

ISSN ONLINE 2782-1919

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



**Том 4  
выпуск**

**3  
2023**

**VOL. 4  
ISSUE 3**

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 4  
Выпуск 3**

**Ярославль 2023**

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор: С.В. ФЕДОСОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва)  
Заместитель главного редактора: П.Б. РАЗГОВОРОВ (д.т.н., проф., Ярославль)  
Ответственный секретарь: В.Б. ДОРОНИНА

## МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., 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., Курск), 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 (иностраннный 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) 44-12-70  
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru  
Электронный адрес: <http://comincon.ru>  
Журнал издается при содействии Российской Академии архитектуры и строительных наук

Редакторы: М.А. Канакотина, О.С. Полагина, О.А. Юрасова  
Англ. перевод: Л.А. Тюкина  
Компьютерная верстка: А.С. Фролов  
Корректор: О.А. Юрасова

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 4**

**Issue 3**

**Yaroslavl 2023**

# 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:	V.B. DORONINA

### INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

A.A. ABDYKALYKOV (doc.eng.sc., prof., Kyrgyzstan, Bishkek), P.A. AKIMOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), V.V. BELOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tver), A.M. BELOSTOTSKIY (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., Kursk), 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) 44-12-70
E-mail	razgovorovpb@ystu.ru
Website	<a href="http://comincon.ru">http://comincon.ru</a>

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

Editors:	M.A. Kanakotina, O.S. Polagina, O.A. Yurasova
English translator:	L.A. Tyukina
Layout designer:	A.S. Frolov
Proofreader:	O.A. Yurasova
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.А. Лазарев, И.Ю. Федотов, Р.Н. Андреев*

8 Моделирование высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты

*A.A. Lazarev, I.Yu. Fedotov, R.N. Andreev*

Modelling of the high-temperature effects of fire on glazing of building embrasures using a moving heat source

*А.Г. Ковригин, А.Н. Блазнов*

18 Исследование эффективности практического применения теплотехнических характеристик изделий из стеклопластика в строительной отрасли

*A.G. Kovrigin, A.N. Blaznov*

Practical application efficiency of thermal performance of GFRP items in construction industry

### Строительные материалы и изделия

*А.А. Баруздин, Л.В. Закревская*

29 Перспективы рециклинга в строительстве с целью создания инновационных композиционных материалов

*A.A. Baruzdin, L.V. Zakrevskaya*

Prospects of recycling in construction in order to create innovative composite materials

### Проектирование и строительство дорог, метрополитенов

*С.Ю. Андронов, В.В. Столяров, Ш.Н. Валиев, А.В. Кочетков*

55 Обоснование закона распределения и статистических характеристик длины нитей фибры для армирования асфальтобетонной смеси

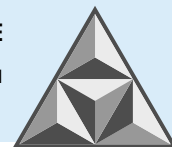
*S.Yu. Andronov, V.V. Stolyarov, S.N. Valiev, A.V. Kochetkov*

Substantiation of the distribution law and statistical characteristics of the fiber filaments lengths for reinforcing asphalt concrete mixture

- 66 *А.М. Кулижников*  
Обеспечение эксплуатационной надежности при проектировании  
автомобильных дорог в условиях Сибири и крайнего севера  
*A.M. Kulizhnikov*  
Ensuring operational reliability in the design of highways in Siberia and the  
Far North

**Архитектура зданий и сооружений.  
Творческие концепции архитектурной деятельности**

- 84 *П.Г. Гасанов, Ю.В. Смирнов, А.Н. Чусов, Н.А. Политаева*  
Мониторинг аварийности фасадов зданий Санкт-Петербурга с  
применением технологий 3D-сканирования  
*P.G. Gasanov, Yu.V. Smirnov, A.N. Chusov, N.A. Politaeva*  
Monitoring of the facades of buildings accident rate in St. Petersburg using 3D  
scanning technologies
- 95 *С.В. Расторгуев, Е.В. Голубева*  
Эмоции в архитектуре  
*S.V. Rastorguev, E.V. Golubeva*  
Emotions in architecture
- 109 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 614.841.2.001.5

# Моделирование высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником

**А.А. Лазарев<sup>1</sup>, И.Ю. Федотов<sup>2</sup>, Р.Н. Андреев<sup>3</sup>**

**Александр Александрович Лазарев**

<sup>1</sup>Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Российская Федерация  
*kgn@edufire37.ru*

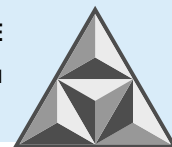
**Илья Юрьевич Федотов**

<sup>2</sup>Главное управление МЧС России по Липецкой области, Липецк, Российская Федерация  
*newspacehorizons@gmail.com*

**Роман Николаевич Андреев**

<sup>3</sup>Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, Москва, Российская Федерация,  
*spsch-no@yandex.ru*



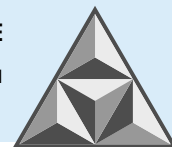


*В статье представлена методика оценки высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты. Рассмотрены вопросы высокотемпературного воздействия на остекление с внешней стороны здания при пожаре в целях обеспечения пожарной безопасности и выбора решений по защите фасада. Проведен численный эксперимент по определению предельных вероятностей для системы оконных проемов.*

**Ключевые слова:** оконный проем, марковский процесс, графы состояний, пожарная безопасность

**Для цитирования:**

Лазарев А.А., Федотов И.Ю., Андреев Р.Н. Моделирование высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 8-17.  
URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

# Modelling of the high-temperature effects of fire on glazing of building embrasures using a moving heat source

**A.A. Lazarev<sup>1</sup>, I.Yu. Fedotov<sup>2</sup>, R.N. Andreev<sup>3</sup>**

**Alexander A. Lazarev**

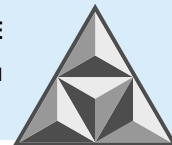
<sup>1</sup>Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters, Ivanovo, Russia  
*kgn@edufire37.ru*

**Ilya Y. Fedotov**

<sup>2</sup>Ministry of the Russian Federation for Civil Defense, Emergencies and Elimination of Consequences of Natural Disasters in the Lipetsk region, Russia  
*newspacehorizons@gmail.com*

**Roman N. Andreev**

<sup>3</sup>Academy of the State Emergency Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Moscow, Russia  
*spsch-no@yandex.ru*

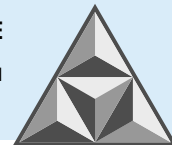


*This article discusses the methodology for assessing the high-temperature impact of fire on the glazing of building embrasures using a moving heat source. The article also considers issues of high-temperature impact on glazing from the outside of the building in order to ensure the facades fire safety and selection of protection against fire. The researchers performed a numerical experiment to determine the limiting probabilities for the system of building embrasures.*

**Key words:** glazing of building embrasures, Markov process, state graphs, fire safety

**For citation:**

Lazarev A.A., Fedotov I.Yu., Andreev R.N. (2023) Modeling of the high-temperature effects of fire on glazing of building embrasures using a moving heat source, *Smart Composite in Construction*, 4(2), pp. 8-17 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

Пожары с внешней стороны многоквартирных жилых домов и объектов высокоэтажного строительства распространяются на вышестоящие этажи, как правило, по фасаду. При этом происходит частичное или полное разрушение остекления окон помещений, лоджий, балконов. Этому во многом способствует то, что на балконах и лоджиях часто сосредоточена большая пожарная нагрузка, способствующая достижению высокой температуры в процессе пожара и перехода пламени через оконные проемы.

Распространение пламени в некоторых случаях может проходить случайно – как вверх (рис. 1), так и вбок, в зависимости от расстояния между окнами, направления ветра, формы разрушения остекления и иных факторов.



**Рис. 1.** Пример распространения пламени по фасаду МКД

**Fig. 1.** Example of flame spreading on the facade of the apartment residential buildings

Гораздо реже происходит распространение пламени на нижележащие этажи (относительно очага пожара) в результате падения горящих обломков вниз. В табл. 1 приведены сведения о пожарах в Липецкой области в период 2018–2022 годов.

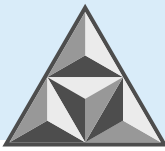
**Таблица 1.** Статистика пожаров в многоквартирных жилых домах на территории Липецкой области

**Table 1.** Statistics on fires in multi-apartment residential buildings in the Lipetsk region

Показатель	2018	2019	2020	2021	2022
Количество пожаров	144	214	230	209	236
Прямой материальный ущерб	18 326 500	12 347 450	16 700 116	23 224 503	25 705 000
Количество погибших	11	20	17	20	22

В настоящее время назрела необходимость разработки методов оценки высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты. Актуальность такой разработки продиктована необходимостью обеспечения пожарной безопасности с внешней стороны здания, оптимизации условий по защите фасада при ограничении распространения пожара. Эта методика может быть использована при выборе строительных материалов для остекления окон и их исполнения. Данные решения будут способствовать не только обеспечению безопасности людей, но и уменьшению размера ущерба от пожара.

Оценивая надежность «одежды» автомобильных дорог, А.Н. Давыдов использовал марковский процесс в качестве вероятностного метода [1]. Р.Ш. Мисбаховым и В.Е. Мизоновым в составной области при фазовых переходах моделировалась теплопроводность [2]; Т.В. Любимовой определялась достоверность гидрогеологических прогнозов при использовании цепей Маркова [3].



Математический аппарат теории цепей Маркова при моделировании использовали В.Е. Мизонов, А.В. Митрофанов, Е.В. Басова, Е.А. Шуина в рамках теоретического исследования нелинейной теплопроводности в многослойной среде [4, 5].

О.С. Симонович, В.Л. Снежко и Д.В. Козлов использовали цепи Маркова для определения периодичности осуществления ремонтных работ на обследованных низконапорных грунтовых плотинах [6]. В.А. Огурцовым, Ю.В. Хохловой, А.П. Алешиной и А.М. Фатахетдиновым на основе теории цепей Маркова разработана математическая модель для создания сухих смесей для строительства [7].

Вместе с тем влияние высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты оказалось неизученным. Целью настоящей работы является разработка методики, адекватно учитывающей влияние указанного фактора.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследования является остекление оконных проемов зданий.

Предметом исследования является высокотемпературное воздействие пожара на остекление оконных проемов зданий перемещающимся источником теплоты.

Задачи исследования:

1. В рамках информационного моделирования разработать размеченные графы состояний системы контроля пожарной безопасности оконных проемов зданий.
2. С использованием правил составления уравнений Колмогорова получить систему дифференциальных уравнений с последующим ее интегрированием и учетом состояния в начальный момент времени.
3. Провести эксперимент по определению предельных вероятностей для системы контроля оконных проемов зданий.

Пусть в некоторой системе четырех окон (Т) осуществляется контроль пожарной безопасности оконных проемов зданий и происходит марковский случайный процесс с дискретными состояниями  $O_1, O_2, O_3, O_4$  (рис. 2) В данном случае переходы системы из состояния в состояние наблюдаются в случайные моменты времени, осуществляются под воздействием пуассоновского потока событий с интенсивностью  $I_{ij} = \text{const}$ .

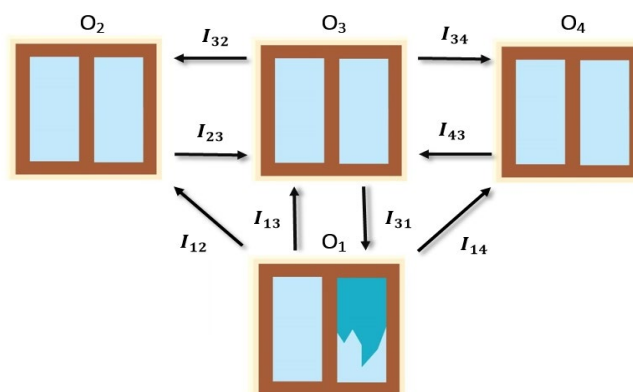
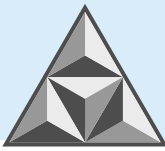


Рис. 2. Размеченный граф состояний системы Т

Fig. 2. Formatted graph of the T system states

Состояние  $O_1$  характеризуется высокотемпературным воздействием пожара на остекление оконного проема здания перемещающимся источником теплоты на первом этаже. Состояние  $O_2$  соответствует высокотемпературному воздействию пожара на остекление



первого оконного проема здания перемещающимся источником теплоты на втором этаже. При состоянии  $O_3$  происходит высокотемпературное воздействие пожара на остекление центрального оконного проема здания перемещающимся источником теплоты на втором этаже. При состоянии  $O_4$  происходит высокотемпературное воздействие пожара на остекление третьего оконного проема здания перемещающимся источником теплоты на втором этаже.

Для нахождения вероятностей состояний составляется система уравнений

$$\sum_{i=1}^n P_i I_{ij} = \sum_{i=1}^n P_j I_{ij}, \quad (j = 1, 2, \dots, n) [8],$$

где  $I_{ij}$  – интенсивность переходных потоков;  $P_i$  – вероятность состояния.

Система составляется по следующим правилам:

- число уравнений в «Т-образной» системе равно числу состояний; в нашем случае – четыре состояния высокотемпературного воздействия;
- каждое состояние  $O_{(1-4)}$  соответствует уравнению с номером (1-4);
- в левой части каждого уравнения находится сумма интенсивностей  $I_{ij}$  (рис. 2, над стрелками) для всех стрелок, входящих в состояние  $O_j$  и умноженных на вероятности состояний, из которых выходят стрелки;
- в правой части уравнений находится сумма интенсивностей, выходящих из  $O_j$  стрелок; эта сумма умножается на вероятность  $P_j$ .

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 2 представлен размеченный граф системы контроля пожарной безопасности при строительстве с заданными значениями интенсивности потока событий. Рассмотрим систему  $T_1$  (рис. 3).

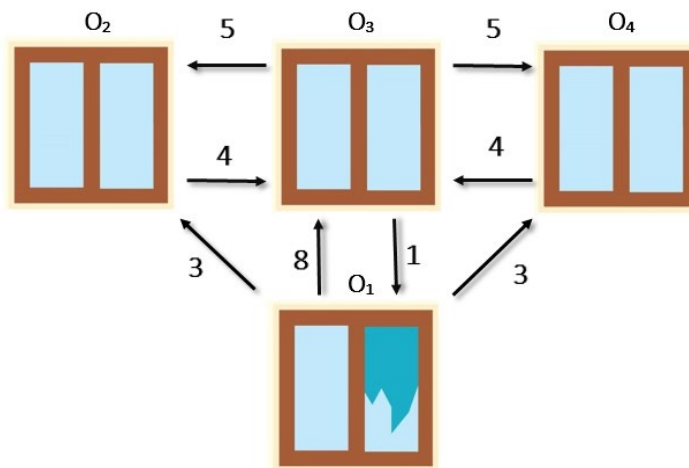
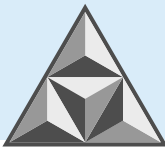


Рис. 3. Размеченный граф состояний системы  $T_1$

Fig. 3. Formatted graph of the  $T_1$  system states

Для системы  $T_1$  система дифференциальных уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} P_3 = 14P_1, \\ 3P_1 + 5P_3 = 4, \\ 8P_1 + 4P_2 + 4P_4 = 11P_3, \\ 3P_1 + 5P_3 = 4P_4 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} P_3 = 14P_1, \\ 3P_1 + 5P_3 = 4P_2, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1, \\ 3P_1 + 5P_3 = 4P_4. \end{cases} \quad (1)$$



Однако система уравнений является вырожденной, и для нахождения единственного решения одно любое уравнение нужно заменить на условие нормировки  $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$ . В нашем случае целесообразно заменить третье уравнение.

При решении данной системы получим предельные вероятности для системы  $T_1$ :  $P_1 = 0.02$ ;  $P_2 = 0.35$ ;  $P_3 = 0.28$ ;  $P_4 = 0.35$ .

Рассмотрим вариант контроля состояния пожарной безопасности объекта строительства. На рис. 4 представлена система  $T_2$  с другими условиями.

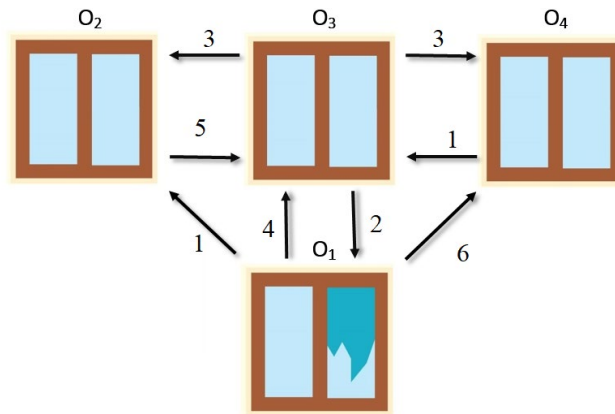


Рис. 4. Размеченный граф состояний системы  $T_2$

Fig. 4. Formatted graph of the  $T_2$  system states

Получим дифференциальные уравнения системы  $T_2$ , которая будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} 2P_3 = 11P_1, \\ P_1 + 3P_3 = 5P_2, \\ 5P_2 + 4P_1 + P_4 = 8P_3, \\ 6P_1 + 3P_3 = P_4 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} 2P_3 = 11P_1, \\ P_1 + 3P_3 = 5P_2, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1, \\ 6P_1 + 3P_3 = P_4. \end{cases} \quad (2)$$

По итогам решения данной системы получим предельные вероятности для системы  $T_2$ . Они будут равны:  $P_1 = 0.03$ ;  $P_2 = 0.10$ ;  $P_3 = 0.16$ ;  $P_4 = 0.71$ .

Рассмотрим систему  $T_3$  (рис. 5).

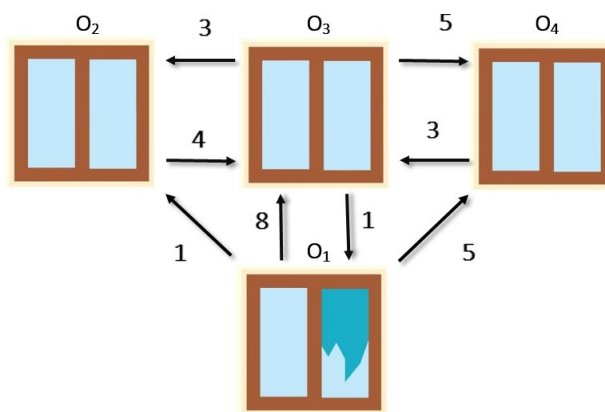
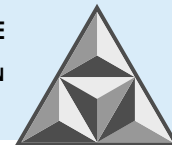


Рис. 5. Размеченный граф состояний системы  $T_3$

Fig. 5. Formatted graph of the  $T_3$  system states

$$\begin{cases} P_3 = 14P_1, \\ P_1 + 3P_3 = 4P_2, \\ 8P_1 + 4P_2 + 3P_4 = 9P_3, \\ 5P_1 + 5P_3 = 3P_4 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} P_3 = 14P_1, \\ P_1 + 3P_3 = 4P_2, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1, \\ 5P_1 + 5P_3 = 3P_4. \end{cases} \quad (3)$$



По итогам решения получим предельные вероятности для системы  $T_3$ :  $P_1 = 0.02$ ;  $P_2 = 0.21$ ;  $P_3 = 0.28$ ;  $P_4 = 0.49$ .

Результаты эксперимента являются адекватными, не противоречат результатам исследования [9] и могут быть использованы для проведения дальнейших расчетов.

## ВЫВОДЫ

Проведен ряд численных экспериментов при различной интенсивности потока событий для четырех состояний высокотемпературного воздействия пожара на остекление оконных проемов строительных зданий и сооружений перемещающимся источником теплоты.

Определены предельные вероятности для Т-образных систем. Для системы  $T_1$  такая вероятность составляет 2% в состоянии  $O_1$ , 35% отвечает состоянию  $O_2$ , 28% – состоянию  $O_3$ , 35% – состоянию  $O_4$ . Система  $T_2$  в среднем 3% будет находиться в состоянии  $O_1$ , 10% – в состоянии  $O_2$ , 16% – в состоянии  $O_3$ , 71% – в состоянии  $O_4$ . Система  $T_3$  в среднем 2% будет находиться в состоянии  $O_1$ , 21% – в состоянии  $O_2$ , 28% – в состоянии  $O_3$ , 49% – в состоянии  $O_4$ .

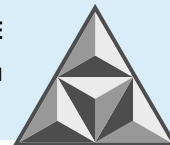
При организации обеспечения пожарной безопасности строительных конструкций многоквартирных жилых домов необходимо:

- проведение расчетных вычислений для определения предельных вероятностей при выборе конструкционных материалов;
- совершенствование подходов к составлению планов установки конструкций для обеспечения пожарной безопасности;
- определение зависимости предельных вероятностей для системы контроля от динамики изменения этой системы в условиях сезонных рисков.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Давыдов А.Н.** Марковский процесс как вероятностный метод оценки надежности дорожной одежды автомобильных дорог // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство: сб. статей / Самарский государственный технический университет.* Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет, 2017. С. 116-119.
2. **Мисбахов Р.Ш., Мизонов В.Е.** Моделирование теплопроводности в составной области с фазовыми переходами // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета.* 2015. № 4. С. 39-43.
3. **Любимова Т.В.** Достоверность гидрогеологических прогнозов в зонах влияния водохранилищ // *Геология, география и глобальная энергия.* 2019. № 4. С. 99-106.
4. **Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Басова Е.В., Шуина Е.А.** Теоретическое исследование нелинейной теплопроводности в многослойной среде с фазовыми переходами в слоях // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета.* 2020. № 1. С. 53-59.
5. **Мизонов В.Е., Митрофанов А.В., Басова Е.В., Шуина Е.А.** Ячеичная модель теплопроводности в многослойной среде с переменным числом слоев // *Вестник Ивановского государственного энергетического университета.* 2020. № 3. С. 51-57.
6. **Симонович О.С., Снежко В.Л., Козлов Д.В.** Периодичность ремонта низконапорных грунтовых плотин для сохранения их уровня безопасности // *Природообустройство.* 2020. № 1. С. 59-64.
7. **Огурцов В.А., Хохлова Ю.В., Алешина А.П., Фатахетдинов А.М.** Моделирование процессов получения сухих строительных смесей в лопастном аппарате непрерывного действия // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии.* 2019. № 2. С. 30-36.
8. **Гефан Г.Д.** Марковские процессы и системы массового обслуживания. Иркутск: Иркутский государственный университет путей и сообщений, 2009. С. 20-21.





9. **Гренандер У., Фрейбергер В.** Краткий курс вычислительной вероятности и статистики. Москва: Наука, 1978. С. 85-97.

Поступила в редакцию 30.05.2023

Одобрена после рецензирования 20.09.2023

Принята к опубликованию 22.09.2023

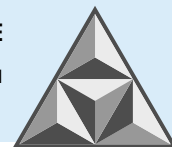
## REFERENCES

1. **Davydov, A.N.** (2017) Markovsky process as a probabilistic method for assessing the reliability of the pavement of highways, *Tradicii i innovacii v stroitel'stve i arkhitekture. Stroitel'stvo: sb. st. / Samarskij gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet*. Samara: Samarskij gosudarstvennyj arkhitekturno-stroitel'nyj universitet, pp. 116-119 (in Russian).
2. **Misbakhov, R.Sh. & Mizonov, V.E.** (2015) Modelling of thermal conductivity in a composite region with phase transitions, *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, (4), pp. 39-43 (in Russian).
3. **Lyubimova, T.V.** (2019) Reliability of hydrogeological forecasts in the zones of influence of reservoirs, *Geologiya, geografiya i global'naya energiya*, (4), pp. 99-106 (in Russian).
4. **Mizonov, V.E., Mitrofanov, A.V., Basova, E.V. & Shuina, E.A.** (2020) Theoretical study of nonlinear thermal conductivity in a multilayer medium with phase transitions in layers, *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, (1), pp. 53-59 (in Russian).
5. **Mizonov, V.E., Mitrofanov, A.V., Basova, E.V. & Shuina, E.A.** (2020) Cellular model of thermal conductivity in a multilayer medium with a variable number of layers, *Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, (3), pp. 51-57 (in Russian).
6. **Simonovich, O.S., Snezhko, V.L., & Kozlov, D.V.** Periodicity of repair of low-pressure ground dams to preserve their safety level, *Prirodoobustrojstvo*, (1), pp. 59-64 (in Russian).
7. **Ogurtsov, V.A., Khokhlova, Yu.V., Alyoshina, A.P. & Fatakhedinov, A.M.** (2019) Modelling of the processes of obtaining dry building mixes in a continuous blade apparatus *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Materialy. Konstrukcii. Tekhnologii*, (2), pp. 30-36 (in Russian).
8. **Gefan, G.D.** (2009) *Markov processes and queuing systems*. Irkutsk: Irkutskij gosudarstvennyj universitet putej i soobshchenij, pp. 20-21 (in Russian).
9. **Grenander, U. & Freiberger, V.** (1978) *A short course in computational probability and statistics*. Moscow: Nauka, pp. 85-97 (in Russian).

Received 30.05.2023

Approved after reviewing 20.09.2023

Accepted 22.09.2023



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.0(045)

# Исследование эффективности практического применения теплотехнических характеристик изделий из стеклопластика в строительной отрасли

**А.Г. Ковригин<sup>1</sup>, А.Н. Блазнов<sup>2,3</sup>**

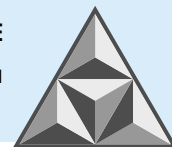
**Антон Георгиевич Ковригин**

<sup>1</sup>ООО «Бийский завод стеклопластиков», Бийск, Алтайский край, Российская Федерация  
*anton.kovrigin@bzs.ru*

**Алексей Николаевич Блазнов**

<sup>2</sup>ФГБУН «Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук (ИПХЭТ СО РАН)», Бийск, Алтайский край, Российская Федерация

<sup>3</sup>Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», Бийск, Алтайский край, Российская Федерация  
*blaznov74@mail.ru*

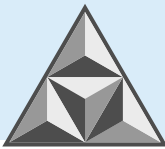


*Определены теплотехнические характеристики фасадной системы с использованием крепежных элементов на основе стеклопластика. Проведен анализ эффективности технического решения на основе стеклопластика в сравнении с аналогами на основе металла. Представлены теоретические данные расчета и графики тепловых полей, рассчитаны тепловые потери через точечные и линейные теплотехнические неоднородности. В отличие от стального распорного элемента с коэффициентом теплотехнической однородности до 0.82, такой расчетный коэффициент для стеклопластикового элемента (0.99) близок к 1.0. Показана эффективность использования стеклопластиковых крепежных элементов в фасадных строительных конструкциях; при их использовании толщина теплоизоляции составляет 130 мм, тогда как при использовании стальных элементов – 160 мм.*

**Ключевые слова:** стеклопластик, намотка, теплотехническая неоднородность, сопротивление теплопередаче, «мостик холода», изотерма

**Для цитирования:**

Ковригин А.Г., Блазнов А.Н. Исследование эффективности практического применения теплотехнических характеристик изделий из стеклопластика в строительной отрасли // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 18-28.  
URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

# Practical application efficiency of thermal performance of GFRP items in construction industry

**A.G. Kovrigin<sup>1</sup>, A.N. Blaznov<sup>2,3</sup>**

**Anton G. Kovrigin**

<sup>1</sup>Biysk Factory of Glass Fiber-Reinforced Plastics, LLC, Biysk, Russia

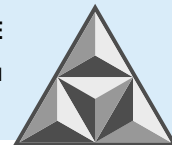
*anton.kovrigin@bzs.ru*

**Aleksey N. Blaznov**

<sup>2</sup>Institute for Problems of Chemical and Energetic Technologies, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (IPCET SB RAS), Biysk, Russia

<sup>3</sup>Biysk Technological Institute (branch), Altai State Technical University named after I.I. Polzunov, Biysk, Russia

*blaznov74@mail.ru*

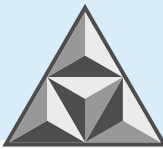


*The article concerns with the assessment of the thermal performance of a facade system using fastening elements made of glass fiber-reinforced plastic (GFRP). The article analyses the efficiency of the technical solution based on fibreglass plastic in comparison with its metal-based counterparts. We present theoretical calculation data and graphs of thermal fields, calculate heat losses through point and linear thermotechnical inhomogeneities. As opposed to a steel spacer assembly with a coefficient of thermal homogeneity up to 0.82, such a design coefficient for a fibreglass element (0.99) is close to 1.0. Herein, the GFRP fastening elements demonstrated practical efficiency when used in real modern facade building structures: the thermal insulation thickness for GFRP was 130 mm, while that for the steel elements was 160 mm when applied in the facade fixing system.*

**Key words:** glass fiber-reinforced plastic, filament winding, thermal heterogeneity, heat transfer resistance, thermal bridge, isotherm

**For citation:**

Kovrigin, A.G. & Blaznov, A.N. (2023) Practical application efficiency of thermal performance of GFRP items in construction industry, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 18-28 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)

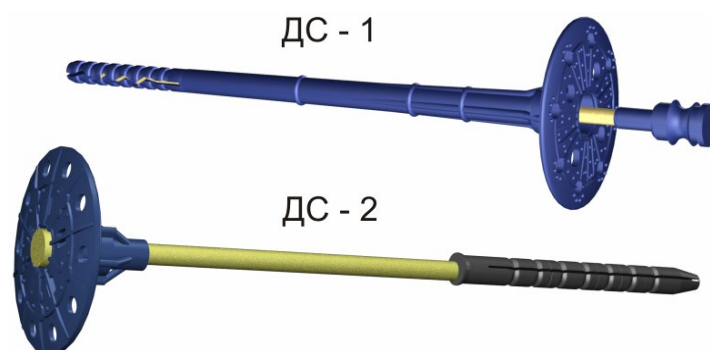


## ВВЕДЕНИЕ

К современным фасадным системам предъявляются жесткие требования по тепловой защите зданий [1]. Согласно строительным нормам, ключевыми характеристиками фасадных систем являются показатели сопротивления теплопередаче, включающие теплотехническую эффективность материалов ограждающей конструкции с учетом влияния точечных и линейных неоднородностей. Широко распространены системы утепления и облицовки фасадов, называемые как «система фасадная теплоизоляционная композитная» (СФТК, или штукатурный фасад) и «навесной вентилируемый фасад» (НВФ) [2, 3]. Обязательными элементами таких фасадных систем являются теплоизоляция (например, из минеральной ваты), крепеж теплоизоляции (тарельчатые анкеры [4]), кронштейны для крепления подсистем и последующей облицовки декоративными материалами (для НВФ). Эффективность работы системы утепления определяется свойствами теплоизоляции – теплопроводностью и толщиной, а также теплопроводными свойствами тарельчатых анкеров и кронштейнов, которые проходят сквозь теплоизоляцию и создают неоднородности в системе, образуя так называемые «мостики холода» [5].

С точки зрения долговечности и прочности закрепления, наиболее надежными являются тарельчатые анкеры с металлическим или стеклопластиковым распорным элементом. Металлический распорный элемент производят из металлической проволоки диаметром 4,8-5,5 мм с последующей оцинковкой (для защиты от коррозии). Стеклопластиковые распорные элементы производят по технологии намотки [6] из Е-стекла, связующего ЭДИ на основе эпоксидной смолы ЭД-22, отвердителя ИМТГФА и ускорителя полимеризации УП-606/2 [7, 8]. Распорный элемент (стальной или стеклопластиковый) устанавливается в полимерную гильзу из литевой пластмассы (полиэтилена).

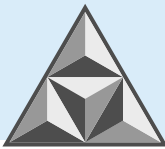
Конструкции двухсоставного и трехсоставного тарельчатого анкера с распорным элементом из стеклопластика [8] приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Конструкция тарельчатого анкера двухсоставного (ДС-1) и трехсоставного (ДС-2) с распорным элементом из стеклопластика

**Fig. 1.** The design of the two-part disc anchor (DS-1) and three-piece (DS-2) with spacer assembly made of fiberglass

Целью настоящего исследования является расчет теплотехнических характеристик фасадной системы с применением крепежных элементов из стеклопластика и оценка эффективности их использования при осуществлении работ в строительной области по сравнению с металлическими крепежными элементами.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для оценки влияния теплопроводных включений на теплоэффективность системы в качестве частного случая выбрана система СФТК с тонким штукатурным слоем. Для расчетов принята типовая конструкция утепления наружной стены фасада здания [9], состоящая из кладки полнотелого глиняного кирпича толщиной 250 мм, теплоизоляционной плиты ROCKWOOL типа “ФАСАД БАТТС” толщиной 50–200 мм с шагом 50 мм, которая закреплена на кирпичной стене с помощью тарельчатых анкеров в количестве от 8 до 14 шт. на 1 м<sup>2</sup>, и облицовочного слоя акриловой штукатурки толщиной 6 мм, армированной стеклосеткой. Коэффициенты теплопроводности для материалов приняты из литературы и составляют, Вт·м<sup>-1</sup>·°С<sup>-1</sup>: для кирпичной кладки – 0.7; теплоизоляционных плит ROCKWOOL – 0.04; акриловой штукатурки – 0.5; стеклопластика – 0.48; полиамида – 0.28; стали – 58. В рассматриваемой системе тарельчатый анкер является точечной теплотехнической неоднородностью.

Расчеты проведены для жилого здания, эксплуатируемого в климатических условиях г. Новосибирска. Температуру воздуха внутри помещения (согласно ГОСТ 30494-2011) приняли  $t_b = 21^\circ\text{C}$ , влажность – 55%, температуру воздуха снаружи  $t_n = -37^\circ\text{C}$ , что соответствует наиболее холодной пятидневке для условий г. Новосибирска, согласно СП 131.13330.2018.

Теплотехнические расчеты выполнены Институтом теплофизики СО РАН (г. Новосибирск) [10] с применением специализированной программы, предназначенной для проведения трехмерных теплотехнических расчетов элементов строительных конструкций и позволяющей решать задачи теплообмена численным методом конечных разностей. Расчетная область разбивалась на  $2 \times 10^6$  ячеек, что является достаточной детализацией для оценки теплоэффективности исследуемых изделий. Повышение точности расчетов достигалось путем использования сетки с переменным шагом.

Приведенное сопротивление теплопередаче рассчитывали:

$$R = \Delta t / q, \quad (1)$$

где  $\Delta t = t_b - t_n$ ;

$q$  – плотность теплового потока на внутренней поверхности.

Коэффициент теплотехнической однородности определяли по выражению:

$$r = R/R_0, \quad (2)$$

где  $R_0$  – сопротивление теплопередаче фасада при отсутствии тарельчатых анкеров.

Величину  $\chi$  определяли в соответствии с ГОСТ Р 56733-2015 [11]:

$$\chi = \Delta Q^K / (t_b - t_n), \quad (3)$$

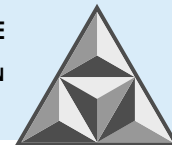
где  $\Delta Q^K = Q_d - Q_{бд}$ ;

$Q_d$  – потери тепла расчетного участка с тарельчатым анкером;

$Q_{бд}$  – потери тепла этого же расчетного участка без учета влияния тарельчатых анкеров.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ результатов теплотехнических расчетов системы СФТК с применением стеклопластикового распорного элемента тарельчатого анкера в сравнении с применением распорного элемента из оцинкованной стали (табл. 1) показывает, что дополнительные



тепловые потери для различных толщин утеплителя (от 50 до 200 мм) снижаются с  $2.59 \cdot 10^{-4}$  до  $0.99 \cdot 10^{-4}$  Вт $\cdot$ °С $^{-1}$ .

