – частицы железа в окисленной (1) и неокисленной (2) форме; *б* – типичный облик фазы SiO_2
Fig. 5. New samples of microphases: *a* – iron particles in oxidised (1) and non-oxidised (2) forms; *b* – typical appearance of SiO_2 phase

Подход к интерпретации данных предполагает учет термодинамических условий синтеза, определяющих перераспределение элементов между блоками и межфазными областями.

Образец 2

Вариации состава стеклофазы приведены на рис. 6. Наиболее существенные из них отмечаются на участках между «блоками» (рис. 6, *б*).

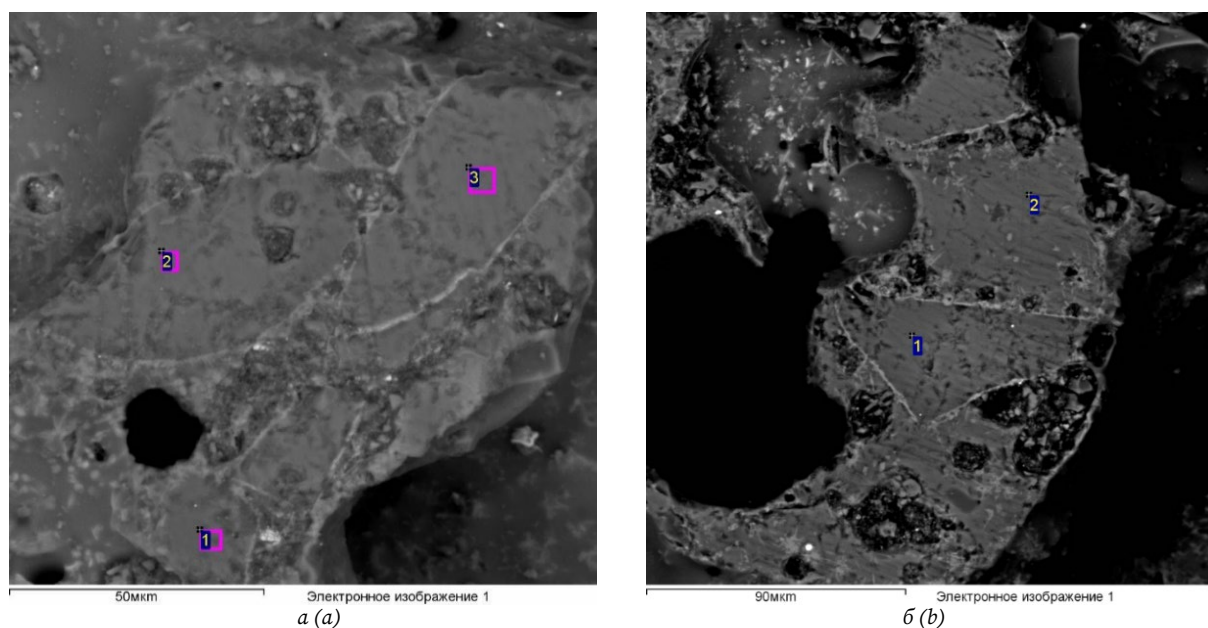
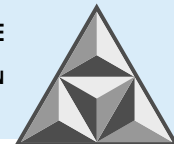


Рис. 6. Вариации состава стеклофазы: *а* – масштаб 50 мкм; *б* – масштаб 90 мкм
Fig. 6. Variations in the composition of the glass phase: *a* – scale 50 μm ; *b* – scale 90 μm



Среди стекла наблюдаются участки, сложенные карбонатом кальция. В межблоковом пространстве отмечаются агрегаты MgO (или карбоната магния) (обычно ассоциирует с микрофазами пироксенового состава) (рис. 7, б), пироксены Fe-Mg-Са группы (расчет кристаллохимической формулы по результатам анализа рис. 7, а, участок 1 – $\{Na_{0.039}Ca_{0.859}Mg_{0.120}\}_{1.0}[Mg_{0.939}Fe_{0.050}^{3+}Al_{0.011}^{VI}]_{1.0}(Al_{0.023}^{IV}Si_{1.977})_{2.0}O_6$ (рис. 8), фазы волластонитового состава (расчет кристаллохимической формулы по результатам анализа: $\{Na_{0.099}Ca_{1.768}\}_{1.9}[Mg_{0.077}Cr_{0.011}Fe_{0.083}^{3+}Al_{0.021}^{VI}]_{0.2}(Al_{0.016}^{IV}Si_{1.984})_{2.0}O_6$, SiO_2 . Отмечается присутствие магнетита (рис. 9, а), оксидов железа, агрегатов карбоната кальция среди массы стекла, зерен ферросиликация, мелких фаз, близких к самородному или сабоокисленному железу (рис. 9, б, в, г).

Таблица 5. Количественный состав участков, мас%

Table 5. Quantitative composition of sections, wt%

Участок	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	MnO	FeO	SO ₃	Cr ₂ O ₃	Итого
Рис. 6, а												
1	7.99	0.72	24.68	55.79	3.02	0.08	1.00	–	1.11	0.16	–	94.54
2	5.22	1.98	28.82	47.76	1.68	0.91	1.61	0.09	4.50	–	–	92.55
3	6.74	1.34	20.30	54.74	2.49	0.40	1.00	–	5.61	–	–	92.61
Рис. 6, б												
1	3.55	1.56	19.97	57.61	2.04	0.73	0.97	0.01	5.68	–	–	92.11
2	8.83	3.09	1.64	67.74	1.19	10.20	0.12	0.03	0.53	–	0.26	93.64

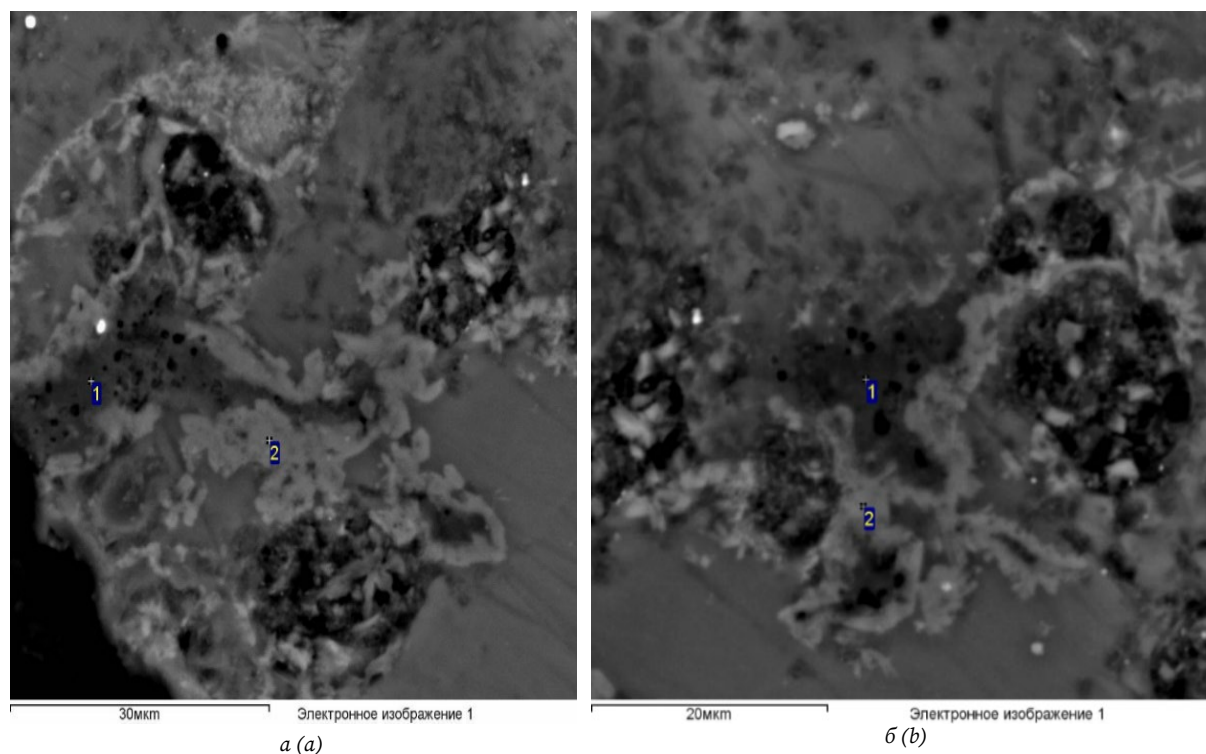
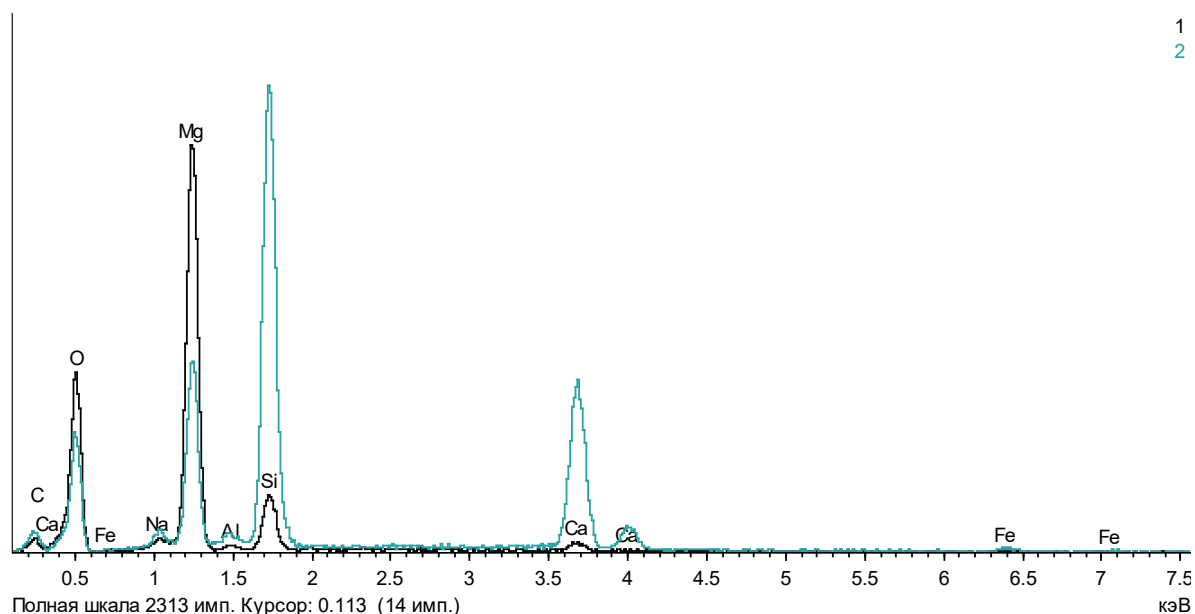
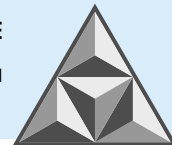
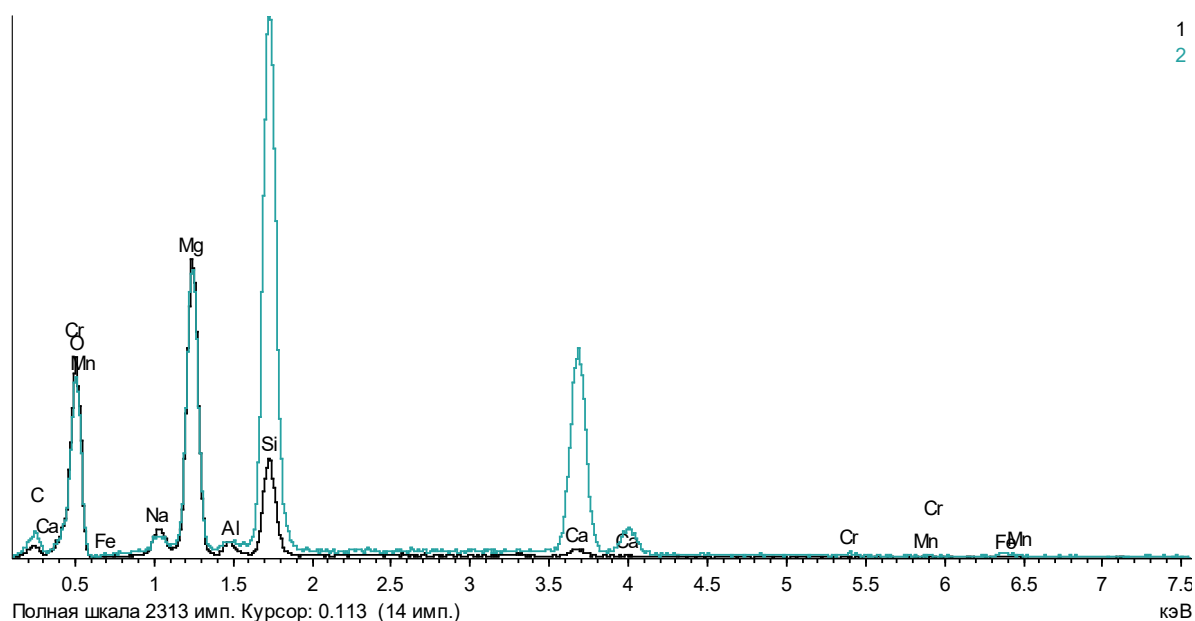


Рис. 7. Демонстрация присутствия оксида магния: а – агрегат MgO (1) (или карбоната магния) среди массы стекла, ассоциирующий с микрофазами пироксенового состава (2); б – сростания со стеклом MgO (1) (или карбоната магния) и микрофазами пироксенового состава (2)

Fig. 7. Demonstration of the presence of magnesium oxide: а – aggregate of MgO (1) (or magnesium carbonate) among the glass mass, associated with microphases of pyroxene composition (2); б – intergrowths with glass of MgO (1) (or magnesium carbonate) and microphases of pyroxene composition (2)



а (a)



б (b)

Рис. 8. Состав/EDX-спектр: а – агрегат MgO (или карбоната магния) среди массы стекла, ассоциирующий с микрофазами пироксенового состава; б – тонкие сростания со стеклом MgO (или карбоната магния) и микрофазами пироксенового состава

Fig. 8. Composition/EDX spectrum: а – aggregate of MgO (or magnesium carbonate) among the glass mass, associated with microphases of pyroxene composition; б – fine intergrowths with glass of MgO (or magnesium carbonate) and microphases of pyroxene composition

В рамках требований ГОСТ 33949-2016 «Изделия из стекла теплоизоляционные для зданий и сооружений. Технические условия» определены следующие характеристики образцов пеностекла: теплопроводность, плотность, прочность при сжатии, прочность на растяжение при изгибе, прочность при растяжении перпендикулярно лицевым поверхностям, прочность при действии сосредоточенной нагрузки (табл. 6).

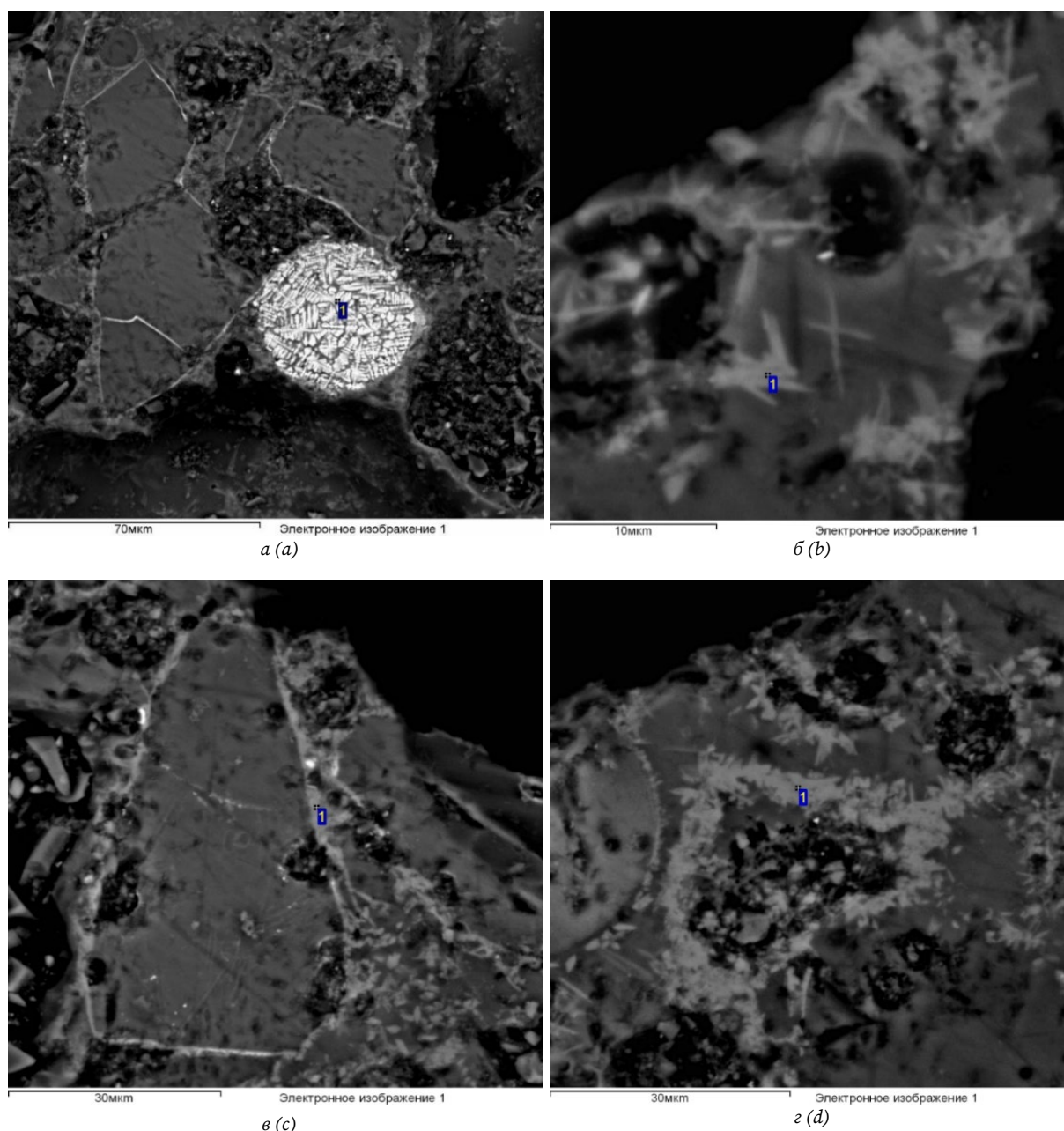
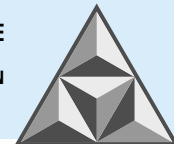


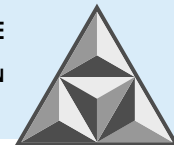
Рис. 9. Кристаллические микрофазы: *a* – дендритовые кристаллы магнетита в ассоциации со стеклом; *б* – кристаллы силикатов кальция в стекле (в область генерации сигнала включено и стекло); *в* – агрегат, обогащенный FeO по периферии стеклофазы; *г* – агрегат силикатов кальция (возможно, волластонит)

Fig. 9. Crystalline microphases: *a* – dendritic crystals of magnetite in association with glass; *b* – crystals of calcium silicates in glass (glass is also included in the signal generation region); *c* – aggregate enriched in FeO along the periphery of the glass phase; *d* – aggregate of calcium silicates (possibly wollastonite)

Таблица 6. Эксплуатационные свойства (параметры) образцов

Table 6. Performance properties (parameters) of samples

№ состава	Теплопроводность, $\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$	Плотность, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$	Прочность при сжатии, МПа	Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Прочность при растяжении (перп-но лиц. пов.), МПа	Коэффициент упругости, $\text{МН} \cdot \text{м}^{-1}$
1	0.1121	658.50	16.43	0.34	9.78	6.64
2	0.1207	804,48	29.70	0.58	12.21	11.02



Анализ результатов синтеза пеностекла с модифицированной шихтой выявляет следующее: введение оксида магния в шихту индуцирует реструктуризацию минерального состава равновесных фаз. В низкотемпературном диапазоне (состав 1) наблюдается селективное формирование MgFe_2O_4 при сохранении концентрации Fe_2O_3 , что свидетельствует о конкурентном механизме кристаллизации в гетерофазной системе.