**Таблица 1.** Результаты сравнительных теплотехнических расчетов с анкерами на основе стеклопластикового распорного элемента (числитель) и распорного элемента из оцинкованной стали (знаменатель)

**Table 1.** The results of comparative thermal engineering calculations with anchors based on a fiberglass spacer assembly (in the numerator) and a spacer assembly made of galvanized steel (in the denominator)

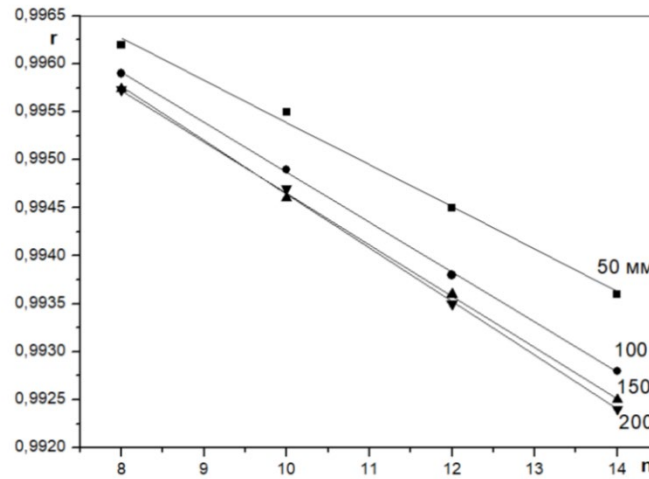
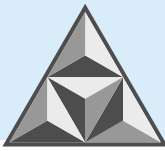
s, мм	n, шт. на 1 м <sup>2</sup>	t <sub>вн</sub> , °С	R, °С·м <sup>2</sup> ·Вт <sup>-1</sup>	r	χ×10 <sup>4</sup> , Вт·°С <sup>-1</sup>
50	14	17.22/16.97	1.766/1.656	0.994/0.932	2.60/2.94
	12	17.23/17.01	1.767/1.672	0.994/0.941	2.59/2.93
	10	17.23/17.05	1.769/1.691	0.995/0.952	2.59/2.85
	8	17.23/17.08	1.771/1.706	0.996/0.960	2.57/2.94
	0	17.25/17.25	1.777/1.777	1/1	-
	<b>Среднее значение</b>				
100	14	18.78/18.39	3.005/2.655	0.993/0.877	1.76/3.31
	12	18.78/18.44	3.009/2.701	0.994/0.892	1.74/3.32
	10	18.79/18.48	3.012/2.751	0.995/0.909	1.74/3.33
	8	18.79/18.52	3.015/2.802	0.996/0.926	1.73/3.33
	0	18.80/18.72	3.027/3.027	1/1	-
	<b>Среднее значение</b>				
150	14	19.43/19.07	4.245/3.600	0.993/0.842	1.32/3.14
	12	19.43/19.11	4.249/3.681	0.994/0.861	1.29/3.15
	10	19.43/19.16	4.254/3.768	0.995/0.881	1.28/3.15
	8	19.43/19.20	4.259/3.859	0.996/0.903	1.28/3.16
	0	19.44/19.44	4.277/4.246	1/1	-
	<b>Среднее значение</b>				
200	14	19.78/19.46	5.484/4.522	0.992/0.818	1.00/2.87
	12	19.79/19.49	5.489/4.640	0.993/0.840	0.99/2.88
	10	19.79/19.53	5.497/4.766	0.995/0.863	0.98/2.88
	8	19.79/19.58	5.502/4.900	0.996/0.887	0.97/2.89
	0	19.79/19.75	5.526/5.526	1/1	-
	<b>Среднее значение</b>				

*Примечание:* s – толщина утеплителя; n – плотность расположения тарельчатых анкеров; t<sub>вн</sub> – наиболее низкая температура внутренней поверхности; R – приведенное сопротивление теплопередаче; r – коэффициент теплотехнической однородности; χ – дополнительные удельные потери тепла через точечную теплотехническую неоднородность.

Согласно результатам расчетов, на температуру внутренней поверхности фасада и его приведенное сопротивление теплопередаче существенное влияние оказывает плотность расположения анкеров. При этом расчетный коэффициент теплотехнической однородности фасада при использовании анкеров со стальным распорным элементом снижается до 0.82, что является показателем существенных тепловых потерь.

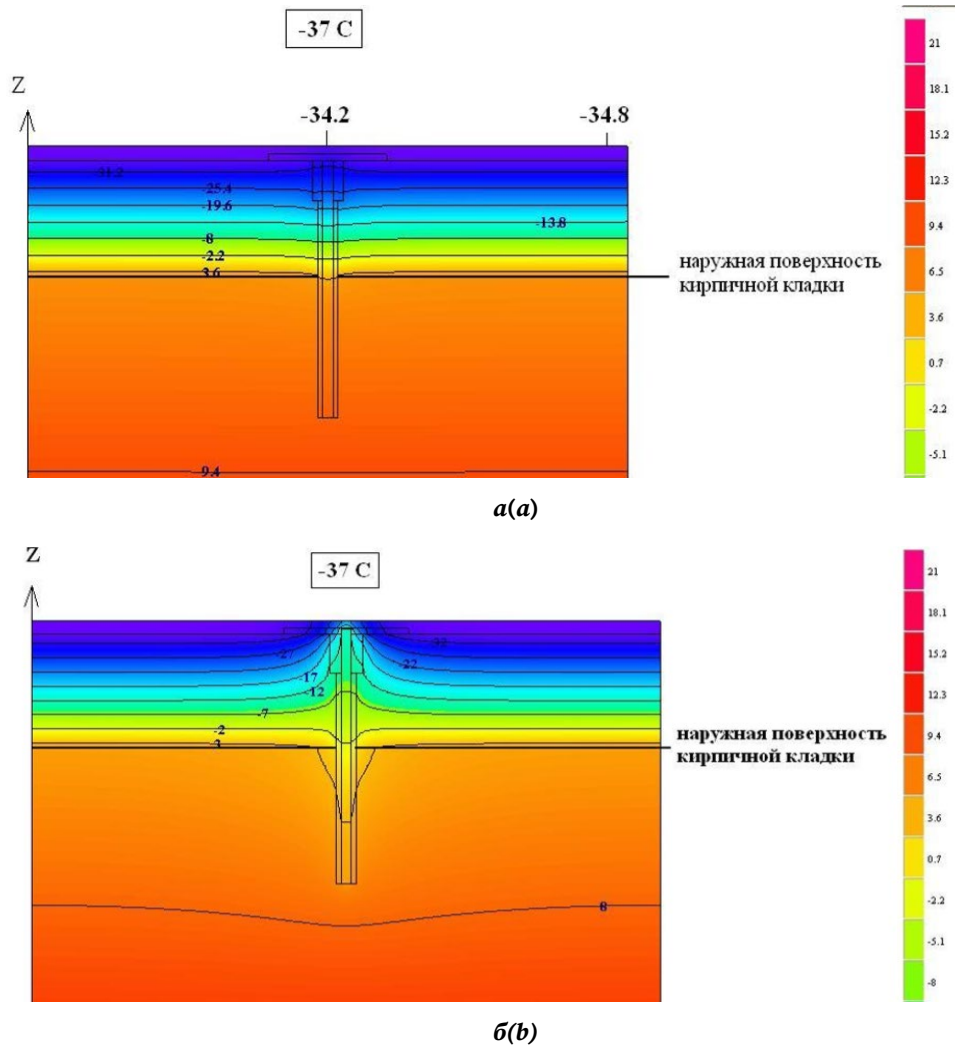
На рис. 2 наблюдается зависимость коэффициентов теплотехнической однородности для фасадной системы СФТК со стеклопластиковыми распорными элементами от толщины применяемой теплоизоляции и плотности расположения тарельчатых анкеров. Эта зависимость носит линейный характер (аналогично – и для стальных распорных элементов).



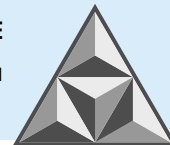


**Рис. 2.** Коэффициенты теплотехнической однородности для фасада со стеклопластиковыми распорными элементами  
**Fig. 2.** Thermal homogeneity coefficients for facade with GRP spacer assemblies

Наглядным представлением расчетов являются изотермы (рис. 3).



**Рис. 3.** Изотермическое представление возмущения тепловых полей в области точечной неоднородности в виде тарельчатого анкера с распорным элементом из стеклопластика (а) и оцинкованной стали (б)  
**Fig. 3.** Isothermal representation of perturbation of thermal fields in the region of point inhomogeneity in the form of a disk anchor with a spacer assemblies made of fiberglass (а) and galvanized steel (б)



Видно, что анкер вносит тепловое возмущение в систему. Однако потери тепла через низкотеплопроводный стеклопластиковый распорный элемент невелики; наблюдаемое искажение изотерм незначительно (см. рис. 3а) в сравнении со стальным распорным элементом (существенное искажение тепловых полей, см. рис. 3б).

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

На практике полученные данные используют для расчета минимальной необходимой и достаточной толщины теплоизоляции конструктивных элементов для обеспечения требований по тепловой защите зданий. Так, определена необходимая толщина утеплителя ( $s$ ) для выполнения требований строительных норм на примере жилого здания в г. Новосибирске. Согласно СП 50.13330.2012 «Тепловая защита зданий» и СП 131.13330.2018 СНИП 23-01-99 «Строительная климатология», сопротивления теплопередаче для стен жилых зданий в указанном городе составляет  $R = 3.66 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м}^2\cdot\text{Вт}^{-1}$ .

Для расчета толщины теплоизоляции при использовании стеклопластикового распорного элемента предложено эмпирическое выражение (4):

$$s = a + b \cdot R, \quad (4)$$

где  $a$ ,  $b$  – эмпирические коэффициенты (см. табл. 2).

**Таблица 2.** Эмпирические коэффициенты и толщины теплоизоляции для системы с тарельчатыми анкерами и стеклопластиковыми распорными элементами

**Table 2.** Empirical coefficients and thermal insulation thicknesses for a system with disk anchors with GRP spacers

$n$ , шт. на $1 \text{ м}^2$	$a$	$b$	$s$ , мм, при $R = 3.66 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м}^2\cdot\text{Вт}^{-1}$
14	-21.235	40.336	126.4
12	-21.226	40.296	126.3
10	-21.196	40.244	126.1
8	-21.175	40.195	125.9
0	-21.107	40.013	125.3

Для расчета толщины теплоизоляции при использовании стального распорного элемента предложено эмпирическое выражение (5):

$$s = a_1 + a_2 \cdot R + a_3 \cdot R^2, \quad (5)$$

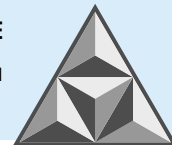
где  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  – эмпирические коэффициенты (см. табл. 3)

**Таблица 3.** Значения эмпирических коэффициентов и толщины теплоизоляции для системы с тарельчатыми анкерами с распорными элементами из оцинкованной стали

**Table 3.** Values of empirical coefficients and thermal insulation thicknesses for a system with disc anchors with galvanized steel expansion elements

$n$ , шт. на $1 \text{ м}^2$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$s$ , мм, при $R = 3.66 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{м}^2\cdot\text{Вт}^{-1}$
14	-28.522	45.544	1.107	153.0
12	-27.598	44.861	0.906	148.7
10	-26.780	44.156	0.721	144.5
8	-25.445	43.222	0.571	140.4
0	-21.107	40.013	0	125.3

В строительной практике толщина теплоизоляции, полученная при расчетах, округляется до 10 мм в большую сторону. Таким образом, для расчетного случая с плотностью расположения тарельчатых анкеров 14 шт. на  $1 \text{ м}^2$  при использовании распорного элемента



из стеклопластика необходимо использовать теплоизоляцию толщиной 130 мм, а при использовании распорного элемента из оцинкованной стали требуемая толщина теплоизоляционного слоя составит 160 мм. При этом обе системы, с точки зрения теплоэффективности, будут работать одинаково.

В случае использования стеклопластика в составе конструктивных элементов снижаются:

- общий вес конструкции, а следовательно, нагрузка на фундамент;
- транспортные расходы на доставку строительных материалов меньшего объема;
- размеры (как следствие, стоимость) всех доборных элементов на фасаде (оконные откосы, кронштейны и др.).

## ВЫВОДЫ

Проведены теплофизические расчеты для системы утепления фасадов строительных конструкций штукатурного типа с применением тарельчатых анкеров с распорными элементами из однонаправленного стеклопластика, получаемого методом намотки, и распорного элемента из оцинкованной стали. Определены теплотери через единичное крепление и коэффициенты теплотехнической неоднородности при использовании указанных типов распорных элементов для систем с толщиной теплоизоляции 50, 100, 150 и 200 мм.

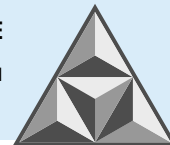
В результате расчета необходимой и достаточной толщины теплоизоляции для утепления здания в г. Новосибирске показана существенная разница в требуемом объеме теплоизоляционного материала в зависимости от типа используемого крепежа.

Внедрение результатов работы при организации утепления навесных вентилируемых фасадов (в том числе – замена используемых металлических кронштейнов на менее теплопроводные неметаллические для крепления элементов подсистемы и декоративных элементов) может обеспечить существенное снижение затрат при строительстве современных зданий и сооружений.

*Работа выполнена в рамках госзадания № 121061500030-3 при использовании оборудования Бийского регионального центра коллективного пользования СО РАН (ИПХЭТ СО РАН, г. Бийск, Алтайский край).*

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. М.: Минрегион России, 2012. 95 с.
2. СП 293.1325800.2017. Системы фасадные теплоизоляционные композиционные с наружными штукатурными слоями. Правила проектирования и производства работ. М.: Стандартинформ, 2017. 74 с.
3. ГОСТ Р 58883-2020. Системы навесные фасадные вентилируемые. Общие правила расчета подконструкций. М.: Стандартинформ, 2020. 56 с.
4. ГОСТ Р 58359-2019. Анкеры тарельчатые для крепления теплоизоляционного слоя в фасадных теплоизоляционных композиционных системах с наружными штукатурными слоями. Технические условия. М.: Стандартинформ, 2019. 15 с.
5. **Овсянников С.Н., Вязова Т.О.** Теплозащитные характеристики наружных стеновых конструкций с теплопроводными включениями // *Строительные материалы*. 2013. № 6. С. 24-27.
6. **Батаев А.А., Батаев В.А.** Композиционные материалы. Строение, получение, применение. Новосибирск: НГТУ, 2002. 377 с.
7. **Blaznov A.N., Samoilenko V.V., Zimin D.E., Komarova M.V., Ananieva E.S., Firsov V.V., Sakoshev Z.G.** Heat-Resistance Enhancement of Fiberglass-Reinforced Plastics in Manufacturing Environments // *Glass and Ceramics*. 2021. Vol. 78, no. 3-4. P. 111-114. DOI: 10.1007/s10717-021-00357-1.



8. **Блазнов А.Н., Савин В.Ф., Волков Ю.П., Рудольф А.Я., Старцев О.В., Тихонов В.Б.** Методы механических испытаний композиционных стержней: монография / под ред. А.Н. Блазнова, В.Ф. Савина. Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2011. 314 с.
9. **Чеботарева В.С., Новиков М.В.** Энергоэффективные фасадные системы // *Международный научный журнал «Вестник науки»*. 2019. Т. 3, № 4 (13). С. 56-65. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37382610>
10. Заключение по результатам теплотехнических расчетов фасадной системы с тонким наружным штукатурным слоем при применении забивных тарельчатых анкеров с различными распорными элементами. Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 2020. 39 с. URL: <https://bzs.ru/upload/iblock/1a1/Zaklyuchenie-po-rezultatam-teplotekhnicheskikh-raschetov-fasadnykh-sistem.pdf>
11. ГОСТ Р 56733-2015. Здания и сооружения. Метод определения удельных потерь теплоты через неоднородности ограждающей конструкции. М.: Стандартинформ, 2016. 10 с.

Поступила в редакцию 23.06.2023

Одобрена после рецензирования 19.09.2023

Принята к опубликованию 22.09.2023

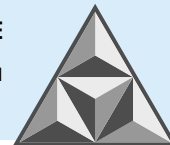
## REFERENCES

1. SP 50.13330.2012. (2012) *Thermal performance of the buildings*. Moscow: Minregion Rossii (in Russian).
2. SP 293.1325800.2017. (2017) *Facade's thermo insulation composite systems with external mortar layers. Design and work execution rules*. М.: Standartinform (in Russian).
3. GOST R 58883-2020. (2020) *Hinged ventilated facade systems. General rules of calculation of substructures*. М.: Standartinform (in Russian).
4. GOST R 58359-2019. (2019) *Plate anchors for fixing of external thermal insulation composite systems with rendering. Specifications*. Moscow: Standartinform (in Russian).
5. **Ovsyannikov, S.N. & Vyazova, T.O.** (2013) Heat-shielding characteristics of external wall structures with heat-conducting inclusions, *Stroitelnye materialy*, (6), pp. 24-27 (in Russian).
6. **Bataev, A.A. & Bataev, V.A.** (2002) *Composite materials. Structure, obtaining, application*. Novosibirsk: NSTU (in Russian).
7. **Blaznov, A.N., Samoilenko, V.V., Zimin, D.E., Komarova, M.V., Ananieva, E.S., Firsov, V.V. & Sakoshev, Z.G.** (2021) Heat-Resistance Enhancement of Fiberglass-Reinforced Plastics in Manufacturing Environments, *Glass and Ceramics*, 78 (3-4), pp. 111-114. DOI: 10.1007/s10717-021-00357-1.
8. **Blaznov, A.N., Savin, V.F., Volkov, Yu.P., Rudolf, A.Ya., Startsev, O.V. & Tikhonov, V.B.** (2011) *Methods of mechanical testing of composite rods*. Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta (in Russian).
9. **Chebotareva, V.S. & Novikov, M.V.** (2019) Energy-efficient facade systems, *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal «Vestnik nauki»*, 3(4), pp. 56-65 [online]. Available at: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37382610> (in Russian).
10. *Conclusion based on the results of thermal engineering calculations of the facade system with a thin outer plaster layer using driven disc anchors with various expansion elements*. (2020) Novosibirsk: Institut teplofiziki SO RAN. [online]. Available at: <https://bzs.ru/upload/iblock/1a1/Zaklyuchenie-po-rezultatam-teplotekhnicheskikh-raschetov-fasadnykh-sistem.pdf> (in Russian).
11. GOST R 56733-2015. (2016) *Buildings and constructions. Method for determination of the specific heat losses through inhomogeneity of the enclosing structure*. М.: Standartinform (in Russian).

Received 23.06.2023

Approved after reviewing 19.09.2023

Accepted 22.09.2023



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

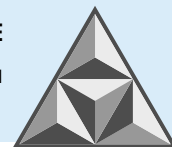
УДК 628.4.036

# Перспективы рециклинга в строительстве с целью создания инновационных композиционных материалов

**А.А. Баруздин, Л.В. Закревская**

**Александр Андреевич Баруздин, Любовь Владимировна Закревская**

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир, Российская Федерация  
*baruzdin98@bk.ru, lvzak@mail.ru*

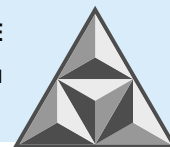


*Приведена классификация отходов строительства и оценена возможность их использования с целью получения новых строительных материалов. Представлены примеры получения композитов на основе отходов стекло- и кирпичного боя, железобетонного лома, гипсокартона, древесины, асбестоцемента, поливинилхлорида и сшитого полиэтилена. Анализ литературных источников выявил, что производство строительных материалов и изделий на основе отходов строительства является перспективным направлением развития производства, позволяющим снизить расходы, сохранить природные ресурсы и уменьшить негативное воздействие на окружающую среду. К отходам, рециклинг которых слабо изучен или затруднен, отнесены отходы сшитого полиэтилена (изоляция кабелей и трубопроводов). Приведены результаты исследований, направленные на синтез нефтестойких бетонов на основе отходов сшитого полиэтилена и кирпичной крошки. Показаны перспективы использования сшитого полиэтилена в качестве заполнителя для бетонов.*

**Ключевые слова:** рециклинг, строительные отходы, кирпичный бой, железобетонный лом, древесина, гипсокартон, полиэтилен

**Для цитирования:**

Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы рециклинга в строительстве с целью создания инновационных композиционных материалов // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 29-54. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

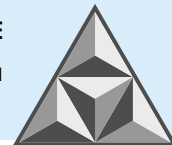
# Prospects of recycling in construction in order to create innovative composite materials

**A.A. Baruzdin, L.V. Zakrevskaya**

**Aleksandr A. Baruzdin, Lyubov V. Zakrevskaya**

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia

*baruzdin98@bk.ru, lvzak@mail.ru*



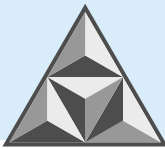
*The article classifies construction wastes and assesses the possibility of using them to produce new construction materials. The authors present examples of obtaining composites on the basis of glass and brick waste, reinforced concrete debris, gypsum plasterboard, drywall, wood, asbestos cement, polyvinyl chloride, and cross-linked polyethylene. The analysis of literature sources reveals the manufacturing of building materials and products on the basis of construction waste. Their using is a promising direction of production development, allowing us to reduce costs, conserve natural resources, and minimize the negative impact on the environment. The wastes of cross-linked polyethylene (insulation of cables and pipelines) belong to the wastes, recycling of which is poorly studied or complicated. The article also provides the results of research aimed at the synthesis of oil-resistant concrete on the basis of cross-linked polyethylene waste and crushed bricks, indicating the prospects of using cross-linked polyethylene as an aggregate for the production of concrete.*

**Key words:** recycling, construction waste, crushed bricks, reinforced concrete debris, wood, drywall, polyethylene

**For citation:**

Baruzdin, A.A. & Zakrevskaya, L.V. (2023) Prospects of recycling in construction to produce innovative composite materials, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 29-54 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)





## ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом возрастает количество возводимых, а также подлежащих разборке и сносу зданий и сооружений. Эти процессы сопровождаются образованием значительного количества техногенных отходов, которые занимают огромные площади для хранения и негативно влияют на экологическую обстановку в стране и в мире.

В октябре 2022 г. Министерство строительства и коммунального хозяйства Российской Федерации утвердило паспорт программы «Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022-2030 годы». Целью введения документа являлось увеличение массы отходов, вовлекаемых в хозяйственный оборот, снижение количества отходов строительства, отправляемых на захоронение, формирование комплексного подхода к обращению с отходами строительства на всех этапах жизненного цикла.

Цель настоящего исследования – анализ известных из литературных источников способов переработки отходов и изучение возможности их повторного использования в составе строительных материалов.

На рис. 1 представлены основные способы утилизации строительных отходов.

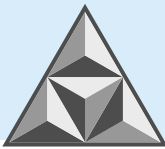


**Рис. 1.** Способы утилизации строительных отходов

**Fig. 1.** Methods of the construction waste disposal

В Российской Федерации на сегодняшний день большая часть строительных отходов подлежит сжиганию или захоронению. К недостаткам таких способов утилизации можно отнести: высокие затраты на строительство мусоросжигательных заводов; негативное влияние на человека и окружающую среду вследствие загрязнения и отравления почвы, воды и атмосферы; организация полигонов для хранения отходов.

Этих недостатков лишен рециклинг отходов. Он подразумевает переработку отходов для их повторного использования в хозяйстве и создания новых материалов и изделий.



К основным его преимуществам можно отнести: снижение стоимости производства материалов и изделий, негативного воздействия на окружающую среду [1-4], сохранение натуральных природных сырьевых ресурсов и снижение

Впервые отходы строительства были применены для возведения новых зданий после второй мировой войны в Германии, однако в мире данная практика получила распространение совсем недавно. В некоторых государствах практически отсутствуют полигоны для захоронения, а доля переработки строительных отходов составляет от 50 до 90%. В России, несмотря на значительный опыт работы с техногенными отходами, такие технологии находятся в стадии развития [5].

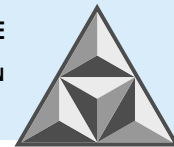
Основными отходами, образующимися в процессе строительства, разборки и сноса зданий и сооружений, являются кирпичный и стеклянный бой, железобетонный лом, лом асфальта, древесина, пластмассы, асбестовый шифер, минераловатный утеплитель, рубероид, обрезки кабелей и труб, гипсокартон, цементно-известковые и гипсовые растворы, лакокрасочные материалы, грунт, санитарно-технический фаянс, загрязненная бумажная, металлическая и пластиковая тара.

На рис. 2 представлены основные виды строительных отходов.



**Рис. 2.** Виды строительных отходов: *a* – кирпичный бой; *б* – бетонный лом; *в* – отходы древесины; *г* – гипсовые отходы (гипсокартон); *д* – асбестоцементные отходы; *е* – отходы ПВХ; *ж* – стеклобой; *з* – отходы шитого полиэтилена

**Fig. 2.** Types of construction waste: *a* – crushed bricks; *b* – concrete debris; *c* – wood waste; *d* – gypsum waste (drywall); *e* – asbestos cement waste; *f* – PVC waste; *g* – glass waste; *h* – waste of cross-linked polyethylene



## РЕЦИКЛИНГ КИРПИЧНОГО БОЯ И БЕТОННОГО ЛОМА

Распространенными отходами являются кирпичный бой и бетонный лом. Они накоплены в больших объемах, и при использовании их в качестве добавок, наполнителей и заполнителей в составе бетонах и других композиционных материалов возникает возможность положительно влиять на свойства композиционных материалов.

Для измельчения кирпичного боя и железобетонного лома необходимо использовать стационарные, сборно-разборные и мобильные дробильные и сортировочные установки, а также мельницы.

Особенностью продуктов переработки кирпичного боя является то, что они имеют ту же структуру, что и исходный материал – кирпич, обладают аналогичной прочностью и пористостью. Зерна заполнителя из дробленого кирпичного боя состоят из фрагментов кирпича и растворной части, доля которой может составлять до 15-20% [6-13].

Кроме того, тонкомолотый порошок, изготовленный из глиняного кирпича, обладает пуццолановой активностью. Это обусловлено переходом кристаллических структур силикатов глины в аморфные соединения при обжиге глин в интервале 973-1473 К. Тонкомолотый кирпич содержит морфологические частицы, представляющие полевои шпат и кварц, что обеспечивает пуццолановую активность при взаимодействии с известью при комнатной температуре [14-16].

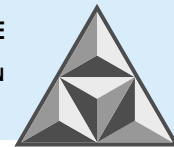
Выявлено, что в тонкомолотом порошке на основе боя глиняного кирпича содержание оксидов кремния, магния и железа составляет 78%, в результате чего порошок обладает пуццолановой активностью. Смесь гидроксида кальция (извести) с молотым боем кирпича, затворенная водой, впоследствии при твердении способна образовывать гидросиликаты и гидроалюминаты кальция в условиях: pH раствора = 12.5; температура 298 К.

Первичными продуктами дробления бетонного лома являются щебень различных фракций и отсеб дробления бетонного лома, который можно использовать в качестве микронаполнителя в комплексных вяжущих. Особенностью щебня из бетонного лома является то, что его гранулы имеют частичную или сплошную оболочку из цементного раствора. Эта оболочка обладает пористостью, что приводит к повышенному водопоглощению заполнителя [17]. При получении щебня из бетона путем дробления происходит разрушение кусков бетона с образованием новых физико-химических активных центров на поверхности цементного камня, негидратированная часть которого может подвергаться дальнейшей гидратации.

Отходы бетонного лома, как и кирпичного боя, обладают повышенным водопоглощением, что подразумевает целесообразность их применения совместно с пластификаторами. Повышенная водопотребность данных заполнителей влияет на процесс структурообразования. Вследствие перераспределения воды между твердой, жидкой и газообразной фазами изменяются реологические свойства бетонной смеси. При введении в бетонную смесь такой заполнитель сначала поглощает жидкую фазу, а затем в процессе образования цементного камня ее отдает. Происходит отсасывание воды из пор заполнителя в твердеющий цементный камень, способствующее образованию более плотной структуры [6-13, 17].

Используя дробленый кирпичный бой в качестве заполнителя совместно с пластификаторами, можно получать бетоны класса В20-В30 с меньшей плотностью, однако без существенного снижения прочности [6-8].





На основе мелкодисперсной фракции кирпичного боя можно изготавливать ячеистые керамобетоны класса по прочности В15, плотностью  $700 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , с показателем теплопроводности, не превышающим  $0.2 \text{ Вт}\cdot(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$  [11].

Для получения на основе отходов кирпичного боя бетона наилучшего качества необходимо ограничивать уровень замещения крупнозернистого и мелкозернистого заполнителя на 25 и 50% соответственно. При этом применение заполнителя из дробленого кирпичного боя может снизить себестоимость бетона до 35%.

На основе боя керамического кирпича возможно изготовление керамобетонных блоков класса по прочности В15, по морозостойкости – F35-F50, с водопоглощением менее 7.5% и сниженной себестоимостью [9].

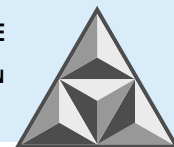
Используя песок из керамического кирпичного боя и портландцемент, можно получать штукатурные смеси, не уступающие по характеристикам традиционным. Растворы с применением песка из данных отходов имеют сопоставимую с традиционными растворами прочность, но более высокие показатели по водоудерживающей способности, раскраиваемости и теплопроводности [18].

В [19] исследовалось влияние введения в цементные растворы мелкой фракции кирпичной крошки. Отмечается, что при введении 5-10% кирпичного заполнителя прочность возрастает до 60 и 75% соответственно, снижается коэффициент водопоглощения. У раствора с добавлением 10% частиц кирпичного порошка водоудерживающая способность выше, чем у эталонного раствора, что может препятствовать всасыванию воды оштукатуренной поверхностью, способствовать увеличению прочности и адгезионной способности. Указывается, что замена натуральных заполнителей на переработанные приводит к незначительному увеличению усадки. В данном исследовании добавление 10% кирпичного порошка в раствор взамен песка позволило увеличить адгезионную прочность на 30%; также зафиксировано снижение паропроницаемости и водопроницаемости.

Возможно использовать мелкодисперсный кирпичный порошок для производства кирпича марок М125, М150 и элементов дорожного мощения при содержании отходов кирпичного боя до 30 и 20% соответственно [20].

Молотый кирпичный бой с удельной поверхностью  $3200-5500 \text{ см}^2\cdot\text{г}^{-1}$  можно использовать в цементных композициях для экономии цемента и снижения выбросов углекислого газа в атмосферу. При этом оптимальная дозировка тонкомолотого кирпичного боя составляет 20% от массы вяжущего, а дополнительно рекомендуется использовать щелочные водные растворы для активации и повышения прочностных характеристик композиций [14]. Авторы [15-16] отмечают, что на механические свойства бетонов с добавлением кирпично-глиняного порошка сильно влияет отношение В/Ц. Наибольшая прочность при сжатии достигается при  $\text{В/Ц} = 0.26$ , размере частиц тонкомолотого кирпича 0.06 мм, содержании песка 33% и коэффициенте замещения цемента на кирпичный порошок 25%. Также добавление тонкомолотого кирпичного порошка улучшает структуру композита; при этом уменьшается количество и размер пор. Дополнительные гидраты, образующиеся в ходе пуццолановой реакции, увеличивают плотность матрицы.

Авторами данной работы на базе Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых проведено исследование, направленное на синтез строительных растворов, пригодных для использования в качестве отделочных, ремонтных и реставрационных целей. Для синтеза растворов использовали отходы гашеной извести и диатомита (отходы горной добычи), тонкомолотые отходы кирпичного боя, гипс, обожженную глину и кварцевый песок. По результатам исследования было установлено,



что добавление в состав тонкомолотой кирпичной крошки повышает плотность и равномерность структуры и снижает количество пор и пустот, а также положительно влияет на прочностные характеристики известкового раствора. Максимальная прочность образцов при содержании извести 35% и кирпичной крошки 19% (по массе) достигала 6.4 МПа; при этом плотность всех образцов варьировалась в диапазоне 1200-1300 кг·м<sup>-3</sup>.

В табл. 1 приведены синтезированные составы и их прочностные характеристики.

**Таблица 1.** Составы синтезированных композитов

**Table 1.** Compositions of synthesized composites

Марка состава	Компоненты, % мас.							Свойства	
	Диатомит	Гипс	Гашеная известь	Кварцевый песок	Глина	Кирпичная крошка	Вода	Плотность $\rho$ , кг·м <sup>-3</sup>	Прочность на сжатие $R_{сж}$ , МПа
1	5	8	35	0	5	19	28	1276	6.40
2	5	8	35	3	5	16	28	1259	5.25
3	5	8	25	5	5	24	28	1293	4.58

В то же время дробленый бетонный лом и отсеvy его дробления также можно применять в качестве вторичного заполнителя и микрозаполнителя в бетонных смесях.

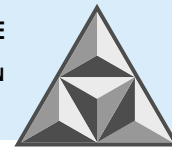
Авторами [21] проведено исследование свойств отсева бетонного лома в качестве активного микрозаполнителя в комплексном вяжущем. Установлено, что помол отсева дробления бетонного лома позволяет включать их в процесс твердения композита. Это объясняется наличием негидратировавших зерен портландцемента, которые при помоле «пробуждаются», а также наличием реакционноспособных карбонатов.

Пористость цементного камня при замещении части цемента молотым отсевом дробления бетонного лома снижается почти в два раза по сравнению с обычным портландцементом. Снижается количество и размер пор. Следовательно, данные бетоны обладают повышенной стойкостью и водонепроницаемостью.

Возможность применения дробленого бетонного лома в качестве заполнителя исследуется с середины XX века. Однако в СССР такие заполнители применялись сравнительно редко, что связано с отсутствием заинтересованности в экономии сырьевых ресурсов и несовершенством технологий фракционирования вторичного щебня. На данный момент применение таких отходов находится в фазе популяризации. Использование вторичного заполнителя из бетонного лома имеет перспективы: энергозатраты при производстве обычного щебня в восемь раз выше, чем таковые при производстве щебня из бетона. В результате использования вторичного щебня можно на 15–30% сократить использование природных заполнителей, а себестоимость бетона снизить на 25% [22].

В [22] отмечается, что бетон на основе заполнителей из бетонного лома относится к легким и имеет среднюю плотность 1840-1940 кг·м<sup>-3</sup> и теплопроводность 0.75-0.85 Вт·(м·К)<sup>-1</sup>. Бетоны с использованием таких заполнителей можно применять для изготовления широкого спектра изделий и конструкций. В ходе исследования [22] были изготовлены бетонные фасадные и тротуарные плиты, по своим эксплуатационным характеристикам удовлетворяющие современным нормам и стандартам. Для утилизации мелкой и пылевидной фракции отходов дробления бетона в качестве мелкого заполнителя предложена технология неавтоклавнога газобетона. Физико-механические показатели такого бетона удовлетворяют требованиям соответствующего государственного стандарта.

На основе заполнителей из бетонного лома можно получать бетоны распространенных классов по прочности В15-В30 и высокопрочные бетоны классов выше В70. При изготовлении



бетонов более низких классов (например, В15) набор прочности происходит быстрее, чем у бетонов на природных заполнителях [23].

Авторы [24] занимались разработкой мелкозернистых бетонов с использованием комбинированного заполнителя, состоящего из песчаной и мелкой щебеночной фракции отсева бетонного лома и природного песка. Они подтвердили целесообразность использования отсевов дробления бетонного лома для оптимизации гранулометрического состава мелкого заполнителя. Заполнитель из лома бетона является активным участником процесса твердения.

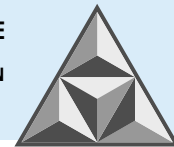
В [25] были проведены исследования составов бетонов с использованием заполнителей на основе отходов бетонного лома Ирака. Выявлено, что использование данных отходов в качестве наполнителя цементного вяжущего при замене до 20% портландцемента позволяет улучшить прочность материалов на сжатие, что происходит благодаря уплотнению структуры продуктами гидратации бетонных отходов, активированных в ходе измельчения.

### РЕЦИКЛИНГ ОТХОДОВ ГИПСА (ГИПСОКАРТОНА)

Гипсовые отходы, как и другие виды строительных отходов, подразделяются: отходы производства; отходы, возникающие во время строительства; отходы от сноса зданий. Отходы строительства и сноса являются сложными для переработки, так как при этом гипс часто смешивается с другими строительными материалами и эффективность его переработки снижается. При сборе отходов гипсокартона необходимо производить сортировку путем отделения от бумаги и металла. Отходы гипсокартона можно собирать и сортировать на месте, а после переработки, которая подразумевает нагрев отходов для дегидратации гипсового камня, использовать совместно с натуральным сырьем для приготовления новых гипсокартонных плит, штукатурки и др.

В [26] исследованы свойства вторичных гипсовых вяжущих, полученных из четырех типов отходов: гипсокартон с пропиткой; гипсокартон огнестойкий; гипсокартон стандартный; разрушенная гипсовая монолитная стена. Гипсовые отходы обрабатывали в дробилке и измельчали для исследований. Результаты исследования показали, что все четыре типа гипсовых отходов пригодны для вторичной переработки. Содержание гипса во вторичном связующем может варьироваться от 38 до 92%. В нем были обнаружены минеральные заполнители, а также древесные и стеклянные волокна. Оптимальный режим обработки для получения полугидрата гипса составляет 4 ч при температуре 403 К. Образцы имели прочность 0.4-1.5 МПа в возрасте 2 ч и 1.0-3.1 в возрасте 14 сут. Данное исследование доказывает целесообразность применения гипсовых отходов совместно с натуральным гипсовым вяжущим.

В [27] предлагается использовать переработанный гипсовый порошок в качестве частичной замены цемента в растворах, причем совместно с добавкой золы-уноса. Замена цемента переработанным гипсовым порошком дает последовательное снижение веса и прочности на сжатие. Однако при добавлении золы-уноса в смесь прочность на сжатие увеличивается, особенно на поздних сроках. Установлено, что при совместной замене цемента на переработанный гипсовый порошок и золу-унос можно получать цементно-песчаный раствор, который на поздних сроках твердения (56 сут.) имеет прочность только на 6% ниже по сравнению с контрольным образцом.



## РЕЦИКЛИНГ ОТХОДОВ ДРЕВЕСИНЫ

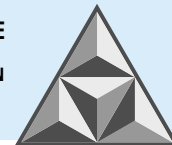
В России находится до 50% мирового запаса древесины, заготовка, обработка и использование которой сопровождаются образованием большого количества отходов. Рециклинг древесных отходов имеет большое экологическое и экономическое значение. С одной стороны, он позволяет производить конструкционные, теплоизоляционные и отделочные материалы с требуемыми эксплуатационными свойствами, с другой – позволяет существенно сократить объемы отходов на полигонах страны.

Древесные строительные отходы можно разделить на твердые или кусковые (обрезки пиломатериалов, досок и т.д.) и мягкие (стружка, опилки, древесная пыль). Наиболее ценными являются твердые отходы, так как из них можно получать разнообразную мелкую пилопродукцию. Последнюю используют в производстве древесноволокнистых (ДВП), древесностружечных (ДСП) и цементно-стружечных плит (ЦСП), арболита, фибролита, ксилолита, опилкобетона, гипсоопилочных блоков, гипсоволокнистых плит. Меньшей ценностью обладают мягкие отходы, варианты использования которых ограничены ввиду их формы и размера [28].

В строительстве широкое применение нашли древесно-цементные композиты – арболит, фибролит и др. Арболит – разновидность легкого бетона на основе минерального вяжущего (обычно портландцемента), органического заполнителя (дробленых отходов древесины), химических добавок и воды. Согласно ГОСТ 19222-2019, изделия из арболита обладают плотностью 500-1000 кг·м<sup>-3</sup>, прочностью на сжатие 1.5–5.0 МПа и теплопроводностью 0.070-0.300 Вт·(м·К)<sup>-1</sup> [29]. Арболитовые изделия используют в строительстве в виде блоков, панелей, плит покрытий и перекрытий, усиленных несущей основой, пола, перегородок, звуко- и теплоизоляционных конструкций.

Другим композитом на основе отходов древесины являются цементно-стружечные плиты. Способ изготовления таких плит открыт в США в 30-х годах XX столетия. В России эти плиты изготавливают с 80-х годов ушедшего века. Согласно ГОСТ 26816-2016 [30], цементно-стружечные плиты подразделяют на два класса: ЦСП-1 и ЦСП-2. Плотность плит составляет от 1100 до 1400 кг·м<sup>-3</sup>, предел прочности на сжатие – от 7 до 12 МПа, водопоглощение – до 16%. Также цементно-стружечные плиты относят к группе трудногораемых материалов (пламя по поверхности не распространяется); предел их огнестойкости составляет 50 мин. ЦСП используют для внутренней и внешней обшивки стен, в качестве несъемной опалубки как основу для пола, как настил под кровлю, в виде подоконника.

Фибролит – строительный материал, представляющий собой спрессованную и затвердевшую смесь из специально приготовленной древесной стружки (древесной шерсти), минерального вяжущего, химических добавок и воды. Фибролит является долговечным материалом (в случае защиты от климатических воздействий), трудногораемым и биостойким. Плотность фибролита составляет 250-500 кг·м<sup>-3</sup>, теплопроводность – 0.07-0.09 Вт·(м·К)<sup>-1</sup>, водопоглощение по массе – 35-45%. Чем больше плотность фибролитовой плиты, тем выше ее прочность (при изгибе достигает 1.0-1.3 МПа). Фибролитовые плиты низкой плотности (250-300 кг·м<sup>-3</sup>) используют для утепления стен, совмещенных кровель, карнизных панелей, вентиляционных каналов, а также в целях звукоизоляции кирпичной кладки. Теплоизоляционно-конструкционный фибролит плотностью 400-500 кг·м<sup>-3</sup> применяют для устройства перегородок, в качестве заполнителя древесного каркаса стен. Если его используют в качестве стенового материала, во избежание намокания и продувания необходимо осуществлять оштукатуривание. В частях зданий,



находящихся в условиях повышенной влажности, его применять не следует. Также фибролит используют в качестве несъемной опалубки.

Ксилолит – строительный материал, состоящий из смеси магнезиального вяжущего, органического целлюлозного заполнителя (древесные опилки или другие измельченные целлюлозосодержащие частицы растительного происхождения) с добавлением тонкодисперсионных минеральных веществ (талька, асбеста, мраморной муки) и щелочестойких пигментов. Данный материал может быть прессованным или свободно формованным. Ксилолит достаточно стоек к пламени (не загорается, а лишь медленно обугливается), обладает низкой теплопроводностью  $0.08-0.26 \text{ Вт}\cdot(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$ , плотностью  $1000-1500 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , прочностью на сжатие (в прессованном виде) до 85 МПа, низким водопоглощением (до 3.8%), стойкостью к кислотам, плесени, морозу, сырости, жаре и сопротивлением к истиранию. Благодаря высокой прочности и незначительному истиранию из ксилолита делают полы на текстильных и прядильных фабриках, в пищевых, винодельческих и консервных производствах, помещениях с интенсивным движением – вестибюлях клубов, кинотеатров, столовых, в коридорах школ, детских садов, больниц и т.д. Особо эффективно применение ксилолитовых полов во взрывоопасных помещениях, где необходимо иметь неискрящие полы.

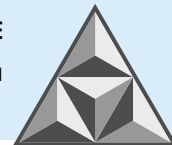
Опилкобетон – конструкционно-теплоизоляционный легкий бетон, в котором в качестве заполнителя используются древесные опилки, а в качестве вяжущего – цемент и известь. Плотность опилкобетона варьируется от 500 до 800  $\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , прочность при сжатии составляет 0.5-3.5 МПа, теплопроводность –  $0.07-0.18 \text{ Вт}\cdot(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$ , водопоглощение – 40–85%. По санитарно-гигиеническим показателям опилкобетон считается лучшим строительным материалом из всех «бетонных изделий», а по теплозащитным качествам он превосходит керамический кирпич. Множество воздушных пор, образующихся в опилкобетоне, и входящие в его состав деревянные опилки позволяют стенам из опилкобетона надежно сохранять тепло в доме, обеспечивая при этом естественную вентиляцию и поддерживая нормальную влажность в помещении. Главный недостаток данного материала – высокая способность впитывать грунтовую и атмосферную влагу. Поэтому при возведении строений из опилкобетона обязательно принимают защитные меры, позволяющие сохранить стены сухими.

Из отходов древесины изготавливают также гипсоопилочные блоки и гипсоволокнистые плиты. В качестве сырья для таких материалов используют щепу, опилки и гипс. Плотность гипсоопилочных блоков составляет  $650-850 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , предел прочности при сжатии – 2.0-3.5 МПа, теплопроводность –  $0.233-0.279 \text{ Вт}\cdot(\text{м}\cdot\text{К})^{-1}$ . Что касается гипсоволокнистых плит, их плотность не превышает  $1200 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ , предел прочности при изгибе – 6-8 МПа, а при сжатии – 22-28 МПа. Гипсоопилочные блоки применяют при устройстве несущих и самонесущих стен в жилых и общественных зданиях с влажностью не более 60%, а гипсоволокнистые плиты – для внутренней отделки зданий в качестве сухой штукатурки, устройства пола и перегородок с высокими звукоизоляционными показателями.

## РЕЦИКЛИНГ СТЕКЛОБОЯ

Стеклобой образуется в процессе строительства и сноса зданий и сооружений, а также существует в виде твердых бытовых отходов. В общей сложности в России на 1 млн. человек образуется 60-100 тыс. т стеклобоья в год, и при хранении отходов на полигонах такого количества стеклобоья выделяется 828-1380 кг щелочи, что приводит к деградации почвы [31]. В то же время использование отходов стеклобоья в производстве строительных материалов





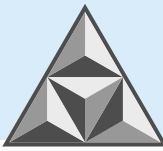
позволяет сохранять и экономить природные ресурсы. Таким образом, переработка данного отхода играет важную экологическую и экономическую роль в современной промышленности.

Отходы стеклобоя активно используют в стекольной (варка стекла, производство стекловолокна и стеклянных шариков) и строительной промышленности (изготовление бетона, облицовочной плитки, строительных кирпичей, пеностекла), а также при укладке дорожных покрытий (асфальтобетон с измельченным стеклом, гласасфальт, герметизирующие составы, нижние слои дорожного покрытия) [32].

По данным [32], при варке листового стекла стеклобой не применяют, но используют при изготовлении темно-зеленого полубелого бутылочного стекла, а также стекла консервной тары. Его можно применять для изготовления стекловолокна (армирование битумных гидроизоляционных покрытий подземных газо- и нефтепроводов) и стеклорубероида (срок службы выше обычного), наружных покрытий горячих трубопроводов, получения стеклопластиков и др. Одним из направлений переработки стеклобоя является производство стеклянных шариков (изготовление теле- и стереоскопических киноэкранов, деталей микрооптики, применение в качестве наполнителей для пластмасс, мелющих тел и т.д). Стеклобой применяют для изготовления строительных кирпичей. Металлургическая лаборатория в Таскалусе (США) провела исследования и изготовила полнотелые кирпичи из массы, содержащей 70% стеклобоя, глину, 1%  $\text{BaCO}_3$  для устранения высолов и 1% лигносульфонатной связки для повышения прочности сырца. После увлажнения до 5% масса перемешивалась в бетономешалке. Кирпичи прессовали при давлении  $2401 \cdot 10^4$  Па ( $245 \text{ кгс} \cdot \text{см}^2$ ). Сырец сушили в течение 15 ч при температуре  $100^\circ\text{C}$  и обжигали в течение 24 ч при температуре  $950^\circ\text{C}$  в газовой челночной печи. Полученные кирпичи имели достаточно высокие характеристики по сравнению с нормативными требованиями Американского сообщества: предел прочности на сжатие составил 56.4 МПа, а водопоглощение – 9.8%. Эти кирпичи можно окрашивать с помощью добавок оксидов железа, кобальта и хромового ангидрида путем введения в шихту перед перемешиванием. В Дании также запатентован способ изготовления силикатных кирпичей с использованием стеклобоя, о чем говорится в [32]. В отличие от обычных силикатных кирпичей, их цвет не зависит от погодных условий. Перед обжигом они могут быть покрыты эмалевой фриттой, окрашивающей изделия в любой желаемый цвет

Другое направление применения стеклобоя в производстве строительных изделий – производство декоративных облицовочных плиток. В [33] описан способ изготовления материала, который авторы называют «поростеклокерамит». Материал пригоден для изготовления плиток, блоков и гранул. Поростеклокерамит получают путем полусухого прессования сырьевой композиции, состоящей на 75-80% из стекольного боя, 15-20% глины и колеманита. Готовые изделия имеют микропористую равномерную структуру, низкое водопоглощение и хорошие прочностные показатели. Поверхность плиток – гладкая оплавленная, практически без пор. Цвет готовых плиток изменяется в зависимости от вида и количества глинистого сырья.

Стеклобой также может использоваться в производстве бетона. Однако при введении стекольного боя в состав бетона происходит взаимодействие аморфного кремнезема, входящего в состав стекла, со щелочами цемента. В результате образуется гель, который разбухает и приводит к растрескиванию и разрушению бетона [34]. При использовании стеклобоя в бетонной промышленности данное взаимодействие необходимо учитывать. Эффективным способом подавления щелочно-кремниевой реакции является введение в состав стеклобетона добавки силикагеля (в количестве 4-8% от массы цемента), что позволяет снизить расширение стеклобетона до уровня ниже критического даже при наличии в составе



стеклобетона дополнительного количества щелочи. Силикагель сорбирует на своей поверхности свободный гидроксид кальция и ионы щелочных металлов. При этом он не проникает в поры цементного камня и не вызывает расширения бетона [35].

Другим способом предупреждения щелочно-кремниевой реакции является помол стекольного заполнителя до мелкодисперсных фракций. При использовании фракций менее 1.25 мм расширение бетонов за 14 недель составляет не более 0.02-0.04%. Если стекло размолото тонко, риск разрушения стеклобетона значительно снижается [35].

Еще одним способом избежать щелочно-кремниевое взаимодействие является частичная кристаллизация стекла. Процесс на поверхности крупнодисперсного стекла может быть активирован при повышенных температурах (973-993 К) в присутствии центров кристаллизации, например, порошка кварцевого песка. Эксперименты с высокощелочными бетонами при использовании такого заполнителя показывают, что расширение образцов, по сравнению с таковыми, включающими немодифицированный стеклобой, оказывается в 2-7 раз меньше, в зависимости от концентрации щелочи и фракции заполнителя [34]. Количество стеклобоя, применяемого в бетонных смесях, различно и зависит от назначения и состава бетона. Применение отходов стекла в изготовлении бетонных изделий, помимо утилизации, позволяет повысить прочность и внешний вид бетонных изделий, улучшить их тепло- и звукоизоляционные свойства, снизить коэффициент температурного расширения.

Работы по изготовлению бетонов с использованием стеклобоя ведутся в России, странах СНГ, Канады, Франции, Германии и др. На рис. 3 приведены составы бетонов с использованием стеклобоя, разработанные в разных странах [31, 32].

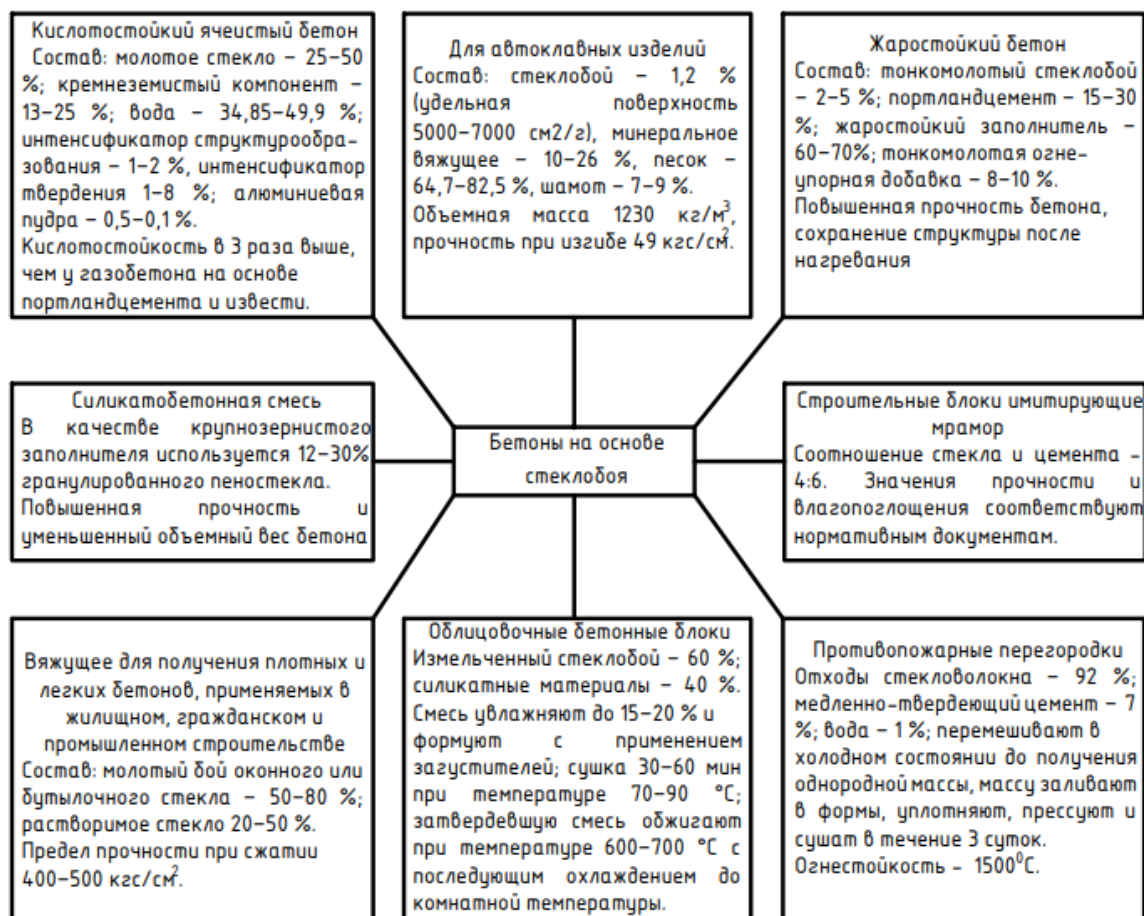
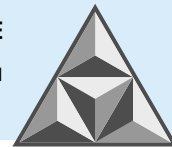


Рис. 3. Существующие составы бетонов с использованием стеклобоя

Fig. 3. Current concrete compositions using glass waste



Помимо прочего, отходы стеклобоя используют для производства пеностекла, которое является хорошим изоляционным материалом и обладает рядом полезных свойств для строительства. Пеностекло имеет малый объемный вес, низкие показатели водопоглощения и теплопроводности, однако повышенную устойчивость в агрессивных средах и огнестойкость. Во многих странах проводят исследования, направленные на снижение себестоимости пеностекла за счет использования стеклобоя и недефицитных дешевых вспенивателей.

В [36] проведено исследование, направленное на синтез пеноматериалов из натриевого жидкого стекла средней плотностью  $1320 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$  в качестве вяжущего, стеклянного порошка из стеклобоя насыпной плотностью  $1600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$  в качестве наполнителя, ускорителя твердения – кремнефторида натрия и пенообразователя «Фэйри» (моющее средство для посуды, взятое в количестве 4% от массы вяжущего). Установлено, что композиции с соотношением жидкое: наполнитель = 1:2 отличаются оптимальной плотностью ( $460 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ ) и прочностью 1.1 МПа (в возрасте 7 сут.).

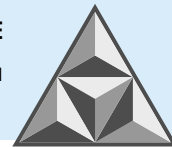
На заводе «Пеноситал» разработана и освоена технология по производству пеностекла [32]. Сырьем для производства являются вода, стеклобой и реагенты для вспенивания. Стеклобой, пришедший на предприятие, отделяется от мусора и подается в сушильный барабан, а затем – в дробилку. Далее стеклобой с помощью элеватора поступает в расходный бункер-накопитель. В процессе производства молотый стеклобой и смесь реагентов поступают в смеситель, на выходе из которого масса подается в окатыватель для формирования гранул и затем – на склад.

В производстве пеностеклового гравия гранулы загружают в бункер-дозатор, откуда они дозируются в барабанную печь вместе с опудривателем, дозируемым из другого бункера. На выходе из печи вспененные гранулы охлаждают в барабанном холодильнике и отделяют от опудривателя, отсеивают по фракциям, фасуют и упаковывают.

В производстве пеностеклянных плит и блоков полуфабрикат загружают в весовой дозатор и далее – в печные тележки, которые направляются в проходную печь. На выходе из печи вспененные блоки (полуфабрикаты) вынимают из тележки и подают на линию распиловки.

Также в [32] описан разработанный в США способ получения пеностекла из стеклобоя с введением реагентов, обеспечивающих включение в структуру гидроксильных групп. Измельченные отходы стекла, имеющие частицы размером 29 мкм, помещают в автоклав и выдерживают в течение нескольких часов в атмосфере насыщенного водяного пара при температуре 663 К и давлении  $744.8\cdot 10^4$  Па. Затем стеклобой охлаждают до комнатной температуры, после чего вновь нагревают в печи до 1373 К. При этой температуре гидроксильные группы вызывают вспенивание размягченного стекла.

Другим направлением применения стеклобоя является дорожное строительство. Для изготовления дорожного бетона стеклобой тщательно дробят с целью получения минерального порошка. Такой порошок является важнейшим структурообразующим компонентом асфальтобетона. На его долю приходится 90-95% суммарной поверхности минеральных зерен, входящих в состав асфальтобетона. Основная цель – перевод битума в пленочное состояние, а также заполнение пор между крупными частицами, в результате чего повышается плотность и прочность асфальтобетона. Минеральному порошку из стекла свойственна развитая поверхность и отсутствие пористости и, как следствие, более высокое набухание в смеси с битумом и дегтем. Наличие стекла в смеси улучшает способность удерживать тепло, что позволяет готовить смесь при температуре 408 К и укладывать



ее при температуре до 277 К. Это дает возможность получить более плотное дорожное покрытие, чем в случае применения обычного асфальта [32].

Введение в асфальтобетонную смесь до 10% стеклобоя не снижает ее характеристики, а при большем содержании указанного отхода рекомендуется дополнительно вводить в битум добавки извести (2%), нефтеполимерной смолы (15%) или катионных ПАВ (2-3%). Содержание стеклобоя в любых составах не должно превышать 50% от массы смеси.

## РЕЦИКЛИНГ АСБЕСТОЦЕМЕНТНЫХ ОТХОДОВ

Одним из ценных видов отходов, образующихся в процессе производства строительных материалов, строительства и сноса зданий, являются отходы асбестоцемента. Только в производстве асбестоцементных изделий образуются отходы в количестве до 12% от массы сырья [37]. Значительная часть таких отходов вывозится в отвалы, загрязняя окружающую среду. В то же время асбестоцементный камень имеет высокую прочность и низкую теплопроводность, поэтому является перспективным для рециклинга и производства новых материалов.

Проводимый авторами настоящей работы анализ указывает на выгоды использования асбестоцементных отходов для производства стеновых камней, кирпичей, сухих строительных смесей, вяжущего и наполнителей для бетона, асфальтобетона, а также для укрепления грунтов.

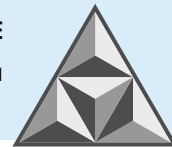
В связи с распространенным мнением о возникновении тяжелых легочных заболеваний у людей, работающих с асбестом, к применению асбеста в строительстве имеется негативное отношение и стремление заменить его равноценным безвредным материалом.

Однако в 1989 г. агентство по охране окружающей среды США отменило предложения о полном запрете асбеста. Институт США по вопросам асбеста, Всемирная организация здравоохранения (ВОЗ) и Международная организация труда (МОТ) считают, что асбест не опасен для здоровья, если загрязнение им не превышает обоснованные нормы. Наименее вредным видом асбеста является хризотилковый, широко применяемый в нашей стране [38]. Согласно федеральному классификационному каталогу, асбестовые отходы относятся к IV классу опасности (вещества малоопасные), поэтому их применение при изготовлении строительных материалов и изделий допускается для всех видов зданий [39].

Существует несколько способов улучшения физико-механических свойств материалов на основе асбестоцементных отходов. Первый способ – помол отходов до высокой удельной поверхности. При этом необходимо учитывать, что условия помола должны обеспечивать максимальную сохранность волокон асбеста (длина волокна  $\geq 0.25$  мм), который должен быть предварительно обезвожен. Второй способ – термообработка. При сушке и обжиге асбестоцементных отходов увеличивается количество способных к гидратации соединений, высушенные или обожженные отходы размалываются легче. Активность материала повышается, однако происходит потеря прочности. Третий способ – добавка кремнеземистых компонентов. В отходах асбестоцемента содержится значительное количество гидроксида кальция, и при введении добавок, содержащих активный кремнезем, за счет пуццолановых реакций могут образовываться низкоосновные гидросиликаты кальция, что приводит к повышению физико-механических характеристик [37].

В [38] описана эффективная технология производства стеновых камней и кирпичей на основе асбестоцементных отходов. Сначала отходы дробят и отсеивают на фракции (5-10 мм и 0-5 мм); крупные частицы возвращают на повторное дробление.





Затем изготавливают сырьевую смесь, состоящую из щебня и песка, золы в качестве кремнеземистой составляющей, асбестоцементной пыли в качестве вяжущего и воды. Изделия формуют в пресс-формах под давлением 20 МПа в течение 30 с и направляют на тепловлажностную обработку в пропарочные камеры при температуре 363-368 К по режиму (3 + 10 + 2) ч. В итоге получают прочный и морозостойкий материал.

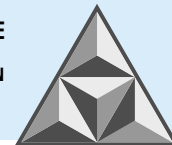
На основе асбестоцементных отходов можно изготавливать вяжущее, пригодное для производства бетонов класса В20-В22.5. Вяжущее получают путем механоактивации смеси асбестоцементных отходов, золы теплоэлектростанций стеклобоя в мельницах ударно-отражательного типа. В качестве добавки, повышающей прочность на изгиб, используется волокнистая добавка отходов производства минераловатных плит в количестве 5% от общей массы смеси [40].

Автор [41] предлагает использовать асбестоцементные отходы для производства сухих смесей. Акцентируется внимание на необходимости снижения в таких отходах содержания шестивалентного хрома. Сухая смесь состоит из портландцемента, асбестоцементных отходов, песка и щелока или сульфита натрия, которые являются дехроматизаторами. Прочность сухих штукатурных смесей в возрасте 28 сут., изготовленных по данной технологии, составляет 6-7 МПа; при этом обеспечивается выполнение требований нормативных документов по содержанию  $Cr^{6+}$ , что обеспечивает экологическую безопасность выпускаемой продукции.

Обосновано получение на основе асбестоцементных отходов безобжигового кирпича марок М100, М125, М150 и тротуарной плитки класса В22.5 [42]. Используется смесь твердых асбестоцементных отходов с размером зерен до 5 мм и золошлаковые отходы ТЭС с размером зерен до 2 мм, а также цемент в количестве 0-5% по массе для изготовления кирпича и 30% – для изготовления плитки. Формирование изделий происходит под прессом при давлении 20-40 МПа. Их себестоимость на 20-25% ниже по сравнению с силикатным кирпичом и традиционной тротуарной плиткой [42].

В [43] предлагается использовать асбестоцементные отходы в виде заполнителя для бетона. Объектом исследования [43] выбран мелкозернистый бетон марки М100. В качестве вяжущего использовали портландцемент М400, в качестве заполнителя – песок с модулем крупности 0.85 и измельченный бой шифера и асбестоцементных труб, рассеянный на фракции 0-5, 10-20 и 20-40 мм. Также использовалась добавка поливинилацетата в количестве 10% по массе для улучшения физико-механических характеристик бетона. Определено, что оптимальными являются составы с фракцией заполнителя 0-5 мм и 10-20 мм при концентрации 33 и 40% соответственно. Полученные бетоны имеют прочность на сжатие до 14 МПа и марку по морозостойкости F40.

Асбестоцементные отходы возможно применять в дорожном строительстве. Такие отходы используют в качестве минерального порошка в составе дорожного асфальтобетона. В [44] представлены исследования структурирующей способности такого порошка. Для этого проведены исследования его смесей с битумом при различном массовом соотношении битум: порошок. Оптимальное содержание битума в асфальтовом вяжущем с использованием мраморного порошка составляет 6.0-6.5%, а для асбестоцементного порошка – 5.5-6.0%. Минеральный порошок на основе асбестоцемента не требует увеличения массы органического вяжущего. Автор [44] отмечает, что использование асбестоцементного минерального порошка позволяет получить плотный асфальтобетон, рекомендуемый при устройстве верхних слоев покрытий автомобильных дорог III и IV категории.



Асбестовые волокнистые и пылеватые отходы рекомендуется применять для укрепления грунтов. В [45] оценены свойства грунтов, армированных асбестовыми отходами (до 20% от массы грунта) и обработанных кремнефтористоводородной кислотой (2.5-7.5% от массы сухой смеси). Отмечается, что прочности грунтовой композиции на сжатие и при изгибе возрастают по мере роста расхода отходов асбеста и кислоты. Добавка асбеста увеличивает водопоглощение композиции, в то время как добавка кислоты снижает этот показатель. Использование таких отходов для армирования связанных грунтов строительных площадок в регионах, где отсутствуют природные каменные материалы, может обеспечить значительный экономический эффект.

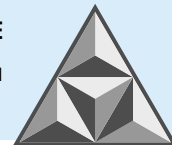
## РЕЦИКЛИНГ ПОЛИМЕРНЫХ ОТХОДОВ

Накопление пластиковых отходов является глобальной проблемой современности. Такие материалы трудно утилизировать, а при их сжигании в атмосферу выделяются токсичные вещества. Они накапливаются на полигонах и свалках с огромной скоростью и разлагаются сотни лет, что приводит к катастрофическому загрязнению окружающей среды. В ходе строительства и сноса зданий и сооружений также образуются значительные объемы отходов на основе полимеров. Это обрезки труб, оплетки кабелей, оконные рамы, двери, различные декоративные материалы, материалы тары и упаковки и др. Рециклинг таких отходов не только может улучшить экологическую обстановку в мире, но и уменьшить себестоимость производства строительных материалов и изделий.

Пластиковые отходы уже сейчас в некоторых странах применяют для изготовления элементов кровли, черепицы, плитки, для отделки стен и полов и др. Также выявлены перспективные направления использования отходов пластмасс в строительстве дорог. В Индии существует опыт создания асфальтовой смеси из переработанного пластика. Пластмассовые отходы обогащаются стабилизаторами, смешиваются с битумом, и в результате получается новое дорожное водонепроницаемое покрытие, отличающееся прочностью и долговечностью [46]. В Канаде реализуется проект по созданию нового дорожного покрытия, которое на 80% состоит из асфальта и на 20% из переработанного пластика. По сравнению с традиционным асфальтом, для производства дорожного полотна требуется меньшая температура. Несколько километров такой дороги позволяют очистить планету от кубометров мусора [46].

Пластиковые отходы также возможно использовать в качестве заполнителя строительных растворов и бетонов. В [47] проведено исследование по усилению штукатурного раствора порошком из отходов стекла и волокнами из отходов типа полиэтилентерефталата. Было отмечено увеличение прочности на изгиб у образцов штукатурки, армированных волокнами из пластиковых отходов (1-2% пластиковых волокон от массы гипса).

Авторами [48] проведен ряд исследований, направленных на изучение свойств бетонных смесей, в которых мелкий заполнитель из речного песка заменен на гранулы, изготовленные путем измельчения отходов труб из поливинилхлорида (ПВХ). Для приготовления составов использовали легкий керамзитобетонный заполнитель в качестве крупной фракции, портландцемент в качестве вяжущего и пластификатор для контроля подвижности смесей. Бетоны на основе заполнителя из ПВХ обладают пониженной прочностью на сжатие и растяжение, однако меньшей усадкой, плотностью, а также более устойчивы к проникновению хлорид-ионов. Авторы рекомендуют при изготовлении бетонов с включением ПВХ ограничивать содержание отходов до 15% по объему. При соблюдении указанного ограничения такие бетоны возможно использовать для возведения ненесущих элементов.



Переработанные ПВХ отходы можно условно разделить на пластмассовые заполнители и пластмассовые волокна. Указывается, что бетоны, содержащие пластмассовые волокна из отходов ПВХ в количестве < 1%, имеют, по сравнению с обычным бетоном, повышенную прочность на сжатие и изгиб, растяжение при расщеплении, однако при увеличении содержания пластиковых волокон сверх этого уровня происходит снижение механических характеристик бетона [49].

Большинство исследований в указанной области направленно на переработку полиэтилентерефталата (ПЭТ) и ПВХ. Также в процессе строительства и сноса образуются отходы сшитого полиэтилена, используемого для изготовления кабелей и систем инженерной коммуникации (отопления, охлаждения, водоснабжения).

По мнению авторов настоящей работы, вопрос применения отходов сшитого полиэтилена в строительстве, по сравнению с другими видами отходов, изучен в недостаточной степени. Поэтому на базе Владимирского государственного университета им. А.Г. и Н.Г. Столетовых проведено исследование, направленное на синтез нефтестойких бетонов с использованием заполнителей из отходов сшитого полиэтилена. В качестве частичной замены цемента была дополнительно использована мелкая фракция кирпичной крошки, получаемая в результате дробления кирпичного боя. Для увеличения плотности бетонов в состав всех образцов вводили добавку белой сажи. При затворении смеси использовали раствор хлористого кальция в целях повышения нефтестойкости.

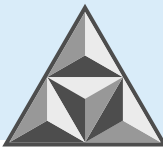
Примеры составов синтезированных бетонов и их свойства приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Составы синтезированных бетонов с заполнителем из сшитого полиэтилена

**Table 2.** Compositions of synthesized concretes with an aggregate made of cross-linked polyethylene

Марка состава	Компоненты, % мас.						Свойства			
	Портландцемент	Кирпичная крошка фракции менее 0.08 мм	Белая сажа	Сшитый полиэтилен фракции менее 0.63 мм	Поликарбоксилатный пластификатор	10%-й раствор CaCl <sub>2</sub>	Плотность $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Прочность на сжатие $R_{сж}$ , МПа	Прочность на изгиб $R_{изг}$ , МПа	Коэффициент стойкости бетона в масле, $K_{ст}$
НБ-1	42.4	16.9	0.8	21.0	0.4	18.5	2010	39.5	3.7	
НБ-2	43.4	17.3	0.8	21.5	0.4	16.6	1940	41.0	3.5	
НБ-3	40.2	16.0	0.8	26.0	0.4	16.6	1870	21.5	4.1	

В ходе исследования авторами настоящей работы отмечалось положительное влияние использования мелкой фракции полиэтилена на прочность и плотность образцов бетона. Выявлено, что структура для образца бетона, где использовали полиэтилен фракции до 0.63 мм, более однородна и уплотнена, по сравнению с образцом бетона, включающим полиэтилен более крупной фракции. Повышение нефтестойкости бетона достигается за счет использования мелкой фракции полиэтилена, наполнителя из мелкой фракции кирпичной крошки, обладающего пуццолановым эффектом, добавки хлористого кальция, использования высокого содержания цемента и низких В/Ц отношений, а также вследствие термической обработки готовых образцов. Введенные в бетонную смесь полимеры расплавляются при тепловой обработке и при последующем застывании коагулируют поры. Температура плавления полиэтилена должна быть в пределах 343-353 К, что соответствует экзотермической реакции гидратации цемента. Результаты данных исследований служат основанием для синтеза новых композиционных материалов с реализацией рециклинга отходов сшитого полиэтилена и кирпичного боя.