Вариация состава шихты (состав 2, с увеличением доли мела на 15%) интенсифицирует газовыделение за счет роста парциального давления CO_2 . Несмотря на снижение доли кварца до 30%, его концентрация остается подходящей для поддержания структурной целостности силикатного каркаса.

Расчетные модели подтвердили синергию между введением MgO и карбонатных добавок, проявляющуюся в перераспределении фазового объема; рост содержания β -волластонита на 22% сопровождается снижением доли кварца на 18%. Данная корреляция объясняется нами изменением активности кремнезема в расплаве.

В отношении локальных концентраций легирующих элементов (Al, Ti, Cr) следует отметить, что они инициируют образование вторичных фаз (шпинелиды, титаносиликаты). Это приводит к перераспределению макроэлементов (Si, Ca, Mg) между аморфной матрицей и кристаллитами. Указанный процесс сопровождается снижением плотности стеклофазы на 8-12% и модифицированием ее химической неоднородности. Комплексная оценка эксплуатационных свойств получаемых материалов выявила повышение (на 35%) их прочности при сжатии, прочности на изгиб – на 28% и коэффициента упругости – на 18% (относительно аморфных аналогов). Достижение указанного эффекта объясняется армирующим действием наноразмерных кристаллитов, распределенных в матрице без образования критических градиентов напряжений на межфазных границах.

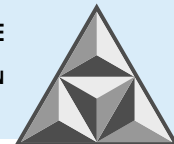
ВЫВОДЫ

1. Направленная модификация межпоровых перегородок позволяет регулировать параметры кристаллической фазы (размер зерна 50-200 нм, объемная доля 15-40%, состав Mg-Ca-силикаты). Оптимизация параметров обеспечивает рост (на 25-40%) предела прочности за счет формирования дислокационно-упрочненной субструктуры.

2. Подтверждена гипотеза о возможности целенаправленного управления структурой пеностекла путем варьирования компонентного состава шихты и режимов термообработки. Установленные закономерности фазообразования и свойств формируют основу для разработки алгоритмов синтеза строительных материалов с прогнозируемыми эксплуатационными характеристиками.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Шилл Ф. Пеностекло. М.: Стройиздат, 1965. 307 с.
2. Китайгородский И.И., Ширкевич Т.Л. // ДАН СССР. 1965. Т. 162. № 6. С. 1339-1341.
3. Czerwiński Z. // Szkło i ceramika. 1964. № 12. S. 313-316.
4. Czerwiński Z. // Szkło i ceramika. 1965. № 3. S. 68-69.
5. Schill F. // Veda a výzkum v promyslu sklarskem. 1961. № 7. S. 59-108.
6. Садченко Н.П.. Исследование в области получения пеностекла для низкотемпературной изоляции: автореф. канд. дисс. Минск, 1973.
7. Сулейменов С.Т. Исследование некоторых физико-химических свойств пеностекла в процессе его получения. Автореф. канд. дисс. Алма-Ата, 1955.
8. Демидович Б.К. Пеностекло. Минск: Наука и техника, 1975. 248 с.



9. **Китайгородский И.И., Бутт М.** // *Стекло: Бюлл. Института стекла*. 1960. № 2. С. 3-7.
10. **Кручинин Д.Ю., Фарафонтова Е.П.** Физическая химия стеклообразного состояния: учеб. пособие. Мин-во науки и высш. образования РФ. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2021. 108 с.
11. **Lilensten L., Fu Q., Wheaton B.R., Credle A.J.** Kinetic study on lithium-aluminosilicate (LAS) glass-ceramics containing MgO and ZnO // *Ceram. Int.* 2014. Vol. 40. P. 11657-11661.
12. **Zhang S.A., Zhang Y.L., Qu Z.M.** Effect of soluble Cr₂O₃ on the silicate network, crystallization kinetics, mineral phase, microstructure of CaO-MgO-SiO₂-(Na₂O) glass ceramics with different CaO / MgO ratio // *Ceram. Int.* 2019. Vol. 45. P. 11216-11225.
13. **Zhang Y.H., Luo Z.W., Liu T.Y., Hao X.J., Li Z., Lu A.X.** MgO-doping in the Li₂O-ZnO-Al₂O₃-SiO₂ glass-ceramics for better sealing with steel // *J. Non-Cryst. Solids*. 2014. Vol. 45. P. 170-175.
14. **Tang Y., Zheng X., Ma W., Wu P.** Residues from sewage sludge incineration for ceramic products with potential for zinc stabilization // *Waste. Manag.* 2018. Vol. 82. P. 188-197.
15. **Zhangyang Lu, Jinshan Lu, Xibao Li, Gangqin Shao**, Effect of MgO addition on sinterability, crystallization kinetics, and flexural strength of glass-ceramics from waste materials // *Ceramics Int.* 2016. Vol. 42, Iss. 2. Part B. P. 3452-3459. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.142>.
16. **Barrere F., van Blitterswijk C.A., de Groot K., Layrolle P.** Nucleation of biomimetic Ca-P coatings on Ti₆Al₄V from a SBF×5 solution: influence of magnesium // *Biomaterials*. 2002. Vol. 23. P. 2211-2220.
17. **Roman J., Salinas A.J., Vallet-Regi M., Oliverira J.M., Correia R.N., Fernandes M.H.** Role of acid attack in the in vitro bioactivity of a glass-ceramic of the 3CaO·P₂O₅-CaO·SiO₂-CaO·MgO·2SiO₂ system // *Biomaterials*. 2001. Vol. 22. P. 2013-2019.
18. **Baoqing Li, Yanping Guo, Jianzhang Fang**, Effect of MgO addition on crystallization, microstructure and properties of glass-ceramics prepared from solid wastes // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 881. 159821. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159821>
19. **Федосов С.В., Баканов М.О., Грушко И.С.** Применение техногенного сырья в процессе синтеза пеностекла с гетерогенной микроструктурой // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 258-269. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.258-269
20. **Федосов С.В., Баканов М.О.** Модели и методы высокотемпературной термической обработки в технологии пеностекла. М.: Издательство «Спутник +», 2021. 302 с.

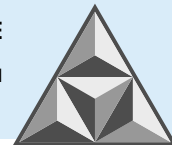
Поступила в редакцию 14.04.2025

Одобрена после рецензирования 29.04.2025

Принята к опубликованию 15.05.2025

REFERENCES

1. **Schill, F.** (1965), *Foam glass*. М.: Stroyizdat, 307 p. (in Russian).
2. **Kitaygorodsky, I.I. and Shirkevich, T.L.** (1965), *DAN USSR*, vol. 162, no. 6, pp. 1339-1341 (in Russian).
3. **Czerwiński, Z.** (1964), "*Szkło i ceramika*", no. 12, pp. 313-316.
4. **Czerwiński, Z.** (1965), "*Szkło i ceramika*", no. 3, pp. 68-69.
5. **Schill, F.** (1961), "*Veda a výzkum v promyslu sklarskem*", no. 7, pp. 59-108.
6. **Sadchenko, N.P.** (1973), "Research in the field of obtaining foam glass for low-temperature insulation", Abstr. Ph.D. diss., Minsk, USSR (in Russian).
7. **Sulejmenov, S.T.** (1955), "Study of some physicochemical properties of foam glass in the process of its production", Abstr. Ph.D. diss. Alma-Ata, USSR (in Russian).
8. **Demidovich, B.K.** (1975), "Foam glass", Minsk: Science and Technology, 248 p. (in Russian).
9. **Kitaygorodsky, I. I. and Butt, M.** (1960), "*Glass*", *Bull. of the Glass Institute*, no. 2, pp. 3-7 (in Russian).
10. **Kruchinin, D.Yu. and Farafontova, E.P.** (2021), "Physical chemistry of the glassy state: a textbook", Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Yekaterinburg: Ural Publishing House University, 108 p. (in Russian).
11. **Lilensten, L., Fu, Q., Wheaton, B.R. and Credle, A.J.** (2014), "Kinetic study on lithium-aluminosilicate (LAS) glass-ceramics containing MgO and ZnO", *Ceram. Int.*, vol. 40, pp. 11657-11661.



12. **Zhang, S.A., Zhang, Y.L. and Qu, Z.M.** (2019), "Effect of soluble Cr_2O_3 on the silicate network, crystallization kinetics, mineral phase, microstructure of $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-(Na}_2\text{O)}$ glass ceramics with different CaO/MgO ratio", *Ceram. Int.*, vol. 45, pp. 11216-11225.
13. **Zhang, Y.H., Luo, Z.W., Liu, T.Y., Hao, X.J., Li, Z. and Lu, A.X.** (2014), "MgO-doping in the $\text{Li}_2\text{O-ZnO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ glass-ceramics for better sealing with steel", *J. Non-Cryst. Solids*, vol. 405, pp. 170-175.
14. **Tang, Y., Zheng, X., Ma, W. and Wu, P.** (2018), "Residues from sewage sludge incineration for ceramic products with potential for zinc stabilization", *Waste. Manag.*, vol. 82, pp. 188-197.
15. **Zhangyang, Lu, Jinshan, Lu, Xibao, Li and Gangqin, Shao** (2016), "Effect of MgO addition on sinterability, crystallization kinetics, and flexural strength of glass-ceramics from waste materials", *Ceramics Int.*, vol. 42, no. 2, part B, pp. 3452-3459, <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2015.10.142>
16. **Barrere, F., van Blitterswijk, C.A, de Groot, K. and Layrolle, P.** (2002), "Nucleation of biomimetic Ca-P coatings on $\text{Ti}_6\text{Al}_4\text{V}$ from a SBF×5 solution: influence of magnesium", *Biomaterials*, vol. 23, pp. 2211-2220.
17. **Roman, J., Salinas, A.J., Vallet-Regi, M., Oliverira, J.M., Correia, R.N. and Fernandes, M.H.** (2001), "Role of acid attack in the in vitro bioactivity of a glass-ceramic of the $3\text{CaO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5\text{-CaO}\cdot\text{SiO}_2\text{-CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ system", *Biomaterials*, vol. 22, pp. 2013-2019.
18. **Baoqing, Li, Yanping, Guo and Jianzhang, Fang** (2021), "Effect of MgO addition on crystallization, microstructure and properties of glass-ceramics prepared from solid wastes", *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 881, 159821. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.159821>
19. **Fedosov, S.V., Bakanov, M.O. and Grushko, I.S.** (2024), "Use of technogenic raw materials in the synthesis of foam glass with a heterogeneous microstructure", *Bulletin of MGSU*, vol. 19, no. 2, pp. 258-269. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.258-269 (in Russian).
20. **Fedosov, S.V. and Bakanov, M.O.** (2021), "Models and methods of high-temperature heat treatment in foam glass technology", Moscow: Publishing house "Sputnik +", 302 p. (in Russian).

Received 14.04.2025

Approved 29.04.2025

Accepted 15.05.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 699.822, 691.17

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-53-65

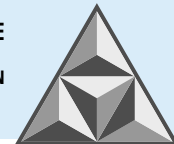
Исследование паропроницаемости пленок на основе мастик различного состава

В.Б. Доброхотов, Е.С. Егоров

Владимир Борисович Доброхотов*, Егор Сергеевич Егоров

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*dobrokhотовvb@ystu.ru**, *egoroves@ystu.ru*



Предотвращение нежелательных процессов конденсатообразования в структуре строительных материалов возможно при использовании пароизоляционных покрытий на основе мастик. Преимуществом формирования таких покрытий является надежное их крепление к поверхности без применения дополнительных приспособлений и сложного оборудования, эксплуатационная надежность ввиду отсутствия стыков. Основное внимание уделяется анализу зависимости коэффициента паропроницаемости пленок на основе полимерных мастик от различных производственно-технологических факторов – расхода компонентов в составе мастики, толщины слоя и условий нанесения. Для эффективного проектирования пароизоляционных систем на основе мастичных составов необходимо учитывать вязкость состава, состояние поверхности при нанесении мастики, режим формирования пленки. Оптимизация технологии выполнения работ способствует расширению сферы применения мастичных составов в строительстве, в частности – для пароизоляционной защиты строительных конструкций.

Ключевые слова: мастичные композиционные материалы, составы, отверждение, паропроницаемость пленок, толщина слоя, цементно-песчаная смесь

Для цитирования:

В.Б. Доброхотов, Е.С. Егоров Исследование паропроницаемости пленок на основе мастик различного состава// *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 2. С. 53-65.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-53-65



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-53-65

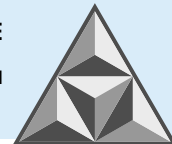
Investigation of vapour permeability of films based on mastics of different composition

V.B. Dobrokhotoy, E.S. Egorov

Vladimir B. Dobrokhotoy*, Egor S. Egorov

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

*dobrokhotoyvb@ystu.ru**, *egoroves@ystu.ru*



Prevention of undesirable condensation processes in the structure of building materials is possible using vapour barrier coatings based on mastics. The advantage of forming such coatings is their reliable fastening to the surface without the use of additional devices and complex equipment, operational reliability due to the absence of joints. The main attention is paid to the analysis of the dependence of the vapour permeability coefficient of films based on polymer mastics on various production and technological factors - consumption of components in the mastic, layer thickness and application conditions. It is necessary to take into account the viscosity of the composition, the condition of the surface when applying the mastic, and the mode of film formation for effective design of vapour barrier systems based on mastic compositions. Optimisation of work technology contributes to the expansion of the application of mastic compositions in construction, in particular for vapour barrier protection of building structures.

Keywords: mastic composites, compositions, curing, vapour permeability of films, layer thickness, cement-sand mixture

For citation:

Dobrokhoto V.B., Egorov E.S. Investigation of vapour permeability of films based on mastics of different composition // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 2. P. 53-65.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-53-65



ВВЕДЕНИЕ

Избыточное увлажнение является одной из наиболее характерных причин разрушения материалов при эксплуатации зданий и сооружений [1-3]. Источником переувлажнения могут выступать атмосферные осадки, капиллярное всасывание грунтовых вод, утечки из инженерных сетей здания и т.д. Часто накопление влаги в структуре материала связано с процессами конденсатообразования [4, 5]. Эти процессы протекают, если парциальное давление паров воды в порах материала или у поверхности конструкции оказывается выше максимально допустимого при данной температуре; в результате избыток влаги переходит из парообразного состояния в жидкую фазу. Механизм образования жидкой фазы в материале является сложным и зависит от многих факторов. Конденсация влаги чаще всего наблюдается внутри у стен и кровельных элементов здания и связана с особенностями температурно-влажностного режима эксплуатации [6-8]. Длительное избыточное переувлажнение строительных зданий и сооружений приводит к ухудшению теплотехнических характеристик материалов, влияет на их механические свойства и существенно снижает долговечность [9-12]. С целью предотвращения нежелательных процессов конденсатообразования обеспечивают:

- регулирование внутреннего микроклимата с использованием систем вентиляции и кондиционирования воздуха; это требует использования специального оборудования, а также значительных энергозатрат при его эксплуатации;

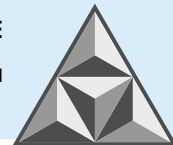
- рациональное конструирование состава ограждающих конструкций с оптимальным подбором свойств материалов для различных внутренних и внешних слоев; при этом важно, чтобы паропроницаемость пленок на внешней поверхности (например, после штукатурной отделки фасада здания) оказалась существенно выше, чем таковая для пленок, получаемых при внутренней отделке стен [13-17].

При эксплуатации помещений с нормальным влажностным режимом в зонах сухого или умеренно-влажного климата этого вполне достаточно. Однако в ряде случаев, особенно для помещений с влажным и мокрым режимом эксплуатации, требуется создавать специальные пароизоляционные слои.

Пароизоляционные слои могут существенно различаться в зависимости от состава используемых материалов и технологии производства работ. Для устройства таких слоев применяют материалы на минеральной основе, полимерные рулонные и листовые материалы [18-23]. Одним из подходящих вариантов является мастичная пароизоляция, выполняемая путем обмазки поверхности жидким или вязкопластичным составом с последующим его затвердеванием. Преимуществом является простота реализации и возможность надежного крепления мастики к поверхности без дополнительных приспособлений, а также эксплуатационная надежность ввиду отсутствия стыков. Последнее обстоятельство особенно важно при выполнении пароизоляционных работ на сложнопрофилированных поверхностях.

Однако для эффективного проектирования ограждающих конструкций с использованием мастичной пароизоляции необходимо дать количественную оценку расчетных показателей сопротивления паропроницанию (или коэффициента паропроницаемости) получаемых слоев, а также установить влияние основных технологических факторов (вязкость и толщина слоя мастики, количество слоев, условия выполнения работ) на указанные показатели.

В этой связи основной целью работы явилось изучение влияния толщины слоя и условий нанесения различных составов мастичных композиционных материалов на сопротивление паропроницанию в формируемой пленке.



ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При определении сопротивления паропроницаемости различных материалов, в том числе – обмазочных, формирование пленки часто рассматривают на беспористой поверхности, с последующим отделением получаемого слоя для исследования. По нашему мнению, такой подход не является адекватным, поскольку в реальных условиях основанием для нанесения мастичного слоя является поверхность, которая может обладать различной пористостью.

В данной работе основанием служили специальные образцы (рис. 1) в форме дисков толщиной 10-20 мм, изготовленные из цементно (Ц)-песчаной (П) смеси.

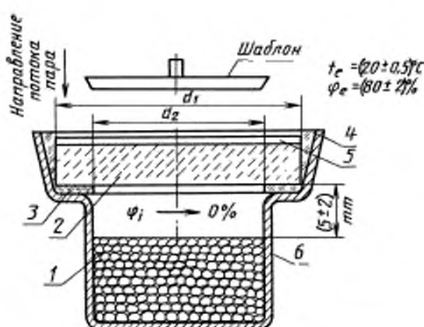


Рис. 1. Установка для испытаний: 1 – влагопоглощающее вещество; 2 – образец; 3 – резиновое кольцо; 4 – герметизирующая паста; 5 – испытуемое покрытие; 6 – сосуд

Fig. 1. Test setup: 1 – absorbent substance; 2 – sample; 3 – rubber ring; 4 – sealing paste; 5 – test coating; 6 – vessel

В состав смеси входили портландцемент ЦЕМ 42,5 Н и песок кварцевый речной с модулем крупности 1.95. Водоцементное отношение подобрано для обеспечения подвижности 5 см. Продолжительность твердения образцов составляла 28 сут. в камере нормального твердения (20°C при влажности воздуха более 90%).

В качестве мастичного слоя применяли эпоксидно-каучуковую мастику «Гидрофор» с отвердителем на основе этиленполиамина (0.05% от массы мастики) [24-28]. Отвердитель вводили непосредственно перед нанесением мастики и тщательно смешивали с основным компонентом. Для снижения вязкости получаемой мастичной композиции в ряде экспериментов полученную смесь разбавляли растворителем (толуол), взятым в количестве 15% от массы мастики. Мастику наносили с помощью кисти в один или несколько слоев, после чего производили отверждение в течение 10 сут в воздушно-сухих условиях. Если мастичный состав наносился в несколько слоев, технологический перерыв отверждения между отдельными слоями составлял 1 сут. (при температуре 20°C).

Измерения паропроницаемости проводили по стандартной методике, описанной в ГОСТ 28575-90 «Защита от коррозии в строительстве. Конструкции бетонные и железобетонные. Испытание паропроницаемости защитных покрытий». Она заключается в определении количества водяного пара, которое проходит через образец с пароизоляционным покрытием и без него, путем периодического измерения массы влагопоглощающего вещества (кальций хлористый) и последующего вычисления коэффициента паропроницаемости (или сопротивления паропропусканию). Взвешивание производили с периодичностью 24 ч до достижения стационарного диффузионного потока, характеризуемого постоянством прироста во времени массы образцов. По полученным данным строили зависимость изменения массы образцов во времени. Коэффициент паропроницаемости (μ , $\text{мг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$) рассчитывали по формуле:



$$\mu = \frac{(m_2 - m_1)h}{A(t_2 - t_1)(P_e - P_i)} \quad (1)$$

где $(m_2 - m_1)$ – количество водяного пара, проходящего через образец в течение интервала времени $(t_2 - t_1)$ между двумя взвешиваниями, мг;

h – толщина образца, м;

A – площадь поверхности образца, м²;

$(P_e - P_i)$ – разность значений парциального давления водяного пара на образце, Па;

P_e – парциальное давление водяного пара в воздухе с внешней стороны образца при испытаниях, Па;

P_i – парциальное давление водяного пара в воздухе над влагопоглощающим веществом (с внутренней стороны образца при испытаниях), Па.