Анализ рециклинга строительных отходов обобщен в виде схемы (см. рис. 4).

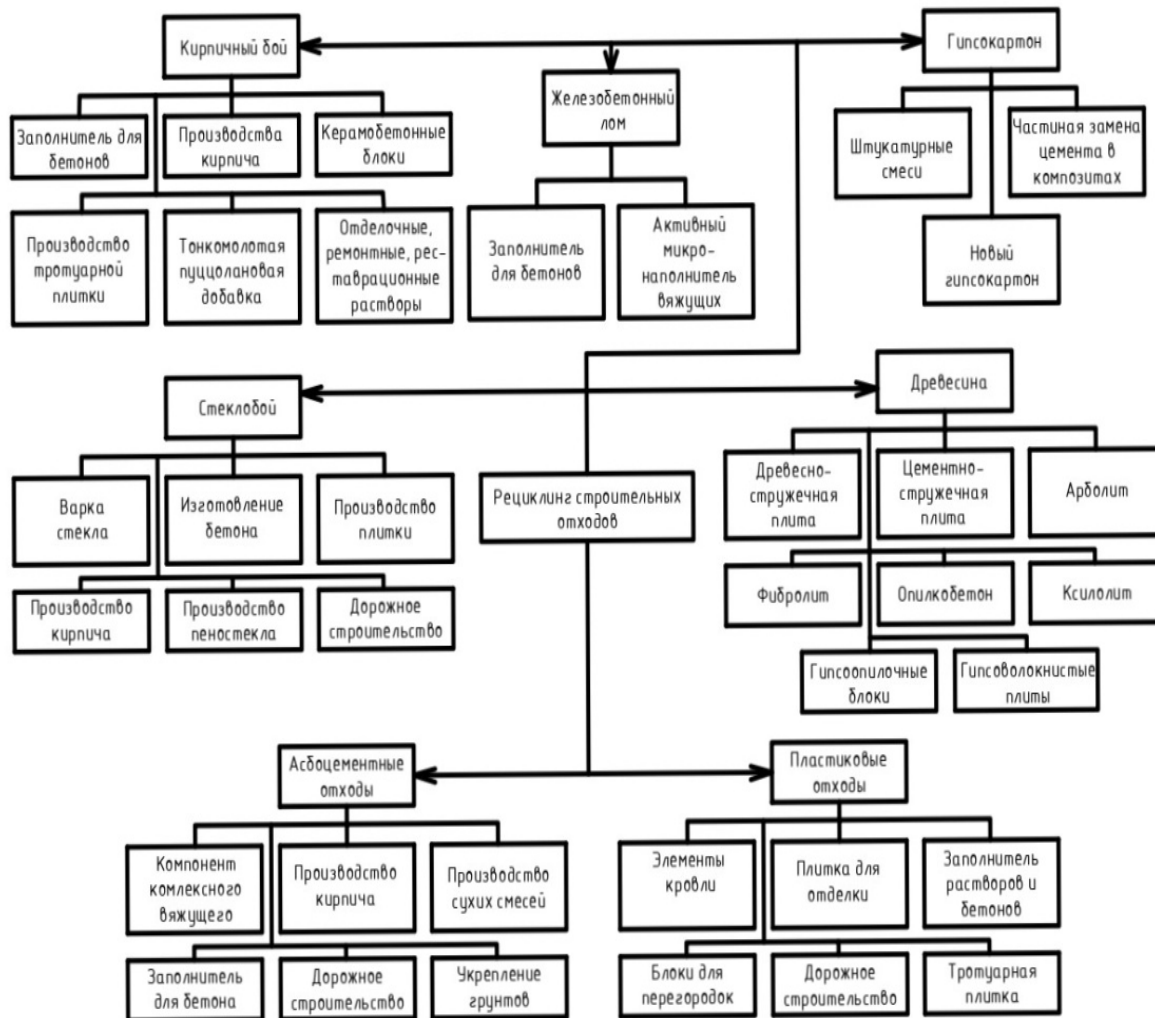


Рис. 4. Рециклинг строительных отходов

Fig. 4. Recycling of construction waste

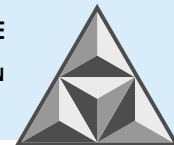
На основании проведенного анализа выявлено, что применение строительных отходов при изготовлении новых композиционных материалов и изделий является весьма перспективным научно-практическим направлением.

## ВЫВОДЫ

Рециклинг отходов строительства открывает широкие перспективы и возможности получения новых строительных материалов на основе вторичного сырья, решает проблемы экономики и экологии на основе осуществления принципа «отходы – в доходы». Наиболее исследованными в сфере рециклинга являются отходы кирпичного и стеклянного боя, бетонного лома, гипса (гипсокартона), древесины и асбестоцемента.

Среди отходов, еще не нашедших широкого применения в технологиях производства строительных материалов, выделен сшитый полиэтилен, который трудно подчиняется традиционным методам рециклинга. Проведенное исследование, направленное на синтез нефтестойких бетонов с использованием отходов сшитого полиэтилена и кирпичной крошки, выявило высокие перспективы переработки данных отходов.



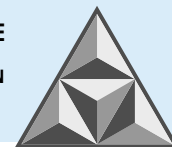


**Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (соглашение №075-15-2021-692 от 5 августа 2021 года).

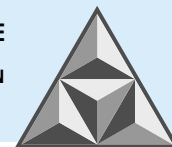
**Acknowledgements.** The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2020-0015, state assignment of VLSU). The study was carried out using the equipment of the interregional multispecialty and interdisciplinary center for the collective usage of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (Agreement No. 075-15-2021-692 of August 5, 2021).

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Соколов Л.И.** Классификация и рециклинг строительных отходов // *Управление техносферой*. 2021. Т. 4, вып. 1. С. 39-49. DOI 10.34828/UdSU.2021.40.44.008. URL: <https://technosphereing.ru>
2. **Гамаюнова О.С., Слободянюк Т.Р.** Вторичное использование строительных отходов // *Высокие технологии в строительном комплексе*. 2022. № 1. С. 18-26.
3. **Олейник С.П.** Строительные отходы при реконструкции зданий и сооружений // *Интернет-журнал «Отходы и ресурсы»*. 2016. Т. 3, № 2. DOI: 10.15862/03RR0116. URL: <http://resources.today/issues/vol3-no2.html>
4. **Лунев Г.Г., Прохоцкий Ю.М.** Рециклинг вторичных строительных ресурсов. Проблемы и перспективы отрасли на примере г. Москвы // *Всероссийский экономический журнал ЭКО*. 2020. № 4. С. 166-192. DOI: 10.30680/ЕСО.
5. **Жуков С.Ю.** Строительные отходы при реконструкции зданий и сооружений // *Проектирование и строительство: сборник научных трудов 2-й Международной научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов, магистров и бакалавров (Курск, 04-05 июня 2018 года)*. Курск: Юго-западный государственный университет, 2018. С. 61-63.
6. **Муртазаев С-А.Ю., Хадисов В.Х., Хаджиев М.Р.** Использование отходов производственного брака и керамического боя кирпича для приготовления легкого бетона // *Труды грозненского государственного нефтяного технического университета имени академика М.Д. Миллионщикова*. 2011. № 11. С. 157-162.
7. **Хаджиев М.Р.** Бетонные композиты на заполнителях из керамического кирпичного боя // *Евразийский союз ученых*. 2014. № 5. С. 37-40. DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.
8. **Хаджиев М.Р.** Керамобетон на основе вторичных заполнителей из кирпичного боя для мелкоштучных стеновых изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Грозный, 2015. 25 с.
9. **Хаджиев М.Р., Хадисов В.Х.** Мелкоштучные стеновые изделия из легкого керамобетона для ограждающих конструкций зданий и сооружений // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2014. № 4. С. 137-142.
10. **Батдалов М.М., Хадисов В.Х.** Использование кирпичного боя для производства строительных композитов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2011. № 23. С. 102-105.
11. **Муртазаев С-А.Ю., Сайдумов М.С., Хаджиев М.Р., Хадисов В.Х.** Ячеистый керамобетон на основе заполнителей из вторичного сырья // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. 2014. № 3 (34). С. 74-81.
12. **Sadek D.M.** Phisico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates // *Journal of advanced research*. 2012. No. 3. P. 253-260.



13. **Debieb F., Kenai S.** The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete // *Construction and building materials*. 2008. No. 22(5). P. 886-893. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013.
14. **Романенко И.И., Петровнина И.Н., Еличев К.А., Романенко М.И.** Пробуждение гидравлической активности наполнителей и заполнителей из лома глиняного кирпича // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 11 (95). С. 563-572.
15. **Aliabdo A.A., Abd-Elmoati M., Hassan H.H.** The use of crushed clay bricks in the concrete industry // *Alexandria Engineering Journal*. 2014. Vol. 53, no. 1. P. 151-168. DOI:10.1016/j.aej.2013.12.003.
16. **Ge Z., Gao Z., Sun R., Zheng L.** Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. // *Construction and building materials*. 2012. No. 31. P. 289-293. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002.
17. **Пуляев С. М.** Бетоны на заполнителях из бетонного лома для сборных железобетонных изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, 2005. 20 с.
18. **Успанова А.С., Исламов А.А., Куразов М.С., Иноркаев И.С-А., Вахажи Х-М.М.** Строительные штукатурные смеси на основе мелкой фракции продукта дробления кирпичного боя и производственного брака кирпича // *Фундаментальные основы строительного материаловедения: сборник докладов Международного онлайн конгресса. (Белгород, 06-11 октября 2017 года)*. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2017. С. 906-913.
19. **Silva J., Brito de J., Veiga R.** Incorporation of fine ceramics in mortars. // *Construction and Building Materials*. 2009. Vol. 23. P. 556-564. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014.
20. **Фоменко А.И., Грызлов В.С., Каптюшина А.Г.** Отходы керамического кирпича как эффективный компонент строительных композитов // *Современные наукоемкие технологии*. 2016. № 2. С. 260-264.
21. **Муртазаев С-А.Ю., Исмаилова З.Х., Хасиев А.А., Нахаев М.Р.** Утилизация отсева дробления бетонного лома // *Экология и промышленность России*. 2012. № 8. С. 26-28.
22. **Ефименко А.З.** Бетонные отходы – сырье для производства эффективных строительных материалов // *Материалы. Технологии бетонов*. 2014. № 2. С. 17-21.
23. **Магсумов А.Н., Шарипянов Н.М., Красникова Н.М.** Использование бетонного лома в качестве крупного заполнителя для производства бетонных смесей // *Символ науки: международный научный журнал*. 2018. № 6. С. 29-33.
24. **Чурсин С.И., Поздняков А.В.** Тяжелые бетоны с использованием модифицированного мелкого заполнителя из бетонного лома // *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2018. № 4 (2). С. 209-215.
25. **Ахмед А.А., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Тимохина Р.А., Мурали Г.** Использование бетонного лома Ирака в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого и легкого бетона // *Строительные материалы и изделия*. 2020. № 3. С. 28-39.
26. **Bumanis G., Zorica J., Korjamins A., Bajare D.** Processing of Gypsum Construction and Demolition Waste and Properties of Secondary Gypsum Binder // *Recycling*. 2022. No. 7 (30). DOI: 10.3390/recycling7030030.
27. **Hansen S., Perdarn S.** Application of Recycled Gypsum Wallboards in Cement Mortar. // *Conference: 7th International Conference on Engineering Mechanics and Materials*. CSCE Annual Conference At: Laval, QC, Canada, 2019.
28. **Кислицына С.Н., Шитова И.Ю.** Способы переработки отходов деревообрабатывающей промышленности: учеб. пособие. Пенза: ПГУАС, 2016. 140 с.
29. **ГОСТ 19222-2019.** Арболит и изделия из него. М.: Издательство Стандартиформ, 2019. 31 с.
30. **ГОСТ 26816-2016.** Плиты цементно-стружечные. М.: Издательство Стандартиформ, 2016. 15 с.
31. **Минько Н.И., Калатоци В.В.** Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 1. С. 82-88.
32. **Мелконян Р.Г., Власова С.Г.** Экологические и экономические проблемы использования стеклобоя в производстве стекла: учеб. пособие. Екатеринбург: Издательство Уральского университета, 2013. 100 с.
33. **Бессмертный В.С., Жерновой Ф.Е., Дорохова Е.С., Изотова И.А., Гокова Е.Н.** Эффективный материал для зеленого строительства на основе вторичного стекольного боя // *Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства*. 2016. С. 111-116.



34. Использование стеклобоя как заполнителя бетонов. URL: [https://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=6702&cat\\_id=24&page\\_id=2](https://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=6702&cat_id=24&page_id=2).
35. **Белокопытова А.С.** Разработка процессов утилизации стеклобоя путем создания композиционных материалов: автореф. дис. ...канд. техн. наук. М., 2006. 18 с.
36. **Григорова Ю.А.** Вторичное использование стеклобоя в производстве теплоизоляционных материалов // *Современные научные исследования и инновации*. 2014. № 8. Ч. 1. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2014/08/37026>
37. **Багаутдинов А.А.** Способы улучшения физико-механических свойств материалов и изделий на основе асбестоцементных отходов // *Вестник УлГТУ*. 2004. № 2. С. 76-78.
38. **Багаутдинов А.А.** Стеновые строительные изделия на основе отходов асбестоцементного производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. М., 1994. 19 с.
39. Росприроднадзор. Федеральный классификационный каталог отходов. URL: <https://rpn.gov.ru/fkko/45592111604/>
40. **Кулигина Т.Н.** Разработка строительных материалов на основе отходов асбестоцементного производства: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Иваново, 2007. 23 с.
41. **Васильева Л.В., Губская А.Г.** Возможность использования асбестоцементных отходов для производства сухих строительных смесей // *Сухие строительные смеси*. 2012. № 2. С. 15-16.
42. **Щукин Е.А., Щукина Е.Г.** Строительные материалы с использованием асбестоцементных отходов // *Актуальные вопросы строительного материаловедения: материалы Всероссийской научно-практической конференции. (Улан-Удэ, 21-24 июля 2021 года)*. Улан-Удэ: Бурятский государственный университет им. Доржи Банзарова, 2021. С. 124-128.
43. **Ярцев В.П., Репина Е.И.** Влияние наполнителей из асбестоцементных отходов на физико-механические свойства и долговечность цементно-песчаных бетонов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2018. № 10. С. 16-22.
44. **Калашников П.И.** Асфальтобетон с использованием отходов асбестоцементных изделий // *Научные исследования*. 2017. № 6. Т. 2. С. 20-24.
45. Изучение реакционной способности асбестов, подбор составов смесей. URL: [https://ozlib.com/1094836/tehnika/izuchenie\\_reaktsionnoy\\_sposobnosti\\_asbestov](https://ozlib.com/1094836/tehnika/izuchenie_reaktsionnoy_sposobnosti_asbestov)
46. **Лысянников А.В., Третьякова Е.А., Лысянникова Н.Н.** Переработанный пластик в дорожном строительстве // *Известия ТулГУ. Технические науки*. 2017. № 7. С. 105-115.
47. **Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H.** Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass // *ICSI 2019. The 3rd International Conference on Structural Integrity*. 2019. P. 170-176. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.023.
48. **Kou S.C., Lee G., Poon C.S., Lai W.L.** Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes // *Waste management*. 2009. No. 29. P. 621-629. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.014
49. **Сиков Н.Е., Серегин А.И., Юркин Ю.В.** Использование пластиковых отходов в качестве заполнителя в цементном растворе и приготовлении бетона // *Инженерный вестник Дона*. 2022. № 8. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/arhive/n8y2022/7845>

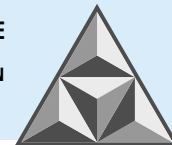
Поступила в редакцию 20.07.2023

Одобрена после рецензирования 20.09.2023

Принята к опубликованию 22.09.2023

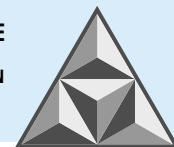
## REFERENCES

1. **Sokolov, I.I.** (2021) Classification and recycling of construction waste, *Upravlenie tekhnosferoy*, 4(1), pp. 39-49. DOI 10.34828/UdSU.2021.40.44.008 [online]. Available at: <https://technosphereing.ru> (in Russian).
2. **Gamayunova, O.S. & Slobodyanyuk, T.R.** (2022) Recycling of construction waste, *Vysokie tekhnologii v stroitel'nom komplekse*, (1), pp. 18-26 (in Russian).

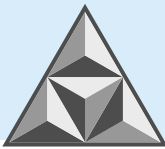


3. **Oleynik, S.P.** (2016) Construction waste during the reconstruction of buildings and structures, *Internet-zhurnal «Otkhody i resursy»*, 3(2). DOI: 10.15862/03RRO116 [online]. Available at: <http://resources.today/issues/vol3-no2.html> (in Russian).
4. **Lunev, G.G. & Prokhotskiy, Yu.M.** (2020) Recycling of secondary construction resources. Problems and prospects of the industry on the example of Moscow, *Vserossiiskiy ekonomicheskoy zhurnal EKO*, (4), pp. 166-192 (in Russian). DOI: 10.30680/ECO.
5. **Gukov, S.U.** (2018) Construction waste during the reconstruction of buildings and structures, *Proektirovanie i stroitel'stvo: sbornik nauchnykh trudov vtoroy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov, magistrrov i bakalavrov. (Kursk, 04-05 iyunya 2018 goda)*. Kursk: Yugo-zapadny gosudarstvennyy universitet, pp. 61-63 (in Russian).
6. **Murtazaev, S-A.U., Khadisov, V.H. & Khadzhiev, M.R.** (2011) The use of industrial waste and ceramic brick scrap for the preparation of lightweight concrete, *Trudy groznenskogo gosudarstvennogo neftyanogo tekhnicheskogo universiteta im. akademika M.D. Millionshchikova*, (11), pp. 157-162 (in Russian).
7. **Khadzhiev, M.R.** (2014) Concrete composites on aggregates from ceramic brick scrap, *Evraziiskiy soyuz uchenykh*, (5), pp. 37-40 DOI: 10.31618/ESU.2413-9335 (in Russian).
8. **Khadzhiev, M.R.** (2015) *Ceramic concrete based on secondary aggregates from brick scrap for small-piece wall products*. PhD. Groznyj (in Russian).
9. **Khadzhiev, M.R. & Khadisov, V.H.** (2014) Small-piece wall products made of lightweight ceramic concrete for enclosing structures of buildings and structures, *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, (4), pp. 137-142 (in Russian).
10. **Batdalov, M.M. & Khadisov, V.H.** (2011) The use of brick scrap for the production of building composites, *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, (23), pp. 102-105 (in Russian).
11. **Murtazaev, S-A.U., Sajdumov, M.S., Khadzhiev, M.R. & Khadisov, V.H.** (2014) Cellular ceramic concrete based on aggregates from secondary raw materials, *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*, 3 (34), pp. 74-81 (in Russian).
12. **Sadek, D.M.** (2012) Phisico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates, *Journal of advanced research*, (3), pp. 253-260.
13. **Debieb, F. & Kenai, S.** (2008) The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete, *Construction and building materials*, 22(5), pp. 886-893. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013.
14. **Romanenko, I.I., Petrovnina, I.N., Elichev, K.A. & Romanenko, M.I.** (2022) Awakening of hydraulic activity of fillers and aggregates from clay bricks scrap, *Inzhenerniy vestnik Dona*, 11(95), pp. 563-572 (in Russian).
15. **Aliabdo, A.A. Abd-Elmoati, M. & Hassan, H.H.** (2014) The use of crushed clay bricks in the concrete industry, *Alexandria Engineering Journal*, 53(1), pp. 151-168. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003.
16. **Ge, Z., Gao, Z., Sun, R. & Zheng, L.** (2012) Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method, *Construction and building materials*, (31), pp. 289-293. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002.
17. **Pulyaev, S.M.** (2005) *Concrete on aggregates from concrete scrap for precast concrete products*. PhD. Moscow (in Russian).
18. **Uspanova, A.S., Islamov, A.A., Kurazov, M.S., Inorkaev, I.S-A. & Vahazhi, H-M.M.** (2017) Construction plaster mixtures based on a fine fraction of the product of crushing of brick scrap and production waste of bricks, *Fundamental'nye osnovy stroitel'nogo materialovedeniya. Sbornik dokladov mezhdunarodnogo onlajn kongressa. (Belgorod, 06-11 oktyabrya 2017 goda)*. Belgorod: Belgorodskiy gosudarstvennyy tekhnologicheskoy universitet im. V.G. Shuhova, pp. 906-913 (in Russian).
19. **Silva, J., Brito de J. & Veiga, R.** (2009) Incorporation of fine ceramics in mortars, *Construction and Building Materials*, (23), pp. 556-564. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014.
20. **Fomenko, A.I., Gryzlov, V.S. & Kapyushina, A.G.** (2016) Ceramic brick waste as an effective component of building composites, *Sovremennyye naukoemkie tekhnologii*, (2), pp. 260-264 (in Russian).
21. **Murtazaev, S-A.U. Ismailova, Z.Kh., Khasiev, A.A. & Nakhaev, M.R.** (2012) Disposal of screening of concrete scrap, *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*, (8), pp. 26-28 (in Russian).
22. **Efimenko, A.Z.** (2014) Concrete waste – raw materials for the production of efficient building materials, *Materialy. Tekhnologii betonov*, (2), pp. 17-21 (in Russian).





23. **Magsumov, A.N., Sharipyanov, N.M. & Krasnikova, N.M.** (2018) The use of concrete scrap as a coarse aggregate for the production of concrete mixtures, *Simvol nauki: mezhdunarodniy nauchniy zhurnal*, (6), pp. 29-33 (in Russian).
24. **Chursin, S.I. & Pozdnyakov, A.V.** (2018) Heavy concretes using modified fine aggregate from concrete scrap, *Vestnik Donbasskoy nacionalnoy akademii stroitel'stva i arkhitektury*, 4(2), pp. 209-215 (in Russian).
25. **Akhmed, A.A., Fedyuk, R.S., Liseyev, Yu.L., Timokhina, R.A. & Murali, G.** (2020) Use of Iraq concrete scrap as filler and aggregate of heavyweight and lightweight concrete, *Stroitel'nye materialy i izdeliya*, (3), pp. 28-39 (in Russian).
26. **Bumanis, G., Zorica, J., Korjakins, A. & Bajare, D.** (2022) Processing of Gypsum Construction and Demolition Waste and Properties of Secondary Gypsum Binder, *Recycling*, 7(30). DOI: 10.3390/recycling7030030.
27. **Hansen, S. & Perdam, S.** (2019) Application of Recycled Gypsum Wallboards in Cement Mortar, *Conference: 7th International Conference on Engineering Mechanics and Materials*. CSCE Annual Conference At: Laval, QC, Canada.
28. **Kislitsyna, S.N. & Shitova, I.U.** (2016) *Methods of processing waste from the woodworking industry*. Penza: PGUAS (in Russian).
29. **GOST 19222-2019.** *Arbolit and its products. Specifications* (in Russian).
30. **GOST 26816-2016.** *Cement-chipboard plates. Technical conditions* (in Russian).
31. **Min'ko, N.I. & Kalatozi, V.V.** (2018) The use of cullet in the technology of materials for construction purposes, *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova*, (1), pp. 82-88 (in Russian).
32. **Melkonyan, R.G. & Vlasova, S.G.** (2013) *Environmental and economic problems of using cullet in glass production*. Ekaterinburg: Izdatel'stvo Ural'skogo universiteta (in Russian).
33. **Bessmertnyj, V.S., Zhernovoy, F.E., Dorokhova, E.S., Izotova, I.A. & Gokova, E.N.** (2016) An effective material for green construction based on secondary glass scrap, *Intellektual'nye stroitel'nye kompozity dlya zelenogo stroitel'stva*, pp. 111-116 (in Russian).
34. *The use of cullet as a concrete aggregate* [online]. Available at: [https://www.newchemistry.ru/letter.php?n\\_id=6702&cat\\_id=24&page\\_id=2](https://www.newchemistry.ru/letter.php?n_id=6702&cat_id=24&page_id=2) (in Russian).
35. **Belokopytova, A.S.** (2006) *Development of cullet recycling processes by creating composite materials*. PhD. Moscow (in Russian).
36. **Grigorova, Y.A.** (2014) Secondary use of cullet in the production of thermal insulation materials, *Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii*, (8) [online]. Available at: <https://web.snauka.ru/issues/2014/08/37026> (in Russian).
37. **Bagautdinov, A.A.** (2004) Methods for improving the physical and mechanical properties of materials and products based on asbestos cement waste, *Vestnik UlGTU*, (2), pp. 76-78 (in Russian).
38. **Bagautdinov, A.A.** (1994). *Wall construction products based on asbestos cement production waste*. PhD. Moscow (in Russian).
39. Rosprirodnadzor. *Federal Classification Catalog of Waste* [online]. Available at: <https://rpn.gov.ru/fkko/45592111604/> (accessed 13.07.2023) (in Russian).
40. **Kuligina, T.N.** (2007) *Development of building materials based on asbestos cement production waste*. PhD. Ivanovo (in Russian).
41. **Vasileva, L.V. & Gubskaya, A.G.** (2012) The possibility of using asbestos cement waste for the production of dry building mixes, *Sukhie stroitel'nye smesi*, (2), pp. 15-16 (in Russian).
42. **Shchukin, E.A. & Shchukina, E.G.** (2021) Construction materials using asbestos cement waste, *Aktualnye voprosy stroitel'nogo materialovedeniya. (Ulan-Ude, 21-24 iyulya 2021 goda)*. Ulan-Ude: Buryatskiy gosudarstvenniy universitet im. Dorzhi Banzarova, pp. 124-128 (in Russian).
43. **Yartsev, V.P. & Repina, E.I.** (2018) The influence of aggregates from asbestos-cement waste on the physical and mechanical properties and durability of cement-sand concrete, *Vestnik BGTU im. V.G. SHuhova*, (10), pp. 16-22 (in Russian).
44. **Kalashnikov, P.I.** (2017) Asphalt concrete using waste asbestos cement products, *Nauchnye issledovaniya*, 6(2), pp. 20-24 (in Russian).
45. *Study of the reactivity of asbestos, selection of mixtures* [online]. Available at: [https://ozlib.com/1094836/tehnika/izuchenie\\_reaktsionnoy\\_sposobnosti\\_asbestov](https://ozlib.com/1094836/tehnika/izuchenie_reaktsionnoy_sposobnosti_asbestov) (in Russian).

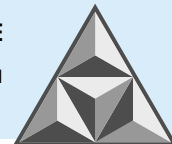


46. **Lsyannikov, A.V., Tretyakova, E.A. & Lsyannikova, N.N.** (2017) Recycled plastic in road construction, *Izvestiya TulGU. Tekhnicheskie nauki*, (7), pp. 105-115 (in Russian).
47. **Salim, K., Houssam, A., Belaid, A. & Brahim, H.** (2019) Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass, *ICSI 2019 The 3rd International Conference on Structural Integrity*, pp. 170-176. DOI: 10.1016/j.prostr.2019.08.023.
48. **Kou, S.C., Lee, G., Poon, C.S. & Lai, W.L.** (2009) Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes, *Waste management*, (29), pp. 621-629. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.014.
49. **Sikov, N.E., Seryogin, A.I. & Yurkin, U.V.** (2022) The use of plastic waste as an aggregate in cement mortar and concrete preparation, *Inzhenernyj vestnik Dona*, (8) [online]. Available at: <https://ivdon.ru/ru/magazine/arhive/n8y2022/7845> (in Russian).

*Received 20.07.2023*

*Approved after reviewing 20.09.2023*

*Accepted 22.09.2023*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.7./8:691.168

# Обоснование закона распределения и статистических характеристик длины нитей фибры для армирования асфальтобетонной смеси

**С.Ю. Андронов<sup>1</sup>, В.В. Столяров<sup>1</sup>, Ш.Н. Валиев<sup>2</sup>, А.В. Кочетков<sup>3</sup>**

**Сергей Юрьевич Андронов, Виктор Васильевич Столяров**

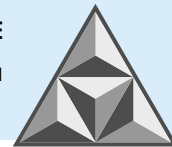
<sup>1</sup>Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., Саратов,  
Российская Федерация  
*atomic08@yandex.ru, stolyarov\_v\_v@mail.ru*

**Шерали Назаралиевич Валиев**

<sup>2</sup>Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва,  
Российская Федерация  
*vshn2014@gmail.com*

**Андрей Викторович Кочетков**

<sup>3</sup>Российский дорожный научно-исследовательский институт (РОСДОРНИИ), Москва, Российская Федерация,  
*soni.81@mail.ru*



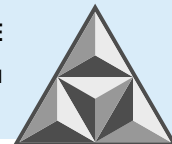
*Распределение длин нитей полиакрилонитрильного ровинга описано в формате теории риска нормальным законом. Оптимальная длина фибры определяется экспериментально и зависит от вида волокнистого материала, его дозировки в процентах по массе асфальтобетонной смеси и плотности волокна. Для обоснования закона распределения длины нитей фибры использованы статистические методы определения среднеквадратического отклонения длины нарезанных нитей на специальном режущем оборудовании. Произведена оценка риска и надежности армирования асфальтобетонной смеси фиброй полиакрилонитрильного волокна. Установлено, что плотность нитей полиакрилонитрильного волокна влияет на разброс закона распределения длин нитей следующим образом: чем больше плотность, тем меньше среднеквадратическое отклонение длин нарезанной фибры; чем плотнее нити полиакрилонитрильного фиброволокна, тем меньше вариация разброса длин нарезанных нитей.*

**Ключевые слова:** автомобильная дорога, риск, фибра, армирование смеси, закон распределения, длина нитей, асфальтобетон

**Для цитирования:**

Андронов С.Ю., Столяров В.В., Валиев Ш.Н., Кочетков А.В. Обоснование закона распределения и статистических характеристик длины нитей фибры для армирования асфальтобетонной смеси // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 55-65.  
URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)





SCIENTIFIC ARTICLE

# Substantiation of the distribution law and statistical characteristics of the fiber filaments lengths for reinforcing asphalt concrete mixture

**S.Yu. Andronov<sup>1</sup>, V.V. Stolyarov<sup>1</sup>, Sh.N. Valiev<sup>2</sup>, A.V. Kochetkov<sup>3</sup>**

**Sergey Yu. Andronov, Viktor V. Stolyarov**

<sup>1</sup>Saratov State Technical University named after Yuri Gagarin, Saratov, Russia

*atomic08@yandex.ru, stolyarov\_v\_v@mail.ru*

**Sherali N. Valiev**

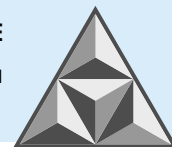
<sup>2</sup>Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia

*vshn2014@gmail.com*

**Andrey V. Kochetkov**

<sup>3</sup>Russian Road Scientific-Research Institute (ROSDORNII), Moscow, Russia

*soni.81@mail.ru*

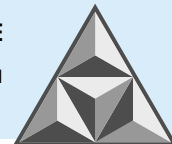


*The paper describes the distribution of polyacrylonitrile roving filaments lengths in terms of risk theory by the normal distribution law. We identify the optimal fiber length experimentally. However, it depends on the type of fibrous material, its optimal dosage as a percentage by weight of asphalt concrete mixture, and fiber density. Also research dwells on the statistical methods of identifying the standard deviation of the cut length of fibre filaments on special cutting equipment which provides the substantiation of the law of distribution of fibre filament lengths. The results ensure the risk assessments and reliability of reinforcement of asphalt concrete mixture with polyacrylonitrile fiber. Moreover, according to the research, density of polyacrylonitrile fiber filaments affects the spread of the distribution law of the lengths of the filaments as follows: the higher the density, the lower the standard deviation of the cut fibre lengths; the denser the polyacrylonitrile fibre filaments, the lower the variability of the cut filament lengths.*

**Key words:** highway, risk, fiber, reinforcement of the mixture, distribution law, thread length, asphalt concrete

**For citation:**

Andronov, S.Yu., Stolyarov, V.V., Valiev, S.N. & Kochetkov, A.V. (2023) Substantiation of the distribution law and statistical characteristics of the fiber filaments length for reinforcing asphalt concrete mixture, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 55-65 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

Как показали результаты лабораторных испытаний при нарезке волокон фибры, даже при тщательной настройке режущего оборудования невозможно обеспечить постоянную длину нитей. Нарезаемое волокно поступает из жгута (ровинга), скрученного в нескольких плоскостях. В связи с этим нарезки волокна остаются изогнутыми, а искусственно выпрямленные образцы имеют разброс по длине.

В качестве нормативного документа, разработанного с участием авторов данной статьи, приняты Методические рекомендации по технологии армирования асфальтобетонных покрытий добавками базальтовых волокон (фиброй) при строительстве и ремонте автомобильных дорог (распоряжение Росавтодора от 11.01.2002 № 12-р).

Краткий обзор по теме исследований дан в [1-8].

Публикации в зарубежных наукометрических базах данных представлены в [9-15].

Цель работы – установить влияние длины нитей на эффективность армирования асфальтобетонной смеси. Для реализации необходимо выполнить статистический анализ длин нарезки фибры, вводимой в асфальтобетонную смесь, и установить закон распределения, по которому оценивается точность нарезки, с учетом оценки риска скручивания нитей в узлы (ведет к потере армирования асфальтобетонной смеси) и риска нарезки мелких нитей (возможно измельчение до порошка, при этом асфальтобетон не будет армирован).

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Допустимый разброс длин нитей, как и среднее значение, близкое к оптимальному для армирования асфальтобетона, определяли на основе оценок риска и допуска последнего в процессе нарезки и перемешивания (армирования) смеси.

Длина фибры определялась экспериментально; таковая зависит от вида волокнистого материала, его дозировки в процентах от массы асфальтобетонной смеси, плотности волокна.

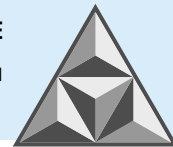
Для обоснования закона распределения использованы статистические методы определения средних значений и среднеквадратического отклонения длины нарезанных нитей на специальном режущем оборудовании.

Для анализа брали полиакрилонитрильное волокно в нарезанных ровингах от ООО Холдинговая компания «Композит». При контроле нарезки фибры из полиакрилонитрильного волокна стремились получить среднюю длину 12 мм, для которой физико-механические свойства армированного асфальтобетона соответствуют требуемым.

В соответствии с этим разделом рассмотрены нити при нормированных значениях плотности внесистемной единицей измерения текс.

*Основные статистические параметры и методы их определения на примере фибры полиакрилонитрильного волокна плотностью 0.56 текс*

Нарезанную фибру полиакрилонитрильного волокна ожидаемой (номинальной) длиной 12 мм распушали и выполняли замер штангенциркулем длины выпрямленных отрезков нитей. Суммарное количество нарезанных нитей, подлежащих статистической обработке в одном массиве, при обосновании приемлемого закона распределения, колебалось от 60 до 90 штук, что отвечало требуемому числу нитей в выборках, определяемому по формуле:



$$n = \frac{\sigma_{\ell}^2 \cdot t^2}{\Delta^2} \quad (1)$$

где  $\sigma_{\ell}$  – среднее квадратичное отклонение длин нарезанных нитей в выборке, мм;

$t$  – коэффициент значимости; при доверительной вероятности 95%,  $t = 1.96 \approx 2$ ;

$\Delta$  – желаемая (ожидаемая) точность средней величины параметра.

Примеры длин нарезанных нитей (1/2 полной выборки) даны в табл. 1.

**Таблица 1.** Примеры длин ( $\ell_i$ ) нарезанных нитей полиакрилонитрильного волокна плотностью 0.56 текс (с 1 по 28 нарезку)

**Table 1.** Examples of lengths ( $\ell_i$ ) of cut filaments of polyacrylonitrile fibre with a density of 0.56 tex (1 to 28 cuts)

Номер измеренной нити	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Длина, мм	11.6	12.4	11.8	12.3	10.4	12.5	11.5	10.8	12.6	12.2	12.7	9.5	12.1	11.5
Номер измеренной нити	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
Длина, мм	8.7	11.1	12.5	11.6	14.8	12.8	11.5	12.0	11.4	11.3	13.2	13.3	12.8	10.1

Статистическая обработка длин кусочков нитей фибры в результате нарезки приведена в табл. 2. При применении мультипликативного метода и метода суммирования замеренные значения длин нитей распределяют по разрядам (см. табл. 2) в графе 3 «абсолютная частота». Вычисление данных в графе 4 основывается на значениях в графе 3. Первое значение переносится из графы 3 в графу 4, затем к нему прибавляется второе значение из графы 3. Суммирование значений продолжают до последнего числа в графе 3. Контроль вычислений в графе 4 заключается в равенстве последнего числа в этой графе и суммарного количества измеренных (вычисленных) величин  $n$ . Данные в графе 5 вычисляют так же, как в графе 4.

**Таблица 2.** Пример статистической обработки длин нарезанных кусочков нитей полиакрилонитрильного волокна плотностью 0.56 текс

**Table 2.** Example of statistical processing of cut lengths of polyacrylonitrile fibre filament pieces with density 0.56 tex

Разряды интервалов	Середина разряда $U_m$	Абсолютная частота, $h_m$	Частичная сумма, $S_m$	Накопленная частота, $T$	Середина условного интервала, $l_m$	Произведения		
						$l_m \cdot h_m$	$l_{m2}$	$l_{m2} \cdot h_m$
8÷9	8.5	1	1	1	-4	-4	16	16
9÷10	9.5	3	4	5	-3	-9	9	27
10÷11	10.5	10	14	19	-2	-20	4	40
11÷12	11.5	30	44	63	-1	-30	1	30
12÷13	12.5 = XA	33	77	140	0	0	0	0
13÷14	13.5	8	85	225	1	8	1	8
14÷15	14.5	2	87	312	2	4	4	8
15÷16	15.5 = UK	1	88	400	3	3	9	9
$d = 1$		$n = 88$	$M = 400$	$\Sigma T = 1165$		$B = -48$		$A = 138$

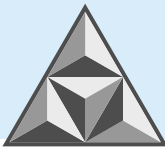
Контроль вычислений в графе 5 осуществляется подобно предыдущему (см. табл. 2). Расчет среднего значения и среднее квадратичное отклонение исследуемого параметра показан ниже.

Обработка данных табл. 2 выполнена с использованием известных приемов математической статистики:

Метод суммирования:

– среднее значение:

$$\ell_{\text{cp}} = U_K - d \left( \frac{M}{n} - 1 \right) = 15.5 - 1 \cdot \left( \frac{400}{88} - 1 \right) = 11.95 \text{ мм};$$



– дисперсия:

$$\sigma_{\ell}^2 = \frac{d^2}{n-1} (2 \sum T - M - \frac{M^2}{n}) = \frac{1^2}{88-1} (2 \cdot 1165 - 400 - \frac{400^2}{88}) = 1.287 \approx 1.285 \text{ мм}^2;$$

– среднее квадратическое отклонение:  $b_{\ell} = 1.134$  мм.

Мультипликативный метод:

– среднее значение:

$$\ell_{\text{cp}} = X_A + \frac{d}{n} B = 12.5 + \frac{1}{88} \cdot (-48) = 11.95 \text{ мм};$$

– дисперсия:

$$\sigma_{\ell}^2 = \frac{d^2}{n-1} (A - \frac{B^2}{n}) = \frac{1^2}{88-1} (138 - \frac{48^2}{88}) = 1.285 \text{ мм}^2;$$

– среднее квадратическое отклонение:  $b_{\ell} = 1.134$  мм.

Сравнение эмпирического распределения с теоретическим законом распределения (по критерию Пирсона) показано в табл. 3.

**Таблица 3.** Сравнение фактического распределения длин нарезанных кусочков нитей фибры с законом нормального распределения

**Table 3.** Comparison of the actual distribution of cut lengths of fibre filament pieces with the normal distribution law

Разряды интервалов	Абсолютная частота, $h_m$	Вероятность попадания измерений в разряд, $P_i$	Теоретическое количество измерений в разряде ( $n_i = P_i \cdot n$ )	$\chi^2 = \frac{(h_m - n_i)^2}{n_i}$
8÷10	4	0.0361	3.1768	0.2133
10÷11	10	0.1506	13.2528	0.7984
11÷12	30	0.3336	29.3568	0.0141
12÷13	33	0.3051	26.4080	1.6455
13÷14	8	0.1410	12.4080	1.5660
14÷16	3	0.0336	2.9568	0.0006
$d = 1$	$n = 88$	$\sum P_i = 1,0000$		$\sum \chi^2 = 4,2379$

\*Примечание. Первый и последний разряды имеют интервал  $d = 2$ , так как менее трех попаданий в графу  $h_m$  в данной таблице не допускается (это приводит к увеличению степеней свободы, в результате чего делается ошибочный вывод о сходимости эмпирического и теоретического распределений, когда сходимость отсутствует).

Вероятность  $P_i$  в табл. 3 вычисляли по формуле Симпсона:

$$P_i = \int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{6 \cdot m} [(y_0 + y_{2m}) + 2(y_2 + y_4 + \dots + y_{2m-2}) + 4(y_1 + y_3 + \dots + y_{2m-1})]. \quad (2)$$

В формуле (2) применяли параметр  $m = 2$ .

Тогда

$$P_i = \frac{b-a}{12} [(y_0 + y_4) + 2 \cdot y_2 + 4(y_1 + y_3)], \quad (3)$$

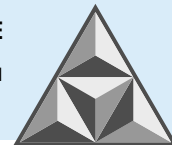
где  $b$  и  $a$  – правая и левая границы длины нитей фибры в разрядах интервалов (см. табл. 3);

$y_0, y_1, \dots, y_4$  – ординаты точек, определяемые по формуле:

$$y = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(\ell_i - \ell_{\text{cp}})^2}{2 \cdot \sigma^2}} \Big|_{ab}. \quad (4)$$

Например, при границах нитей от 11 до 12 мм имеем:  $a = 11$ ,  $b = 12$  и при четырех интервалах имеем пять значений  $\ell_i$  (11.00; 11.25; 11.50; 11.75; 12.00).

Применяя формулы (4) и (3), с учетом известных параметров распределения  $\ell_{\text{cp}}$  и  $b_{\ell}$  определили  $P_i = 0.3336$  (см. табл. 3).



При сравнении с нормальным законом распределения также применяли формулу вида

$$P_i = \Phi\left(\frac{\ell_{i+1} - \ell_{cp}}{\sigma_\ell}\right) - \Phi\left(\frac{\ell_i - \ell_{cp}}{\sigma_\ell}\right), \quad (5)$$

где  $\Phi(u)$  – функция Лапласа;

$\ell_i$  и  $\ell_{i+1}$  – левая и правая границы длин нитей в разрядах (см. табл. 3);

$\ell_{cp}$  и  $\sigma_\ell$  – средняя длина нитей фибры и среднеквадратичное отклонение длин нитей, установленные по методике, как это представлено в табл. 2, или с использованием других формул математической статистики.

На рис. 1 показано сравнение гистограммы длин нитей фибры и плотности нормального их распределения.

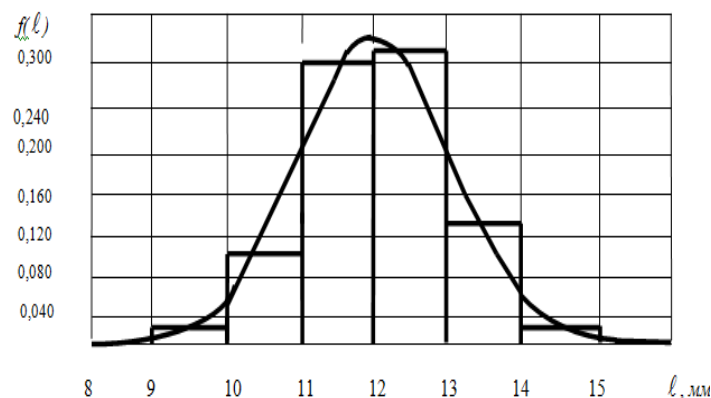


Рис. 1. Гистограмма длины волокон нарезанной фибры и плотность нормального распределения

Figure 1. Histogram of cut fibre length and density of normal distribution

Для теоретического распределения число степеней свободы определяли:

$$\nu = k - r, \quad (6)$$

где  $k$  – число разрядов (в табл. 3  $k = 6$ );

$r$  – число наложенных связей (для нормального закона распределения  $r = 3$ ).

Получаем  $\nu = 6 - 3 = 3$ . Из таблиц  $\chi^2$ -распределения при  $\chi^2 = 4.2379$  и  $\nu = 3$  выписываем вероятность  $P = 0.25$ , по которой устанавливаем соответствие теоретического закона распределения результатам измерений (гистограмме):

- отличное соответствие при  $P > 0.5$ ;
- хорошее соответствие при  $P = 0.3 \div 0.5$ ;
- удовлетворительное соответствие при  $P = 0.1 \div 0.3$ ;
- неудовлетворительное соответствие при  $P < 0.1$ .

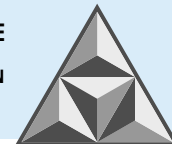
Так как для приведенного примера  $P = 0.25$ , то соответствие гистограммы плотности нормального распределения следует считать удовлетворительным.

Для сравнения теоретического и эмпирического распределения использовали также критерий Романовского:

$$R = \frac{\chi^2 - \nu}{\sqrt{2\nu}}. \quad (7)$$

Если критерий Романовского меньше 3, гипотеза о соответствии фактической кривой теоретическому закону распределения принимается.

В противном случае (при  $R \geq 3$ ) делают вывод, что выбранный теоретический закон распределения не соответствует результатам измерения.



Согласно этому критерию,

$$R = \frac{4,2379 - 3}{\sqrt{2 \cdot 3}} = 2.4495.$$

Так как  $2.4495 < 3$ , нормальное распределение согласуется с результатами экспериментальных данных (с гистограммой).

В табл. 4 дано сравнение статистических данных средних (оптимальных) значений и среднеквадратических отклонений длин нитей полиакрилонитрильного волокна, которые необходимы для оценки риска и надежности дисперсного армирования асфальтобетонной смеси с учетом различной плотности данного волокна.

**Таблица 4.** Сравнение полученных статистических данных средних (оптимальных) значений и среднеквадратичных отклонений длин нитей полиакрилонитрильного волокна

**Table 4.** Comparison of statistical data obtained of average (optimum) values and standard deviations of polyacrylonitrile fibre filament lengths

Плотность, текс	0.17	0.33	0.56	0.68
Средняя длина нитей, мм	11.84	12.19	11.95	12.06
Среднеквадратическое отклонение длин нитей, мм	1.583	1.470	1.134	1.119

Общее решение, учитывающее возникновение при четырех значениях плотностей (0.17, 0.33, 0.56 и 0.68 текс) одного оптимального значения длин нитей (12 мм), устанавливает предельно допустимое среднеквадратическое отклонение оптимальных длин нитей полиакрилонитрильного волокна  $\sigma_{\ell}^{opt} = 2.496$  мм при  $c_V^{opt} = 0.208$ .

Таким образом, параметры  $\ell_{opt}$ ,  $\sigma_{\ell}^{opt}$  и  $c_V^{opt}$  определены по всем четырем выборкам; результаты представлены в табл. 4.

## ВЫВОДЫ

Распределение длин нитей полиакрилонитрильного волокна плотностью нитей 0.56 текс описано в теории риска нормальным законом.

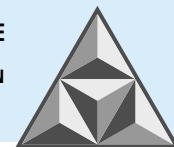
Установлено, что для оценки риска и надежности армирования асфальтобетонной смеси фиброй полиакрилонитрильного волокна (при плотности 0.56 текс) следует применять параметры  $\ell_{CP} = 11.95$  мм и  $\sigma_{\ell} = 1.134$  мм (для других плотностей результаты исследований показаны в табл. 4).

На основании проведенных исследований выявлено, что плотность нитей полиакрилонитрильного волокна влияет на разброс закона распределения длин нитей следующим образом: чем выше плотность (в текс), тем меньше среднеквадратическое отклонение длин нарезанной фибры; чем плотнее нити полиакрилонитрильного фиброволокна, тем меньше вариация разброса длин нарезанных нитей.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Янковский Л.В., Кочетков А.В., Кокодеева Н.Е.** Техническое нормирование макрошероховатости дорожных покрытий автомобильных и лесовозных дорог: монография. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2019. 321 с.
2. **Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кочетков А.В.** Ремонт автомобильной дороги с применением фибросодержащих асфальтобетонных смесей с диспергированным вяжущим // *Строительные материалы*. 2020. № 4-5. С. 62-67.





3. **Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кочетков А.В.** Технология производства и применения дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей с базальтовой фиброй // *Строительные материалы*. 2020. № 3. С. 70-75.
4. **Андронов С.Ю., Алферов В.И., Кочетков А.В.** Совершенствование методов введения фиброволокон в горячие и холодные асфальтобетонные смеси // *Вестник евразийской науки*. 2020. Т. 12, № 2. С. 2.
5. **Пат. 170486 Российская Федерация, МПК В28С 5/40.** Приставка для обработки фиброволокна перед введением его в дорожно-строительную армируемую смесь / С.Ю. Андронов, А.А. Артеменко, Н.Е. Кокодеева. Опубл. 26.04.2017.
6. **Пат. 171296 Российская Федерация, МПК В28С 5/40.** Узел подготовки фиброволокна для приготовления дорожно-строительной смеси / С.Ю. Андронов, А.А. Артеменко, С.В. Арзамасцев. Опубл. 29.05.2017.
7. **Кочетков А.В., Андронов С.Ю., Иванов А.Ф., Кокодеева Н.Е., Козин А.С., Пачина О.В.** Битумная суспензия: монография. Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2019. 192 с.
8. **Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ 2020612667 Российская Федерация.** TST-РИСК / Н.Е. Акулова, Н.В. Шеголева, В.В. Столяров. Опубл. 28.02.2020.
9. **Kokodeeva N., Vasiliev Y., Kotlyarsky E., Kochetkov A., Andronov S.** Impact study of basalt and polyacrylonitrile fibercon performance characteristics of asphalt concrete // *Advances in Intelligent Systems and Computing*. 2021. Vol. 1258. P. 473-485.
10. **Di Yu, Wensheng Wang, Yongchun Cheng, Yafeng Gong.** Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis // *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*. 2016. 3(5). DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. **Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan, Chunfeng Zhu** Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber-Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // *Materials (Basel)*. 2018. 11(11). P. 2148. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. **Clara Celauro, Filippo Praticò.** Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses // *Construction and Building Materials*. 2018. 170. P. 245-253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058.
13. **Yafeng Gong, Haipeng Bi, Chunyu Liang, Shurong Wang.** Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology // *Applied Sciences*. 2018. 8(11). P. 2191. DOI: 10.3390/app8112191.
14. **Xiao Qin, Aiqin Shen, Yinchuan Guo, Zhennan Li.** Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers // *Construction and Building Materials*. 2018. 159. P. 508-516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
15. **Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan.** Pavement Performance Investigation of Nano-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // *Applied Sciences*. 2018. 8(12). P. 2581. DOI: 10.3390/app8122581.

Поступила в редакцию 14.07.2023

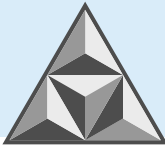
Одобрена после рецензирования 19.09.2023

Принята к опубликованию 22.09.2023

## REFERENCES

1. **Yankovskiy, L.V., Kochetkov, A.V. & Kokodeeva, N.E.** (2019). *Technical regulation of macro-roughness of road surfaces of automobile and logging roads*. Perm': Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta (in Russian).
2. **Andronov, S.Yu., Ivanov, A.F. & Kochetkov, A.V.** (2020) Highway repair with the use of fluorinated asphalt concrete mixtures with dispersed binde, *Stroitel'nye materialy*, (4-5), pp. 62-67 (in Russian).
3. **Andronov, S.Yu., Ivanov, A.F. & Kochetkov, A.V.** (2020) Technology of production and application of dispersed-reinforced asphalt concrete mixtures with basalt fiber, *Stroitel'nye materialy*, (3), pp. 70-75 (in Russian).
4. **Andronov, S.Yu., Alferov, V.I. & Kochetkov A.V.** (2020) Improving the methods of introducing fiber fibers into hot and cold asphalt concrete mixtures, *Vestnik evrazijskoy nauki*, 12(2), pp. 2 (in Russian).
5. **Andronov S.Yu., Artemenko A.A. & Kokodeeva, N.E.** (2017) *An attachment for processing fiber before introducing it into a road-building reinforced mixture*. RU 170486 (in Russian).



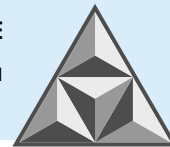


6. **Andronov, S.Yu., Artemenko, A.A. & Arzamastsev, S.V.** (2017) *Fiber-fiber preparation unit for the preparation of road-building mix.* RU 171296 (in Russian).
7. **Kochetkov, A.V., Andronov, S.Yu., Ivanov, A.F., Kokodeeva, N.E., Kozin, A.S. & Pachina, O.V.** (2019) *Bitumen suspension.* Saratov: Sarat. gos. tekhn. un-t (in Russian).
8. **Akulova, N.E., Shchegoleva, N.V. & Stolyarov, V.V.** (2020) *TST-RISK.* RU 2020612667 (in Russian).
9. **Kokodeeva, N., Vasiliev, Y., Kotlyarsky, E., Kochetkov, A. & Andronov, S.** (2021) Impact study of basalt and polyacrylonitrile fibercon performance characteristics of asphalt concrete, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, (1258), pp. 473-485.
10. **Di, Yu, Wensheng, Wang, Yongchun, Cheng & Yafeng, Gong.** (2016) Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis, *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 3(5). DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. **Yongchun, Cheng, Di, Yu, Guojin, Tan & Chunfeng, Zhu** (2018) Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber–Diatomite-Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles, *Materials (Basel)*, 11(11), 2148. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. **Clara, Celauro & Filippo, Praticò** (2018) Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses, *Construction and Building Materials*, 170, pp. 245-253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058.
13. **Yafeng, Gong, Haipeng, Bi, Chunyu, Liang & Shurong Wang** (2018) Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology, *Applied Sciences*, 8(11), 2191. DOI: 10.3390/app8112191.
14. **Xiao, Qin, Aiqin, Shen, Yinchuan & Guo, Zhennan, Li** (2018) Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers, *Construction and Building Materials*, 159, pp. 508-516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
15. **Yafeng, Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan** (2018) Pavement Performance Investigation of Nano-TiO<sub>2</sub>/CaCO<sub>3</sub> and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze–Thaw Cycles, *Applied Sciences*, 8(12), 2581. DOI: 10.3390/app8122581.

Received 14.07.2023

Approved after reviewing 19.09.2023

Accepted 22.09.2023



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.72

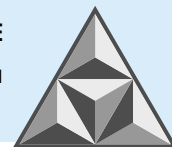
# Обеспечение эксплуатационной надежности при проектировании автомобильных дорог в условиях Сибири и крайнего севера

**А.М. Кулижников**

**Александр Михайлович Кулижников**

Федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт»  
(ФАУ «РОСДОРНИИ»), Москва, Российская Федерация

*kulizhnikov@rosdornii.ru*

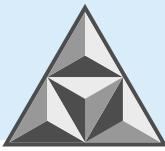


*Сложные природно-климатические, неблагоприятные грунтово-гидрогеологические и криогенные условия Сибири и Крайнего Севера требуют особого подхода к проектированию дорожных конструкций. С учетом прогнозирования изменений климата, интенсивности и состава транспортного потока, возникает ряд неопределенностей на стадии проектирования, которые могут привести к неучтенной картине в процессе эксплуатации автомобильной дороги. Рассмотрены результаты прогнозирования и изменения эксплуатационных характеристик, а также георадиолокационных обследований на участках эксплуатируемых автомобильных дорог в жизненном цикле, сформулированы основные положения обеспечения эксплуатационной надежности при проектировании автомобильных дорог в Сибири во II и III дорожно-климатических зонах. Также для условий Крайнего Севера даны рекомендации по обеспечению эксплуатационной надежности с постановочной позицией, требующей проведения дополнительных углубленных мониторинговых обследований.*

**Ключевые слова:** надежность, эксплуатация, проектирование, автомобильные дороги, криогенные условия, прочность

**Для цитирования:**

Кулижников А.М. Обеспечение эксплуатационной надежности при проектировании автомобильных дорог в условиях Сибири и Крайнего Севера // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 66-83. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

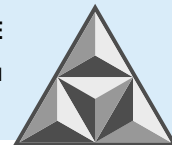
# Ensuring operational reliability in the design of highways in Siberia and the Far North

**A.M. Kulizhnikov**

**Aleksandr M. Kulizhnikov**

Federal Autonomous Institution «Russian road research institute», Moscow, Russia

*kulizhnikov@rosdornii.ru*

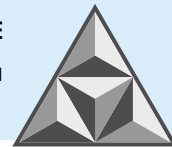


*Complex natural and climatic, unfavorable soil-hydrogeological and cryogenic conditions of Siberia and the Far North require a special approach to the design of road structures. Taking into account the prediction of climate changes, the intensity and composition of traffic flow, a number of uncertainties arise at the design stage, which can lead to an unrealistic unaccounted picture during the operation of the highway. The article presents the criteria of operational reliability, the results of forecasting and changes in the operational characteristics of highways in the life cycle. It also provides the results of georadar surveys on the sections of operated highways, and concerns with the main provisions of ensuring operational reliability in the design of highways in Siberia in the II and III road-climatic zones. The results of the research give the recommendations for the conditions of the Far North. They are able to ensure operational reliability with a staged position requiring additional in-depth monitoring surveys.*

**Key words:** reliability, operation, design, highways, cryogenic conditions, durability

**For citation:**

Kulizhnikov, A.M. (2023) Ensuring operational reliability in the design of highways in Siberia and the Far North, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 66-83 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

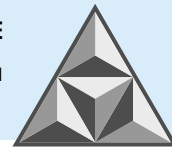
Для решения вопросов обеспечения эксплуатационной надежности при проектировании автомобильных дорог, в первую очередь, необходимо обратить внимание на особенности условий Крайнего Севера. Крайний Север и Сибирь занимают более 60% территорий Российской Федерации, отличающихся экстремальными природно-климатическими условиями, слабо развитой инфраструктурой и сетью транспортных сообщений. На этой территории имеются большие запасы природных ресурсов (в том числе – неосвоенных) и проживает всего 7% населения. Жизнь здесь очень дорогая, затраты на строительство дорог – в два, а на эксплуатацию – в 10 раз выше, чем в центральной части России. Большие затраты в обслуживании автомобильных дорог определяют актуальность оценки эксплуатационной надежности на стадии проектирования.

С учетом длительных периодов эксплуатации (межремонтные сроки службы – 12 лет и сроки службы между капитальными ремонтами – 24 года), указанные особенности требуют достоверной картины при прогнозировании транспортного потока (состав, интенсивность движения) и детального изучения климатических, криогенных, геологических и гидрогеологических условий по длине трассы и в каждом поперечном сечении в полосе отвода.



**Рис. 1.** Продольные трещины, просадки земляного полотна, обусловленные оттаиванием многолетнемерзлых грунтов подстилающего основания; размывы паводковыми водами  
**Fig. 1.** Longitudinal cracks, subsidence of the roadbed caused by thawing of permafrost soils of the underlying foundation; wash due to flood

Так, неоднородность подстилающих грунтов и криогенных условий приводит к продольному растрескиванию и образованию просадок на поверхности покрытия автомобильных дорог (рис. 1), усложнению водоотвода и размывам земляного полотна.



## ПОНЯТИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Эксплуатационная надежность – это способность дорожной конструкции сохранять заданные эксплуатационные характеристики (продольная и поперечная ровность, прочность, шероховатость) в течение расчетного срока службы [1].

Вопросы обеспечения эксплуатационной надежности автомобильных дорог при проектировании во II и III дорожно-климатических зонах ранее рассмотрены в [1]. Большой вклад в их решение внесли российские исследователи А.П. Васильев, В.А. Веренько, В.А. Давыдов, В.Н. Ефименко, С.М. Жданова, И.А. Золотарь, М.С. Коганзон, О.А. Красиков, А.А. Малышев, В.П. Носов, В.В. Пассек, Р.З. Порицкий, Н.А. Пузаков, Н.Ф. Савко, В.А. Семенов, Ю.В. Слабодчиков, А.Я. Тулаев, А.А. Цернант и др. И все же повышению эксплуатационной надежности на стадии проектирования автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах уделяется недостаточное внимание. Не систематизированы многолетние (за последние 30 лет) мониторинговые исследования в условиях Крайнего Севера.

Например, при надежностном подходе прогнозирование влияния интенсивности и состава движения на срок службы дорожной одежды может выполняться в пределах максимально и минимально возможного значения, как и прогнозирование изменения климата (температура воздуха, количество осадков, глубина промерзания и т.д.), положения уровня грунтовых и поверхностных вод. Различным сценариям должны соответствовать индивидуальные значения надежности для дорожной одежды, соответствующие дифференцированным значениям коэффициентов прочности.

Пункт 7.1.2 ГОСТ Р 59120-2021 гласит: «Дорожные одежды автомобильных дорог должны быть запроектированы так, чтобы обеспечивать безотказную работу в течение расчетного межремонтного и расчетного срока службы дорожной одежды со значениями предельного коэффициента разрушения (табл. 1), назначаемого на последний год межремонтного срока в зависимости от капитальности дорожной одежды и категории дороги» [2].

**Таблица 1.** Предельный коэффициент разрушения в зависимости от капитальности дорожной одежды и категории автомобильной дороги [2]

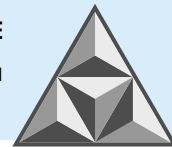
**Table 1.** The maximum coefficient of destruction depending on the capital of the pavement and the category of the highway [2]

Тип дорожной одежды	Категория дороги	Предельный коэффициент разрушения
Капитальный	IA, IB, IB, II	0.10
	III, IV	0.2
Облегченный	III, IV, V	0.3
Переходный	IV, V	0.4

На сегодняшний день особенности условий Крайнего Севера здесь не учтены. Следовательно, за счет дополнительного увеличения затрат на строительство и содержание автомобильных дорог предстоит добиваться установленных требований, в том числе и по предельному коэффициенту разрушения.

Интегральной характеристикой надежности дорожной конструкции является уровень надежности, характеризующий вероятность ее отказа (в зависимости от достоверности прогнозирования воздействий на автомобильную дорогу транспортного потока и учета климатических, криогенных, геологических и гидрогеологических условий) в течение расчетного срока службы, с учетом предельного коэффициента разрушения.





## КРИТЕРИИ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Следует обратить внимание на критерии эксплуатационной надежности автомобильных дорог:

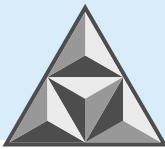
- работоспособность;
- срок службы дорожной одежды. ГОСТ Р 58861-2020 [3];
- степень резервированности по прочности;
- ремонтпригодность.

Особого внимания заслуживают два последних критерия.

Критерий «степень резервированности по прочности во II и III дорожно-климатических зонах» свидетельствует о том, что по мере истираемости и потери прочности покрытия слоев дорожной одежды функции по обеспечению прочности должны брать на себя резервные элементы. Таковыми могут быть, например, слои основания дорожной одежды, прочность которых должна увеличиваться по мере эксплуатации за счет укрепления минеральных слоев основания минеральными вяжущими или активными золошлаковыми смесями. Другой пример – устройство самовосстанавливающихся конструктивных слоев дорожной одежды, например, органоминеральных смесей типа черного щебня. Однако в условиях Крайнего Севера основным звеном обеспечения прочности и надежности дорожных конструкций являются неоднородные подстилающие и пылеватые грунты земляного полотна, стабильность свойств которых в условиях периодического оттаивания многолетнемерзлых грунтов гарантировать крайне сложно. Степень резервированности в условиях Крайнего Севера можно достигаться, в основном, за счет обеспечения устойчивости земляного полотна. Необходимо избегать продольного растрескивания, образования таликовых зон, просадок и размывов подстилающих грунтов и грунтов земляного полотна (при сохранности многолетнемерзлых грунтов, обеспечении поверхностного водоотвода от земляного полотна).

Во II и III дорожно-климатических зонах целесообразно придерживаться концепции «вечных дорог» [4, 5], в которую заложен принцип прочных и надежных оснований, позволяющих в процессе эксплуатации заменять изношенные слои покрытия. Целесообразно внедрять саморегулирование (самодиагностику) на базе нейронных сетей, когда «умная дорога» на основе оснащения комплексом датчиков с использованием экспертных систем обнаруживает и предупреждает о возникновении повреждений, сигнализирует о необходимости ремонтных работ. Такие работы успешно ведутся за рубежом. В Российской Федерации сотрудники Московского автодорожного института используют отдельные элементы самодиагностики автомобильных дорог по условиям колееобразования на основе регистрации транспортного потока и прогнозирования глубины колеи в процессе эксплуатации.

В условиях Крайнего Севера ремонтпригодность достигается за счет внедрения инновационных решений по сохранению многолетнемерзлых грунтов (в частности, дополнительного замораживания в теплый период года), диагностирования температурного режима грунтов основания насыпи и земляного полотна в трехмерном пространстве (по глубине дорожных конструкций и в поперечном направлении) и обеспечения поверхностного водоотвода от земляного полотна.



## ОПЫТ ИЗМЕНЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Рассмотрим, как изменяются эксплуатационные характеристики дорожных конструкций в процессе эксплуатации.

Попытки прогнозирования состояния таких конструкций осуществляют давно. Так, например, согласно результатам изучения участков автомобильной дороги М-4 «Дон» с применением аппарата цепей Маркова [6], предполагается, что на 18-й год службы примерно 22% участка будут находиться в неудовлетворительном состоянии; гарантия срока выдержки до капитального ремонта, с учетом коэффициента предельного разрушения, отсутствует.

Известен прогноз формирования теплового поля под проектной насыпью автомобильной дороги Надым-Салехард [7], выполненный по программе «Qfrost», который показал, что на третий год эксплуатации возможно развитие талика мощностью до 3.5 м в связи с негативным отепляющим влиянием снегонакопления у откосов земляного полотна. На пониженных обводненных участках трассы Северного широтного хода образование новых таликов (мощность может достигать до 15–20 м) также представляется неизбежным; при этом мерзлота отличается неоднородностью по длине дороги и имеет прерывистый характер [7].

Исследования показали, что после оттаивания мерзлый грунт находится преимущественно в текуче-пластичном состоянии, не пригодном для воздействия транспортных нагрузок (показатель текучести почти вдвое больше, чем у талых грунтов). Это приводит к низкой несущей способности грунтов основания и, как следствие, образованию просадок [7].

Стабильность основания насыпи не обеспечивается даже в исходном состоянии; возникают дополнительные нагрузки от насыпи и воздействия транспортного потока. Негативные процессы развития талика усугубляются в процессе строительства. По результатам численного моделирования напряженного состояния земляного полотна на переувлажненных участках автомобильной дороги Надым – Салехард установлены максимальные напряжения сдвига и наибольшие деформации под откосами насыпей.

Если перейти от прогнозирования состояния автомобильных дорог к фактическим результатам [8], средний модуль упругости для трех замеров на одном из километров автомобильной дороги М4 «Дон» в различные годы (с октября 2014 по октябрь 2016 г.) в осенний период снизился с 1447 до 995 МПа. Таким образом, несущая способность снижается почти в 1.5 раза, что очень существенно.

Согласно результатам исследований [9], на автомобильной дороге «Россия» за четыре года эксплуатации продольная ровность покрытия по IRI изменилась с 3.1-4.6 до 4.7-6.3 м·км<sup>-1</sup>, то есть ухудшилась более чем в 1.5 раза. Эти примеры характерны для Европейской части Российской Федерации, где отсутствуют многолетнемерзлые грунты, в то время как в условиях Крайнего Севера такое снижение прочности и ровности будет значительно выше.

Снижению продольной ровности соответствует и потеря прочности дорожной конструкции, что показано [10] сначала по результатам прогнозирования (рис. 2), а затем подтвердилось результатами экспериментальных измерений на участках автомобильных дорог различных технических категорий.

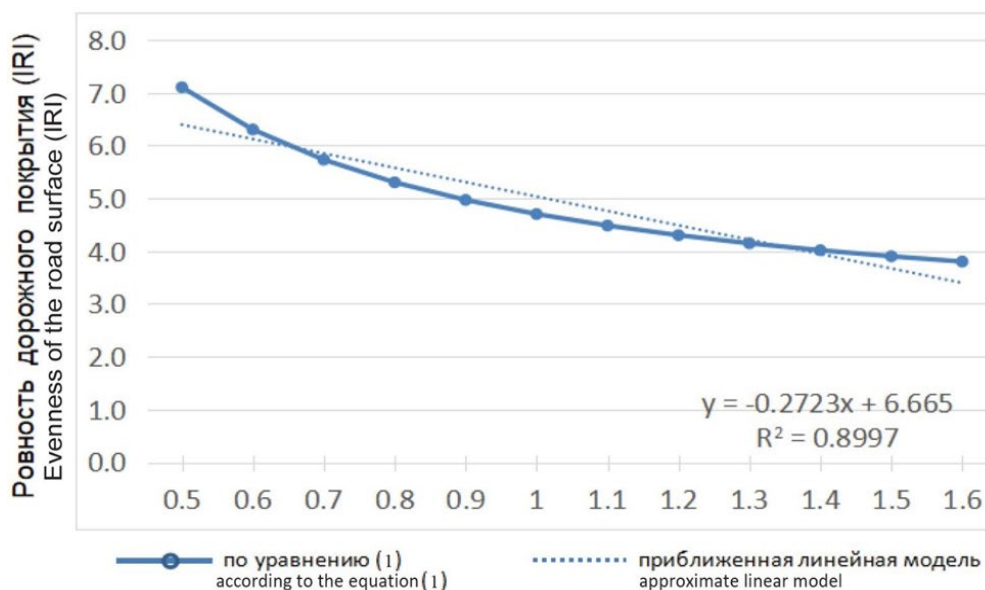
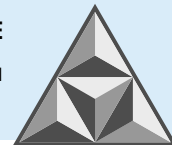


Рис. 2. График зависимости ровности дорожного покрытия от коэффициента прочности дорожной конструкции автомобильной дороги II категории

Fig. 2. Dependence graph of road surface evenness on strength coefficient of the road structure of a category II

На автомобильных дорогах проводились исследования глубины колееобразования [11], при этом изучалось влияние шипованной резины, воздействие интенсивности и состава транспортного потока. В связи с этим пункт 7.6 ГОСТ Р 59120-2021 [2] гласит: «Конструкцию дорожной одежды при проектировании необходимо проверять расчетами на устойчивость к образованию колеи в процессе эксплуатации автомобильной дороги». Однако вопросы преждевременного образования колеи в условиях Крайнего Севера при коротком теплом периоде и невысоких температурах на поверхности покрытия хотя и возникают, но являются менее актуальными, чем таковые, возникающие во II-IV дорожно-климатических зонах.