Сопротивление паропрооницанию (м²·ч·Па·мг⁻¹) определяли по формуле:

$$R_i = \frac{h_i}{\mu_i} \quad (2)$$

Чтобы оценить влияние подложки из цементно-песчаной смеси на сопротивление паропрооницанию, проводили исследования по определению влияния состава и толщины исследуемых образцов без мастичного слоя на паропрооницаемость. Состав цементно-песчаной композиции в этих опытах варьировали от 1:1 до 1:5 (по массе) при толщине слоя 10-20 мм.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 показаны зависимости изменения массы образцов при проведении эксперимента.

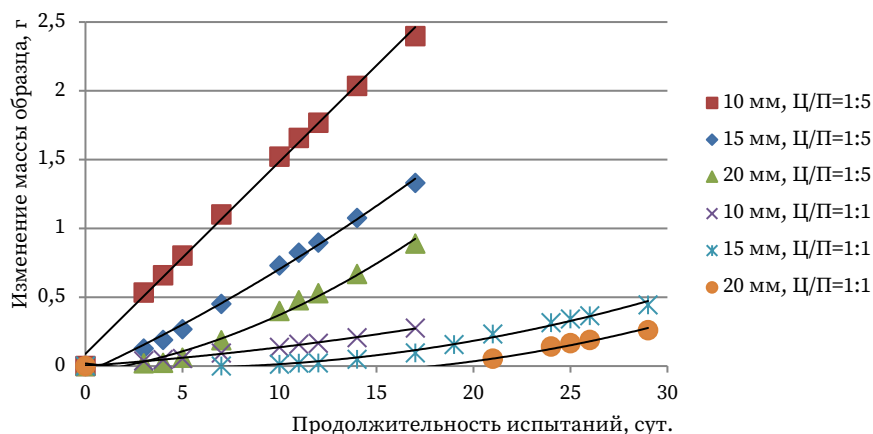


Рис 2. Влияние толщины образцов из цементно-песчаной смеси на изменение массы в процессе испытаний

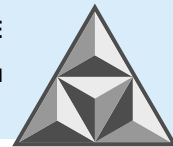
Fig. 2. Impact of cement-sand mix samples' thickness on mass variation during the testing process

На основании полученных данных нами произведен расчет коэффициентов паропрооницаемости исследуемых образцов (табл. 1).

Таблица 1. Расчетные коэффициенты паропрооницаемости образцов из цементно-песчаной композиции

Table 1. Calculated vapour permeability coefficients of cement-sand composition samples

Толщина образца, мм	Коэффициент паропрооницаемости, мг·м ⁻¹ ·ч ⁻¹ ·Па ⁻¹	
	для Ц/П = 1:1	для Ц/П = 1:5
10	0.016	0.040
15	0.013	0.046
20	0.018	0.045



Представленные результаты показывают, что коэффициент паропроницаемости образцов из цементно-песчаной смеси практически не зависит от их толщины в рассматриваемых пределах; в то же время состав смеси существенно влияет на этот показатель. Паропроницаемость образцов из смеси при соотношении Ц/П = 1:1 в 3.0-3.5 раз ниже, чем таковая для смеси при соотношении Ц/П = 1:5. Это объясняется существенным различием пористости смесей. В условиях эксперимента незначительные отклонения в толщине образца не будут оказывать существенного влияния на коэффициент паропроницаемости.

При определении влияния состава мастичного композиционного материала и способа нанесения необходимо учитывать также состав основания. В дальнейшем во всех измерениях, связанных с оценкой паропроницаемости, выбран постоянный состав цементно-песчаной смеси (Ц/П = 1:3) и неизменная толщина цементно-песчаного слоя основания (14-16 мм).

Как указано выше, в исследованиях для создания изолирующего слоя применялась эпоксидно-каучуковая мастика «Гидрофор». Состав этого композиционного мастичного материала обладает высокой адгезией ко всем видам оснований – металлам, бетону, кирпичу и т.д., что позволяет эффективно использовать его для гидроизоляционных целей [25]. Однако ранее не имелось достаточного опыта применения данной мастики для создания пароизоляции. В исходном состоянии она представляет собой вязкую жидкость, а после отверждения образует на поверхности плотную и упругую полимерную пленку. Для определения влияния толщины мастичного состава на паропроницаемость образцов нами выполнены измерения сопротивления паропроницанию при варьировании толщины пленки в диапазоне 0.6-2.5 мм. Характерно, что толстые пленки (> 2.0 мм) формировали как однократным нанесением слоя, так и путем последовательного нанесения двух слоев толщиной около 1.0 мм с промежуточным отверждением первого слоя в течение 1 сут. При этом нами выявлено отсутствие существенного различия показателей паропроницаемости; соответственно, данный фактор в дальнейших экспериментах уже не учитывался.

На рис. 3 приведены результаты влияния толщины слоя мастики на изменение массы образцов. По полученным данным рассчитаны коэффициенты паропроницаемости мастичного слоя (табл. 2).

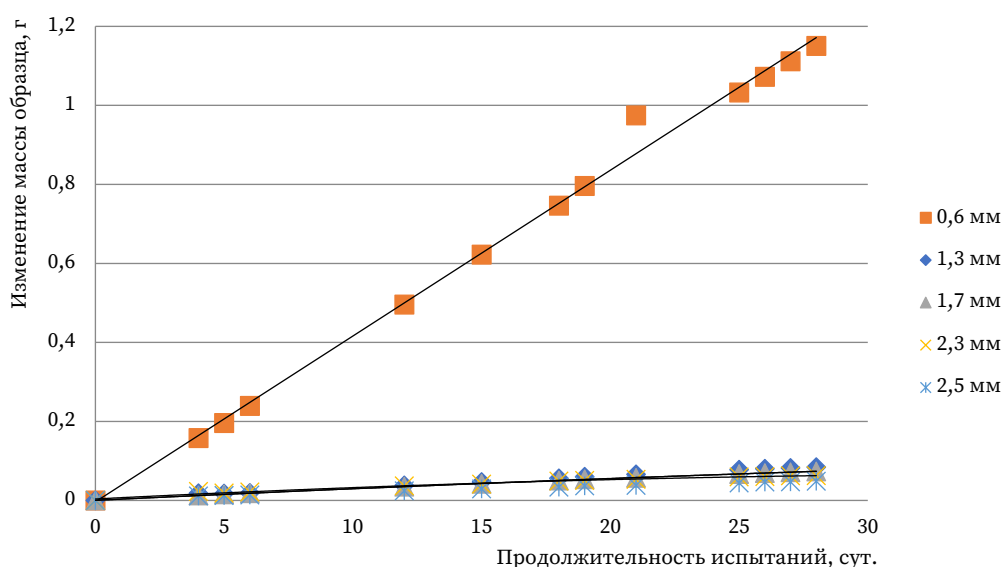


Рис. 3. Влияние толщины слоя мастики на изменение массы образца при испытаниях

Fig. 3. Impact of the thickness of the mastic layer on the change in the mass of the sample during testing

**Таблица 2.** Расчетные коэффициенты паропроницаемости пленок, полученных из мастичного состава «Гидрофор»**Table 2.** Calculated coefficients of vapour permeability of films made of 'Hydrophor' mastic composition

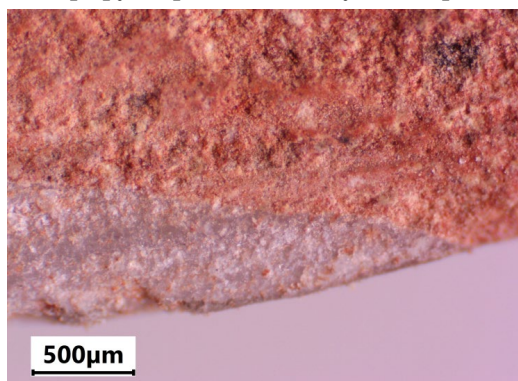
Толщина слоя мастики, мм	Коэффициент паропроницаемости, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$
0.6	$0.820 \cdot 10^{-3}$
1.3	$0.127 \cdot 10^{-3}$
1.7	$0.137 \cdot 10^{-3}$
2.3	$0.116 \cdot 10^{-3}$
2.5	$0.138 \cdot 10^{-3}$

Из представленных данных видно, что существенное их различие наблюдается только в случае толщины слоя < 1 мм, что связывается нами со сложностью равномерного нанесения тонкого слоя вязкой мастики на основание. Отметим также, что при смешении основного состава с отвердителем в состав мастики вовлекаются пузырьки воздуха, которые частично остаются в пленке при отверждении. Наибольшее негативное влияние таких пузырьков будет проявляться при малой толщине пленки. Проведенное нами исследование паропроницаемости для образцов с нанесением слоя мастики после ее разведения толуолом (15% от массы мастики) (табл. 3) позволило снизить вязкость состава и облегчить удаление вовлеченного воздуха при формировании пленки.

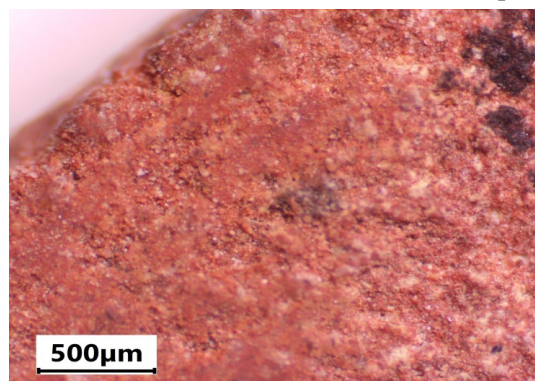
Таблица 3. Расчетные коэффициенты паропроницаемости пленок из мастичного состава «Гидрофор» после добавления растворителя**Table 3.** Calculated coefficients of vapour permeability of films made of 'Hydrophor' mastic composition after solvent addition

Толщина слоя мастики, мм	Коэффициент паропроницаемости, $\text{мг} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1} \cdot \text{Па}^{-1}$
0.8	$0.097 \cdot 10^{-3}$
1.4	$0.097 \cdot 10^{-3}$
1.6	$0.105 \cdot 10^{-3}$

Полученные результаты показали эффективность данного подхода: коэффициент паропроницаемости пленок снижается, что наблюдается даже при малой их толщине. Достижимый эффект удаления воздушных включений за счет уменьшения вязкости мастичного состава превалирует над снижением плотности пленки при испарении из нее растворителя. Кроме того, снижение вязкости мастики может обеспечить более существенное проникновение материала вглубь поверхности, что также отразится на величине коэффициента паропроницаемости. Данный эффект требует подробного изучения, тем более, что микрофотографии (рис. 4) для образцов керамического кирпича, обработанного неразведенной мастикой (см. рис. 4, а) и мастикой, разбавленной толуолом (см. рис. 4, б), демонстрируют различие в глубине проникновения мастичного композиционного материала.

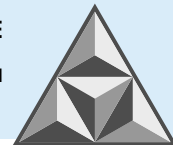


а (a)



б (b)

Рис. 4. Разрез образца керамического кирпича с покрытием из мастики (а) и мастики, разбавленной толуолом (б)**Fig. 4.** Section of a ceramic brick sample coated with mastic (a) and mastic diluted with toluene (b)



Подобная картина, хотя и менее заметна на изображениях из-за особенностей поровой структуры, характерна и для цементно-песчаных композиций (см. рис. 5, а и 5, б)

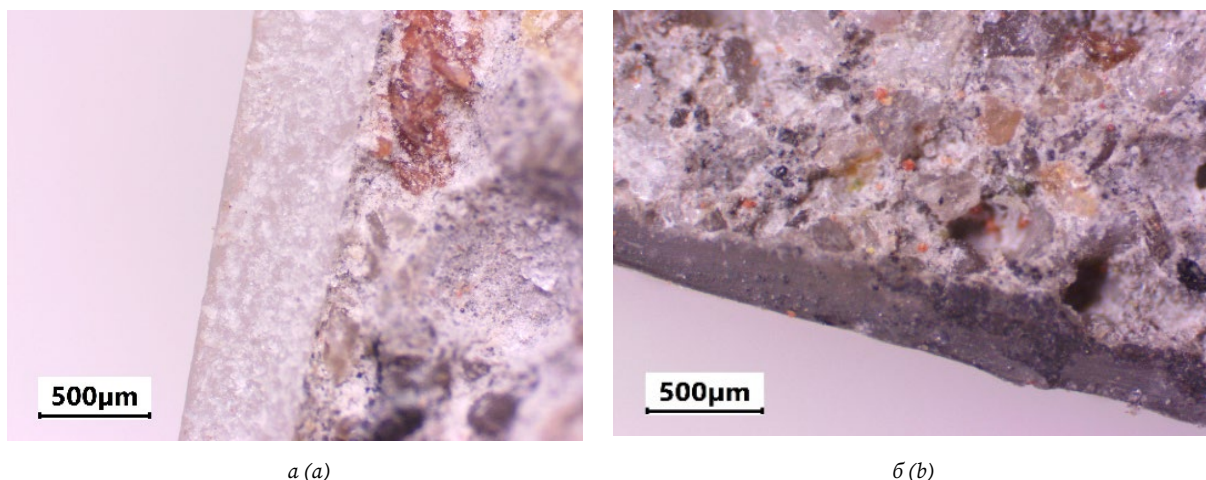


Рис. 5. Разрез образца цементно-песчаной композиции с покрытием из мастики «Гидрофор» (а) и покрытием из мастики «Гидрофор», разбавленной толуолом (б)

Fig. 5. Section of a sample of cement-sand composition coated with 'Hydrophor' mastic (a) and coated with 'Hydrophor' mastic diluted with toluene (b)

Таким образом, применение мастичных композиционных материалов может быть эффективным для формирования пароизоляционных слоев строительных материалов. В то же время необходимо учитывать ряд особенностей структуры пароизолирующей пленки при нанесении состава на пористое основание. Коэффициент паропроницаемости пленки, сформированной на цементно-песчаном основании, слабо зависит от толщины (расхода) мастичного состава только в пределах 1.0-3.0 мм. При толщине пленки мастики < 1.0 мм коэффициент паропроницания возрастает в 6-8 раз, что необходимо учитывать при расчете сопротивления паропроницанию. Данный эффект связывается нами со сложностью равномерного нанесения вязкого состава на поверхность и неоднородностью получаемой пленки ввиду вовлечения пузырьков воздуха при перемешивании мастики.

ВЫВОДЫ

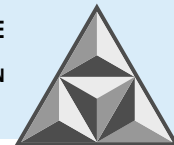
1. Установлено, что введение растворителя в мастичные композиционные материалы позволяет получать равномерные по структуре пленки (без существенного воздухововлечения), однако их плотность после удаления растворителя может снижаться. Необходимо учитывать также глубину проникновения мастичного состава в пористую структуру основания, возрастающую по мере снижения вязкости мастики при разбавлении. Это может играть как положительную, так и отрицательную роль при создании пароизоляции.

2. Отсутствие линейной зависимости между расходом мастики «Гидрофор» (соответственно, толщиной пароизоляционной пленки) и сопротивлением паропроницанию усложняет моделирование процесса, однако позволяет оптимизировать составы материалов. Проведенные исследования паропроницаемости мастичных слоев приводят к выводу о необходимости учета ряда технологических факторов (вязкость материала, состояние поверхности при нанесении мастики, режимы формирования пленки и др.), что послужит основанием для разработки эффективной технологии пароизоляции с применением широкого спектра составов мастик.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Сенченко Н.М.** Сырость в жилых зданиях, ее источники и борьба с ней. М.: Изд-во литературы по строительству, 1967. 259 с.
2. **Травин В.И.** Капитальный ремонт и реконструкция жилых и общественных зданий. Ростов-на-Дону: Феникс, 2002. 236 с.
3. **Латышева Л.Ю., Смирнов С.В.** Как защититься от воды и сырости // *Строительные материалы*. № 8. 2003. с. 24–25.
4. **Шпайдель К.** Диффузия и конденсация водяного пара в ограждающих конструкциях. М.: Стройиздат, 1985. 48 с.
5. **Попов Г.Т., Бурак Л.Я.** Техническая экспертиза жилых зданий старой постройки. Л.: Стройиздат, 1986. 240 с.
6. **Майнерт З.** Теплозащита жилых зданий. М.: Стройиздат, 1985. 208 с.
7. **Еремкин А.И., Королева Т.И.** Тепловой режим зданий. М.: Изд-во АСВ, 2000. 368с.
8. **Мамонтов А.А., Ярцев В.П., Монастырев П.В.** Оценка температурно-влажностных и теплотехнических показателей каркасно-панельных стен с трехлетним периодом эксплуатации // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3. Вып. 3. С. 7-15. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5043/view> (дата обращения 09.04.2025). DOI: 10.52957/27821919_2022_3_78
9. **Гучкин И.С.** Диагностика повреждений и восстановление эксплуатационных качеств конструкций: учеб. пособие. М.: Изд-во АСВ, 2001. 176 с.
10. **Котельников В.С.** Справочник новейших технологий в строительстве и ремонте. Ростов-на-Дону: Феникс, 2013. 271с.
11. **Колотилкин Б.М.** Долговечность жилых зданий. М.: Стройиздат, 1965. 250 с.
12. **Ариевич Э.М., Коломеец А.В., Нотенко С.Н., Ройтман А.Г.** Эксплуатация жилых зданий. М.: Стройиздат, 1991. 510 с.
13. **Зубарев К.П.** Применение теории потенциала влажности в оценке тепловлажностного режима ограждающих конструкций зданий // *Строительные материалы*. 2024. № 6. С. 46–51. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-46-51>.
14. **Helmut Kunzel.** Außenputz Untersuchungen Erfahrungen Überlegungen. Fraunhofer IRB Verlag, 2003. 125 p.
15. **Александров А.В.** Требования к эффективным утеплителям для систем фасадных теплоизоляционных композиционных (СФТК) // *Кровельные и изоляционные материалы*. 2018. № 6. С. 24-31.
16. **Александров А.В.** Анализ ГОСТ Р 56707-2015 «Системы фасадные теплоизоляционные композиционные с наружными штукатурными слоями. Общие технические условия» // *Кровельные и изоляционные материалы*. 2018. № 4. С. 34-38.
17. **Александров А.В.** Анализ ГОСТ Р 56707-2015 «Системы фасадные теплоизоляционные композиционные с наружными штукатурными слоями. Общие технические условия» Ч. 2. // *Кровельные и изоляционные материалы*. 2018. № 5. С. 30-36.
18. **Попченко С.Н.** Гидроизоляция сооружений и зданий. Л.: Стройиздат, 1981. 304 с.
19. **Зарубина Л. П.** Гидроизоляция конструкций, зданий и сооружений. СПб: БХВ-Петербург, 2011. 272 с.
20. **Масаев В.Ю., Полякова Т.Л.** Новые материалы для гидроизоляционных работ, усиления фундаментов и реконструкции сооружений // *Строительные материалы*. № 3. 1997. С. 19-21.
21. **Смирнов С. В.** Отечественные гидроизолирующие материалы на основе вяжущих // *Строительные материалы*. № 9. 1999. С. 16–17.
22. **Новиков В.У.** Полимерные материалы для строительства: справочник. М.: Высш. шк., 1995. 448 с.
23. **Низин Д.Р., Низина Т.А., Селяев В.П., Канаева Н.С.** Обратимое и необратимое изменение свойств полимерных материалов в процессе натурального климатического старения // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3. Вып. 1. С. 18-29. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5041/view> (дата обращения 09.04.2025). DOI: 10.52957/27821919_2022_1_1819
24. Официальный сайт КОНКОРД Гидрофор. URL: <https://konkordpro.ru/prochee/gidrofor.html> (дата обращения 09.04.2025).