В процессе эксплуатации автомобильной дороги техническое состояние, прочность и ровность автомобильной дороги ухудшаются, и принятые проектные решения в условиях Крайнего Севера часто не обеспечивают нормативные сроки службы дорожных одежд. Следовательно, на стадии проектирования автомобильных дорог необходимо дифференцированно прогнозировать и учитывать изменение эксплуатационных характеристик автомобильных дорог.

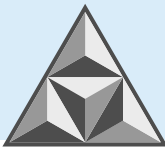
В [12] рассмотрены способы учета эксплуатационной надежности при проектировании автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения (НИД).

В США расчет потери эксплуатационной надежности учитывает допустимое колееобразование в слое покрытия и износ щебеночного слоя покрытия. Также при проектировании принимается во внимание коэффициент эксплуатационной надежности при расчете нежестких и жестких дорожных одежд, который достигает 1.5.

В Канаде прочность и эксплуатационная надежность дорожных одежд автомобильных дорог с НИД включает проверку на колееобразование, коррелируется с расчетами на морозостойкость и осушение.

В Финляндии допускается сумма определенных повреждений до следующего ремонта, предусматривается предотвращение образования колеи до допустимого значения, а также возникновение неровностей, вызванных просадкой и морозным пучением.

В России на автомобильных дорогах с НИД дорожная одежда, рассчитанная на прочность (по остаточным деформациям), проходила проверку на эксплуатационную надежность



по следующим условиям: колееобразование, истирание и износ материала покрытия, морозное пучение и осушение. На сегодняшний день на дорогах общего пользования, согласно ПНСТ 542-2021 [13], выполняются проверки только на морозоустойчивость и осушение дорожной одежды.

На основе приведенного анализа можно рекомендовать следующее. Дорожная одежда, рассчитанная на прочность, должна пройти проверку на эксплуатационную надежность по условиям: обеспечение продольной ровности и колееобразование (поперечная ровность); износ материала покрытия; морозного пучение и осушение дорожной одежды. Для условий Крайнего Севера целесообразно добавить проверку на устойчивость грунтов к просадкам, образованию и развитию таликовых зон, возникновению продольных трещин и предотвращению размывов поверхностными водами.

### ДЕЙСТВУЮЩИЕ НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ДОКУМЕНТЫ

Ниже представлен перечень действующих на сегодняшний день нормативно-технических документов по проектированию дорог в условиях Крайнего Севера:

1. СП 313.1325800.2017 Дороги автомобильные в районах вечной мерзлоты. Правила проектирования и строительства;
2. ОДМ 218.2.095-2019 Методические рекомендации по проектированию земляного полотна на вечной мерзлоте с использованием местных грунтов;
3. ГОСТ 33149-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Правила проектирования автомобильных дорог в сложных условиях.
4. Методические рекомендации по применению конструктивных мероприятий для сохранения вечномерзлых грунтов в основаниях земляного полотна и искусственных сооружений на автомобильных дорогах центральной Якутии (ООО ЦНИИС, ОАО «ТРАНДОРПРОЕКТ»).
5. СП 447.1325800.2019 Железные дороги в районах вечной мерзлоты. Основные положения проектирования.

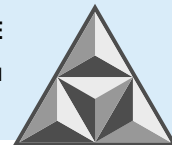
На основании указанной документации разрабатываются проектные решения (в том числе – направленные на сохранение многолетнемерзлых грунтов), однако проверка эксплуатационной надежности на стадии проектирования в документах не предусмотрена.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ФАУ РОСДОРНИИ ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Автор настоящей работы имеет многолетний опыт обследования с использованием георадаров автомобильных дорог (водно-тепловой режим) и разведки запасов в притрассовых карьерах на автомобильных дорогах «Колыма», в Республиках Бурятия, Саха (Якутия), Коми, Ямало-Ненецком округе, а также в Мурманской и Архангельской областях. В ходе обследований неразрушающий георадиолокационный метод показал высокую эффективность при определении внутреннего строения дорожных конструкций, в ходе исследования водно-теплого режима грунтов земляного полотна и подстилающего основания, выявления ослабленных зон в дорожных конструкциях, определения причин потери прочности и разрушения дорожных конструкций.

Способы повышения эксплуатационной надежности были установлены по результатам исследований оценки прочности дорожной одежды совместно с георадарным сканированием внутреннего строения дорожных сооружений. В георадарных обследованиях в различные годы





принимали участие также сотрудники ФАУ «РОСДОРНИИ» (г. Москва) Р.Р. Денисов, Р.А. Еремин, Е.О. Зверев, А.О. Кузнецов, Н.Г. Пудова.

Внутреннее строение дорожных конструкций определялось по радарограммам с помощью одноканальных импульсных георадаров, а в последние годы – двухканальных георадаров и шестиканального георадарного комплекса (рис. 3). Динамические прогибы и модуль упругости оценивали с помощью установки динамического нагружения FWD (рис. 4).



**Рис. 3.** Мобильная дорожная лаборатория ФАУ «РОСДОРНИИ» с шестиканальным георадарным комплексом

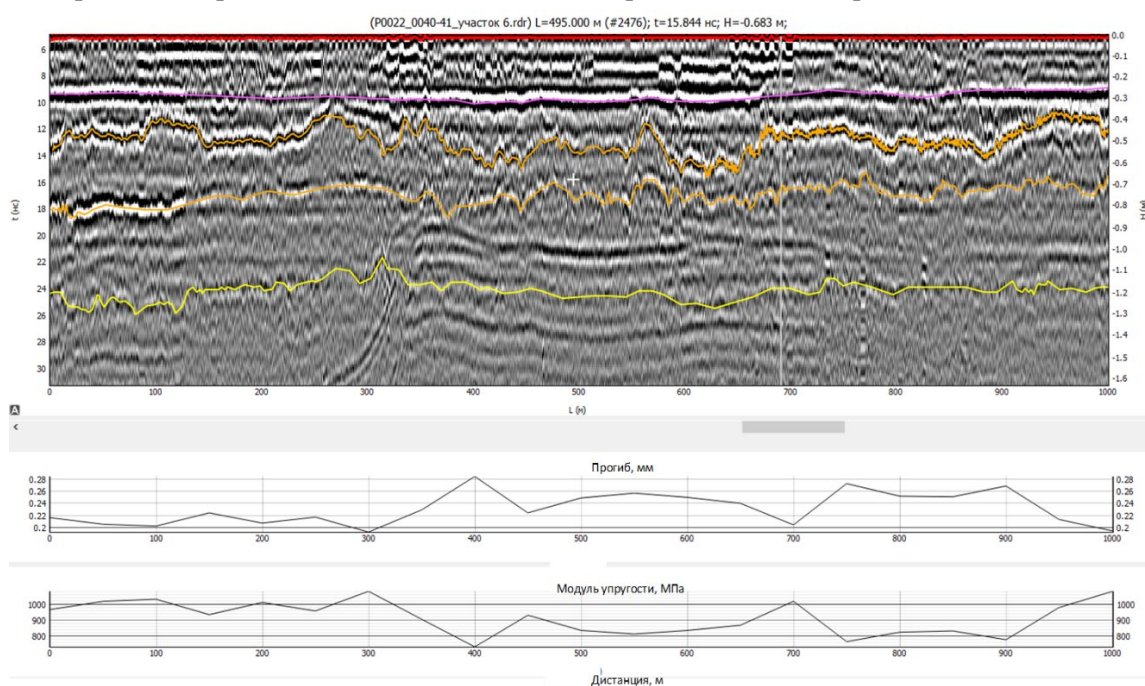
**Fig. 3.** Mobile road laboratory of the FAA "ROSDORNII" with a six-channel georadar complex



**Рис. 4.** Установка динамического нагружения FWD  
**Fig.4.** FWD dynamic loading machine

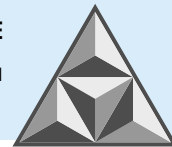
Шестиканальный георадарный комплекс позволяет за один проход восстанавливать пространственное изображение дорожной конструкции по всей ширине георадарного комплекса, оценивать толщины слоев и определять местоположение ослабленных зон.

Испытания, проведенные в 2022 г. совместно с ГК «АВТОДОР» на вновь построенном участке автомобильной дороги М-12 Москва-Казань, показали, что модули упругости на поверхности дорожной одежды изменяются в пределах 300 МПа (рис. 5).



**Рис. 5.** Радарограмма и графики зависимости динамического прогиба и модуля упругости на участке автомобильной дороги М-12 протяженностью 1000 км

**Fig. 5.** Radarogram and dependence graphs of the dynamic deflection and modulus of elasticity on a section of the M-12 highway with a length of 1000 km



Несмотря на неоднородность по прочности на поверхности рабочего слоя земляного полотна и основания, подстилающего земляное полотно, требуемые модули упругости на поверхности покрытия дорожной одежды были обеспечены. В процессе эксплуатации под воздействием транспортной нагрузки в расчетный период могут возникать различные сопротивления нагрузкам по длине автомобильной дороги и, как результат, преждевременные разрушения в процессе эксплуатации. Чтобы обеспечить однородность по прочности, при проведении инженерных изысканий необходимо оценить деформационные характеристики грунтов подстилающего основания, предусмотреть усиление и укрепление участков со слабыми грунтами и рассчитать модуль упругости на поверхности рабочего слоя земляного полотна, который должен иметь низкие значения вариации по длине автомобильной дороги.

Результаты георадарных обследований, проведенные ФАУ «РОСДОРНИИ» (г. Москва) на автомобильной дороге «Колыма» [14] с целью выявления однородности подстилающих грунтов и грунтов земляного полотна, отражают данные на рис. 6, 7. Выявленные ослабленные зоны (рис. 7, темно-синий цвет) неравномерно распределены как по длине, так и по глубине продольного разреза (протяженностью 900 м), что объясняется различным сопротивлением нагрузкам от движения транспортных средств.

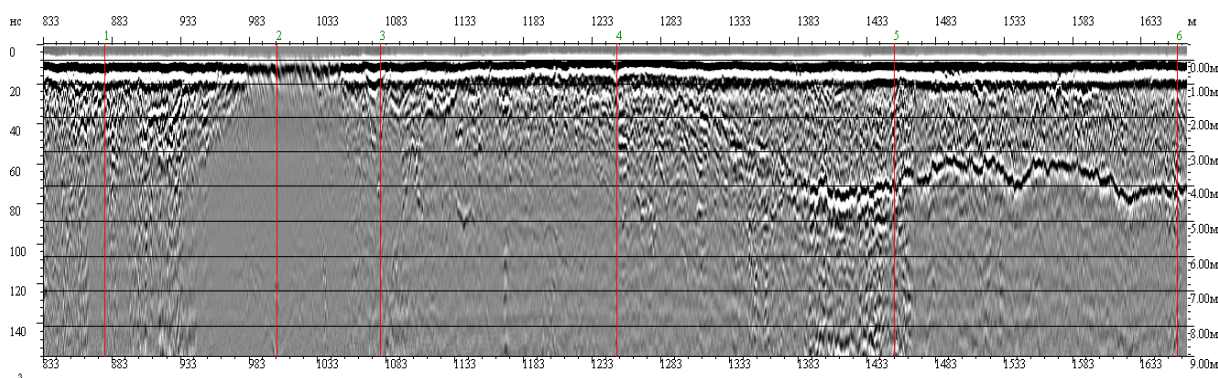


Рис. 6. Фрагмент радарограммы продольного разреза на отрезке участка автомобильной дороги «Колыма»

Fig. 6. Fragment of a radar image of a longitudinal section on a segment of the Kolyma highway

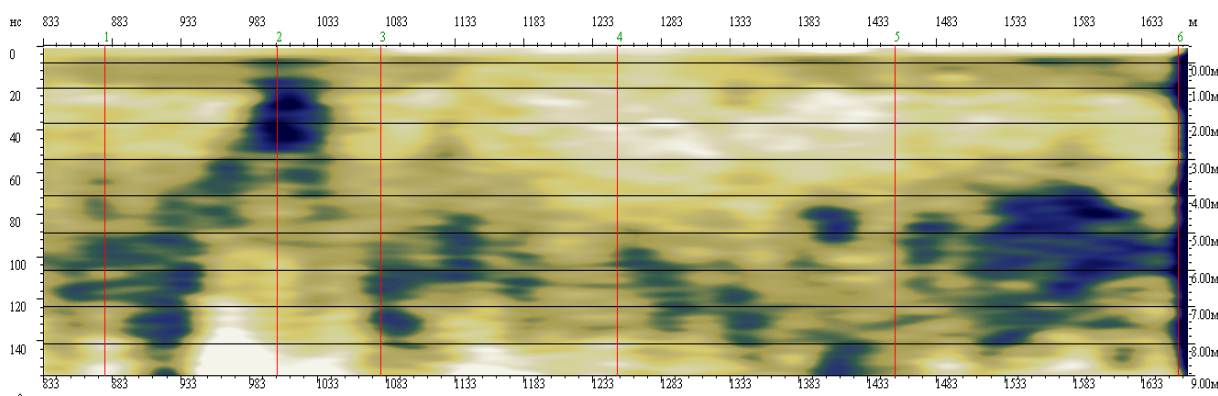
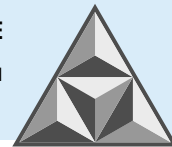


Рис. 7. Продольный профиль после обработки методом частотного анализа на том же отрезке (см. рис. 6) с выделением ослабленных зон (темно синий цвет)

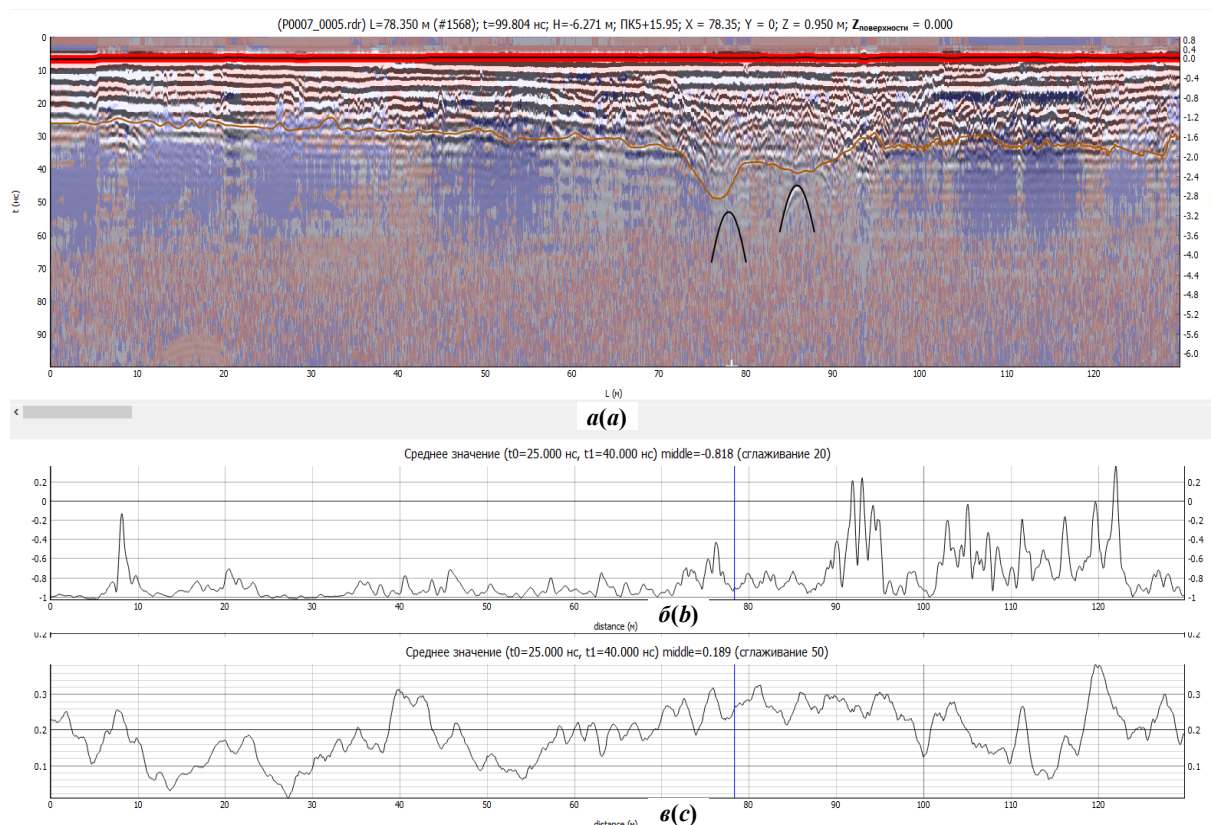
Fig. 7. The longitudinal profile after processing by the method of frequency analysis on the same segment (see Fig. 6) with the allocation of weakened zones (dark blue)

Возможности диагностирования георадарами криогенных процессов в грунтах оснований автомобильных дорог оценивались в Якутии специалистами Института горного дела Севера им. Н.В. Черского СО РАН под руководством Л.Л. Федоровой [15]. По радарограммам



определяются области сильнообводненных талых грунтов, а также включения линз мерзлых грунтов в грунтовые основания из талых грунтов на участках автомобильных дорог.

Опыт работ сотрудников ФАУ «РОСДОРНИИ» (г. Москва) по определению георадиолокационными методами состояния грунтов, подстилающих земляное полотно, отражает рис. 8. На рис. 8, а приведена радарограмма с выделенными синим фоном ослабленными зонами, определенными по максимальной энергии сигнала (рис. 8, б) и минимальными значениями частоты сигнала (рис. 8, в). Характерно, что ослабленные зоны на радарограмме могут быть определены не только по качественным визуальным признакам, но и по количественным характеристикам.

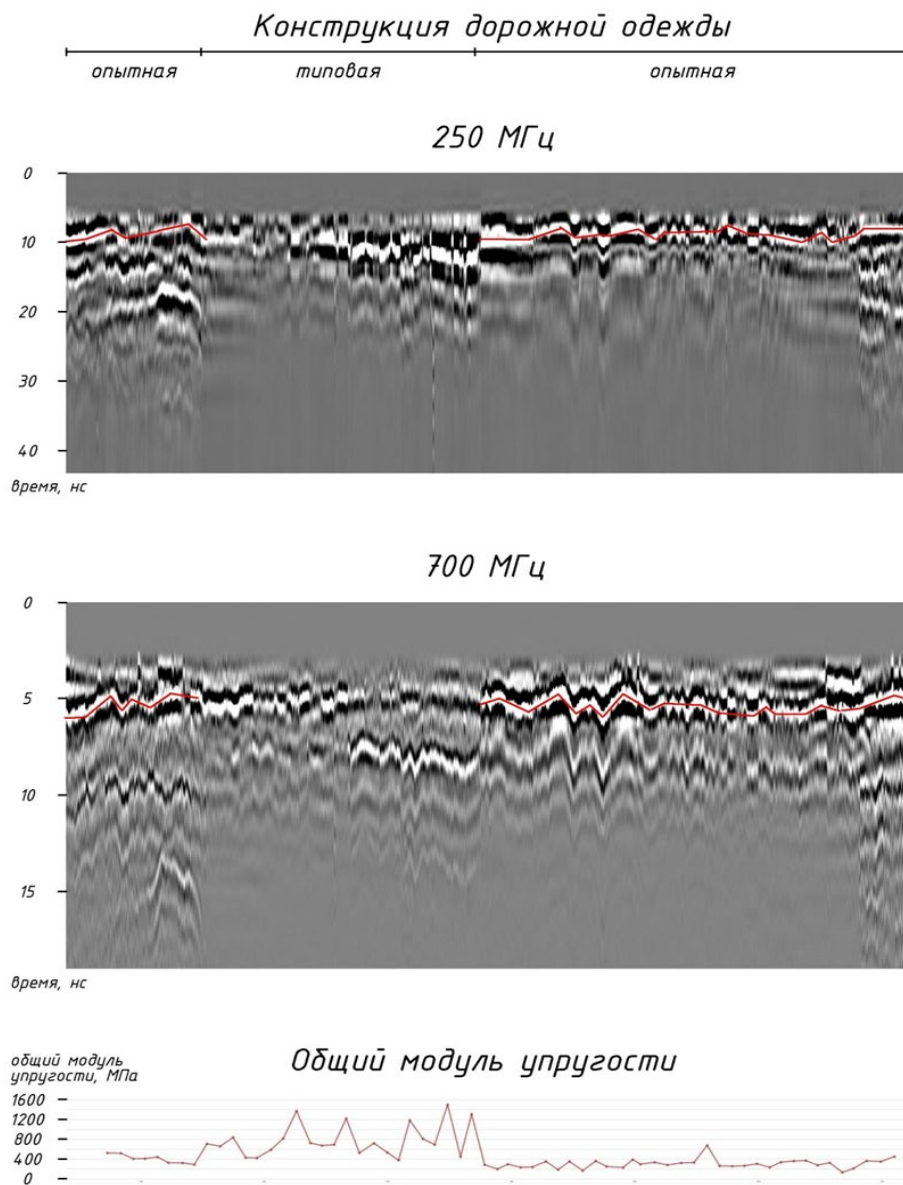
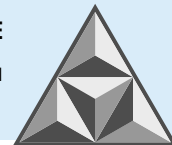


**Рис. 8.** Радарограмма и графики энергии и частоты электромагнитного сигнала на протяжении участка автомобильной дороги: а – радарограмма, б – энергия электромагнитного сигнала, в – частота электромагнитного сигнала

**Fig. 8.** Radarogram and graphs of the energy and frequency of the electromagnetic signal throughout the section of the highway: а – radarogram, б – the energy of the electromagnetic signal, с – the frequency of the electromagnetic signal

В 2019 г. совместно с ГК «АВТОДОР» также проведены первые испытания на участке автомобильной дороги А-107 «ММК» [16] в сопоставлении с типовыми и опытными конструкциями дорожных одежд и различными геосинтетическими материалами. По результатам получены радарограммы и построен график зависимости модуля упругости по длине участка дороги (рис. 9).





**Рис. 9.** Радарограммы при центральной частоте антенного блока 250 и 400 МГц и график зависимости модуля упругости по длине обследуемого участка автомобильной дороги.

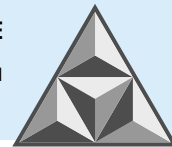
Красные линии – местоположение геосинтетических материалов.

**Fig. 9.** Radarograms at the central frequency of the antenna unit 250 and 400 MHz and dependence graph of the modulus of elasticity along the length of the highway surveyed section. Red lines are the location of geosynthetic materials.

По результатам динамического нагружения и георадиолокационных работ выявлено следующее:

– в типовых конструкциях модуль упругости выше, чем в опытных конструкциях с геосинтетическими материалами; в то же время коэффициент вариации модуля упругости в опытных конструкциях значительно меньше, чем в типовых конструкциях; это свидетельствует об однородности по прочности опытных конструкций с геосинтетическими материалами и отсутствии однородности по прочности типовых конструкций;

– местоположение геосинтетического материала, в отличие от других дорожно-строительных материалов, выражено на радарограммах ярко, так как слой способствует



некоторой аккумуляции влаги; об этом свидетельствует повышенная амплитудой сигнала на поверхности данного слоя и снижение общего модуля упругости на поверхности покрытия дорожной одежды;

– укладка геосинтетических материалов в основание насыпи и рабочие слои земляного полотна способствует повышению однородности дорожных конструкций по прочности.

Имеется также положительный опыт по применению георешеток с теплоизолирующим наполнителем [17] для предотвращения растепления многолетнемерзлых грунтов в условиях Крайнего Севера и их армирования.

В 2006-2007 гг. ФАУ «РОСДОРНИИ» (г. Москва) выполнило работы по заданию Федерального дорожного агентства на тему «Исследование надежности дорожных конструкций автомобильных дорог в зоне многолетнемерзлых грунтов с разработкой методических рекомендаций по конструированию и расчету дорожных одежд и земляного полотна» [14]. По результатам исследований был подготовлен проект ОДМ «Методические рекомендации по конструированию и расчету дорожных одежд и земляного полотна при проектировании автомобильных дорог в зоне распространения многолетнемерзлых грунтов». В отчете представлены: типовые конструкции земляного полотна и технологические решения, применяемые при каждом из трех принципов проектирования; конструктивные решения по повышению прочности дорожной одежды и обеспечению устойчивости откосов; рекомендации по использованию различных видов геосинтетических материалов. Основные положения указанного проекта легли в основу решений по повышению эксплуатационной надежности автомобильных дорог.

## РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПОВЫШЕНИЮ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ

Способы повышения эксплуатационной надежности при проектировании можно разделить:

- с применением инновационных материалов и технологий;
- с использованием известных конструктивных решений.

Такие способы целесообразно также классифицировать в зависимости от обеспечения эксплуатационных характеристик (прочность дорожной одежды, ровность поверхности покрытия, шероховатость материала покрытия, устойчивость грунтов земляного полотна).

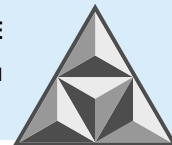
Обеспечение прочности и продольной ровности должно достигаться на всем протяжении дорожного полотна. В условиях Крайнего Севера следует предусмотреть:

- сохранение многолетнемерзлых грунтов основании насыпей;
- усиление участков со слабыми грунтами и зонами (с использованием армирующих слоев, в том числе из геосинтетических материалов),
- устройство легких и невысоких насыпей, стадийное строительство, строительство эстакад.

Основные решения в условиях Крайнего Севера:

– регулирование мерзлотных условий с помощью сезонно-охлаждающих установок и оборудования для терморегулирования – тепловых экранов, амортизаторов (аккумуляторов), диодов и трансформаторов, вентиляционных труб, геокомпозитных слоев, а также поверхностного водоотвода от земляного полотна [7, 17-21];

– запроектированная дорожная одежда должна отвечать критериям резервированности и ремонтпригодности, в том числе за счет обеспечения устойчивости подстилающих грунтов в основании насыпи и грунтов земляного полотна;



- расчетные характеристики дорожно-строительных материалов должны назначаться с учетом уровня надежности и сроков службы дорожной одежды;

- достижение требуемых модулей упругости и однородности по прочности на поверхности рабочего слоя земляного полотна.

Обеспечение поперечной ровности достигается путем:

- разработки новой или усовершенствование известной методики расчета глубины колеи;
- применения в дорожных покрытиях материалов, устойчивых к низким температурам и пластическому деформированию при высоких температурах, а также износостойких;

- армирования основания земляного полотна на слабых грунтах и (или) рабочего слоя земляного полотна армирующими, в том числе – геосинтетическими материалами;

- достижения однородности по прочности в поперечном направлении на поверхности рабочего слоя земляного полотна и поверхности подстилающего основания насыпей.

Обеспечение шероховатости (коэффициента сцепления) достигается за счет выполнения работ по своевременной замене защитных слоев и слоев износа.

Основная задача учета эксплуатационной надежности при проектировании – проверка сроков службы расчетной конструкции дорожной одежды по результатам анализа прочности и ровности в процессе эксплуатации с учетом изменения интенсивности движения и состава транспортного потока, климатических условий в течение нормативного срока службы дорожной одежды. В условиях Крайнего Севера крайне важным является сохранение многолетнемерзлых грунтов в основаниях насыпей с учетом прогнозирования изменения климатических и криогенных условий, водно-теплового режима в срок службы автомобильной дороги, а также обеспечение поверхностного водоотвода от земляного полотна.

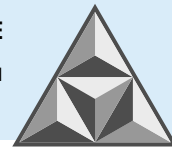
## ВЫВОДЫ

Дорожная одежда на стадии проектирования должна пройти проверку на эксплуатационную надежность по критериям: обеспечение продольной ровности; колеобразование; износ материала покрытия; морозное пучение и осушение дорожной одежды. Для условий Крайнего Севера дополнительно рекомендуется ввести критерии: устойчивость грунтов к просадкам, продольному растрескиванию, образованию таликовых зон и размывам паводковыми водами.

Запроектированная дорожная одежда должна отвечать критериям резервированности и ремонтпригодности. Для Крайнего Севера целесообразно подготовить многолетнюю научно-техническую программу повышения эксплуатационной надежности, оборудовать опытные участки и провести мониторинговые обследования автомобильных дорог с различными сроками эксплуатации (в том числе – с использованием георадиолокационного оборудования).

Обеспечение прочности и продольной ровности на всем протяжении автомобильной дороги может быть достигнуто за счет постоянства показателей на поверхности основания, подстилающего насыпь по длине дороги. Обеспечение же поперечной ровности достигается проверкой на колеобразование с применением в дорожных покрытиях материалов, устойчивых к пластическому деформированию и износу, а также армирующих слоев (в том числе – из геосинтетических материалов).

Обеспечение прочности на поверхности основания, подстилающего земляное полотно, достигается сохранением многолетнемерзлых грунтов в основании насыпей. При этом целесообразно усиливать участки дорог с ослабленными грунтами и зонами путем использования геосинтетических материалов.



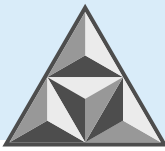
## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Кулижников А.М.** Повышение сроков службы дорожной одежды за счет учета эксплуатационной надежности // *Дорожная держава*. 2023. № 115. С. 16-21.
2. ГОСТ Р 59120-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожная одежда. Общие требования.
3. ГОСТ Р 58861-2020. Дороги автомобильные общего пользования. Капитальный ремонт и ремонт. Планирование межремонтных сроков.
4. **Радовский Б.С.** Концепция вечных дорожных одежд // *Дорожная техника*. 2011. № 11. С. 132–144.
5. **Кулижников А.М.** Пути увеличения межремонтных сроков службы автомобильных дорог // *Транспорт Российской Федерации*. 2018. № 2 (75). С. 46-50.
6. **Тиратурян А.Н., Белоусов Е.С., Шаталов В.Ю.** Имитационное моделирование ухудшения эксплуатационного состояния нежестких дорожных конструкций на основе вероятностного подхода // *Инженерный вестник Дона*. 2016. № 3. С. 1-9.
7. **Луцкий С.Я., Ландсман А.Я., Шепитько Т.В., Бурукин А.Ю.** Развитие транспортной инфраструктуры Арктики // *СТТ DIGEST*. 2019. № 6. URL: <https://www.wilmix.ru/o-kompanii/statyi/98-razvitie-transportnoj-infrastruktury-arktiki/?ysclid=llxmhxnasl663198724>
8. **Тиратурян А.Н., Ольховой С.А.** Оценка деградации прочности нежесткой дорожной конструкции на основе натуральных измерений на участке автомобильной дороги М4 «Дон» п. Тарасовский // *Инженерный вестник Дона*. 2017. № 2. URL: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/4160>
9. **Красиков О.А.** Ровность покрытий нежестких дорожных одежд. М.: ГосИНТИ, 2019. 317 с.
10. **Буртыль Ю.В., Капский Д.В.** Моделирование взаимосвязи ровности и прочности нежестких дорожных одежд на основании теоретическо-практических исследований // *Вестник СибАДИ*. 2022. Т. 19, № 4 (86). С. 570-583.
11. **Тиратурян А.Н.** Мониторинг состояния нежестких дорожных конструкций на основе анализа диссипативных процессов при их деформировании: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов на Дону, 2020. 336 с.
12. **Кулижников А.М., Каптур С.А.** Зарубежные методы расчета дорожных одежд с НИД // *Автомобильные дороги*. 2016. № 12. С. 31-34.
13. ПНСТ 542-2021. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования.
14. **Кулижников А.М.** Исследование дорожных конструкций на многолетнемерзлых грунтах // *Дороги и мосты*. 2009. Вып. 2/22. С. 89-110.
15. **Федорова Л.Л., Саввин Д.В., Федоров М.П.** Возможности диагностики криогенных процессов в грунтах оснований автодорог методом георадиолокации // *Горный информационно-аналитический бюллетень*, 2017. № 7. С. 195-202
16. **Кулижников А.М., Еремин Р.А., Кузнецов А.О.** Влияние характеристик границ контакта слоев на прочность дорожной одежды // *Дороги и мосты*. 2019. Вып. 2/42. С. 90-103
17. **Пшеничникова Е.С.** Особенности применения геосинтетических материалов в зоне вечной мерзлоты // *Дороги. Инновации в строительстве*. 2018. № 67. С. 28-32.
18. **Цернант А.А.** Сооружение земляного полотна: дис. ... д-ра техн. наук. М., 1998. 100 с.
19. Методические рекомендации по применению конструктивных мероприятий для сохранения вечномерзлых грунтов в основаниях земляного полотна и искусственных сооружений на автомобильных дорогах центральной Якутии. М.: ЦНИИС, 2010. 89 с.
20. **Гулько О.Н.** Анализ методов строительства конструкций земляного полотна в районах Вечной мерзлоты в России и США // *Проектирование автомобильных дорог: сб. науч. тр. / МАДИ*. М.: МАДИ, 2003.
21. **Макаров А.С., Краев А.Н., Шанхоев З.Ш.** Конструктивно-технологические решения по устройству автомобильных дорог на многолетнемерзлых грунтах // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. № 4. URL: <https://t-s.today/PDF/17SATS418.pdf> (доступ свободный)

Поступила в редакцию 03.08.2023

Одобрена после рецензирования 18.09.2023

Принята к опубликованию 21.09.2023



## REFERENCES

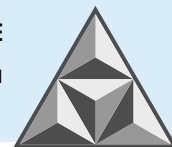
1. **Kulizhnikov, A.M.** (2023) Increasing the service life of road clothing by taking into account operational reliability, *Dorozhnaya derzhava*, (115), pp.16-21 (in Russian).
2. GOST R 59120-2021. (2021) *Public roads. Travel clothes. General requirements* (in Russian).
3. GOST R 58861-2020. (2020) *Public automobile roads. Major repairs and repairs. Planning of inter-repair periods* (in Russian).
4. **Radovskiy, B.S.** (2011) The concept of eternal road clothes, *Dorozhnaya tekhnika*, (11), pp. 132-144 (in Russian).
5. **Kulizhnikov, A.M.** (2018) Ways to increase the inter-repair service life of highways, *Transport Rossiyskoy Federatsii*, 2 (75), pp. 46-50 (in Russian).
6. **Tiraturyan, A.N., Belousov, E.S. & Shatalov, V.Yu.** (2016) Simulation modeling of deterioration of the operational condition of non-rigid road structures based on a probabilistic approach, *Inzhenerniy vestnik Dona*, (3), pp. 1-9 (in Russian).
7. **Lutskiy, S.Ya., Landsman, A.Ya., Shepitko, T.V. & Burukin, A.Yu.** (2019) Development of the Arctic transport infrastructure, *CTT DIGEST*, (6) [online]. Available at: <https://www.wilmix.ru/o-kompanii/statyi/98-razvitiye-transportnoj-infrastruktury-arktiki/?ysclid=llxmxnasl663198724> (in Russian).
8. **Tiraturyan, A.N. & Ol'hovoy, S.A.** (2017) Assessment of the degradation of the strength of a non-rigid road structure based on full-scale measurements on the section of the M4 highway "Don" v. Tarasovsky, *Inzhenerniy vestnik Dona*, (2) [online]. Available at: <http://www.ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2015/4160> (in Russian).
9. **Krasikov, O.A.** (2019) *Evenness of coatings of non-rigid road clothes*. M.: GosINTI (in Russian).
10. **Burtyl, Yu.V. & Kapskiy, D.V.** (2022) Modeling of the relationship between the evenness and strength of non-rigid road clothes on the basis of theoretical and practical studies, *Vestnik SibADI*, 19 (4-86), pp. 570-583 (in Russian).
11. **Tiraturyan, A.N.** (2020) *Monitoring of the state of non-rigid road structures based on the analysis of dissipative processes during their deformation*. PhD. Rostov na Donu (in Russian).
12. **Kulizhnikov, A.M. & Kaptur, S.A.** (2016) Foreign methods of calculating road clothes with NID, *Avtomobilnyye dorogi*, (12), pp. 31-34 (in Russian).
13. PNST 542-2021 (2021) *Public roads. Non-rigid travel clothes. Design rules* (in Russian).
14. **Kulizhnikov, A.M.** (2009) Investigation of road structures on permafrost soils, *Dorogi i mosty*, (2/22), pp. 89-110 (in Russian).
15. **Fedorova, L.L., Savvin, D.V. & Fedorov, M.P.** 2017 Possibilities of diagnostics of cryogenic processes in the soils of the bases of highways by the method of georadiolocation, *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten*, (7), pp. 195-202 (in Russian).
16. **Kulizhnikov, A.M., Eremin, R.A. & Kuznetsov A.O.** (2019) The influence of the characteristics of the contact boundaries of layers on the strength of the pavement, *Dorogi i mosty*, (2/42), pp. 90-103 (in Russian).
17. **Pshenichnikova, E.S.** (2018) Features of the use of geosynthetic materials in the permafrost zone, *Dorogi. Innovatsii v stroitelstve*, (67), pp. 28-32 (in Russian).
18. **Tsernant, A.A.** (1998) *Construction of the roadbed*. PhD. Moscow (in Russian).
19. *Methodological recommendations on the use of constructive measures for the preservation of permafrost soils in the foundations of the roadbed and artificial structures on the highways of Central Yakutia* (2010). M.: TsNIIS (in Russian).
20. **Gul'ko, O.N.** (2003) Analysis of methods of construction of roadbed structures in permafrost areas in Russia and the USA, *Proyektirovaniye avtomobilnykh dorog: sb. nauch. trudov / MADI*. Moscow: MADI (in Russian).
21. **Makarov, A.S., Kraev, A.N. & Shankhoyev, Z.Sh.** (2018) Constructive and technological solutions for the construction of highways on permafrost soils, *Internet-zhurnal «Transportnyye sooruzheniya»*, (4) [online]. Available at: <https://t-s.today/PDF/17SATS418.pdf> (free access) (in Russian).