25. Полимерная мастика «Гидрофор» (ТУ 38.403.692.91). URL: <https://tech.wikireading.ru/hQ0gbFXBA> (дата обращения 09.04.2025).
26. **Майер-Вестус У.** Полиуретаны. Покрытия, клеи и герметики. М.: Пейн-Медиа, 2009. 400 с.
27. **Матвеева Л.Ю., Синайский А.Г., Андреева Е.Е., Румянцева А.В., Кукса П.Б.** Демпферные гидроизолирующие материалы серии «Гидрофор» на основе полиизоцианатурета // *Строительные материалы*. № 7. 2016. С. 63-66.
28. Официальный сайт ЭКОТЕК Полимерный материал Гидрофор. URL: <https://eko-tec.ru/product/5163264> (дата обращения 09.04.2025).

Поступила в редакцию 08.05.2025

Одобрена после рецензирования 02.06.2025

Принята к опубликованию 10.06.2025

REFERENCES

1. **Senchenok, N.M.** (1967), "Dampness in housing buildings, its sources and fight against it", Building Literature Publishing House, Moscow, USSR, 259 p. (in Russian).
2. **Travin, V.I.** (2002), "General Repair and Reconstruction of Residential and Public Buildings", Phoenix, Rostov-on-Don, Russia, 236 p. (in Russian).
3. **Latysheva, L.Yu. and Smirnov, S.V.** (2003), "How to protect yourself from water and dampness", *Stroitelnye Materialy*, no. 8, pp. 24-25 (in Russian).
4. **Speidel, K.** (1985), "Diffusion and condensation of water vapour in enclosing structures", Stroyizdat, Moscow, USSR, 48 p. (in Russian).
5. **Popov, G.T. and Burak, L.Ya.** (1986), "Technical expertise of housing buildings of old construction", Stroyizdat, Leningrad, USSR, 240 p. (in Russian).
6. **Meinert, Z.** (1985), "Thermal protection of housing buildings", Stroyizdat, Moscow, USSR, 208 p. (in Russian).
7. **Eremkin, A.I. and Koroleva, T.I.** (2000), "Thermal mode of buildings", ASV Publishing House, Moscow, Russia, 368 p. (in Russian).
8. **Mamontov, A.A., Yartsev, V.P. and Monastirev, P.V.** (2022), "Assessment of temperature-humidity and heat engineering indicators of frame-panel walls with a three-year period of operation", *Smart Composite in Construction*, vol. 3, no. 3, pp. 7-15 [online]. <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5043/view> (in Russian). DOI: 10.52957/27821919_2022_3_78 (accessed 09.04.2025).
9. **Guchkin, I.S.** (2001), "Diagnostics of damages and restoration of operational qualities of structures: Textbook", ASV Publishing House, Moscow, Russia, 176 p. (in Russian).
10. **Kotelnikov, V.S.** (2013), "Handbook of the latest technologies in construction and repair", Phoenix, Rostov-on-Don, Russia, 271 p. (in Russian).
11. **Kolotilkin, B.M.** (1965), "Durability of residential buildings", Stroyizdat, Moscow, USSR, 250 p. (in Russian).
12. **Arievich, E.M., Kolomeyets, A.V., Notenko, S.N. and Roitman, A.G.** (1991), "Operation of residential buildings", Stroyizdat, Moscow, Russia, 510 p. (in Russian).
13. **Zubarev, K.P.** (2024), "Application of the theory of moisture potential in estimation of thermal and moisture regime of building envelopes", *Stroitelnye Materialy*, no. 6, pp. 46-51 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-825-6-46-51> (in Russian).
14. **Helmut Kunzel.** (2003), "Außenputz Untersuchungen Erfahrungen Überlegungen", Fraunhofer IRB Verlag, 125 p.
15. **Aleksandrov, A.V.** (2018), "Requirements for effective insulators for facade thermal insulation composite (FITC) systems", *Roofing and Insulation Materials*, no. 6, pp. 24-31 (in Russian).
16. **Aleksandrov, A.V.** (2018), "Analysis of GOST R 56707-2015 'Facade thermal insulation composite systems with external plaster layers. General technical conditions'", *Roofing and Insulation Materials*, no. 4, pp. 34-38 (in Russian).
17. **Aleksandrov, A.V.** (2018), "Analysis of GOST R 56707-2015 'Facade thermal insulation composite systems with external plaster layers. General technical conditions'", part 2, *Roofing and Insulation Materials*, no. 5, pp. 30-36 (in Russian).
18. **Popchenko, S.N.** (1981), "Waterproofing of structures and buildings", Stroyizdat, Moscow, USSR, 304 p. (in Russian).

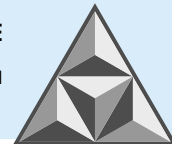


19. **Zarubina, L.P.** (2011), Waterproofing of Structures, Buildings and Structures, BHV-Peterburg, S-Pb., Russia, 272 p. (in Russian).
20. **Masaev, V.Yu. and Polyakova, T.L.** (1997), New materials for waterproofing works, reinforcement of foundations and reconstruction of structures, *Stroitelnye Materialy*, no. 3. pp. 19-21 (in Russian).
21. **Smirnov, S.V.** (1999), "Domestic binder-based waterproofing materials", *Stroitelnye Materialy*, no. 9, pp. 16-17 (in Russian).
22. **Novikov, V.U.** (1995), "Polymeric materials for construction: Handbook", Vysh. shk., Moscow, Russia, 448 p. (in Russian).
23. **Nizin, D.R., Nizina, T.A., Selyaev, V.P. and Kanaeva N.S.** (2022), "Reversible and irreversible changes in the properties of polymer materials during full-scale climatic aging", *Smart Composite in Construction*, vol. 3, no. 1, pp. 18-29 [online]. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5041/view> DOI: 10.52957/27821919_2022_1_1819 (accessed 09.04.2025) (in Russian).
24. Official website of CONCORD Hydrofor, Available at: <https://konkordpro.ru/prochee/gidrofor.html> (accessed 09.04.2025) (in Russian).
25. Polymer mastic 'Hydrophor' (TU 38.403.692.91), Available at: <https://tech/wikireading.ru/hQ0gbFXBA> (accessed 09.04.2025) (in Russian).
26. **Mayer-Westus, W.** (2009), Polyurethanes. Coatings, Adhesives and Sealants, Paine-Media, Moscow, Russia, 400 p. (in Russian).
27. **Matveeva, L.Yu., Sinaisky, A.G., Andreeva, E.E., Rumyantseva, A.V. and Kuksa, P.B.** (2016), "Damping waterproofing materials of "Hydrophor" series based on polyisocyanurethane", *Construction Materials*, no. 7, pp. 63-66 (in Russian).
28. Official site ECOTEK Polymer material Hydrophor, Available at: <https://eko-tec.ru/product/5163264> (accessed 09.04.2025).

Received 08.05.2025

Approved 02.06.2025

Accepted 10.06.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 656.078 (132)

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-66-80

Проектирование и устройство зарядных станций в условиях дорожной сети мегаполиса России

А.М. Бургунутдинов, П.Б. Разговоров, А.Д. Коровка, И.А. Викулин

Альберт Масугутович Бургунутдинов^{1,*},

¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация
burgunutdinov.albert@yandex.ru

Павел Борисович Разговоров²

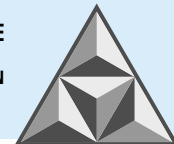
²Ярославский государственный технический университет», Ярославль, Российская Федерация
razgovorovpb@ystu.ru

Артемий Денисович Коровка³

³Московский научно-исследовательский и проектный институт жилищного хозяйства
(ГАОУ «Мосжилниипроект»), Москва, Российская Федерация
artemijkor@yandex.ru

Игорь Александрович Викулин⁴

⁴Военно-воздушная академия им. Н.Е. Жуковского, Воронеж, Российская Федерация
vikulin777@gbk.ru



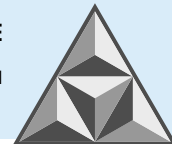
В связи с перестройкой мирового рынка наблюдается насыщение различных секторов экономики автомобилями с новыми устройствами, включающими компактные накопители энергии. Утвержденная в 2021 году «Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года» требует существенного изменения дорожной инфраструктуры. Строительство сетей зарядных станций, с учетом отсутствия сформированных нормативных документов, ставит перед развитием автомобильных дорог в отечественных мегаполисах ряд вызовов и новых задач. Рассмотрены аспекты, касающиеся развития инфраструктуры общественного транспорта и организации бесперебойного движения электробусов при проектировании городских дорог на примере города Москвы.

Ключевые слова: электробусы, общественная инфраструктура, зарядные устройства, асфальтобетонное покрытие, колеиность, нагрузка, прочность

Для цитирования:

Бургунутдинов А.М., Разговоров П.Б., Коровка А.Д., Викулин И.А. Проектирование и устройство зарядных станций в условиях дорожной сети мегаполиса России // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 2. С. 66-80.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-66-80



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-66-80

Design and construction of charging stations in the conditions of street and road network of a megalopolis in Russia

A.M. Burgonutdinov, P.B. Razgovorov, A.D. Korovka, I.A. Vikulin

Albert Masugutovich Burgonutdinov^{1,*}

¹Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

burgonutdinov.albert@yandex.ru

Pavel Borisovich Razgovorov²

²Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

razgovorovpb@ystu.ru

Artemy Denisovich Korovka³

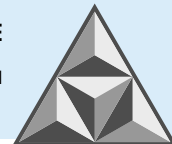
³Moscow Research and Design Institute of Housing (Moszhilniiproekt), Moscow, Russian Federation

artemijkor@yandex.ru

Igor Alexandrovich Vikulin⁴

⁴Zhukovsky Air Force Academy, Voronezh, Russian Federation

vikulin777@gbk.ru



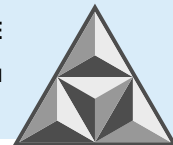
The restructuring of the global market has resulted in a saturation of various sectors of the economy with vehicles with new devices including compact energy storage. In 2021, the 'Concept for the Development of Production and Use of Electric Road Transport in the Russian Federation for the Period until 2030' was approved. It requires significant changes in road infrastructure. The construction of charging station networks, due to the lack of formed regulatory documents, poses a number of challenges and new tasks for the development of roads in domestic metropolises. The paper considers aspects concerning the development of public transport infrastructure and the organisation of uninterrupted electric bus traffic in the design of urban roads on the example of the city of Moscow.

Keywords: electric buses, public infrastructure, chargers, asphalt pavement, rutting, load, strength

For citation:

Burgonutdinov A.M., Razgovorov P.B., Korovka A.D., Vikulin I.A. Design and construction of charging stations in the conditions of street and road network of a megalopolis in Russia // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 2. P. 66-80. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-66-80



ВВЕДЕНИЕ

По данным [1] Европейского союза, к 2035 году будет полностью прекращена продажа автомобилей с традиционными моторами. Китайская Народная Республика весьма активно внедряет искусственный интеллект в процесс управления дорожным движением. В свою очередь, «Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года», принятая в 2021 г., предполагает переход общественного транспорта на компактные накопители энергии [2]. Создание технических средств, использующих альтернативные виды топлива, способствует улучшению экологической обстановки в российских городах, особенно – в мегаполисах. В связи с возросшими требованиями мирового сообщества требуются сложные модели принятия решений, которые будут учитывать множество экологических, экономических и социальных ограничений при реализации различных «зеленых» методов и технологий [3].

В России становится популярным новый вид транспортного средства для перевозки людей – электробусы. При этом особо важным является разработка инновационных подходов к проектированию и строительству современных городских дорог и организации дорожного движения в мегаполисах. Должна быть представлена методика оценки качества функционирования городских транспортных систем, а также решены вопросы оптимизации обслуживания населения и построения систем управления транспортной сферой в территориальных образованиях [4].

Применение электробусов стало актуальным в связи со снижением запасов ископаемых источников энергии и необходимостью ограничения выбросов вредных веществ при эксплуатации городских маршрутных автобусов. Однако ожидаемое размещение зарядных станций электротранспорта осложняется неравномерностью распределения свободной электрической энергии в городах. Также существует ряд дополнительных проблем, с которыми постоянно сталкиваются водители электробусов – в частности, потребность значительного повышения мощности [5]. Известно, что устройство и зарядка городского пассажирского транспорта могут осуществляться только на специальных станциях, построенных и установленных на городских магистралях.

Основными поставщиками электробусов на российский рынок являются компания «КАМАЗ» (г. Набережные Челны), а также ее дочерняя организация «ЛИАЗ». Они производят автобусы для городов Москвы и Казани. В Санкт-Петербурге электрические автобусы обслуживает компания *Volgabus*, в Нижнем Новгороде аналогичным производством занимается фирма «Газель», а Пермь поставляет электробусы КАМАЗ-6282. Кроме указанных регионов, внедрение электробусов начинается на Дальнем Востоке, где уже функционирует две единицы общественного транспорта. На Сахалине в 2024 году ввели в эксплуатацию уже 120 электробусов. Хотя Москва является лидером по темпам внедрения такого транспортного средства на европейской арене, инфраструктура по части эффективного его использования в общественных пространствах столицы России пока неидеальна [6] (на 2024 год – 1500 единиц). К концу 2030 года предполагается весь автобусный транспорт города Москвы перевести в режим работы электромобилей.

МЕТОДИЧЕСКАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Существует несколько способов зарядки электробусов [7]. На рис. 1 приведена общая схема работы зарядной станции. В зависимости от способа подключения электробуса, существует возможность организовать зарядку через пантограф (рис. 2) либо зарядный порт (рис. 3).

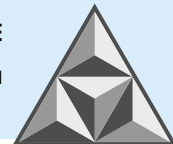


Рис. 1. Устройство электрической зарядной станции электробуса
Fig. 1. Design of the electric charging station of an electric bus



Рис. 2. Зарядка электробуса через пантограф
Fig. 2. Charging the electric bus via pantograph

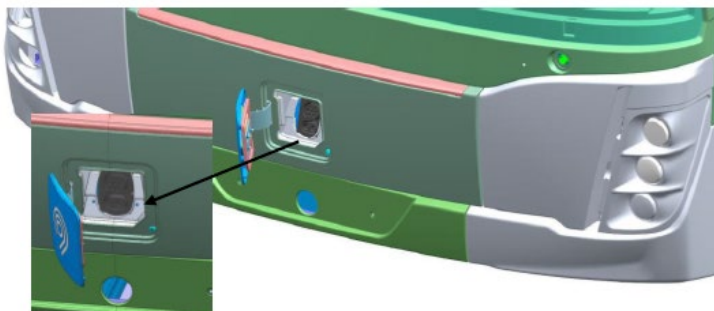
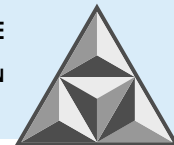


Рис. 3. Зарядка электробуса через зарядный порт
Fig. 3. Charging the electric bus via the charging port



Зарядка электробуса производится током длительного действия (6 ч, 150 А), быстрым током (15 мин, до 500 А) или пульсирующим током (30 с, до 1000 А). Пульсирующие токи применяются на остановках и реализуются только с пантографа. Подача быстрых и длительных токов возможна как с пантографа, так и через зарядный порт.

Ключевой проблемой является то, что в условиях плотной городской застройки и заранее распределенной электроэнергии не всегда удастся использовать ток быстрой зарядки или энергозатратный пульсирующий ток. В связи с этим электробусы в течение длительного времени оказывают нагрузку на дорожное покрытие, которое ранее не было рассчитано на такие ситуации.

Согласно ОДН 218.1.052-2002. Оценка прочности нежестких дорожных одежд, колеиность возникает, когда дорожное покрытие прогревается и испытывает давление тяжелых автомобилей за счет модуля деформации грунтового основания [8]. Поэтому в дальнейшем был произведен расчет в программе *Indor Pavement* по «Методическим рекомендациям по расчету и прогнозированию колееобразования на нежестких дорожных одеждах» [9].

В качестве граничных условий в расчет вносились поправки, так как настоящая методика не учитывала условия зарядки электробусов. Конструкция дорожной одежды подбиралась из «Альбома типовых дорожных конструкций» на примере города Москвы (см. табл. 1) [10]. С учетом правила увеличения модуля упругости от грунта к верхнему слою покрытия, нами выбраны следующие конструктивные слои (рис. 4):

Таблица 1. Толщина слоев дорожной одежды улиц и дорог местного значения (без движения общественного транспорта, стоянки для грузового транспорта)

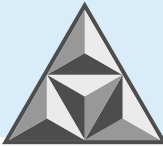
Table 1. Thickness of pavement layers of local streets and roads (without public transport, truck parking)

Номер слоя	Конструктивный слой	Материал слоя дорожной одежды	Толщина слоя, см
1	Верхний слой покрытия	Асфальтобетон плотный	5
2	Нижний слой покрытия	Асфальтобетон плотный	7
3	Верхний слой основания	Асфальтобетон плотный	8
4	Нижний слой основания	Щебеночно-гравийно-песчаные смеси	35
5	Прослойка	Геотекстиль	–
6	Грунт земляного полотна	Песок	–

Конструкция	Материал	Толщина	Модуль	Прогиб
Проект конструкции дорожной одежды				
Вариант № 1				
Верхний слой покрытия	ЩМА-20, марка битума...	h = 5 см (4...20)		E _{упр} = 3200 МПа
Нижний слой покрытия	Асфальтобетон горяче... плотный II марки из ще... (гравийной) смеси типа...	h = 7 см (3...15)		E _{упр} = 3200 МПа
Верхний слой основания	Асфальтобетон горяче... плотный II марки из ще... (гравийной) смеси типа...	h = 8 см (3...15)		E _{упр} = 2400 МПа
Нижний слой основания	Щебеночно-гравийно-п... смеси, при максимальн... размере зерен 0-8 мм	h = 35 см (5...100)		E _{упр} = 235 МПа
	Полотно геотекстильное тканое марки Геофлакс ПП...		α = 1,007	
Грунт земляного полотна	Песок средней крупнос... содержанием пылевато-глинистой ф...		E _{пов} = 120 ...	E _{упр} = 120 МПа

Рис. 4. Задание слоев дорожной одежды в программе *Indor Pavement*

Fig. 4. Specifying pavement layers in the *Indor Pavement* programme



Строительные материалы в конструкции дорожной одежды:

- 1 – верхний слой покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА-20);
- 2 – нижний слой покрытия из асфальтобетона горячей укладки, плотный, II марки из щебеночной (гравийной) смеси типа Б; марка битума БНД/БН-60/90;
- 3 – верхний слой основания из асфальтобетона горячей укладки, плотный, II марки из щебеночной (гравийной) смеси типа Б; марка битума БНД/БН-90/130;
- 4 – нижний слой основания представлен щебеночно-гравийно-песчаной смесью (с размером зерен 0-8 мм).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для расчета осевой нагрузки электробуса принимаем, что радиус шин электробуса $R_{\text{шин}} = 0.5$ м. Пятно контакта рассчитываем исходя из условия, что колесо проминается на 5%:

$$H_{\text{кон}} = R_{\text{шин}} \cdot 0.95 = 500 \cdot 0.95 = 475 \text{ мм.}$$

Тогда высота пятна контакта (рис. 5): $H_{\text{пят}} = 312$ мм

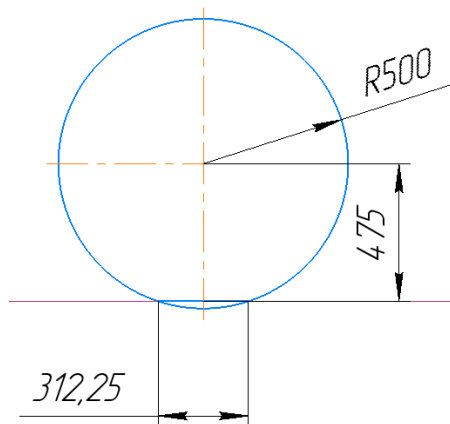


Рис. 5. Высота пятна контакта, согласно чертежу

Fig. 5. Height of contact patch according to drawing

Ширина шин электробуса: $L_{\text{шин}} = 230$ мм. При этом задние колеса сдвоены. Расстояние между шинами принимаем согласно техническим характеристикам электробуса.