Received 03.08.2023

Approved after reviewing 18.09.2023

Accepted 21.09.2023





НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69.059.22

# Мониторинг аварийности фасадов зданий Санкт-Петербурга с применением технологий 3D-сканирования

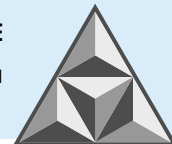
**П.Г. Гасанов<sup>1</sup>, Ю.В. Смирнов<sup>1</sup>, А.Н. Чусов<sup>2</sup>, Н.А. Политаева<sup>2</sup>**

**Первиз Гасан оглы Гасанов, Юрий Владимирович Смирнов**

<sup>1</sup>Общество с ограниченной ответственностью "УМТранс", Санкт-Петербург, Российская Федерация  
*m.gasanov2008@mail.ru, umtrans2008@mail.ru*

**Александр Николаевич Чусов, Наталья Анатольевна Политаева**

<sup>2</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация  
*chusov17@mail.ru, politaevana1971@gmail.com*



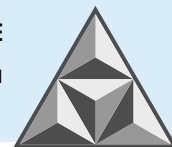
*В историческом центре Санкт-Петербурга остро стоит проблема разрушения фасадов. Их сохранение и реставрация, в связи с уникальностью и культурной ценностью зданий, являются приоритетными задачами для городских властей и специалистов по строительству. Предлагается использовать 3D-сканирование для получения точных данных о состоянии фасадов. Этот метод с высокой степенью детализации позволяет создать трехмерную модель здания, сокращая время и затраты на мониторинг. Для оценки эффективности предлагаемого подхода проведено экспериментальное исследование на примере одного из исторических и культурных зданий Санкт-Петербурга – Доходного дома А.Л. Лишневского. Результаты исследования показали, что использование технологий 3D-сканирования обеспечивает оперативный контроль степени повреждения и аварийности фасадов и может способствовать сохранению и реставрации зданий, расположенных в историческом центре северной столицы.*

**Ключевые слова:** исторические здания, фасады зданий, мониторинг в Санкт-Петербурге, 3D-сканирование

**Для цитирования:**

Гасанов П.Г., Смирнов Ю.В., Чусов А.Н., Политаева Н.А. Мониторинг аварийности фасадов зданий с применением технологий 3D-сканирования (на примере Санкт-Петербурга) // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 84-94.  
URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)





SCIENTIFIC ARTICLE

# Monitoring of the facades of buildings accident rate in St. Petersburg using 3D scanning technologies

**P.G. Gasanov<sup>1</sup>, Yu.V. Smirnov<sup>1</sup>, A.N. Chusov<sup>2</sup>, N.A. Politaeva<sup>2</sup>**

**Perviz G. Gasanov, Yuriy V. Smirnov**

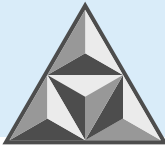
<sup>1</sup>Limited Liability Company «UMTrans», St. Petersburg, Russia

*m.gasanov2008@mail.ru, umtrans2008@mail.ru*

**Aleksandr N. Chusov, Natalia A. Politaeva**

<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

*chusov17@mail.ru, politaevana1971@gmail.com*

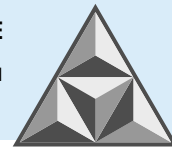


*The problem of facade destruction is particularly acute in the historical center of St. Petersburg. Due to the uniqueness and cultural value of buildings in this area, the preservation and restoration of facades are priorities for city authorities and experts. In their work the authors suggest using 3D scanning to obtain more accurate data on the condition of facades. This method provides performing a detailed three-dimensional model of a building. It significantly reduces the time and cost of monitoring, and allows one's to assess the facades state. To evaluate the effectiveness of the proposed approach, we conducted the experimental research on the case study of one of the historical and cultural buildings of St. Petersburg – the Apartment House of A.L. Lishnevsky. The results of the study demonstrated that 3D-scanning technologies provide operational control of the damage and accident rate of facades. Also they can facilitate the conservation and restoration of buildings located in the historical centre of St. Petersburg.*

**Key words:** historical buildings, building facades, monitoring in St. Petersburg, 3D-scanning

**For citation:**

Gasanov, P.G., Smirnov, Yu.V., Chusov, A.N. & Politaeva, N.A. (2023) Monitoring of the facades of buildings accident rate in St. Peterburg using 3D scanning technologies, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 84-94 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

В Санкт-Петербурге острой проблемой остается разрушение зданий исторической застройки, многие из которых являются памятниками архитектуры [1]. Культурная и историческая ценность таких зданий является предметом особого внимания при поиске решений по реконструкции и реставрации, отвечающих как архитектурным, так и структурным требованиям [2]. Сохранение культурного наследия является приоритетом для развитых стран во всем мире [3]. Это связано, в том числе, с травмированием и гибелью людей вследствие обрушения штукатурного слоя.

На сегодняшний день существует целый спектр методов выявления разрушающихся слоев с целью оперативного устранения возникающих угроз [4-6]. Одним из таких методов является 3D-лазерный мониторинг технического состояния фасадов. 3D-моделирование используется как визуальный метод представления архитектурно-дизайнерских проектов. Исторические реконструкции с привлечением новейших информационных технологий способствуют решению задач изучения, сохранения и реставрации объектов культурного наследия [7].

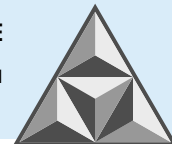
Данный метод получил одобрение на заседании Научно-технического совета в сфере жилищно-коммунального хозяйства Санкт-Петербурга (Протокол № 54 от 18.08.2016 г.) [8] и Комитета по государственному контролю, использованию и охране памятников истории и культуры (КГИОП) Санкт-Петербурга (письмо от 21.02.2017 № 2-22387-1). Однако в городе он до сих пор не внедрен, тогда как негативные тенденции, связанные с разрушением объектов застройки, нарастают.

Как указывают авторы коллективной монографии «Современные методы архитектурного обследования городской среды» [9], «в настоящее время основными причинами, препятствующими широкому внедрению современных информационных технологий в практику обследования исторической архитектуры, является отсутствие у государственных и частных заказчиков понимания возможностей, а у большинства исполнителей-проектировщиков – соответствующей квалификации в работе с оборудованием и навыков обработки полученных данных».

Это является одной из серьезных проблем не только в масштабе Петербурга, но и всей страны. Состояние фасадов зданий и сооружений, построенных и несколько десятилетий назад, и относительно недавно, оставляет желать лучшего. Площадь аварийного жилья продолжает расти [10, 11], что усугубляется появлением человеческих жертв. При этом существующая система мониторинга не отвечает современным требованиям. Регламентирующие документы, обязывающие осуществлять постоянный мониторинг аварийности, устарели и не отвечают современным методам контроля безопасности городской среды. Существующие организации, отвечающие за контроль и проведение контролируемых функций, в большинстве случаев только констатируют свершившийся факт аварии. Отсутствуют единый центр и регламент на инженерно-физические исследования, способные, соответственно, выдавать прогноз и фиксировать динамику разрушений и аварийности фасадов зданий и сооружений.

Необходимо отметить, что техническое состояние зданий, в целом, определяется работоспособностью отдельных конструктивных элементов каждого здания и связей между ними. Описание процесса изменения технического состояния зданий, ввиду большого числа конструктивных элементов, представляет значительные трудности [12].

Указанная общегородская проблема не может быть сведена к деятельности отдельных управляющих компаний на уровне Санкт-Петербурга. Необходимо построить четкую систему



взаимоотношений между управляющими компаниями, Жилищным комитетом, Жилищной инспекцией, Комитетом по государственному контролю, использованию и охране памятников истории и культуры и Фондом капитального ремонта. С этой целью может быть создан Центр инженерно-физических исследований. Регулярные исследования такого Центра легли бы в основу указаний к эксплуатационной деятельности управляющих компаний, выдаче объективного технического задания на проектирование фасадных ремонтных работ. Фонду капитального ремонта и КГиОП требуется основа «применения современных информационно-телекоммуникационных технологий, гибкого сочетания традиционных и новых методов сбора, обработки, анализа и обобщения информации для осуществления управления» [13] и обеспечения долгосрочного прогноза.

Это даст возможность урегулировать взаимоотношения управляющих компаний и Фонда капитального ремонта по передаче жилищного фонда в ответственность компаний на начальном этапе реформ ЖКХ.

Целью данной работы является оценка возможности создания единой базы таких объектов в Санкт-Петербурге, хранение ее и анализ для обеспечения комплексного и системного восстановления фасадов архитектурных объектов культурного и исторического значения.

Основные задачи исследования:

- проведение анализа литературных источников для установления причин, затрудняющих внедрение 3D-моделирования на территории Санкт-Петербурга;
- внесение предложений по созданию Центра инженерно-физических изысканий;
- апробация предложенного метода на одном из исторических и культурных зданий Санкт-Петербурга – Доходном доме А.Л. Лишневого.

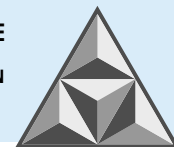
## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ 3D-СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ МОНИТОРИНГА ФАСАДА ЗДАНИЙ

По результатам краткого обзора литературы, представители ООО «УМТранс» предлагает создать Центр инженерно-физических изысканий, основными задачами которого будут являться мониторинг аварийности зданий и определение финансовых затрат на проведение работ с помощью 3D-сканирования. Основой для предложения по внедрению Центра являются Рекомендации по проектированию и монтажу фасадных систем нового строительства и реконструкции жилых и общественных зданий в Санкт-Петербурге (РМД 51-25-2015 Санкт-Петербург). В данных Рекомендациях 3D-лазерного сканирования фасадов был включен в перечень рекомендованных методов мониторинга технического состояния фасадов зданий.

Так, при участии специалистов ООО «УМТранс» организованы и проведены опытные работы по 3D-лазерному мониторингу и геофизическим изысканиям для Санкт-Петербургского государственного бюджетного учреждения «Центр мониторинга и экспертизы цен». Результатом стало внесение этих работ в Сборник «Территориальные сметные нормы и территориальные единичные расценки на содержание объектов городского хозяйства Санкт-Петербурга».

Актуальность предложения обусловлена следующим:

- компания располагает необходимой технической базой и коллективом специалистов для внедрения новых методик мониторинга аварийности зданий, способна организовать как плановые работы, так и круглосуточный выезд дежурных бригад инженеров-геофизиков для исследований на аварийных объектах;
- возможность принять участие в разработке общегородской программы и мероприятий по проведению обследования фасадов зданий и сооружений Санкт-Петербурга.



Основная задача, решаемая при плановом внедрении предложенного Центра, связывается с предупреждением аварийных ситуаций путем мониторинга деформаций фасадов, а также осуществления изысканий и наблюдений.

Анализ изысканий и наблюдений проводится регулярно. В случае выявления деформаций и изменения геометрических параметров объекта, можно принять решение о необходимости использования дополнительных методов исследования для получения расширенной картины процессов и, как следствие, принятия своевременных мер по предотвращению происшествий или ремонта. Специалисты смогут приступить к непрерывным наблюдениям и, при необходимости, своевременно сообщить о чрезвычайной ситуации (обвал балконов, сильная деформация фасада и т.д.).

На основе имеющихся данных составляется рациональная смета ремонтных работ, позволяющая провести их качественно и в срок. Внедрение предлагаемого метода позволит получить полную и достоверную информацию о текущем состоянии объектов до и после выполнения капитального ремонта, что позволит принять своевременные меры в гарантийный период в случае возникновения каких-либо нарушений.

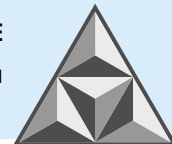
Для выполнения необходимых изысканий и наблюдений необходимо провести анализ объемов работ и составить график с учетом регламентированных периодов и сроков выезда специалистов. Необходим первичный выезд на каждый объект для создания обоснования (эталона) проведения последующих работ.

Отметим, что геометрический контроль, построенный на применении современных инструментов 3D-лазерного сканирования, есть наиболее информативный и быстрый способ получения данных с наименьшими затратами и сроками выполнения работ непосредственно на объекте. В свою очередь, это позволит уделить больше времени анализу полученных результатов и, как следствие, получить адекватную картину по объекту, а также оптимизировать количество выездов на данный объект. Если в результате анализа будут очевидны изменения и их степень опасности, потребуется увеличить и сконцентрировать внимание на объекте.

Как уже отмечалось, необходимо создание единой информационной базы данных, которая позволит сохранять архивы наблюдений по каждому объекту и иметь оперативный доступ к необходимой информации. Такая база данных включает результаты изысканий лазерного сканирования, на основе которых формируются 3D-модели архитектурных элементов фасадов. При выезде специалистов на исторические значимые объекты со сложными и уникальными фасадными элементами необходимо провести детализированную съемку таких элементов (однократно). В дальнейшем, в случае утери таких элементов, возможно осуществить полное их восстановление. При качественной съемке и обработке с высокой детализацией точность в размерах модели здания составляет 1-2 см, что достаточно для решения большинства задач при обследовании фасадов [14]. При комплексном подходе необходимо использовать сочетание разнообразных методов [15].

Современная методология не исключает архитектурного обследования зданий. Для этого необходимы исторические знания и практический опыт, что позволяет сопоставить целесообразность применения различных материалов для конкретных строительных конструкций, избежать некорректной идентификации исторических признаков объекта.

Итак, сохранение и восстановление исторического объекта возможно только при грамотном подходе на основании данных, полученных при обследовании. Если целью реставрации является преобразование объекта в музей, доступный для посетителей, правильная оценка его состояния позволит оптимально определить состав и методы работы



по техническому восстановлению, выработать рекомендации по обслуживанию объекта с учетом его исторической ценности.

Комплекс работ по обследованию объекта позволяет документировать полученные данные, составить каталог элементов и на основании анализа представить прогноз вариантов дальнейшего развития объекта. Графические документы (в печатном или цифровом формате), полученные при обследовании исторических территорий, представляют особую ценность и могут быть использованы лицами, изучающими вопросы сохранения архитектурного наследия [9].

Методом 3D-лазерного мониторинга аварийности фасадов могут быть решены следующие задачи:

- предупреждение аварийных ситуаций;
- мониторинг деформаций фасадов;
- производство изысканий и наблюдений;
- создание единой базы объектов, ее хранение и анализ;
- восстановление фасадов архитектурных объектов культурного и исторического значения.

Как уже отмечалось, для рационального выполнения необходимых изысканий и наблюдений необходимо провести анализ объемов работ и составить график с регламентированными периодами и сроками выездов специалистов.

Для этого на каждый из объектов организуется первичный выезд. Компанией ООО «УМТранс» предлагаемый метод апробирован на историческом и культурном здании Санкт-Петербурга – Доходном доме А.Л. Лишневого (рис. 1) (он же – «Дом с Мефистофелем»), фасад которого (рис. 2) расположен по адресу: ул. Лахтинская, 24, Петровский, Петроградский район, Санкт-Петербург.



a(a)



б(b)

**Рис. 1.** Апробация новой методики на объекте «Дом с Мефистофелем»:

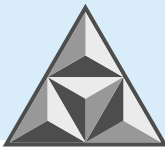
a – работы на объекте; б – результат 3D-сканирования фасада

**Fig. 1.** Testing of the new methodology on the "House with Mephistopheles" site:

a - works on the site; b - result of the facade 3D scanning

В результате в базе данных будут храниться результаты изысканий 3D-лазерного сканирования, на основе которых созданы трехмерные модели архитектурных элементов указанного объекта.





a(a)



б(б)

**Рис. 2.** Работа с выбранным объектом: а – часть фасада «Дома с Мефистофелем»; б – результат 3D-сканирования выбранной части фасада с расстояния 80 метров  
**Fig. 2.** Working with the selected site: a - part of the "House with Mephistopheles" facade; b - the result of 3D-scanning of the facade selected fragment from a distance of 80 metres

При выезде специалистов на значимые объекты со сложными и уникальными фасадными элементами большое внимание уделяется детализированной съемке. Это позволяет избежать появления после ремонта испорченных скульптур, мешающих общему восприятию культурно-исторических зданий Санкт-Петербурга. Так, на фасаде главного здания Адмиралтейства (Невский проспект, 66) расположены устрашающие фигуры, требующие реставрации (рис. 3). Новостное издание «Фонтанка.ру» сообщает: «На башне главного здания Адмиралтейства живут четырехпалые мутанты и круглоголовые безухие собаки...» [16].

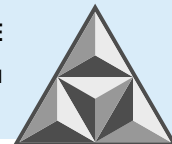


**Рис. 3.** Фигуры на фасаде главного здания Адмиралтейства [16]  
**Fig. 3.** Statuary arts on the facade of the main building of the Admiralty [16]

В общем и целом, для Петербурга и других исторических городов мониторинг и 3D-сканирование фасадов позволяют предотвратить угрозу здоровью и жизни горожан.

Для этого представляется возможным создание дата-центра, который бы сохранял и обрабатывал большие объемы получаемой визуальной и цифровой информации, что станет основой для создания 3D-модели ежемесячного прогнозирования аварийности фасадов исторической части северной столицы. Проект прошел проверку городских властей и поддержан ими. Отмечается, что он имеет потенциал монетизации за счет организации оплаты подписки за услуги дата-центра со стороны Управляющих компаний, Фонда





капитального ремонта, КГиОП, оценочных компаний и залоговых служб, Товариществ собственников жилья.

## ВЫВОДЫ

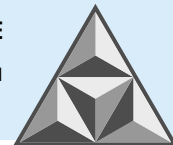
Выявлены сложности внедрения компьютерных технологий при исторической реконструкции в г. Санкт-Петербурге. Мониторинг аварийности фасадов зданий архитектурных объектов должен проводиться с использованием сочетания передовых методов строительной экспертизы – термографии, 3D-лазерного сканирования, ультразвуковых и иных физико-химических исследований, которые дополняются высокой технической интуицией привлекаемых специалистов

Проведена апробация метода 3D-сканирования фасадов на одном из исторических и культурных зданий Санкт-Петербурга – Доходном доме А.Л. Лишневого.

Представлена инициатива ООО «УМТранс» о создании единого городского оператора с целью реализации описанного проекта. Его деятельность могла бы строиться на основе частно-государственного партнерства.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Почему разрушается исторический центр Петербурга. URL: <https://fedpress.ru/article/2936460>
2. **Pescari S., Budău L., Vilceanu, C.B.** Rehabilitation and restauration of the main façade of historical masonry building – Romanian National Opera Timisoara // *Case Studies in Construction Materials*. 2023. Vol. 18(9). e01838. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01838.
3. **Vilceanu C.B., Pescari S., Herban S., Budău, L.** Comparative study of 3D modeling by short-range photogrammetry // *Scientific Bulletin of Politehnica University Timisoara. Transactions on Hydrotehnics*. 2022. Vol. 67, no. 1. P. 45-49.
4. **Jo Y.H., Hong, S.** Three-dimensional digital documentation of cultural heritage site based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry // *ISPRS - International Journal of Geo-Information*. 2019. Vol. 8(2). P. 53.
5. **Pepe M., Costantino D., Restuccia Garofalo A.** An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds // *Applied Sciences*. 2020. Vol. 10(4). P. 1235.
6. **Fiorucci M., Khoroshiltseva M., Pontil M., Traviglia M., Del Bue A., James S.** Machine learning for cultural heritage: A survey // *Pattern Recognition Letters*. 2020. Vol. 133. P. 102-108.
7. **Бызова О.М.** Использование цифровых технологий в исторических исследованиях // *Общество: философия, история, культура*. 2022. № 2. С. 76-81.
8. 3D лазерное сканирование технического состояния фасадов зданий. URL: <http://um-trans.com/3d-lazernoe-skanirovanie-tehnicheskogo-sostoyaniya-fasadov-zdaniy/>
9. **Парринелло С., Максимова С.В., Сосновских Л.В. Шамарина А.А., Мезенина К.О., Кузнецова А.Е.** Современные методы архитектурного обследования городской среды. Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2015. 126 с.
10. Количество ветхих и аварийных домов в Петербурге растет, а доля реконструкции во вводе жилья падает. URL: <https://ktostroit.ru/news/305179/>
11. Непослушная «аварийка». URL: <https://nsp.ru/29511-neposlusnaya-avariika>
12. **Леденев В.В., Ярцев В.П.** Обследование и мониторинг строительных конструкций зданий и сооружений: учеб. пособие. Тамбов: Изд-во Тамбов. гос. техн. ун-та, 2017. 252 с.
13. **Зыков В.И., Кокшин В.В., Кривошонок В.В.** История создания и совершенствования беспроводных систем мониторинга: монография. М.: Акад. ГПС МЧС России, 2016. 160 с.
14. **Корнев В.В., Орлова Н.С., Улыбин А.В., Федотов С.Д.** Строительный контроль зданий и сооружений с применением мультикоптеров и фотограмметрии // *Строительство уникальных зданий и сооружений*, 2018, № 2. С. 40-58.



15. **Баснукаев Ш., Исмаилова З.Х., Мовсулов М.М.** Основы мониторинга зданий и сооружений // *Вестник ГГНТУ. Технические науки*, 2020. Т. 16, № 2 (20). С. 46-51.
16. Паноптикум на Адмиралтействе. URL: <https://giper.livejournal.com/3452.html>

Поступила в редакцию 12.07.2023

Одобрена после рецензирования 19.09.2023

Принята к опубликованию 22.09.2023

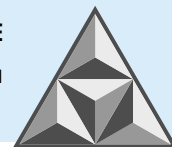
## REFERENCES

1. *Why is the historical center of St. Petersburg being destroyed* (2022) [online]. Available at: <https://fedpress.ru/article/2936460> (in Russian).
2. **Pescari, S., Budău, L. & Vilceanu, C.B.** (2023) Rehabilitation and restauration of the main façade of historical masonry building – Romanian National Opera Timisoara, *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01838. DOI: 10.1016/j.cscm.2023.e01838.
3. **Vilceanu, C.B., Pescari, S., Herban, S. & Budău, L.** (2022) Comparative study of 3D modeling by short-range photogrammetry, *Scientific Bulletin of Politechnica University Timisoara. Transactions on Hydrotehnics*, 67(1), pp. 45-49.
4. **Jo, Y.H. & Hong, S.** (2019) Three-dimensional digital documentation of cultural heritage site based on the convergence of terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle photogrammetry, *ISPRS - International Journal of Geo-Information*, 8(2), p. 53.
5. **Pepe, M., Costantino, D. & Restuccia Garofalo, A.** (2020) An efficient pipeline to obtain 3D model for HBIM and structural analysis purposes from 3D point clouds, *Applied Sciences*, 10(4), p. 1235.
6. **Fiorucci, M., Khoroshiltseva, M., Pontil, M., Traviglia, M., Del Bue, A. & James, S.** (2020) Machine learning for cultural heritage: A survey, *Pattern Recognition Letters*, 133, pp. 102-108.
7. **Byzova, O.M.** (2022) The use of digital technologies in historical research, *Obshchestvo: filosofiya, istoriya, kul'tura*, (2), pp. 76-81 (in Russian).
8. *3D laser scanning of the technical condition of building facades* [online]. Available at: <http://um-trans.com/3d-lazernoe-skanirovanie-tehnicheskogo-sostoyaniya-fasadov-zdaniy/> (in Russian).
9. **Parinello, S., Maksimova, S.V., Sosnovskikh, L.V., Shamarina, A.A., Mezenina, K.O. & Kuznetzova, A.E.** (2015) *Modern methods of architectural survey of the urban environment*. Perm: Izd-vo Perm. nats. issled. politekhn. un-ta. (in Russian).
10. *The number of dilapidated and dilapidated houses in St. Petersburg is growing, and the share of reconstruction in housing commissioning is falling* [online]. Available at: <https://ktostroit.ru/news/305179/> (in Russian).
11. *Naughty "emergency"* [online]. Available at: <https://nsp.ru/29511-neposlusnaya-avariika> (in Russian).
12. **Ledenev, V.V. & Yartsev, V.P.** (2017) *Inspection and monitoring of building structures of buildings and structures*. Tambov: Izd-vo Tambov. gos. tekhn. un-ta (in Russian).
13. **Zykov V.I., Kokshin, V.V. & Krivoshonok, V.V.** (2016) *History of creation and improvement of wireless monitoring systems*. Moscow: Akademiya GPS MChS Rossii (in Russian).
14. **Korenev, V.V., Orlova, N.S., Ulybin, A.V. & Fedotov, S.D.** (2018) Construction control of buildings and structures using multicopters and photogrammetry, *Stroitel'stvo unikal'nyh zdaniy i sooruzheniy*, (2), pp.40-58 (in Russian).
15. **Basnukaev, Sh., Ismailova, Z.Kh. & Movsulov, M.M.** (2020) Fundamentals of monitoring of buildings and structures *GGNTU. Tekhnicheskie nauki*, 16(2), pp. 46-51 (in Russian).
16. *Panopticon at the Admiralty* [online]. Available at: <https://giper.livejournal.com/3452.html> (in Russian).

Received 12.07.2023

Approved after reviewing 19.09.2023

Accepted 22.09.2023



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.017.9

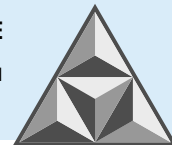
# Эмоции в архитектуре

**С.В. Расторгуев, Е.В. Голубева**

**Семен Васильевич Расторгуев, Елена Вячеславовна Голубева**

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация,

*rastorguevsv@ystu.ru, lena371g@gmail.com*

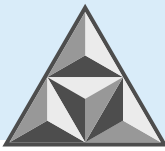


*Рассматривается феномен эмоций в архитектуре: эмоции как неотъемлемая часть архитектуры, как движущая сила архитектуры, как составляющая творческого процесса проектирования. Предпринята попытка не только рассмотреть аспекты данной темы, но на основе собранных данных также создать обобщающую модель – архитектурный проект музея эмоций или объекта, в функциональную программу которого входит классификация и демонстрация эмоций зрителю, выявление связей между различными эмоциями и методами их отображения архитектурными средствами. Затрагиваются понятия «сенсорная архитектура – воздействие архитектуры на эмоциональную картину мира в глазах наблюдателя», связка «экология – архитектура – эмоции», «эмоциональная составляющая в экспозиционном и музейном пространстве», «влияние освещения на эмоции, вызываемые архитектурным пространством», «цифровое распознавание эмоций».*

**Ключевые слова:** архитектура, эмоции, классификация эмоций, восприятие, пространство, музей, проектирование

**Для цитирования:**

Расторгуев С.В., Голубева, Е.В. Эмоции в архитектуре // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 95-108. URL: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



SCIENTIFIC ARTICLE

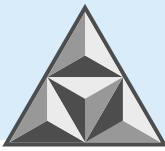
# Emotions in architecture

**S.V. Rastorguev, E.V. Golubeva**

**Semen V. Rastorguev, Elena V. Golubeva**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia,

*rastorguevsv@ystu.ru, lena371g@gmail.com*

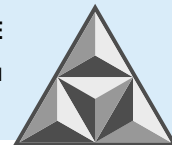


*The article deals with the phenomenon of emotions in architecture: emotions as an integral part of architecture, a driving force of architecture, and a component of the creative design process. The article attempts to consider the aspects of this issue, and, based on the collected data, develop a generalizing model – an architectural project of a Museum of Emotions or an object, which functional programme includes classification, demonstration of emotions to the viewer, identification of relationships between different emotions and methods of their display by architectural facilities. Also the article deals with the concepts of "sensory architecture - the impact of architecture on the emotional picture of the world in the eyes of the observer", the connection "ecology-architecture-emotions", "emotional component in the exposition and museum space", "the impact of lighting on emotions caused by architectural space", and "digital recognition of emotions".*

**Key words:** architecture, emotions, classification of emotions, perception, space, museum, design

**For citation:**

Rastorguev, S.V. & Golubeva, E.V. (2023) Emotions in Architecture, *Smart Composite in Construction*, 4(3), pp. 95-108 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n3_2023)



## ВВЕДЕНИЕ

Целью настоящей работы является рассмотрение эмоциональной составляющей в архитектуре. Подобная тема весьма широка и включает в себя целый ряд аспектов, указанных в ходе исследования.

Особенность работы заключается в реальной проектной составляющей, т.е. в ходе исследования был спроектирован архитектурный объект – музей эмоций. Таким образом, осуществляется попытка перевести эфемерный и не нормируемый язык человеческих эмоций пока не в конструкции и реальное строительство, но уже в язык чертежей, расчетов, функциональных схем и 3D-моделей.

Говоря об эмоциональной составляющей в архитектуре, в первую очередь, следует отметить важность философии как площадки, задающей правила игры эмоций при формировании архитектурных образов и объектов. Историческим примером может служить Витрувианская триада, кратко описывающая такие составляющие архитектуры, как «польза, прочность, красота» [1]; при этом красота характеризуется как слот-разъем, куда «пристыковываются» эмоции в архитектурном процессе. Николя Ле Камю де Мезьер пришел к выводу, что эмоция является основой философии архитектора на всех уровнях развития его теоретических моделей [2].

Следует вспомнить известную фразу: «Архитектура – это застывшая музыка», авторство которой приписывается Иоганну Вольфгангу фон Гете, а также, по более ранним сведениям, греческому поэту Симониду Кеосскому [3]. Названные мыслители помещали красоту, философию и музыку в некие зоны конвергенции, где происходил волшебный процесс смешения технической и гуманитарной составляющей архитектуры, порядка и хаоса, а в нашей (современной) интерпретации – эмоций и архитектурно-строительных норм.

В задачи данного исследования входит учет и локальных («тактических») эмоциональных аспектов архитектуре, таких как:

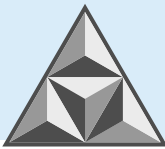
- воздействие архитектуры на человеческие чувства и механизм обратной связи (так называемая «сенсорная архитектура»);
- экология и эмоции, где живая природа выступает резонатором, усиливающим трансляцию эмоций в архитектурном объекте;
- влияние архитектурной среды на психологическое состояние человека (как часть замкнутого процесса, где эмоции формируют архитектуру, а архитектура рождает эмоции);
- эмоциональная составляющая в музейном пространстве (архитектура как участник диалога между посетителем и экспозицией);
- цифровое распознавание эмоций и создание архитектурных решений и форм с привлечением искусственного интеллекта.

Описываемый в данной работе проект музея эмоций [4] отмечался по итогам международного конкурса «Emotions on Display», представлялся в одной из номинаций конкурса «Inspire! Awards», а также – к получению международной архитектурной премии «Золотой Трезини». Доклад с изложением авторской концепции также обсуждался на 76-й Всероссийской научно-технической конференции студентов, магистрантов и аспирантов в Ярославле [5], что свидетельствует об актуальности темы исследования.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕНОМЕНА ЭМОЦИЙ В АРХИТЕКТУРЕ

Архитектура предлагает человеку определенные сценарии развития общества с давних времен, при этом в настоящее время люди понимают и принимают необходимость действия



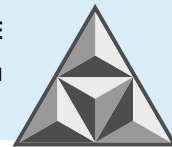


в условиях комфортной среды. Природа уже выступала образом архитектуры в пещерах, скалах, природных углублениях и т.д. Эти объекты стали концептуальной основой для зданий с комнатами, различающимися по функциональному назначению. Простые эмоциональные состояния человека, взаимодействуя с процессом архитектурного проектирования и пройдя долгую цепочку эволюции, привели архитектуру в тот вид, в котором мы ее знаем сейчас. При этом возникает вопрос: каким образом эмоции влияют на наше окружение и пространство?

Эмоции охватывают широкий спектр чувств, изменений в теле, разуме и поведении человека. Выбор цветовых решений и материалов зависит от функционального назначения и предпочтений обитателя создаваемого пространства. Архитектурное окружение в глазах одного человека может изменяться при трансформации его эмоционального состояния. Архитектура производит мощное эмоциональное воздействие на человека; именно это связывает ее с искусством [6].

В первую очередь, при проектировании здания формируется физическое пространство с протекающими в нем функциональными процессами. Архитекторами и дизайнерами создаются условия для восприятия различных объектов – людей, пейзажей города и др. Так, среда представляется сменой видовых перспектив, раскрывающихся человеку при движении по запроектированному пути. Средства организации, необходимые для эмоционального воздействия, тождественны средствам программирования восприятия человека, которые можно отнести к отдельной группе. Эта группа имеет такие свойства, как открытое (или замкнутое) пространство, особенности планировки или простота геометрических форм, направленность или центричность элементов, оказывающих устойчивое эмоциональное влияние. Проектируемое пространство представляется уютным или враждебным, динамичным или однообразным, вызывающим широкий спектр эмоций. Несомненно, эмоциональное воздействие воспринимаемого пространства зависит от конкретного функционального процесса и поведения человека в той или иной среде. Элементы, формирующие архитектурный облик среды, есть визуальный материал со всеми характеристиками. Организация внешних архитектурных форм выступает особым источником эмоционального воздействия. Своеобразие заключается во множестве значений, которые несет архитектурная среда. Можно заключить, что средства, связанные с основными потребностями, процессами деятельности человека и его поведением, формируют целостную, художественно значимую среду [7].