Рассчитываем площадь давления электробуса:

$$S_{\text{шин}} = 2 \cdot (L_{\text{шин}} \cdot H_{\text{пят}}) + 2 \cdot (2 \cdot L_{\text{шин}} \cdot H_{\text{пят}}) = 2 \cdot 0.230 \cdot 0.312 + 2 \cdot 2 \cdot 0.230 \cdot 0.312 = 0.43 \text{ м}^2.$$

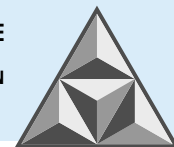
С учетом массы электробуса 12200 кг [11], рассчитываем силу давления электробуса на дорожное покрытие:

$$Q = \frac{12200 \cdot g}{S_{\text{шин}}} = \frac{12200 \cdot 9.82}{0.43} = 278 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}.$$

Задаем нагрузку на ось (см. рис. 6):

$$Q_{\text{ось}} = Q \cdot 2 = 556 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}.$$

По ГОСТ 9128–2013. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов, предел прочности на статическое сжатие асфальтобетонного покрытия $\sigma_B = 2.5$ МПа.



Расчётная нагрузка	
Двухбаллонное колесо	☒
Давление колеса на дорогу	Расчёт по осевой нагрузке
Давление в шине p, МПа	0,600
Диаметр отпечатка шины D (дин.), см	27,54
Диаметр отпечатка шины D (стат.), см	24,16
Статическая нагрузка на ось Q, кН	56,00
Статическая нагрузка от колеса на поверхность Qн, кН	27,50

Рис. 6. Задание осевой нагрузки в программе Indor Pavement

Fig. 6. Setting the axial load in the Indor Pavement programme

В соответствии с требованиями ГОСТ Р 59280 – 2020. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения усталостной долговечности при непрямом растяжении, предел выносливости асфальтобетонного покрытия $\sigma_{-1} = 250$ кПа.

Определяем отношение пределов:

$$K_{\sigma} = \frac{\sigma_B}{\sigma_{-1}} = \frac{2500 \text{ кПа}}{250 \text{ кПа}} = 10.$$

Так как длительность приложения нагрузки во время зарядки электробусов велика, делаем поправку нагрузки на отношение пределов, выражающую то, что прочность покрытия на статическое сжатие выше:

$$Q_{\text{ось}}^* = \frac{Q_{\text{ось}}}{10} = \frac{556}{10} \approx 56 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}.$$

Условная интенсивность движения электробусов и колеиность рассчитаны нами по нормативным требованиям [9], согласно исходным данным, представленным в табл. 2.

Таблица 2. Данные для расчета условной интенсивности движения транспорта

Table 2. Data for calculating the conditional traffic intensity

Параметр	Значение
Интенсивность движения в зоне зарядной станции в среднем (количество зарядок электробусов на маршруте в день) ($N_{\text{рс}}$)	10 авт./сут.
Время зарядки электробуса в пульсационном режиме ($T_{\text{зар}}$)	15 с

Приведенную интенсивность, рассчитанную ниже по известной формуле [9], вносим в программу Indor Pavement (см. рис. 7):

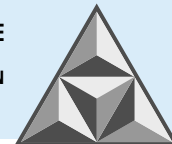
$$N_{\text{сф}} = \frac{N_{\text{рс}} \cdot T_{\text{зар}}}{0,01 \text{ с}} = \frac{10 \cdot 15}{0,01} = 15\,000 \frac{\text{авт.}}{\text{сут.}}$$

Число приложений расчётной нагрузки ΣNp	
Значение ΣNp	Расчёт по условиям движения
Тип участка дороги	Полоса движения
Показатель изменения интенсивности по годам q	1,000
Приведённая перспективная интенсивность Np	Явное задание
Способ задания приведённой интенсивности	На первый год службы
Приведённая интенсивность, авт./сут.	15 000
Суммарная интенсивность в первый год, авт./сут.	15 000

Рис. 7. Задание интенсивности движения в программе Indor Pavement

Fig. 7. Setting the traffic intensity in the Indor Pavement programme

Исходные данные (рис. 8, а), а также схема конструкции и порядок расчетов (рис. 8, б) в программе Indor Pavement на 2024 год представлены ниже (рис. 8).



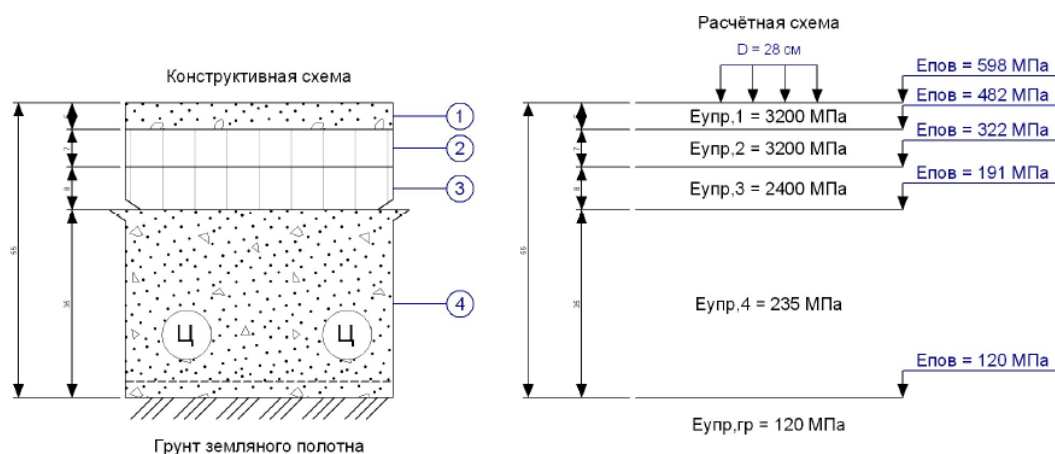
Исходные данные

Название объекта	Автомобильная дорога		
Район проектирования			
Выполняемые расчёты	На упругий прогиб		
Техническая категория дороги	III категория	Схема увлажнения	Схема 1
Тип дорожной одежды	Облегчённый	Коэффициент уплотнения грунта	0,97
Число полос движения (в обе стороны)	1	Требуемый поверхностный модуль упругости, МПа	393
Номер расчётной полосы от обочины	1	Суммарное число приложений нагрузки	34095600
Расчётная влажность грунта W_p	0,74	Расчётная скорость движения, км/ч	20
Нагрузка, кН / Давление, МПа / D штампа, см	55 / 0,60 / 28	Расчётное количество дней в году $Tr_{дг}$	205
Заданная надёжность K_n	0,90	Срок службы между кап. ремонтами $T_{сл}$, лет	12
Дорожно-климатическая зона	II - подзона 1		

a(a)

№ варианта	Наименование слоёв и материалов конструкции дорожной одежды	Схема конструкции дорожной одежды. Толщина, см	Общий модуль упругости на поверхности слоёв, МПа	Упругий прогиб, МПа	Колейность, см
Вариант № 1	1. Верхний слой покрытия — ЩМА-20, марка битума 90/130		Е _{пов} = 598 Е _{ктр} = 1,150 К _{расч} = 1,520 Запас = 32%	Е _{упр} = 3200	Н _{общ} = 13,3 Запас = -9,8 см
	2. Нижний слой покрытия — Асфальтобетон горячей укладки плотный II марки из щебёночной (гравийной) смеси типа Б, марка битума БНД/БН-60/90		Е _{пов} = 482	Е _{упр} = 3200	
	3. Верхний слой основания — Асфальтобетон горячей укладки плотный II марки из щебёночной (гравийной) смеси типа Б, марка битума БНД/БН-90/130		Е _{пов} = 322	Е _{упр} = 2400	Н _{ост.д.} = 3,9
	4. Нижний слой основания — Щебёночно-гравийно-песчаные смеси, при максимальном размере зёрен 0-8 мм		Е _{пов} = 191	Е _{упр} = 235 $\alpha = 1,000$	Н _{ост.д.} = 2,2
	— Полотно геотекстильное тканое марки Геофлак ПП 40				
	Грунт земляного полотна — Песок средней крупности с содержанием пылевато-глинистой фракции 5%		Е _{пов} = 120	Е _{упр} = 120	

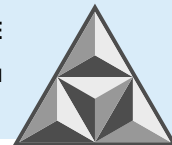
б(б)



- Верхний слой покрытия — ЩМА-20, марка битума 90/130
- Нижний слой покрытия — Асфальтобетон горячей укладки, плотный, II марки из щебёночной (гравийной) смеси типа Б, марка битума БНД/БН-60/90
- Верхний слой основания — Асфальтобетон горячей укладки, плотный, II марки из щебёночной (гравийной) смеси типа Б, марка битума БНД/БН-90/130
- Нижний слой основания — Щебёночно-гравийно-песчаные смеси, при максимальном размере зёрен 0-8 мм
— Полотно геотекстильное тканое марки Геофлак ПП 40

Рис. 8. Данные (а), конструктивная схема и порядок расчетов (б) в программе Indor Pavement

Fig. 8. Data (a), design scheme and calculation procedure (b) in the Indor Pavement programme



Показатели колеиности за 5 лет предполагаемой службы дорожного покрытия представлены в табл. 3, а расчет конструкции дорожной одежды дан в Приложении 1.

Таблица 3. Прогнозируемая колеиность в течение пяти лет

Table 3. Projected rutting within five years

Глубина колеи	Год службы дорожной одежды
4.4 см	1
6.6 см	2
7.8 см	3
8.9 см	4
9.8 см	5

Приложение 1

Appendix 1

Расчет конструкции дорожной одежды (отчет из программы Indor Pavement)

Calculation of pavement structure (report by Indor Pavement programme)

Исходные данные:

Название объекта: Автомобильная дорога

Район проектирования: город Москва

Выполняемые расчеты: На упругий прогиб

Дорожно-климатическая зона: II – подзона 1

Схема увлажнения: Схема 1

Расчетная влажность грунта W_p : 0.74

Коэффициент уплотнения грунта: 0.97

Продольный уклон i , ‰: 40.00

Проектные данные:

Техническая категория дороги: III категория

Тип дорожной одежды: Облегченный

Заданная надежность K_n : 0.90

Срок службы между кап. ремонтами $T_{сл}$, лет: 12

Ширина проезжей части, м: 7.5

Расчетная нагрузка:

Давление в шине p , МПа: 0.60;

Диаметр отпечатка шины D (дин.), см: 27.54

Статическая нагрузка на ось Q , кН: 55.00

Суммарное число приложений нагрузки:

Суммарное число приложений нагрузки: 34095600

Тип участка дороги: Полоса движения

Число полос движения (в обе стороны): 1

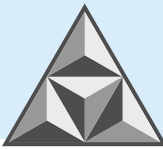
Номер расчетной полосы от обочины: 1

Расчетное количество дней в году $T_{р\text{дг}}$: 205

Показатель изменения интенсивности: 1.00

Приведенная интенсивность на первый год службы: 15000

Расчетная скорость движения, км·ч⁻¹: 20

*Вариант № 1*

Верхний слой покрытия: 5.0 см

ЩМА-20, марка битума 90/130

Нижний слой покрытия: 7.0 см

Асфальтобетон горячей укладки, плотный, II марки из щебеночной (гравийной) смеси типа Б, марка битума БНД/БН-60/90

Верхний слой основания: 8.0 см

Асфальтобетон горячей укладки, плотный, II марки из щебеночной (гравийной) смеси типа Б, марка битума БНД/БН-90/130

Нижний слой основания: 35.0 см

Щебеночно-гравийно-песчаные смеси, при максимальном размере зерен 0-8 мм

Полотно геотекстильное тканое, марки Геофлакс ПП 40

Грунт земляного полотна:

Песок средней крупности, с содержанием пылевато-глинистой фракции 5%

Стоимость варианта 155.00 у.е. на участке проектирования ($10.00 \cdot 10 = 100 \text{ м}^2$)

Результаты расчета на упругий прогиб:

Поверхностный модуль упругости $E_{\text{пов}} = 598.0 \text{ МПа}$

Требуемый модуль упругости $E_{\text{тр}} = 392.9 \text{ МПа}$

Расчетный коэффициент прочности $K_{\text{расч}} = 1.520$

Требуемый коэффициент прочности $K_{\text{тр}} = 1.150$

Коэффициент усиления $\alpha = 1.000$

Запас прочности 32%

Результаты расчета колеяности – суммарное число приложений расчетной нагрузки
 $N_c = 9225000$

Остаточная деформация:

для слоя № 3 $h = 3.9 \text{ см}$;

для слоя № 4 $h = 2.2 \text{ см}$;

для грунта $h_r = 2.2 \text{ см}$

Износ покрытия $D_{\text{и}} = 1.7 \text{ см}$

Общая глубина колеи $h_{\text{общ}} = 13.3 \text{ см}$

Допустимая глубина колеи $h_{\text{д}} = 3.0 \text{ см}$

Предельно допустимая глубина колеи $h_{\text{пр}} = 3.5 \text{ см}$

Запас = – 9.8 см (колея)

На основании проведенных расчетов нами рекомендовано, во избежание колеяности в зоне зарядки электробусов, перераспределить нагрузку более равномерно.

Нагрузку можно перераспределить двумя способами:

а) использование стальных подставок с резиновым покрытием для электробусов (см. рис. 9).

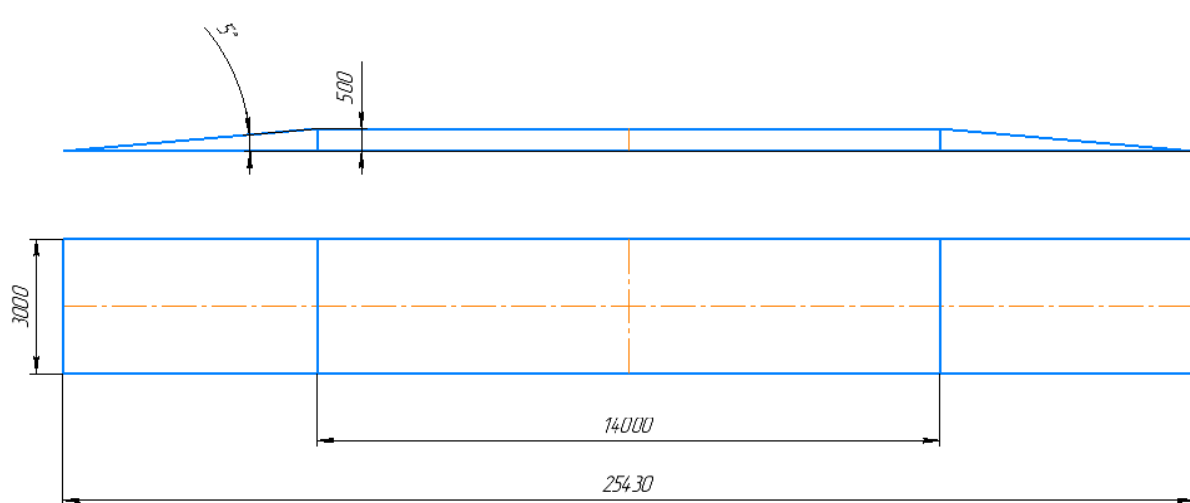
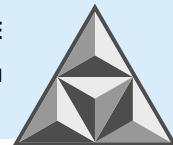


Рис. 9. Схема стальной подставки под электробус

Fig. 9. Schematic diagram of the steel stand for the electric bus

Распределяя нагрузку на большую площадь асфальтового покрытия, добиваемся значительного снижения давления;

б) замена верхнего слоя покрытия на жесткую дорожную одежду.

Монолитные бетонные покрытия имеют модуль упругости, который более чем вдвое превышает таковой для асфальтобетонных покрытий.

Площадь нагрузки, согласно схеме:

$$S_{\text{нагр}} = 25.43 \text{ м} \cdot 3 \text{ м} = 76.29 \text{ м}^2.$$

Нагрузка на дорожное покрытие составит:

$$Q_{\text{распр}} = \frac{12200 \text{ кг} \cdot g}{S_{\text{нагр}}} = \frac{12200 \cdot 9.82}{76.29} = 1.57 \frac{\text{кН}}{\text{м}^2}.$$

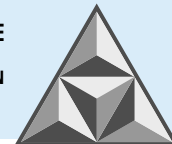
Следовательно, нагрузку на дорожное покрытие можно снизить минимум в 150 раз.

Программа *Indor Pavement* не позволяет задать столь малую нагрузку, поэтому расчет в условиях распределенной нагрузки не приведен. Обсуждение затрат на устройство разгрузочной площадки для зарядки электробусов в рамках настоящей работы также не предусматривалось.

ВЫВОДЫ

1. Определены расчетные нагрузки на площадках зарядки электробусов и предложены рекомендации по снижению колеиности на примере дорожного участка Москвы – столицы Российской Федерации. Результаты позволяют обоснованно подходить к вопросам проектирования и строительства дорог в местах расположения постов длительной зарядки общественного транспорта на электротяге.

2. Применение стальных устройств с резиновым покрытием по длине электробуса позволит равномерно распределить нагрузку по площади дорожного покрытия и значительно снизить давление на грунтовое основание. Замена верхнего слоя асфальтобетонного покрытия на жесткую дорожную одежду обеспечит существенное увеличение срока службы дорог в сети мегаполиса.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Официальная интерпретация национального стратегического плана и промышленной политики Коммунистической партии Китая «Made in China 2025» [Электронный ресурс] // URL: https://www.gov.cn/zhuanti/2016-05/12/content_5072762.htm (дата обращения 05.03.2025).
2. Распоряжение правительства российской федерации от 23 августа 2021 г. № 2290-р «Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года» [Электронный ресурс] // URL: <http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2rDs3BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJJt.pdf> (дата обращения 12.02.2025).
3. **Осинцев Н.А.** Многокритериальные методы принятия решений в «зелёной» логистике // *Мир транспорта*. 2021. Т. 19. № 5. С. 105-114. URL: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-5-13>.
4. **Ларин О.Н.** Транспортные системы крупных городов: вопросы эффективности // *Мир транспорта*. 2023. № 2 (105). С. 138-142. URL: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-16>.
5. **Битюков М.В.** Эксплуатация электробусов в России // *Молодой ученый*. 2022. № 48 (443). С. 21-25.
6. **Левкин С.И.** Доклад руководителя департамента городской политики г. Москвы. Комплексное освоение подземного пространства // Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы [Электронный ресурс] // URL: <https://stoi.mos.ru/news/v-moskvie-obsudili-voprosy-kompleksnogo-osvoeniia-podziemnogo-prostranstva> (дата обращения 14.02.2025).
7. **Рязанов Г.М., Доманов В.И.** Анализ и перспектива развития зарядных устройств для электромобилей // Мат. VI Национал. научно-практ. конф. В 2 т. Казань, 2020. С. 20-22.
8. **Тумаков С.А., Голубь Г.Н.** Вычисление напряжений в строительных конструкциях с учетом развития деформаций грунтового основания // *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. Вып. 1. С. 7-13.
9. Отраслевой дорожный методический документ: Рекомендации по выявлению и устранению колеи на нежестких дорожных одеждах. М.: ГП «Ииформавтодор», 2003. 181 с.
10. Альбом типовых дорожных конструкций для города Москвы. Правительство Москвы. Комплекс градостроительной политики и строительства города Москвы от 30.12.2020 [Электронный ресурс] // URL: <https://smart.mos.ru/mtsk-proxy/image/0af39c3a-189b-4beb-983d-a2339cb8326c> (дата обращения 12.03.2025).
11. Устройство и техническое обслуживание электробуса ЛИА3-6274 с зарядной системой «пистолетного» типа и пантографом. Учеб. пособие по программе профессиональной подготовки. Корпоративный ун-т московского транспорта [Электронный ресурс] // URL: <https://sop.mosmetro.ru/wp-content/uploads/2022/03/TK-voditel-D-ustrojstvo-elektrobusa.pdf> (дата обращения 12.03.2025).

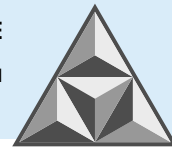
Поступила в редакцию 22.04.2025

Одобрена после рецензирования 19.05.2025

Принята к опубликованию 10.06.2025

REFERENCES

1. Official Interpretation of the National Strategic Plan and Industrial Policy of the Communist Party of China 'Made in China 2025'. Available at: https://www.gov.cn/zhuanti/2016-05/12/content_5072762.htm (accessed 05.03.2025).
2. Directive of the Government of the Russian Federation No. 2290-r dated 23 August 2021 'Concept for the Development of Production and Use of Electric Road Transport in the Russian Federation for the Period until 2030'. Available at: <http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2rDs3BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJJt.pdf> (accessed 12.02.2025) (in Russian).
3. **Osintsev, N.A.** (2021), "Multicriteria methods of decision making in 'green' logistics", *Mir Transporta*, vol. 19, no. 5, pp. 105-114. Available at: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2021-19-5-13> (in Russian).
4. **Larin, O.N.** (2023), "Transport systems of large cities: issues of efficiency", *Mir Transporta*, vol. 2, no. 105, pp. 138-142. Available at: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-2-16> (in Russian).
5. **Bitjukov, M.V.** (2022), "Operation of electric buses in Russia", *Young Scientist*, vol. 48, no. 443, pp. 21-25 (in Russian).



6. **Levkin, S.I.** "Report of the Head of the Moscow City Policy Department. Integrated development of underground space", Complex of urban policy and construction of the city of Moscow. Available at: <https://stroimsk.ru/news/v-moskvie-obsudili-voprosy-kompleksnogo-osvoeniia-podziemnogo-prostranstva> (in Russian) (accessed 14.02.2025).
7. **Ryazapov, G.M. and Domanov, V.I.** (2020), "Analysis and Prospect of Development of Charging Devices for Electric Vehicles", Proceedings of the Conference, Proceedings of the VI National Sci. Pract. Conf. [Mat. VI Natsional. nauch.-prakt. konf.], in 2 vols, Kazan, Russia, pp. 20-22 (in Russian).
8. **Tumakov, S.A. and Golub, G.N.** (2021), "Calculation of stresses in the building structures, taking into account ground base deformations", *Smart Composite in Construction*, vol. 2, no. 1, pp. 7-13 (in Russian).
9. Industry road methodological document: Recommendations on identification and elimination of rutting on non-rigid pavements (2003). Moscow, State Enterprise 'Informavtodor' (in Russian).
10. Album of standard road structures for the city of Moscow. Moscow Government. Complex of urban policy and construction of the city of Moscow dated 30.12.2020. Available at: <https://smart.msk.ru/mtsk-proxy/image/0af39c3a-189b-4beb-983d-a2339cb8326c> (accessed 12.03.2025) (in Russian).
11. Design and maintenance of electric bus LIAZ-6274 with 'pistol' type charging system and pantograph. Manual for the professional training programme. Corporate University of Moscow Transport. Available at: <https://sop.mosmetro.ru/wp-content/uploads/2022/03/TK-voditel-D-ustrojstvo-elektrobusa.pdf> (accessed 12.03.2025) (in Russian).

Received 22.04.2025

Approved 19.05.2025

Accepted 10.06.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.017.9

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-81-96

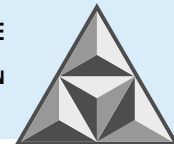
Иммерсивные технологии в архитектуре

С.В. Расторгуев

Семен Васильевич Расторгуев

Ярославский государственный технический университет, Институт архитектуры и дизайна,
Ярославль, Российская Федерация

rastorguevsv@ystu.ru



Рассматривается применение новых иммерсивных технологий – от архитектурного проектирования, визуализации информации до создания видоизменяющихся интерьеров и экстерьеров зданий. Для выяснения их особенностей использован ряд концептуальных разработок, прототипов и осуществленных экспериментов в области иммерсивной архитектуры как в виртуальном пространстве, так и в реальности, и на границах этих сред. Разработки включают создание виртуального макета здания в дополненной реальности, онлайн-проектирование интерьеров, визуализацию архитектурных объектов (от региона до квартиры), создание музейной экспозиции, сфокусированной на демонстрации исторического облика зданий и территорий. При создании выставочной экспозиции ориентируются на презентацию региона с применением разработки «виртуальный портал». Иммерсивные технологии ожидают большие перспективы развития, которые приведут к значительному изменению облика архитектуры в целом.

Ключевые слова: иммерсивная архитектура, цифровые технологии, мультимедиа, мэппинг, онлайн-проектирование, виртуальная архитектура, музейная экспозиция

Для цитирования:

Расторгуев С.В. Иммерсивные технологии в архитектуре // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 2. С. 81-96. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-81-96



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-81-96

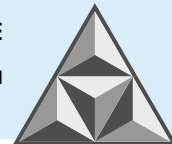
Immersive technologies in architecture

S.V. Rastorguev

Semyon V. Rastorguev

Yaroslavl State Technical University, Institute of Architecture and Design, Yaroslavl, Russian Federation

rastorguevsv@ystu.ru



The paper considers the application of new immersive technologies - from architectural design, information visualisation to the creation of immersive interiors and exteriors of buildings. The author applies a number of conceptual developments, prototypes and experiments in the field of immersive architecture both in virtual space and in reality, and at the boundaries of these environments. The developments include the creation of a virtual model of a building in augmented reality, online interior design, visualisation of architectural objects (from a region to a flat), creation of a museum exposition focused on demonstrating the historical appearance of buildings and territories. When creating an exhibition exposition, the focus is on the presentation of the region using the development of a 'virtual portal'. Immersive technologies have great prospects for development, which will lead to a significant change in the architectural image as a whole.

Keywords: immersive architecture, digital technologies, multimedia, mapping, online design, virtual architecture, museum exhibition

For citation:

Rastorguev S.V. Immersive technologies in architecture // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 2. P. 81-96. URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/6061/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-81-96



ВВЕДЕНИЕ

Расцвет цифровых технологий не оставляет в стороне и архитектуру [1]. Материальность зданий и архитектурных пространств постепенно растворяется в цифровых пикселях. Образы и идеи, заложенные в проекты, авторы стремятся подать и проявить наиболее ярко, опираясь на новые технологии. В свою очередь, эти технологии воздействуют на чувства зрителя все активнее и настойчивее, обеспечивая полное погружение наблюдателя в среду.

Архитектура так или иначе направлена в будущее. Архитекторы чаще прогнозируют короткие периоды ее локального развития, пытаются добиться, чтобы здание не успело устареть за то время, пока будет разработана рабочая документация, осуществится согласование проекта и строительство. Однако существуют методики реалистичного прогнозирования и долгосрочного развития архитектуры [2]. Чаще всего следствием их применения являются проекты, которые современники называют «бумажными». Однако, если проследить за судьбой такой «бумажной архитектуры» в авангарде 1920-х гг., можно отметить, что многие из представленных идей нашли применение спустя десятилетия или, скорее, даже столетие.

Рассмотрим одно из направлений развития архитектуры и дизайна, которое только зарождается, находится в экспериментальной стадии и, возможно, через короткое время станет мейнстримом. Это направление тактическое и не нацеливается на создание мегасооружений. Оно затрагивает визуальную составляющую самой архитектуры, процесса проектирования и донесения до наблюдателя зрительной информации о здании или объекте. В архитектуре, дизайне и строительстве таковое сегодня называют «иммерсивной архитектурой» (от англ.: *immersive architecture*).

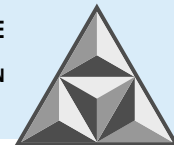
Данное направление стремится создать пространства, погружающие человека в определенную среду или опыт. Проекты, с ним ассоциирующиеся, часто используют сочетание физических элементов и технологий, например, виртуальной реальности (VR), дополненной реальности (AR) или смешанной реальности (MR) [3], света, звука, аудио- и сенсорных систем, а также интерактивных компонентов, чтобы стереть границы между зрителем (пользователем) и окружающим пространством.

Среди примеров применения подобных технологий можно выделить инсталляции *TeamLab* [4], их цифровые музеи, где посетители взаимодействуют с динамическими проекциями, или здания, спроектированные с учетом сенсорного опыта (например, павильоны на выставке *Expo* в Дубае). Повседневное применение – мультимедийные пространства или игровые зоны, где архитектура предоставляет пользователю обратную связь, «отвечая» на действия человека.

Иммерсивные технологии предлагают архитектору набор инструментов и решений, которые позволяют обитателю здания, в зависимости от реализуемой функции, тем или иным способом «погрузиться» в искусственную или реальную среду, дополненную цифровыми элементами; при этом создается ощущение присутствия. Эти технологии все активнее применяются не только в выставочных пространствах и для развлечений, но и успешно реализуются в медицине, образовании, искусстве и других сферах.

Среди иммерсивных технологий известны:

– *виртуальная реальность (Virtual reality; VR)*: полное погружение в цифровой мир через VR-очки или шлемы (например, *Oculus Rift* или *Valve Index*) [5]; при этом пользователь переносится из реальности в смоделированную среду;



– *дополненная реальность (Augmented Reality; AR)*: наложение цифровых элементов на реальный мир через очки (как вариант: *HoloLens*); одним из ярких примеров является игра *Pokémon GO* [6];

– *смешанная реальность (Mixed reality; MR)*: гибрид VR и AR, где цифровые объекты взаимодействуют с физическим окружением в реальном времени;

– *360°-видео и аудио*: панорамный контент, который позволяет ощутить себя «внутри» сцены; часто используется в кино или при проведении виртуальных туров;

– *гаптические технологии*: устройства, передающие тактильные ощущения (вибрация, давление), усиливая таким образом эффект присутствия.

В контексте иммерсивной архитектуры перечисленные технологии могут использоваться для создания интерактивных пространств. Например, архитекторы применяют VR для визуализации проектов еще до строительства объекта, позволяя клиентам «пройтись» по будущему зданию. Также в готовых тестовых пространствах возможно создание инсталляций с проекциями и датчиками движения, которые реагируют на действия посетителей.

Кроме того, эти технологии потенциально пригодны для 3D скульптинга, однако на данный момент иммерсивное архитектурное проектирование делает свои первые шаги и пока широко не распространено [7].

Рассмотрим практическое применение технологии на нескольких реальных примерах и прототипах, созданных в лаборатории расширенной реальности Института архитектуры и дизайна Ярославского государственного технического университета (*XR lab*). Об актуальности представленных разработок свидетельствуют публикации в региональных и федеральных СМИ («Аргументы и факты», МК.ru, «Вести Ярославль», «Первый Ярославский» и др.), а также выставочные презентации на мероприятиях: Интурмаркет, Интермузей, Ярославский градостроительный форум.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ИММЕРСИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В АРХИТЕКТУРЕ

Виртуальный макет здания в дополненной реальности

Проект направлен на то, чтобы предоставить архитекторам, специалистам по недвижимости и застройщикам новый способ архитектурной презентации объекта. В это время заказчики или потенциальные обитатели недвижимости получают принципиально новый опыт просмотра объекта, их интересующего.

Дополненная реальность в данном случае используется как технология, позволяющая продемонстрировать здания или их интерьеры даже в том случае, если они еще не построены или не существуют. Технологии расширенной реальности (XR) также могут быть привлечены для создания дискуссионной площадки при взаимодействии застройщиков и их клиентов для обсуждения объектов недвижимости еще до строительства или в его процессе с возможностью последующей корректировки проекта.

В разработанном прототипе виртуальный макет здания визуализируется на основе печатного буклета, содержащего QR-код для скачивания приложения и специальный маркер. При этом пользователь, направляя на маркер камеру мобильного устройства, изучает планируемое здание в виде макета (рис. 1).

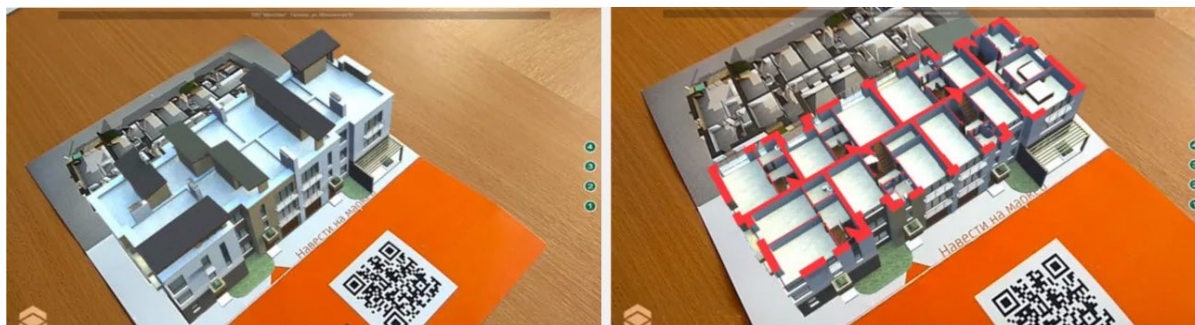


Рис. 1. Буклет с виртуальным макетом на экране устройства.

Слева – вид макета. Справа – режим поэтажного разреза здания

Fig. 1. Booklet with a virtual model on the device screen.

On the left is the model view. On the right is the floor-by-floor section mode of the building

Также пользователь имеет возможность рассмотреть окружающую территорию, сделать виртуальный разрез здания, изучить планировки квартир, ознакомиться с технико-экономическими показателями [8]. Возможными опциями для развития данной разработки являются визуальное представление интерьера отдельных квартир с расстановкой мебели в комнатах. Если применять ее к малоэтажному строительству, доступным становится выбор дизайна будущего дома, а также материалов отделки и их расцветки.

Маркер, который является точкой расположения виртуального макета, может быть размещен не только на буклете, но и на визитке, указателе или любой ровной однотонной поверхности. Также возможна безмаркерная технология в связке с геолокацией пользователя, когда виртуальный макет возникает в определенном месте.

Создание интерьера онлайн

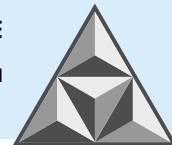
Данный прототип был разработан для подбора декоративных материалов, требуемых в процессе ремонта квартиры.

В настоящее время проект интерьера квартиры может создаваться хозяевами, которых творчески увлекает сам процесс. Однако зачастую таким проектировщикам не хватает квалификации или вкуса, кроме того, процесс может затянуться.

Второй вариант – привлечение профессионального дизайнера. В этом случае вероятность получить осмысленный и реализуемый проект интерьера резко возрастает. С другой стороны, процесс проектирования требует дополнительных затрат, не показывает всех возможных вариантов. Зачастую дизайнер аффилирован с определенными производителями материалов и мебели, что приводит к удорожанию процесса реализации и сужению диапазона выбора материалов.

Третий вариант – использование известных сервисов дизайна интерьера [9]. В данном случае проектирование осуществляется без привлечения дизайнера, что обеспечивает безвозмездное создание проекта для пользователя. Однако у таких сервисов имеется недостаток: чем больше параметров требуется настроить для проектирования, тем сложнее работа для пользователя. На определенном этапе требуются навыки САПР. Пока сервисы не позволяют автоматически создавать гармоничные сочетания цветов и материалов и не содержат прямых связей – ни с реальной стоимостью материалов на текущий момент, ни с исполнителями, реализующими проект.

Разрабатываемый прототип призван компенсировать недостатки автоматизированного проектирования, описанного в третьем варианте [10]. Прототип разрабатывается в виде мобильного приложения и веб-интерфейса с использованием технологий *Webgl*, *Three.js*.



Работа с приложением начинается с регистрации и ввода параметров помещений. В процессе уточняется тип помещения (гостиная, кухня, детская комната и др.). Затем задается наполнение комнат: мебель, материал, цвета и т.д. Отдельно возможно задавать бренды и стиль (рис. 2).

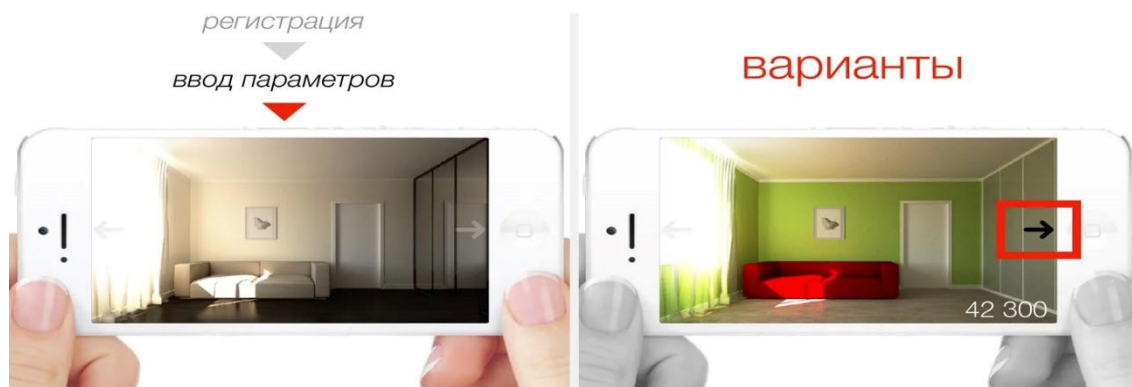


Рис. 2. Прототип мобильного приложения сервиса для дизайна интерьера на этапах ввода параметров и получения вариантов

Fig. 2. Prototype of a mobile app for interior design service at the stages of entering parameters and receiving options

После ввода первоначальных параметров пользователю становятся доступны базовые визуализации помещений, изучая которые можно регулировать параметры, что отражается на результате. В дальнейшем предполагается развитие этой модели с включением в процесс технологии искусственного интеллекта, что позволит быстро создавать наиболее гармоничные варианты интерьера.

Кроме визуализации, пользователь получает актуальный каталог отделочных материалов производителей и магазинов, привязанный к проекту, и трехмерную модель комнат для просмотра, в том числе – в дополненной/виртуальной реальности.

Приложение для демонстрации архитектурного проекта в разных масштабах

Следующий проект реализован на концептуальном уровне; на его примере продумана логистика перемещения в VR-пространстве. VR-приложение предоставляет возможность подробно и наглядно ознакомиться с архитектурным объектом и его окружением. С его помощью пользователи могут исследовать объект в различных масштабах – от регионального уровня до уровня комнаты [11].

Для использования VR-приложения требуется шлем виртуальной реальности (например, *Oculus Quest*). После активации шлем автоматически запускает приложение, и пользователь оказывается в специально созданном виртуальном пространстве – VR-офисе. Варианты оформления пространства могут быть различными: эстетически оформленное помещение с панорамным видом из окна, выполненное в заданной стилистике, либо абстрактное решение, разработанное с учетом определенного бренда.

В этом виртуальном пространстве пользователю предлагается меню с основными разделами презентации проекта. Все элементы меню активируются жестом – наведением виртуальной «руки» с курсором на соответствующий пункт в разделе. При наведении на элемент появляется пояснительная информация о реализуемой функции.

Пользователь может воспроизвести презентацию в автоматическом режиме, который представляет собой последовательность трехмерных видеороликов. Продолжительность просмотра зависит от сложности и объема информации. При необходимости пользователь



может приостановить воспроизведение, осуществить возврат (перемотку) назад или продолжить просмотр вручную.

VR-приложение содержит интерактивную карту с включением различных функций. Выбирая категорию «Регион», пользователь получает доступ к карте, на которой указано местоположение объекта. Карта представлена под углом 45 град. в аксонометрическом отображении; она содержит фрагмент космического снимка или картографическое изображение. На карте отмечены основные транспортные магистрали и соседние населенные пункты, при этом масштаб охватывает границы административного округа.

После активации геотега микрорайона на карте пользователь переходит на уровень «Микрорайон». Здесь он наблюдает трехмерную модель микрорайона, которая медленно вращается, при этом управление позволяет осмотреть объект и получить представление о нем со всех сторон.