Одни типы среды характеризуются сложным синтезом различных процессов, в которых отражаются потребности людей (городская среда, жилая среда, промышленная среда); в других – главенствуют процессы утилитарного характера (торговые центры, транспортные узлы и т.п.) или ярко выраженного эмоционального состояния (Дворцы культуры и бракосочетаний, театры и кинотеатры, кладбища, мемориальные комплексы); для третьих сред характерны процессы и утилитарного и эмоционального характера (рестораны, кафе, плавательные бассейны и т.п.). Эта сложная зависимость проявляется для разных типов сред. Эмоциональность восприятия определяется характером организации конкретных процессов деятельности людей. Например, в аэропорту важную роль играет система визуальной навигации и коммуникаций – и для ее организации необходимо установить в интерьерах определенные пространственные связи, организовать акценты светом и цветом. Если система строится без учета важности сообщений, например, основная информация подается так же, как и второстепенная, это может вызывать у человека дискомфорт и растерянность. Напротив, упорядоченность пространства интерьеров, выделение ориентиров, информационных



носителей и специальных знаков создают состояние эмоционального комфорта. Эти свойства интерьера формирует объемно-планировочное решение [8].

В отношении свойств пространства и его феноменологическом измерении Хайдеггер отметил, что невозможно «пережить» среду посредством тщательного анализа, методично двигаясь к результату. Получение впечатления – это момент абсолютной ясности, огонь просвещения, который не может быть описан или познан опытным путем. В эссе Хайдеггера «Строить обитать мыслить» высказано: «Пространство – это не внешний предмет, но и не внутреннее переживание... Смертные существуют – это значит, обитая, они переживают и проникают пространства в силу самого своего пребывания при вещах и местах» [9].

Феномен эмоции в архитектуре наиболее ярко проявил себя в эпоху постмодернизма (1960–1990 гг.). В этот период многие архитекторы использовали эмоцию как способ сделать свой проект более ярким и заметным на фоне модернистских построек. Акцент постмодернистов на феноменологии восприятия и феноменологическом способе думать и видеть оказал влияние на способы работы с естественным светом в современной архитектуре. Чувственный способ постижения пространства раскрывает потенциал света в качестве элемента атмосферы пространства и средства воздействия на эмоции людей, воспринимающих архитектуру. Таким образом, естественный свет переходит в разряд метафизических универсалий архитектурной культуры. Повышенный интерес к контексту заставляет архитекторов обратить внимание на свет как элемент окружающей среды. Переосмысление отношений между «внутренним» и «внешним» пространством раскрывает свет как средство выявления тонких нюансов состояний природы, а работа с различными качествами естественного света позволяет установить взаимосвязь между человеком и архитектурой [10].

Николя Ле Камю де Мезьер предлагает ориентироваться на вызываемые зданием эмоции для создания верной композиции. Он провозгласил «мудрость чувствующей души», способной проникать в суть вещей. Его авторский метод заключается в том, чтобы на основе эмоций создавать верное строение здания.

Наиболее удачным архитектурным объектом, в котором можно зафиксировать наибольшее количество взаимодействий архитектуры и эмоций и даже каким-то образом их классифицировать, является музейное здание. Архитектура музейных зданий изменяется вместе со сменой модели взаимосвязи «человек – мир». Современные визуальные практики особенно эмоциогенны. Еще в начале XX века было установлено, что эмоциональное явление всегда двухкомпонентно. Эмоция, как известно, представляет собой отношение субъекта к объекту (первый компонент), и это отношение человека к внешнему миру неотделимо от отображения переживания, состояния (второй компонент). Как правило, на втором компоненте акцентируют внимание современные архитекторы, формируя художественный образ и программируя восприятие зданий музеев [11].

## КОНЦЕПТУАЛИЗАЦИЯ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ. ГЕНЕРАЦИЯ ИДЕИ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ

Чтобы подойти к проектированию архитектурного объекта на основе собранных знаний о взаимодействии эмоций с архитектурой, необходимо найти способы отражения эмоций в архитектурном формообразовании. Формообразование музея эмоций складывается из трех слоев-идей (рис. 1):

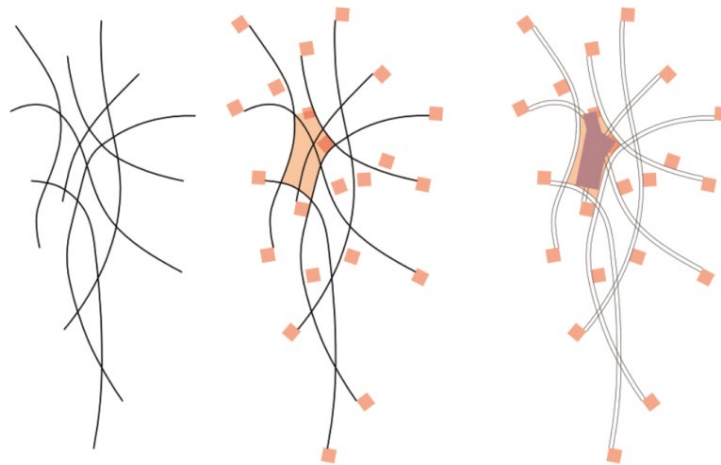
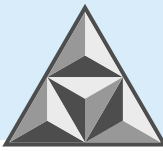


Рис. 1. Схема формообразования в плане

Fig. 1. Scheme of form-making in plan

- отражение классификации эмоций;
- траектории эмоциональных связей;
- инициация посетителя музея.

**Классификация эмоций в проекте.** Одна из методик, применяемая для формирования первого композиционного слоя в данном проекте, базируется на концепции Роберта Плутчика «Колесо эмоций» (рис. 2).

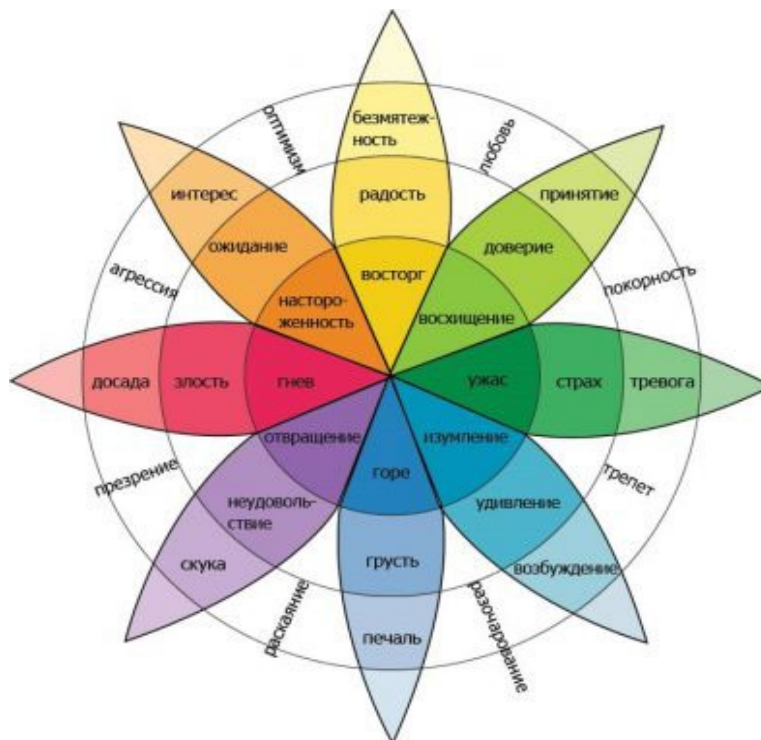
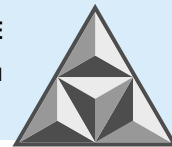


Рис. 2. Колесо эмоций Роберта Плутчика

Fig. 2. Plutchik's Wheel of Emotions

Он указал основные эмоции – радость, ожидание, злость, неудовлетворение, грусть, удивление, страх, доверие, а также классифицировал их (первичные, вторичные и третичные). Наряду с первичными эмоциями (аффектами), человек испытывает эмоции вторичные эмоции, которые являются прямой реакцией на первичные эмоции.



Эмоции выступают как эволюционные механизмы, обеспечивающие адаптацию к внешним условиям деятельности и эффективное выживание. Они играют роль стимулятора адаптивного поведения; за каждой эмоцией стоит естественный импульс, который должен находить свое выражение [12].

Для отображения эмоции могут использоваться: растительность; фактура, материалы и их цвет; водные элементы; пропорции помещений; естественный и искусственный свет; перспективные виды; изменение температуры; уровень шума; музыка, запахи.

При формировании данного слоя композиции музея были взяты за основу следующие ключевые понятия:

- собственно эмоции как чувства, возникающие в результате настроения человека и обстоятельств; эмоции, вызванные внешним раздражителем;
- эмпирический опыт как опыт вовлекающий, доказанный экспериментально, основанный на наблюдении;
- холистическая архитектура: гуманистический подход, объединяющий разум, тело и душу;
- сенсорная архитектура: восприятие пространства с помощью органов чувств.

Толкованием эмоций в проекте служат образы природы. Местом для проектирования была выбран город Петропавловск-Камчатский, поскольку климат Камчатки отличается разнообразием, а природа на ее территории способна отразить разнообразие эмоций. Эмоции здесь могут быть представлены вулканами, горами, полями, гейзерами, северным сиянием, степями и т.д.

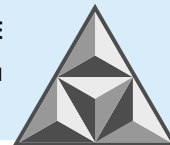
В ходе работы создана экспериментальная модель музея, включающая следующие компоненты:

- пространства, вызывающие различные эмоции, где человек имеет возможность идентифицировать себя с эмоцией, которая его переполняет;
- пространства, которые могут быть созданы как чистое отражение отдельных эмоций либо функциональные помещения, которые объединяют несколько различных эмоций;
- последовательность эмоций и переходов от одной эмоции к другой, зафиксированная в проекте;

Реализация модели приводит к возникновению музея, функция которого – отображение эмоций в конструкциях и пространствах и донесение их базовых свойств до посетителя, что способствует глубокому осмыслению у него собственных эмоций.

**Траектории эмоциональных связей.** Формообразование музея метафорически представляет собой клетку, сдерживающую эмоции человека. Любая форма, будучи незаполненной, состоит из оболочки и внутреннего пространства. В данном проекте оболочка – это ограничение воспитанием, нормами морали, внутренними переживаниями, культурными границами и мнениями, навязанными обществом. Периодически эмоции вырываются из клетки-оболочки. В настоящей работе авторами представлен момент преобладания эмоций над ограничениями, момент выплеска их человеком.

Музей состоит из путей-траекторий, формирующих контуры центрального объема и ведущих к кубам – разрозненным, отколовшимся фрагментам трехмерной клетки, оболочкам с эмоциями. Следуя по воздушным траекториям-коридорам, можно рассмотреть окружающие объекты и внешние пейзажи с разных точек и высот. Центральный объем ограничен формируемыми плоскостями с планарным остеклением, без крыши и с наложением на него «листов» с такой же расстекловкой. Фонд Картье в Париже архитектора Жана Нувеля послужил аналогом девизуализации и экстерьерного вида этого объема [13]. По периметру расставлены колонны, на которых лежат фермы, несущие подвешенные этажи, где реализуются смежные с музеем утилитарные функции: административная часть, гардероб,



кафе, магазин (сувенирная лавка), туалеты, библиотека, находящиеся в центральном объеме и не затрагивающие остальную территорию (рис. 3).

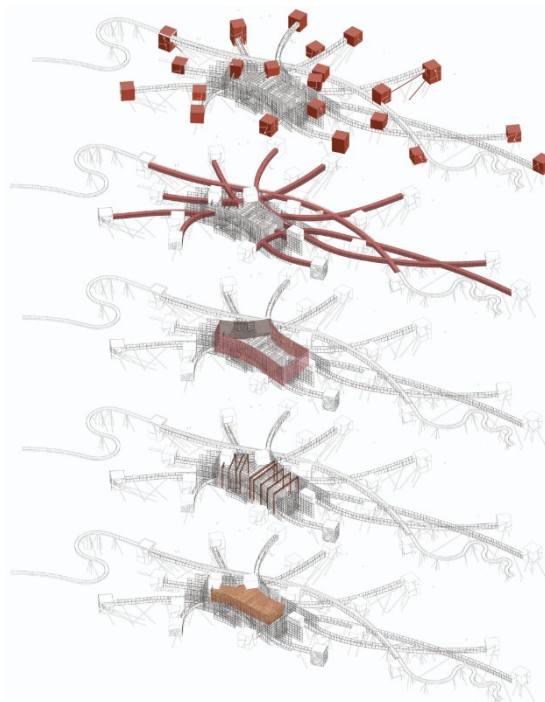


Рис. 3. Взрыв-схема

Fig. 3. Explosion diagram

Посетитель попадает в музей через центральный объем как начало пути восприятия и осмысления эмоций. Место рефлексии находится на -1 (минус первом) этаже. Это территория дикого природного ландшафта, контрастирующая с другими этажами. Вдоль здания пролегает искусственный ручей. Тут расположены инсталляция «Древо» и флорариумы с редкими растениями Камчатки, функционирующие и зимой, что создает эффект разнообразия внутреннего «пейзажа». Попастъ в кубы можно только со второго этажа по четырем проходам к воздушным коридорам – переходам от одной эмоции к другой (так называемым «мостам нейронной сети»).

Некоторые эмоции объединены в одну комнату, потому что различные типы личности проживают эмоции неодинаково (субъективное переживание реальности). Так, одна комната может вызвать смежные эмоции у посетителей, согласно кругу Плутчика.

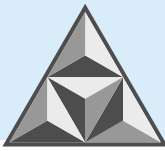
Каждая комната – ячейка клетки наполнена звуками, которые, расходясь по воздушным коридорам-траекториям, позволяют посетителям выбрать свой путь, полагаясь на слух. Чтобы не заблудиться, посетитель получает электронную карту перемещения по зданию, сопровождаемую советами двигаться по траекториям, генерируемым искусственным интеллектом на основе уже пройденного пути.

Отдельные комнаты эмоций – внутренние пространства ячеек клетки разработаны подробно. Их описания, короткие и эмоциональные, запечатлены в проектируемых объемах.

Комната Гнева. Гнев – это разрушение, появившееся и не отпускающее, вулкан, разрывающий земную поверхность. Черный шар – то, что дало начало этому разрушению, и разбивающее помещение трещинами. Этот куб трескается и снаружи.

Комната Ужаса. Помещение несомасштабно человеку, как в греческих храмах, и, благодаря черным металлическим стенам, наполнено мраком. Малый вырез в потолке – единственный источник света. Легкая дрожь стен тактильно передает чувство тревоги.





Сопровождающая музыка: грохот, гром, звуки падающего пианино и приближающегося поезда.

Комната Безмятежности. Это выражение расслабления, тихого счастья, покоя и умиротворения. Комната помещена вровень с уровнем окружающего озера. Расслабившись на «облачке», посетитель наблюдает за изменчивостью пейзажа.

Комната Настороженности. Дизайн комнаты основан на поведении человека в связи с его инстинктами. Стены комнаты покрыты экранами, транслирующими быстро сменяющийся видеоряд природы, сопровождающиеся спокойной музыкой.

Комната Горя. Надежда, возрождаемая во время пути со дна к вершине. Преодоление пути, ведомого терзаниями и неотвратимостью, завершается принятием на самой высокой точке айсберга и навсегда остается в памяти. Свет близок, но недостижим, как выход из состояния горя. Сопровождающая музыка – редкое падение капель воды, будто это слезы.

**Инициация посетителя музея.** Начинается с колодца при входе в центральный объем и заканчивается у дерева – символа перехода.

Вдохновением для инициации послужил мультфильм «Ежик в тумане». Инициация включает:

- отделение (вход в здание);
- переход (прохождение по комнатам эмоций);
- включение (прибытие на минус первый этаж).

Посетитель при входе в здание видит себя в отражении зеркального круга на дверях. Познание себя возможно только при участии внешней стороны, от которой человек мог бы «отразиться». Залы с эмоциями выступают как «Сумрачный лес», как странствие души, путь от темного к светлому. Путь начинается с «колодца» – символа спуска в подземное царство.

Посетитель входит в коридоры. Пройденный путь – пространственный переход, который заканчивается на -1 (минус первом) этаже у дерева, где происходит включение. «Мировое дерево» и река (тут же) представляют финальный рубеж (рис. 4).

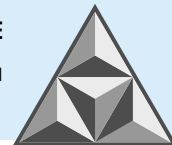


Рис. 4. Минус первый этаж. Мировое дерево, голограмма белой лошади, река (ручей)

Fig. 4. -1st floor. World tree, white horse hologram, stream

Голограмма белой лошади на минус первом этаже выступает как нечто прекрасное и неуловимое. Ей (так же, как в мультфильме) в реальном мире нет места, она остается в тумане.

Такая идея проектирования ненарочита и может быть не понята посетителем. Однако элементы, пронизывающие объемно-планировочное решение, есть загадка музея. Главная цель, достигаемая в финале индивидуальной траектории – посредством действия архитектурно-пространственных средств добиться от посетителя рефлексии и переосмысления увиденного после посещения музея.



Реальная территория проектирования музея имеет рельеф с небольшим уклоном по берегу. Набережная покрыта мелкой галькой. Территория поделена на пешеходные пути с различной насыщенностью потоков, тихую и рекреационную зоны, детские и спортивные площадки, парковки.

Благоустройство набережной включает в себя устройство дополнительной пешеходной дорожки, установку смотровой площадки в виде кольца, маяка и спусков к пляжу, декоративных элементов и лавок, а также озеленение. Идея больших насыпных озелененных объемов навеяна самой природой; это «затвердевшая сотнями лет магма, которая стала землей и обросла травой», а темные пласты – это «земля, из которой выплескивалась магма».

Композиция парка вокруг музея берет начало из кубов и траекторий. Линии на генеральном плане продлеваются и формируют каркас (пешеходные пути). Ландшафтная композиция у южной стороны музея состоит из квадратов, направление которым дает пара кубов. В свою очередь, получаемая композиция дает направление на набережную – на маяк и смотровую площадку. Здесь было принято решение организовать пешеходный переход от музея к набережной. Части парка сформированы бриколажем из линий кубиков; мощения квадратной формы представлены по площади 8x8 м. Такие формы вдохновлены ландшафтом и природой Камчатки. Фронтальная композиция состоит из «земли» (бетонного мощения), «травы» (отличной от той, что находится на большей части участка), «воды» (стеклянного покрытия, напоминающего «лед», под которым располагается «вулканическая лава» – подсветка). Аналогичная композиция спроектирована у северной части здания. Для структуры характерны четыре кольца (три на основной территории и одно – на набережной), формирующие площадки.

На аванплощади расположена инсталляция «Монетка» – «зло и добро есть стороны одной монеты» (круглое двухстороннее зеркало, высветленное с одной стороны и затемненное – с другой).

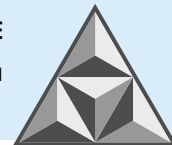
В настоящее время количество музеев эмоций в мире невелико. Чаще всего, это небольшие помещения, выступающие как аттракционы и развлечения. Предпосылкой для реализации данного проекта, помимо опоры на теоретическую модель, служит уникальная природа Камчатки как естественный аналог отражения эмоций в различных объемах и формах. Здание музея, по проекту, собирает вокруг себя в единую композицию город и его окрестности (рис. 5): озеро, автомобили, горы, залив, реагируя на нюансные изменения погоды и естественного света.



Рис. 5. Визуализация музея

Fig. 5. Museum visualization





Своей многозначной формой музей выступает как пример создания «загадочного означающего», отраженного парадигмой Чарли Дженкса в [14].

## ВЫВОДЫ

Эмоции в большинстве случаев воспринимаются как важная составляющая архитектуры, однако попытки осмысления их архитектурными средствами предпринимаются редко. Тем не менее нельзя отрицать, что «запечатление» эмоций в архитектуре отождествляется с высоким потенциалом формотворчества. В этой связи на основе авторской концепции предложен проект нового типа здания – музея, выполняющего градостроительную функцию, одновременно работающего как ориентир и достопримечательность.

Дальнейшее изучение взаимодействий архитектуры и эмоций, ведущее к совершенствованию архитектурного языка, следует продолжать с использованием инновационных инструментов (искусственный интеллект, параметрическое проектирование, цифровой анализ больших массивов данных и др.) в руках архитектора, двигающегося в ногу с развитием современной научной мысли.

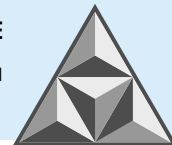
## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Витрувий.** Десять книг об архитектуре. Кн. 2. 3-е изд. М.: КомКнига, 2005. С. 5.
2. **Коптева Т.В.** «Дух архитектуры» Николая Ле Камю де Мезьера: эмоция и архитектура // *Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. Вестник МГХПА.* 2014. № 3. С. 125-138.
3. **Бабаджанова А.И., Бурцева Е.Н.** Архитектура - застывшая музыка // *APRIORI. Серия: Естественные и технические науки.* 2016. №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/arhitektura-zastyvshaya-muzyka>
4. Музей эмоций. Отзыв и дополнительная информация о проекте. URL: <https://wp.me/p518pU-1wq>
5. **Голубева Е.В., Расторгуев С.В.** Эмоции и архитектура // *Семьдесят шестая всероссийская научно-техническая конференция студентов, магистрантов и аспирантов с международным участием. 19-20 апреля 2023 г.* В 3 ч. Ч. 2. Ярославль: Изд-во ЯГТУ, 2023. С. 660-663. 1-CD-ROM.
6. **Коваль М.В.** Архитектура, реагирующая на человека // *Бизнес и дизайн ревью.* 2020. № 2(18). С. 11.
7. **Авилова Д.В., Воронкова А.А.** Влияние архитектурной среды на психологическое состояние человека // *Архитектура и дизайн: история, теория, инновации.* 2021. № 5. С. 18-22.
8. **Забельшанский Г.Б., Минервин Г.Б., Раппапорт А.Г., Сомов Г.Ю.** Эмоциональное воздействие архитектурной среды и ее организация. Архитектура и эмоциональный мир человека. М.: Стройиздат, 1985. 208 с.
9. **Хайдеггер М.** Строить обитать мыслить // *Проект International.* 2008. № 20. С. 176-189.
10. **Насыбуллина Р.А., Самогоров В.А.** Влияние феноменологии на современное понимание роли естественного света в архитектуре // *Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Архитектура и дизайн: сб. статей.* Самара: Изд-во Самарского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. С. 181-184.
11. **Бабушкина Е.С.** Архитектура современных музейных зданий. Формирование смысловых моделей // *Вестник Кемеровского государственного университета культуры и искусств.* 2016. № 34. С. 102-108.
12. **Мукажанова Ф.** Теория эмоций Роберта Плутчика. URL: <https://4brain.ru/blog/emotion-theory-of-robert-plutchik/>
13. **Волков А.М.** Неоконструктивизм // *Ярославский архитектурный альманах «Корпус 2».* Ярославль, 2000. С. 6-25. URL: <https://cih.ru/k2/neocon2.html>
14. **Дженкс Ч.** Новая парадигма в архитектуре. Раздел «Загадочное означающее». URL: <https://cih.ru/ae/ad38.html>

Поступила в редакцию 28.07.2023

Одобрена после рецензирования 20.09.2023

Принята к опубликованию 22.09.2023



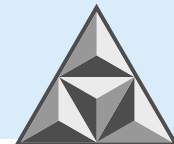
## REFERENCES

1. **Vitruvius.** (2005) *Ten books about architecture. Book 2.* М.: KomKniga. P. 5 (in Russian).
2. **Kopteva, T.V.** (2014) "Spirit of architecture" of Nicolas Le Camus de Meisieres: emotion and architecture, *Dekorativnoe iskusstvo i predmetno-prostranstvennaya sreda. Vestnik MGKhPA*, (3), pp. 126-138 (in Russian).
3. **Babadzhanova, A.I. & Burtseva, E.N.** (2016) Architecture - frozen music // *APRIORI. Seriya: Estestvennye I tekhnicheskie nauki*, (3) [online]. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/arkhitektura-zastyvshaya-muzyka> (in Russian).
4. The Museum of Emotions. (2023) *Feedback and additional information about the project* [online]. Available at: <https://wp.me/p518pU-1wq> (in Russian).
5. **Golubeva, E.V. & Rastorguev, S.V.** (2023) Emotions and architecture, *Sem'desyat shestaya vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya studentov, magistrantov i aspirantov s mezhdunarodnym uchastiem, Yaroslavl': Izd-vo YAGTU*, 3(2). pp. 660-663 (in Russian).
6. **Koval, M.V.** (2020) Architecture responsive to human, *Biznes i dizajn revyu*, 2(18), pp. 11 (in Russian).
7. **Avilova, D.V. & Voronkova, A.A.** (2021) Influence of the architectural environment on human psychological state, *Arkhitektura i dizajn: istoriya, teoriya, innovatsii*, (5), pp. 18-22 (in Russian).
8. **Zabelshanskiy, G.B., Minervin, G.B., Rappaport, A.G. & Somov, G.Yu.** (1985) *The emotional impact of the architectural environment and its organization. Architecture and the emotional world of man.* Moscow: Stroyizdat (in Russian).
9. **Heidegger, M.** (2008) Build inhabit think, *Proekt International*, pp. 176-189 (in Russian).
10. **Nasybullina, R.A. & Samogorov, V.A.** (2016) The impact of phenomenology on the modern understanding of the role of natural light in architecture, *Traditsii i innovatsii v stroitel'stve i arkhitekture. Arkhitektura i dizajn: sb. statej*, Samara: Izd-vo Samarskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta, pp. 181-184 (in Russian).
11. **Babushkina, E.S.** (2016) Architecture of modern museum buildings. Formation of semantic models, *Vestnik Kemerovskogo gosudarstvennogo universiteta kul'tury i iskusstv*, (34), pp. 102-108 (in Russian).
12. **Mukazhanova, F.** (2020) *Robert Plutchik's Theory of Emotion* [online]. Available at: <https://4brain.ru/blog/emotion-theory-of-robert-plutchik/> (in Russian).
13. **Volkov, A.M.** (2000) Neoconstructivism, *Yaroslavskij arhitekturnyj al'manah «Korpus 2»*, pp. 6-25 [online]. Available at: <https://cih.ru/k2/neocon2.html> (in Russian).
14. **Jenks, Ch.** New paradigm in architecture. Section "Mysterious signifier" [online]. Available at: <https://cih.ru/ae/ad38.html>

Received 28.07.2023

Approved after reviewing 20.09.2023

Accepted 22.09.2023



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

При представлении рукописи в журнал авторы должны убедиться, что все цитирования оформлены корректно, указаны заимствованные источники в подписях к рисункам и надписям таблиц. Если таковые не приведены, предполагается, что рисунки и таблицы представляют собой плод авторской деятельности. Редакция осуществляет проверку статей на антиплагиат (не менее 70% оригинальности).

### **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 работы.
- 2) Авторы сохраняют право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся распространения версии работы в опубликованном виде (например, размещение ее в институтском хранилище, публикация в книге), со ссылкой на оригинальную публикацию в этом журнале.

### **Приватность**

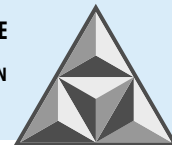
Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте этого журнала, будут использованы исключительно для целей, обозначенных журналом; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

### **ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ**

В журнале «Умные композиты в строительстве Smart Composite in Construction» печатаются работы преподавателей и сотрудников высших учебных заведений РФ, РАН, РААСН, а также других учебных и исследовательских подразделений стран, работающих в сфере промышленного и гражданского строительства и архитектуры.

#### **Перечень специальностей с указанием отраслей науки, которым отвечают рубрики журнала**

- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические);
- 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические);
- 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические);
- 2.1.12. Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура; технические)



### Статьи, направляемые в журнал, должны удовлетворять следующим требованиям:

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

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

3. Основной текст статьи должен быть подготовлен 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 список источников, таблицы (не более 5, ширина 8 см) и рисунки (не более 5, для обзорной статьи – не более 10, ширина 8 см), в том числе помеченные буквами *a*, *b*, *c* и т.д. Рисунки – в редакторе в *MS Excel* или *Origin*, без рамок, формулы – в *Chem Wind*. Они размещаются, как и подписи к ним, таблицы и заголовки, примечания, по тексту статьи. В раздел «Обзорные статьи» принимаются материалы объемом от 20-25 страниц.

При оформлении статьи рекомендуется избегать употребления любых сокращений, кроме общепринятых. При первом упоминании сокращенного термина обязательно приводится его расшифровка в полном виде. Рукописные вставки не допускаются. Кавычки оформляются елочкой. Текст набирается без нумерации страниц.

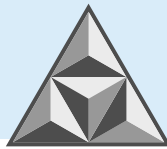
### Структура статьи

На первой странице рукописи слева проставляется индекс по универсальной десятичной классификации (УДК, шрифт 10 пт, прямой, *Verdana*, без отступа. После УДК пропускается строка, дается наименование работы по центру (шрифт 12 пт, прямой, полужирный, все буквы прописные, шрифт *Verdana*). Ниже по центру – инициалы, фамилия авторов (шрифт 11 пт, курсив, *Verdana*, полужирный). После фамилий авторов указываются их место работы: подразделение и название организации, почтовый адрес (шрифт 10 пт, курсив, *Verdana*). Отдельной строкой указывается электронный адрес авторов (курсив). Далее через интервал (1 строка) размещается аннотация (150-200 слов, выравнивание по ширине, размер шрифта 10 пт, курсив, отступ слева 1 см, шрифт *Times New Roman*). После аннотации и интервала (1 строка) полужирным шрифтом курсивом набирается *Ключевые слова* и приводят шрифтом *Times New Roman*, размер шрифта 10 пт, 5-8 словосочетаний (не курсив), без точки в конце.

Эти же данные, кроме УДК, представляются на английском языке, на отдельной странице.

Затем располагается текст статьи (шрифт 12 пт, прямой, *Times New Roman*), в котором через интервал выделяются разделы: ВВЕДЕНИЕ, ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ, РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ, ВЫВОДЫ (в обзорной статье выделяются ВВЕДЕНИЕ, названия подразделов курсивом, ВЫВОДЫ). Подписи к рисункам и названия таблиц представляют на русском и английском языке. Числа, не являющиеся целыми (десятичные), указывают через точку, например: 5.3 или 395.18.

Статья заканчивается разделом СПИСОК ИСТОЧНИКОВ (шрифт 10 пт, *Times New Roman*). Количество цитированных источников – не менее 10, оптимальное – от 15 до 20. Желательно включать работы из журналов, входящих в список ВАК РФ, и не менее 2-3 работ, входящих в международные базы. В обзорных работах принимаются ссылки от 40-50 источников и выше. Под списком литературных источников через интервал слева курсивом приводятся слова: *Поступила в редакцию*, на следующей строке: *Одобрена после рецензирования*, на следующей



строке: *Принята к опубликованию*. Раздел Список источников дополнительно представляется на английском языке (REFERENCES, см. **Оформление литературных ссылок**).

4. В адрес редакции, кроме электронного варианта, по электронной почте направляют сведения об авторах, с указанием их ученой степени, ученого звания, места работы и занимаемой должности, адреса, телефона и e-mail, а также подписями, означающими согласие на опубликование работы.

#### Формат

Редакция принимает тексты, сохраненные в программе *Microsoft Word* в форматах .doc или .docx. Материалы, не соответствующие вышеуказанным требованиям, не рассматриваются.

#### Оформление литературных ссылок

Все русскоязычные литературные источники должны быть указаны на английском языке. 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, год, номер тома, номер или выпуск, диапазон страниц и DOI (при наличии), например, DOI: 10.6060/2012.01.01.

##### Ссылки на статьи из иностранных источников:

**1 Фамилия И.О. (англ.), 2 Фамилия И.О. (англ.)** Название статьи (англ.). *Название журнала (англ.)*. Год. Том (Vol.) цифрами, например, Vol. 5, номер (no.) цифрами, например, no. 3. Диапазон страниц через дефис (например, P. 465-472). DOI (при наличии), например, DOI: 10.13655/1.6.1234567).

##### Ссылки на статьи на русском языке [перевод на английский]:

**1 Фамилия, И.О., 2 Фамилия, И.О.** (Год) Название статьи (на англ. языке), *Название журнала (транслитерация)*, Том (Номер) цифрами, диапазон страниц. [1 Familia, I.O., 2 Familia, I.O. (Год) Перевод названия статьи. *Транслитерация названия журнала*, Том (Номер) цифрами, например, 5(3), диапазон страниц, например, pp. 17-23 (in Russian)].

##### Ссылки на монографии и учебники / учебные пособия на иностранном языке:

**1 Фамилия И.О. (англ.), 2 Фамилия И.О. (англ.)** *Название книги (англ.)*. Номер переиздания. Город (англ.): Издательство (англ.). Год. Общее число страниц (например: 372 p.)

##### Ссылки на монографии на русском языке [перевод на английский]:

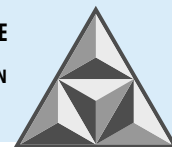
**1 Фамилия, И.О. (англ.) & 2 Фамилия, И.О. (англ.)** (Год) *Название монографии*. Город: Издательство. Общее число страниц (например, 456 с.) [1 Familiya, I.O. & 2 Familiya, I.O. (Год) *Перевод названия монографии на англ. язык*. Город: Издательство (транслитерация) Gorod: Izdatel'stvo. God izdaniya. 456 p. (in Russian)].

##### Ссылки на интернет-ресурсы (рус.):

**Фамилия И.О.** Название материала на сайте [сайт]. Название сайта; 2021 [обновлено 17 октября 2021; процитировано 29 октября 2021]. URL: <http://www.example.ru>

##### Ссылки на интернет-ресурсы (англ.):

**Фамилия, И.О. (англ.)** (Год) *Название материала на сайте (англ.)*. *Название сайта (англ.)*; [обновлено 17 октября 2021; процитировано 29 октября 2021 на англ.] [online]. Available at: <http://www.example.ru>



## Примеры оформления ссылок на литературные источники

### ЛИТЕРАТУРА

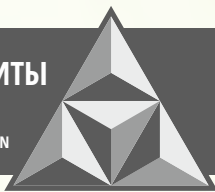
1. **Dvorkin L.I.** The influence of polyfunctional modifier additives on properties of cement-ash finegrained concrete. *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 93, no. 1. P. 121-133. DOI: 10.18720/MCE.93.10.
2. **Калашников В.И., Мороз М.Н., Нестеров В.Ю., Хвастунов В.Л., Макридин Н.И., Василик П.Г.** Металлоорганические гидрофобизаторы для минерально-шлаковых вяжущих // *Строительные материалы*. 2016. № 10. С. 38-39.
3. **Разговоров П.Б., Горшков В.К.** Технологическое оборудование отрасли: расчеты в масложировых производствах: учеб. пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т. 2009. 48 с.
4. **Киселев А.А.** Реновация территории усадьбы Черелисино. URL: <https://cad.ru/support/bz/projects/3ds-max/renovatsiya-territorii-usadby-cherelisino/?ysclid=lh25z2rtja319315116>

### REFERENCES

1. **Dvorkin, L.I.** (2020) The influence of polyfunctional modifier additives on properties of cement-ash fine-grained concrete, *Magazine of Civil Engineering*, 93(1), pp. 121-133. DOI:10.18720/MCE.93.10
2. **Kalashnikov, V.I., Moroz, M.N., Nesterov, V.Yu., Hvastunov, V.L., Makridin, N.I. & Vasilik, P.G.** (2016) Organometallic hydrophobizers for mineral-slag binders, *Stroitel'nye materialy*, (10), pp. 38-39 (in Russian).
3. **Razgovorov, P.B. & Gorshkov, V.K.** (2009) *Processing equipment of industry: calculations in oil and fat productions*. Ivanovo: Ivan. gos. khim.-tekhnol. un-t (in Russian).
4. **Kiselev, A.A.** *Renovation of the Cherelisino estate territory* [online]. Available at: <https://cad.ru/support/bz/projects/3ds-max/renovatsiya-territorii-usadby-cherelisino/?ysclid=lh25z2rtja319315116> (in Russian).



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



**ТОМ 4, ВЫПУСК 3, 2023** | VOL. 4, ISSUE 3