Затем пользователь переходит на уровень «Двор». Здесь подбирается тип представления микрорайона – в формате плоской карты или же упрощенных трехмерных объектов для ориентации. Также можно активировать обозначение границ муниципальных образований и ключевые инфраструктурные объекты – дороги, магазины, школы и др. Значки, обозначающие инфраструктурные объекты, являются интерактивными. При нажатии на них пользователь получает текстовую или аудиовизуальную справку. Дополнительная опция для просмотра объектов на данном уровне восприятия – аудиовизуальная справка, описывающая основные преимущества местоположения микрорайона. Модель на данном уровне также анимирована: доступны варианты плавного вращения, приближения к пользователю или движения по определенной траектории, охватывающей интересующий здания, для более детального их рассмотрения. Анимация синхронизируется с аудиовизуальной информацией.

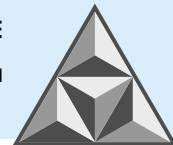
С целью повышения информативности предлагается создание полупрозрачных слоев, наложенных на модель или карту с указанием таких аспектов, как уровень загрязнения, средний уровень шума или очередность строительства здания или сооружения. В качестве дополнения создается анимация этапов застройки, при которой объекты будут появляться по мере реализации предполагаемого строительства. Анимация может включать шкалу времени и поясняющую инфографику. Также на этом уровне просмотра могут присутствовать специальные значки, при указании которых пользователь переходит к фотопанораме 360 град. в высоком разрешении с заданной видовой точки, имеющей интерактивные пояснения.

Спускаясь вниз по уровням восприятия, пользователь переходит на уровень «Здание» (рис. 3); здесь перед ним предстает трехмерная модель выбранного объекта в увеличенном масштабе.



Рис. 3. 3D визуализация отображаемой информации на уровне «Здание»

Fig. 3. 3D Visualization of the displayed information at the «Building» level



Модель здания можно виртуально вращать для подробного исследования. На этом уровне допускается загружать собственные 3D-модели пользователя, прошедшие этап оптимизации для использования в виртуальной реальности. Здесь также присутствуют значки панорам, активация которых позволяет визуализировать общественные пространства и рассматривать их с углом обзора 360 град. Выделяя различные этажи здания, пользователь получает отображение их планировок в трехмерном пространстве. Предусмотрена возможность визуализации интерактивных зон этажа – холла, коридора, лестничной клетки и лифта, жилых помещений и др.

Активируя интересующее здание, осуществляем быстрый переход на уровень «Квартира». Пользователь видит трехмерную модель выбранного жилого помещения, выполненную без верхнего перекрытия и отмасштабированную для обеспечения целостного восприятия. Пользователь может не только вращать модель в виртуальном пространстве, но и «ходить», рассматривая интерьер в упрощенном представлении. Также имеется возможность интеграции внешних 3D моделей после необходимой оптимизации VR-отображения. Выбирая интересующее помещение, пользователь «переходит» в виртуальное пространство. Для создания эффекта полного погружения используется высококачественный панорамный рендеринг, который позволяет осуществлять детальный осмотр при повороте головы.

Кроме того, имеется возможность исследования виртуального пространства с поддержкой шести степеней свободы перемещения, что создает ощущение реальности. В интерьере могут размещаться интерактивные метки с поясняющими текстовыми или аудиовизуальными сообщениями. На этом уровне реализована функция анимации, имитирующая движение солнца и теней внутри помещения в течение дня. Также имитируется вид из окон – панорамное изображение экстерьера, полученное с помощью камеры (360 град.) с заданной высоты. Дополнительно реализуется механизм переключения между различными интерьерными решениями в сочетании с возможностью замены цветовых характеристик стен и мебели. Существенным аспектом описанной технологии является 3D моделирование крупных территорий или целых городов. Этот процесс подробно описан в [12].

AR-VR музей на примере Ростовского кремля

Мы рассмотрели несколько прототипов и концептуальный проект, рассчитанные на широкую, однако абстрактную аудиторию. Следующий проект имеет географическую привязку. Он создан как отдельная экспозиция для Конюшенного двора Государственного музея-заповедника Ростовского кремля [13].

В данном случае речь идет о технологии мэппинга [14], которая демонстрирует дополненные элементы реальности не на экране устройства или в VR-очках, а на реальных объектах с помощью проекции. В данном случае для проекции используется макет Ростова Великого (Россия), который размещается в экспозиционном пространстве. Размеры макета составляют 3×4 м. Используются проекторы ультракороткого фокусного расстояния, с помощью которых на макет проецируются различные видеофрагменты и изображения, посвященные истории города. Проекция учитывает элементы реального макета; соответственно, на макете подсвечиваются памятники архитектуры, отображаются исторические вехи и этапы развития города, достопримечательности и места археологических раскопок (рис. 4).

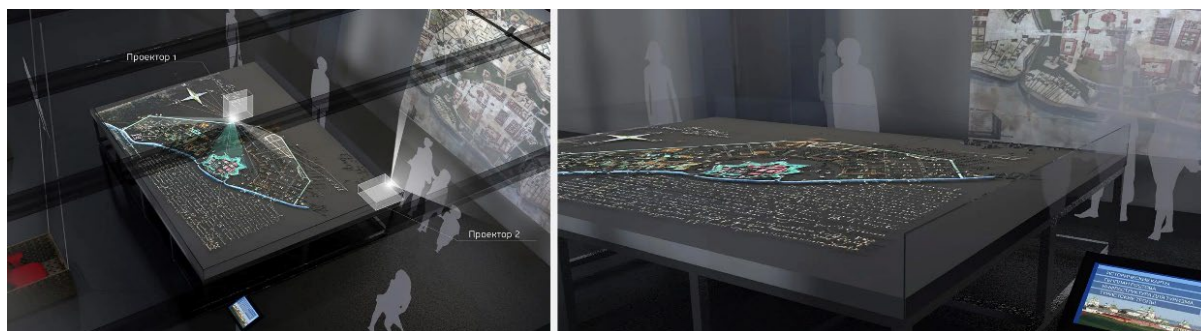


Рис. 4. Экспозиция в музее-заповеднике Ростовский кремль с использованием макета и технологии мэппинга. Слева – схема расположения проекторов и макета.

Справа – посетителям доступен выбор определенного сценария, отображаемого на макете информации

Fig. 4. Exposition in the Rostov Kremlin using a model and mapping technology.

On the left is a diagram of the layout of the projectors and the model.

On the right is the choice of a specific scenario for the information displayed on the model

Дополнительные материалы выносятся на стену рядом с макетом, например, здание подсвечивается, а линия выноса от него попадает на стену с изображениями и пояснительной информацией.

В этом же экспозиционном пространстве, где установлен макет, размещается симулятор виртуальной реальности [15], стилизованный под корзину воздушного шара и позволяющий более глубоко погрузиться в отображаемый контент. Используя VR-технологии, посетители могут совершить воздушное путешествие над Ростовом Великим, где выделяются памятники архитектуры, отображаемые на макете. В полете происходит «погружение в историю», когда величественный памятник архитектуры и прилегающая территория показаны такими, какими они были в разные исторические периоды [16]. Область виртуального полета включает в себя также городские окрестности, для чего создаются 3D модель города и прилегающих территорий в настоящем времени и 3D модели отдельных фрагментов города, характерных для различных эпох (рис. 5).

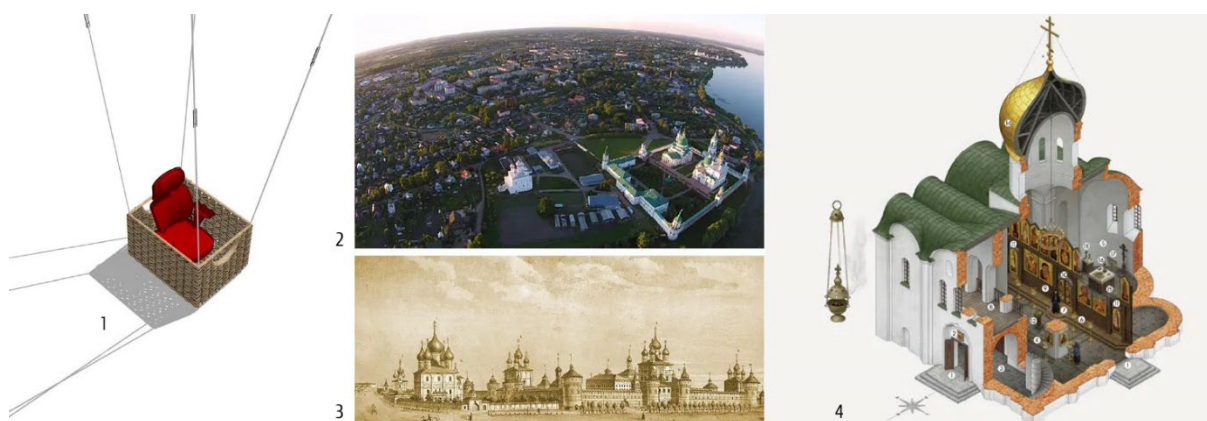


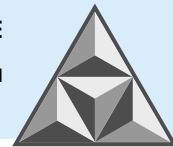
Рис. 5. Симулятор виртуальной реальности (1) и типы отображаемой информации:

2 – полет над городом с обзором 360° град.; 3 – воссоздание исторического облика Ростовского кремля; 4 – инфографика, показывающая детали памятника архитектуры

Fig. 5. Virtual reality simulator (1) and types of displayed information:

2 – flight over the city with a 360° view; 3 – recreation of the historical appearance of the Rostov Kremlin; 4 – infographics showing details of the architectural monument

Инфографика позволяет подробно изучить городские интерьеры и в отдельных случаях – модели этапов строительства зданий. Для мэппинговой проекции на макете предусмотрен режим навигации, дающий возможность пользователю ввести точки маршрута по городу,



узнать оптимальные траектории перемещения, расположение всех достопримечательностей, близких к маршруту, изучить информацию о них и получить историческую справку.

Набор сценариев для мэппинговой проекции на макете зависит от общей направленности музейной экскурсии. Обозначим некоторые доступные варианты:

- объекты и этапы реставрации в Ростове Великом и его окрестностях, указанные на ленте времени;
- места реставрационных открытий, вклад известных реставраторов в раскрытие древнего образа города;
- точки археологических экспедиций, уникальные археологические находки и открытия;
- сценарий, посвященный урагану 1953 г. в городе, с визуализацией на макете, фотографиями и информацией о реставрированных объектах;
- рассказ о месте расположения экспозиции – Конюшенном дворе с иллюстрированной лентой времени, демонстрирующей первоначальное разрушение и дальнейшее восстановление этого объекта.

На основе полученного опыта по разработке отдельной AR-VR-экспозиции также сформулирована общая концепция развития музейных пространств.

Экспозиционные пространства открыты для иммерсивной архитектуры в наибольшей степени, поскольку их функциональная задача – глубоко вовлечь посетителя в процесс изучения.

Одна из важных целей функционирования современного музея – разработка инновационных и вовлекающих методов презентации и интерпретации культурных, художественных и архитектурных ценностей, экспонатов и предметов искусства. В рамки научных концепций и программ развития музеев все чаще внедряются современные технологии. В частности, использование программ расширенной реальности (XR) способствует дальнейшему совершенствованию просветительской, образовательной и научно-исследовательской активности музея.

Предлагаемые XR-технологии могут функционировать на основе электронных баз данных, содержащих высокоточные трехмерные модели отсканированных объектов. Работа по созданию таких баз и оцифровки фонда в некоторых музеях уже проводится. Эта методика расширяет возможности изучения музейных экспонатов и коллекций, а также способствует популяризации культурного наследия и повышению доступа к экспозициям. В частности, возникает возможность ознакомления с редкими экспонатами, которые обычно скрыты от посетителей.

Кроме того, в расширенной реальности любому пользователю доступны вспомогательные элементы – виртуальные диаграммы, схемы и чертежи, наиболее полно раскрывающие концепцию выставки и экспонируемых коллекций.

Применение XR-технологий создает новые условия для развития музейного туризма и придает экскурсионному обслуживанию дополнительную ценность, поскольку виртуальный контент может адаптироваться в зависимости от уровня знаний и тематических интересов посетителей. Соответственно, одна постоянная экспозиция может включать в себя несколько «ветвей» или слоев просмотра, что способствует увеличению аудитории и повышает вероятность повторного посещения.

С другой стороны, возможность выбора типа экскурсии позволяет музею получить обратную связь – данные о количестве и составе посетителей, включая профессиональный статус и другие статистические параметры.



Рекреационную зону музея и пространства, не занятые под постоянные экспозиции, целесообразно дополнить тематическим или развлекательным XR-контентом, что особенно актуально для школьников в перерывах между осмотром экспонатов. Кроме того, «новая наглядность» позволит существенно повысить степень вовлечения таких пространств в различные виды деятельности; они станут пригодны для проведения научных конференций, симпозиумов, круглых столов, семинаров, временных выставок и различных социально-культурных мероприятий на высоком уровне, включая творческие мастерские и художественные студии, концерты и конкурсы. Ключевой фактор – возможность, пребывая физически в разных помещениях, виртуально находиться в единых пространствах, а при необходимости – вновь «разбиваться» на студии, секции или аудитории, которые соотносятся с реальными помещениями.

Стоит отметить еще одно преимущество использования XR-технологий – возможность демонстрации музейных предметов или зданий музеев в процессе реставрации. Сканирование предметов до реставрации, во время ее и по окончании процесса позволит наглядно продемонстрировать работу реставрационных мастерских. Кроме того, XR-технологии частично решают проблему адаптации экспозиций для восприятия людьми с нарушениями зрения.

Таким образом, применение XR-технологий в музеях, хотя и потребует на первоначальном этапе затрат на оцифровку экспонатов, в итоге повысит интерес широкой публики к музейному делу и будет способствовать переосмыслению восприятия музейных ценностей в современных условиях.

Стенд для Петербургского международного экономического форума

Ярким примером применения иммерсивных технологий для создания реального интерьера является выставочный стенд Ярославской области на Петербургском международном экономическом форуме (ПМЭФ) [17]. Объект одновременно включает две компоненты – реальную и виртуальную. Реальная составляющая – сложная структура из гибких светодиодных RGB-трубок, функционирующая по принципу единого экрана и демонстрирующая изображения или видеофрагменты, разделенные на вертикальные полосы (рис. 6).

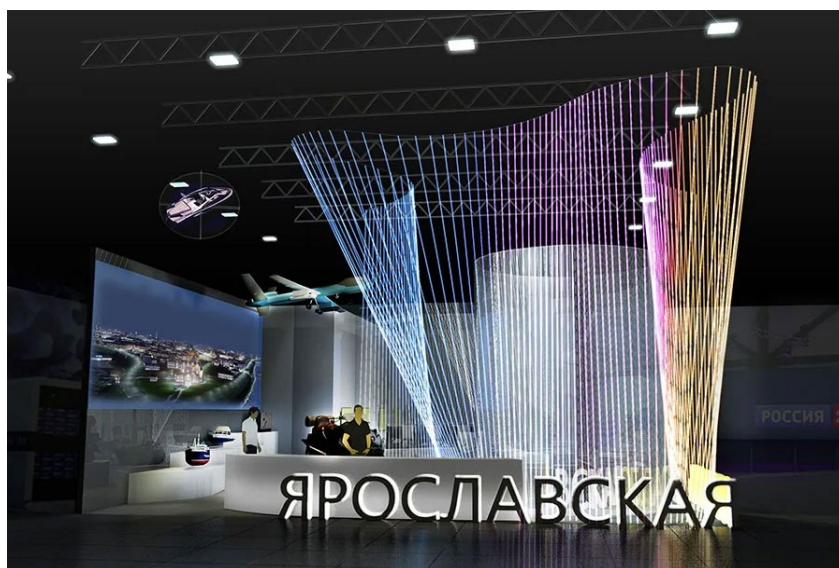
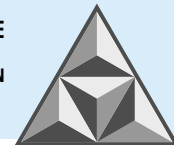


Рис 6. Стенд Ярославской области для Петербургского международного экономического форума (проект)

Fig. 6. Yaroslavl Region stand for the SPIEF (project)



Таким образом, пусть и в упрощенном виде, во внутреннем пространстве создается подобие иммерсивного интерьера, в котором поверхность «стены» способна постоянно изменяться и преобразовываться. Кроме того, эффект отчасти транслируется вовне, только видоизменяется не интерьер, а арт-объект загадочной формы, привлекающий посетителей других стендов и зон на ПМЭФ. Также в экспозиции присутствует обычная проекционная плоскость, на которой транслируется информативный видеоконтент.

Вторая составляющая экспозиции стенда полностью виртуальная; она представлена AR-порталами, позволяющими посетить различные города региона. Технология портала реализуется в среде дополненной реальности. Сам портал представляет собой виртуальный проем (окно или дверь), который виден на экране мобильного устройства или в VR-очках, совмещаясь с реальным изображением, получаемым камерой. Он привязывается к определенной точке реальной среды, например, стоит на полу в заданном месте. Пользователь может подойти к portalу и, в зависимости от его конфигурации, заглянуть или же войти в него. При этом он оказывается в другой точке реального или виртуального пространства, имеет возможность осмотреть его или сделать несколько шагов внутри. Обернувшись, он видит тот же портал, ведущий обратно, и, при желании, возвращается в исходный пункт. В рамках экспериментальной работы реализовался портал Ярославль-Вятское [18], причем время года в точке назначения отличалось от исходной точки. На стенде был представлен проект «Портал в регион», состоящий из нескольких AR-порталов, позволяющих посетить различные города и предприятия Ярославской области. Хотя проект стенда реализовался только частично, именно виртуальная его составляющая стала своеобразной визитной карточкой иммерсивной архитектуры, представленной на форуме.

ВЫВОДЫ

Зафиксирован начальный этап развития нового технологического направления в архитектуре. Показанные наработки демонстрируют, что у него может быть много векторов и только будущее определит, какие из них будут широко использованы, а какие – останутся на уровне узкопрофессиональных экспериментов. Ожидается масштабирование технологии по количеству объектов и их физическим размерам. Рано или поздно мы столкнемся с целыми кварталами городов, пронизанными результатами внедрения данной технологии. В условиях широкой VR-интеграции все чаще стены домов будут становиться динамичными медиафасадами, дизайн интерьеров – легко изменяться, а население городов – смотреть на мир через очки дополненной реальности.

Тот динамизм, которого в прошлом столетии добивались авангардисты и к которому сегодня стремятся архитекторы при реализации своих статичных объектов, на новом витке цивилизации будет достигаться за счет иммерсивной архитектуры.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Трубин С.С.** Влияние цифровых технологий на развитие параметрического проектирования в архитектуре // Наука и технологии: вчера, сегодня, завтра: Сб. науч. статей. Краснодар: ИП Кабанов В.Б. (издательство «Новация»), 2024. С. 149-151.
2. **Расторгуев С.В., Петрова П.В.** Архитектура без границ // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, вып. 4. С. 72-98. DOI 10.52957/27821919_2022_4_72
3. **Утегенов Н.Б.** Виртуальная и дополненная реальности (VR и AR) // *Universum: технические науки*. 2022. № 7-1(100). С. 23-26. <https://7universum.com.ru/tech/archive/item/14088>



4. **Мещерякова А.А.** Иммерсивная галактика от TeamLab // *Artifex*: [сайт]. URL: <https://artifex.ru/цифра/teamlab/> (дата обращения: 17.04.2025).
5. **Voinea G.D., Boboc R.G., Antonya C.** Mixed reality tools for education in the metaverse // *Education and New Development*. 2022. Т. 12. № 4. С. 249-251. <https://doi.org/10.36315/2022v2end056>
6. **Alha K., Koskinen E., Paavilainen J., Hamari J.** Why do people play location-based augmented reality games: a study on Pokémon GO // *Computers in Human Behavior*. 2019. Т. 93. С. 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.12.008>
7. **Гуреев К.А., Наговицын А.А.** Интеграция технологий виртуальной и дополненной реальности для проектирования строительных объектов // *Прикладные экономические исследования*. 2025. № 1. С. 123-129. DOI 10.47576/2949-1908.2025.1.1.015
8. Инновационная технология презентации для недвижимости // *XR lab*: [сайт]. URL: <https://vimedia.ru/w/blog/2022/03/05/vimedia-xr-инновационная-технология/> (дата обращения: 18.04.2025).
9. 10 онлайн-планировщиков квартиры // *vc.ru*: [сайт]. URL: <https://vc.ru/id2102337/1426850-10-onlain-planirovshikov-kvartiry-kak-ya-vybirala-besplatnyi-servis-dlya-planirovki> (дата обращения: 18.04.2025).
10. RoomZoom — создать интерьер онлайн // *XR lab*: [сайт]. URL: <https://vimedia.ru/w/blog/2022/04/11/roomzoom-создать-интерьер-онлайн/> (дата обращения: 18.04.2025).
11. VR-приложение для демонстрации архитектурного проекта // *XR lab*: [сайт]. URL: <https://vimedia.ru/w/blog/2023/01/26/vr-приложение-архитектура/> (дата обращения: 18.04.2025).
12. **Расторгуев С.В.** Трехмерное моделирование городов: исторические реконструкции и альтернативная реальность // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 3. С. 65-79. DOI 10.52957/2782-1919-2024-5-3-65-79
13. Макет Ростова и AR-VR // *Cih.ru блог*: [сайт]. URL: <https://cih.ru/wp/bld/макет-ростова-и-ar-vr/> (дата обращения: 18.04.2025).
14. **Решетникова И.В.** 3D-mapping как способ популяризации культурного наследия в цифровом обществе // *Современная культурология: проблемы и перспективы*. Саратов: Издательство «Саратовский источник», 2024. С. 40-45.
15. **Hu Y., Sun W., Liu X., Gan Q., Shi J.** Tourism demonstration system for large-scale museums based on 3D virtual simulation technology // *The Electronic Library*. 2020. Т. 38. № 2. С. 367-381. DOI 10.1108/e1-08-2019-0185
16. **Расторгуев С.В.** Методы изучения истории архитектуры на основе 3D моделирования // *Строительство и реконструкция*. 2024. № 5 (115). С. 95-111. DOI 10.33979/2073-7416-2024-115-5-95-111
17. Стенд для SPIEF // *Cih.ru блог*: [сайт]. URL: <https://cih.ru/wp/bld/стенд-для-spief/> (дата обращения: 19.04.2025).
18. Портал дополненной реальности // *Rutube*: [сайт]. URL: <https://rutube.ru/video/98f780ee3cc993d65a6b7d5b08e3aca4/> (дата обращения: 19.04.2025).

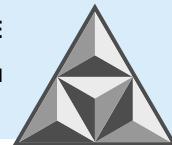
Поступила в редакцию 18.04.2025

Одобрена после рецензирования 03.05.2025

Принята к опубликованию 22.05.2025

REFERENCES

1. **Trubin, S.S.** (2024), "Influence of digital technologies on the development of parametric design in architecture", *Science and Technology: yesterday, today, tomorrow: Proc. sci. art. Krasnodar*: IE Kabanov V.B. (Novatsiya Publishing House), pp. 149-151 (in Russian).
2. **Rastorguev, S.V. and Petrova, P.V.** (2022), "Architecture without Borders", *Smart Composite in Construction*, vol. 3, no. 4, pp. 72-98 [online]. DOI 10.52957/27821919_2022_4_72 (in Russian).
3. **Utegenov, N.B.** (2022), "Virtual and augmented reality (VR and AR)", *Universum: Technical Sciences*, vol. 7-1, no. 100, pp. 23-26. <https://universum.com.ru/tech/archive/item/14088> (in Russian).
4. **Meshcheryakova, A.A.** Immersive galaxy from TeamLab, *Artifex*: [site]. Available at: <https://artifex.ru/цифра/teamlab/> (accessed 17.04.2025) (in Russian).
5. **Voinea, G.D., Boboc, R.G. and Antonya, C.** (2022), "Mixed reality tools for education in the metaverse", *Education and New Development*, vol. 12, no. 4, pp. 249-251. <https://doi.org/10.36315/2022v2end056>



6. **Alha, K., Koskinen, E., Paavilainen, J. and Hamari, J.** (2019), "Why do people play location-based augmented reality games: a study on Pokémon GO", *Computers in Human Behavior*, vol. 93, pp. 114-122, <https://doi.org/10.1016/j.chb.2018.12.008>
7. **Gureev, K.A. and Nagovitsyn, A.A.** (2025), "Integration of virtual and augmented reality technologies for design of construction projects", *Applied Economic Research*, no. 1, pp. 123-129. DOI 10.47576/2949-1908.2025.1.1.015 (in Russian).
8. Innovative presentation technology for real estate, *XR lab*: [website]. Available at: <https://vimedia.ru/w/blog/2022/03/05/vimedia-xr-инновационная-технология/> (accessed 18.04.2025) (in Russian).
9. 10 online flat planners, *vc.ru*: [site]. Available at: <https://vc.ru/id2102337/1426850-10-onlain-planirovshikov-kvartiry-kak-ya-vybirala-besplatnyi-servis-dlya-planirovki> (accessed 18.04.2025) (in Russian).
10. RoomZoom – create an interior online, *XR lab*: [website]. Available at: <https://vimedia.ru/w/blog/2022/04/11/roomzoom-создать-интерьер-онлайн/> (accessed 18.04.2025) (in Russian).
11. VR application for demonstrating an architectural project, *XR lab*: [website]. Available at: <https://vimedia.ru/w/blog/2023/01/26/vr-приложение-архитектура/> (accessed 18.04.2025) (in Russian).
12. **Rastorguev, S.V.** (2024), "3D modelling of cities: historical reconstructions and alternative reality", *Smart Composite in Construction*, vol. 5, no. 3, pp. 65-79. DOI 10.52957/2782-1919-2024-5-3-65-79 (in Russian).
13. The Layout of Rostov and AR-VR, *Cih.ru blog*: [site]. Available at: <https://cih.ru/wp/bld/макет-ростова-и-ar-vr/> (accessed 18.04.2025) (in Russian).
14. **Reshetnikova, I.V.** (2024), "3D-mapping as a way to popularise cultural heritage in the digital society", *Modern Cultural Studies: problems and prospects*, Saratov: Publishing House 'Saratov Source'.
15. **Hu, Y., Sun, W., Liu, X., Gan, Q., and Shi, J.** (2020), "Tourism demonstration system for large-scale museums based on 3D virtual simulation technology", *The Electronic Library*, vol. 38, no. 2, pp. 367-381. DOI 10.1108/e1-08-2019-0185
16. **Rastorguev, S.V.** (2024), "Methods of studying architectural history on the basis of 3D modelling", *Construction and Reconstruction*, vol. 5, no. 115, pp. 95-111. DOI 10.33979/2073-7416-2024-115-5-95-111 (in Russian).
17. Stand for SPIEF, *Cih.ru blog*: [site]. Available at: <https://cih.ru/wp/bld/стенд-для-spief/> (accessed 19.04.2025) (in Russian).
18. Portal of augmented reality, *Rutube*: [website]. Available at: <https://rutube.ru/video/98f780ee3cc993d65a6b7d5b08e3aca4/> (accessed 19.04.2025) (in Russian).

Received 18.04.2025

Approved 03.05.2025

Accepted 22.05.2025



ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция строго придерживается норм и правил международной публикационной этики.

Правовую основу обеспечения публикационной этики составляют международные стандарты: положения II Всемирной конференции по вопросам соблюдения добросовестности научных исследований, положения Комитета по этике научных публикаций (The Committee on Publication Ethics – COPE) и нормы раздела «Авторское право» Гражданского кодекса РФ.

Представление статьи в журнал подразумевает следующее:

- работа не была опубликована в другом журнале;
- работа не находится на рассмотрении в другом журнале;
- все соавторы согласны с публикацией статьи;
- получено согласие (в явной или неявной форме) организации, на базе которой проведено исследование.

При представлении рукописи в журнал авторы должны убедиться, что все цитирования оформлены корректно, указаны заимствованные источники в подписях к рисункам и надписям к таблицам. Если таковые не приведены, предполагается, что рисунки и таблицы представляют собой плод авторской деятельности. Редакция осуществляет проверку статей на антиплагиат и отклоняет или возвращает авторам рукописи, если оригинальность текстов по результатам такой проверки не достигает 70-75 %.

Авторские права

Авторы, направляющие свои работы в журнал, соглашаются со следующим:

1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации.
2. Авторы сохраняют за собой право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся неэксклюзивного распространения версии работы в опубликованном в журнале виде (например, размещение в институтском хранилище, публикация в книге), со ссылкой на оригинальную публикацию в данном журнале.

Приватность

Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте данного журнала, используются исключительно для достижения целей, совпадающих с миссией журнала; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

Правила оформления статей для журнала «Умные композиты в строительстве Smart Composite in Construction»

В журнале «Умные композиты в строительстве Smart Composite in Construction» печатаются работы преподавателей и сотрудников высших учебных заведений РФ, РАН, РААСН и других исследовательских организаций, работающих в сфере промышленного и гражданского строительства и архитектуры, в том числе – зарубежных.

Рубрики журнала

- Строительные конструкции, здания и сооружения (технические)
- Строительные материалы и изделия (технические)
- Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические)



– Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (технические; архитектура)

Статьи, направляемые в журнал, должны удовлетворять следующим требованиям:

Статья должна соответствовать профилю и рубрикам журнала, обладать актуальностью, новизной, иметь прикладное значение (и/или теоретическое обоснование). Вопрос об опубликовании или отклонении статьи решает редакционная коллегия журнала, и ее решение является окончательным.

Статьи должны представлять сжатое, конкретное изложение результатов, без повторения одних и тех же данных в тексте, рисунках и таблицах.

Все представленные статьи должны быть набраны 12 кеглем, шрифт *Times New Roman*, интервал – 1.1. Поля: верхнее и нижнее – 3 см, левое и правое – 2.5 см. Абзацный отступ – 0.75 см. Объем статьи – 7-15 страниц, включая аннотацию и список литературы на русском и английском языках; число таблиц – не более 3, рисунков – не более 5-6, для обзорной статьи – не более 8, в том числе помеченных буквами *a, б* (курсив) и т.д. Рисунки, как и таблицы, подписи и заголовки к ним, а также примечания, размещаются по тексту статьи. В раздел «Обзорные статьи» принимаются материалы объемом от 20 до 30-35 страниц.

При оформлении статьи рекомендуется избегать употребления любых сокращений, кроме общепринятых. Первое упоминание сокращенного термина обязательно следует после его представления в полном виде. Рукописные вставки не допускаются. Кавычки оформляются «елочкой». Текст набирается без нумерации страниц.

Структура статьи

Первая страница рукописи оформляется шрифтом с размером 12 пт. На первой строке указывается тип статьи с выравниванием слева без абзацных отступов (Научная статья, Обзорная статья). На следующей строке проставляется индекс по универсальной десятичной классификации (УДК). После УДК пропускается одна строка и дается по центру **наименование работы** (полужирное начертание). Пропускается одна строка и приводятся **И.О. Фамилия** (полужирное начертание) каждого автора. После фамилии каждого автора надстрочным символом указывается сноска на аффилиацию в виде цифры. Если все авторы представляют одну и ту же организацию, цифровое обозначение аффилиации не указывается. Пропускается одна строка, начиная с первого надстрочного номера аффилиации, приводится полное Имя, Отчество, Фамилия автора (или авторов, если таковых, представляющих данную организацию, несколько), затем, на следующей строке – наименование организации (места работы), города, страны и электронный адрес (курсив) каждого автора из данной организации. Пропускается одна строка и приводится полное **Имя, Отчество, Фамилия** автора (или авторов) другой организации, а на следующей строке – наименование другой организации (места работы), города, страны и электронный адрес (курсив). Пропускается строка, размещается аннотация со слов «**Аннотация.**» (**Abstract.**) (**с точкой**). Текст аннотации должен включать 150-250 слов, выполненных курсивным нежирным начертанием, и завершается точкой. После аннотации и пропуска одной строки набирается «**Ключевые слова:**» (**Keywords:**) (**с двоеточием**) и приводится 6-10 словосочетаний с курсивным начертанием, без точки в конце. Через строку указывается автор, ответственный за переписку, и его электронная почта (курсивом). Все вышеописанные пункты следом приводятся на английском языке.



Благодарности организациям, научным руководителям и другим лицам, оказавшим помощь при написании статьи, приводятся после слова «**Благодарности:**». На английском языке слова благодарности приводятся после слова '**Acknowledgments:**'

Сведения о грантах и финансировании исследования при подготовке и публикации статьи могут быть приведены после слова «**Финансирование:**» (на английском языке – после слов '**Funding:**' или '**Financial Support:**').

На первой странице рукописи (если статья представлена на английском языке) все вышеописанные пункты приводятся только на английском языке.

Основной текст научной статьи рекомендуется излагать согласно структуре IMRAD, содержащей следующие заголовки: Введение, Экспериментальная часть, Результаты и их обсуждение, Выводы, Список источников. Каждый заголовок приводится прописными буквами высотой 12 пт и выделяется одной пустой строкой перед ним и после него.

Рисунки оформляются внутри текста, перенос строк подписей на другую страницу не допускается. Подписи к рисункам приводятся сразу под графическим изображением. Подпись рисунка составляется из сокращения «**Рис.**» (или '**Fig.**' для статьи на английском языке или для перевода подписи), порядкового номера и отделенного точкой названия рисунка, при этом текст, кроме самого названия, выделяется полужирным начертанием. Следом в статье на русском языке приводится подпись рисунка на английском языке. Если рисунок состоит из нескольких частей, помеченных отдельными буквами, перенос любой части рисунка и примечания в виде буквы на другую страницу не рекомендуется. Рекомендуется уменьшение шрифта для подписи до 10 пт (допускается до 8 пт). Рисунки располагаются только после их упоминания (или перекрестной ссылки) в тексте статьи. Ссылка на каждый рисунок по тексту статьи приводится в обязательном порядке и приводится в скобках с сокращением «рис.» ('Fig.'), после которого указывается номер, например: (рис. 1) – при представлении работы на русском языке, (Fig. 1) – при представлении работы на английском языке.

Формулы рекомендуется оформлять внутри таблицы, состоящей из двух столбцов. В первом столбце приводится сама формула, оформленная редактором формул или в виде изображения. Во втором столбце шириной 1 см приводится порядковый номер формулы, заключенный в скобки при создании перекрестных ссылок в тексте. Если необходимость давать перекрестные ссылки отсутствует, второй столбец не создают. После формулы ставится запятая, когда приводится расшифровка символов формулы, или точка; порядковый номер формулы после запятой или точки располагается на этой же строке, с выравниванием по правому краю.

Для статейных таблиц приводится обозначение «**Таблица**» (или '**Table**' для статьи на английском языке), порядковый номер (без обозначения знака номера), а после точки дается наименование таблицы. Текст, кроме самого наименования таблицы выделяется полужирным начертанием. Следом в статье на русском языке приводится название таблицы на английском языке. Рекомендуется уменьшение шрифта в таблице до 10 пт (допускается до 8 пт). Таблицы располагаются только после их упоминания (или перекрестной ссылки) в тексте статьи. Упоминание приведенной таблицы по тексту статьи является обязательным и приводится в скобках, в которых дают обозначение, например: (табл. 1) – при представлении работы на русском языке, (Table 1) – при представлении работы на английском языке.

Статья заканчивается разделом «Список источников» (в статье на английском языке – разделом 'References'), шрифт Times New Roman, кегль 10 пт. Оптимальное количество цитированных источников от 15 до 20 (но не менее 10), при этом в список рекомендуется включить не менее 3 работ, представляющих журналы из ядра РИНЦ или входящих в базы



данных WoS/Scopus. В обзорных работах принимается не менее 40-50 ссылок на литературные источники. Под списком литературных источников приводятся надписи курсивом, каждая – с новой строки: «Поступила в редакцию», «Одобрена после рецензирования», «Принята к опубликованию».

Формат

Редакция принимает тексты, сохраненные в форматах .doc. или .docx. Материалы, не соответствующие указанным требованиям и представленные в других форматах, не рассматриваются.

Оформление литературных ссылок

Все затекстовые библиографические ссылки в статье на русском языке составляют по ГОСТ Р 7.0.5 и ГОСТ Р 7.0.100, в статье на английском языке – согласно международному стилю оформления Harvard.

Дополнительно в статье на русском языке приводят перечень затекстовых библиографических ссылок на латинице ('References'), согласно международному стилю оформления Harvard.

Издания, которые не переводятся, необходимо указать транслитерацией в соответствии с общепринятыми международными правилами, в конце каждого такого источника должна стоять пометка (in Russian) (см. <http://www.cas.org/expertise/cascontent/caplus/corejournals.html>).

Для журнальной статьи должны быть указаны фамилии и инициалы всех авторов, название статьи, сокращенное название журнала (если допускается, например: *Изв. вузов. Химия и хим. технология*) год, номер тома, номер или выпуск, диапазон страниц и DOI (при их наличии, в случае если цитируемая статья напечатана на русском языке).

Примеры оформления литературных источников (статьи, монографии, патенты на изобретение, интернет-данные) на русском и английском языках

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Трейбакс Е.А.** Использование уникальных свойств клееных деревянных панелей CLT в строительстве общественных зданий // *Инновации в науке*. 2017. № 10 (71). С. 68-69.
2. **Ammari M.S., Belhadj B., Bederina M., Ferhat A., Quéneudec M.** Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers // *Construction and building materials*. 2020. Vol. 233, no. 8. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2010.117374
3. **Титунин А.А., Зайцева К.В.** Проектирование и производство строительных материалов из древесины. Комплексный подход. Кострома: Изд-во Костром. гос. технол. ун-та, 2009. 185 с.
4. **Яргина З.Н.** Эстетика города. М.: Стройиздат, 1991. 365 с.
5. В России будет обеспечено широкое внедрение многоэтажного деревянного домостроения // *Минстрой России*: [сайт]. URL: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-rossii-budet-obespecheno-shirokoe-vnedrenie-mnogoetazhnogo-derevyannogo-domostroeniya/> (дата обращения 10.10.2023).
6. Citation guides / Mendeley [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mendeley.com/guides/citation-guides/> (дата обращения: 05.04.2022).
7. Патент № 2667367 Российская Федерация, МПК В28С 5/00 (2006.01), В28С 9/02 (2006.01). Способ получения бетонной смеси с утилизацией ранее полученных остатков этой смеси: опубл. 19.09.2018 / Коган Артем Сергеевич.

Поступила в редакцию

Одобрена после рецензирования

Принята к опубликованию



REFERENCES

1. **Treybaks, E.A.** (2017) Utilization of unique properties of glued wood CLT panels in the construction of public buildings, *Innovatsii v nauke*, 10(71), pp. 68-69 (in Russian).
2. **Ammari, M.S., Belhadj, B., Bederina, M., Ferhat, A. & Quéneudec, M.** (2020) Contribution of hybrid fibers on the improvement of sand concrete properties: Barley straws treated with hot water and steel fibers, *Construction and Building Materials*, 233(8). DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117374.
3. **Titunin, A.A. & Zaitseva, K.V.** (2009) *Design and production of construction materials of wood. Complex approach.* Kostroma: Izd-vo Kostrom. gos. tekhnol. un-ta (in Russian).
4. **Yargina, Z.N.** (1991) *Aesthetics of the city.* Moscow: Stroyizdat (in Russian).
5. Ministry of Construction of Russia. (2022) *Russia will ensure widespread introduction of multi-storey wooden house building* [online]. Available at: <https://minstroyrf.gov.ru/press/v-rossii-budet-obespecheno-shirokoe-vnedrenie-mnogoetazhnogo-derevyannogo-domostroeniya> (accessed 10.10.2023) (in Russian).
6. Citation Guides / Mendeley [online]. Available at: <https://www.mendeley.com/guides/citation-guides/> (accessed 05.04.2022).
7. **Ferrari, G., Surico, F., Brocchi, A., Banfi, E., Maltese, C. & Squinzi, M.** (2019) Method for recycling concrete, IT, Patent EP 2,468,695 A1.

Received

Approved

Accepted

**УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**
SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



ТОМ 6, ВЫПУСК 2, 2025 | VOL. 6, ISS. 2, 2025

