

ISSN ONLINE 2782-1919

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



**Том 6
выпуск**

**1
2025**

**VOLUME 6
ISSUE 1**

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

Включен в апреле 2023 года в Перечень ВАК РФ

**Том 6
Выпуск 1**

Ярославль 2025

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: С.З. КАЛАЕВА (д.т.н., доцент., Ярославль)

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), М.О. БАКАНОВ (советник РААСН, д.т.н., доц., Москва), В.В. БЕЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Тверь), А.М. БЕЛОСТОЦКИЙ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), Н.И. ВАТИН (советник РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), В.М. ГОТОВЦЕВ (д.т.н., проф., Ярославль), А.В. ЗАХАРОВ (советник РААСН, к. архитектуры, проф., Иваново), А.Б. КАПРАНОВА (д.ф.-м.н., проф., Ярославль), В.И. КОЛЧУНОВ (академик РААСН, д.т.н., проф., Москва), В.Г. КОТЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Йошкар-Ола), Н.Н. КУДРЯШОВ (к. архитектуры, проф., Ярославль), А.Е. ЛЕБЕДЕВ (д.т.н., доц., Ярославль), С.Н. ЛЕОНОВИЧ (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) 44-32-75
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru
Электронный адрес: <http://comincon.ru>

Журнал издается при содействии Российской академии архитектуры и строительных наук

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

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

PUBLISHED BY YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Established in November 2020, published quarterly

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

Volume 6

Issue 1

Yaroslavl 2025

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

«SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION»

EDITORIAL BOARD

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

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ / TABLE OF CONTENTS

Строительные конструкции, здания и сооружения

С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь

- 8 Расчет свободных колебаний башен по методам Фаддеева и Крылова
S.A. Tumakov, G.N. Golub
Calculation of free vibrations frequencies of towers using Faddeev's and Krylov's methods

Гергишан С.В., Овчинников А.А., Ходова И.А.

- 21 Моделирование процесса прогрева строительной конструкции с защитным огнестойким покрытием
Gergishan S.V., Ovchinnikov A.A., Khodova I.A.
Modelling of the heating process of a building structure with a protective fire-resistant coating

Строительные материалы и изделия

Низина Т.А., Леонтьев Н.С.

- 31 Композитная полимерная арматура: анализ опыта производства
Nizina T.A., Leont'ev N.S.
Composite polymer reinforcement: analysis of production experience

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

Буданова Е.А., Ярмолинский В.А., Гриценко Е.А., Егоров Е.С.

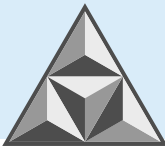
- 46 Метод деформируемого симплекса применительно к изучению прочности и водостойкости асфальтогранулобетона в зависимости от его состава
Budanova E.A., Yarmolinsky V.A., Gritsenko E.A., Egorov E.S.
The deformable simplex method applied to the study of strength and water resistance of asphalt granuloconcrete depending on its composition

- Васильев Ю.Э., Малазония Г.Ш., Кочетков А.В., Иванов А.Ф., Кочетков Д.А.*
- 60 Оценка размеров частиц битумной суспензии с помощью фотосъемки и обработки данных седиментации
- Vasiliev Yu.E., Malazonia G.Sh., Kochetkov A.V., Ivanov A.F., Kochetkov D.A.*
- Estimation of bitumen suspension particle size using photography and sedimentation data processing

Архитектура зданий и сооружений.

Творческие концепции архитектурной деятельности

- Личак Н. А., Ушакова Н. Е., Малышев И.Д.*
- 73 Тенденции развития креативных пространств: Ярославский опыт
- Lichak N.A., Ushakova N.E., Malyshev I.D.*
- Trends in the development of creative spaces: the experience of Yaroslavl
- 84 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.042 + 519.6

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-8-20

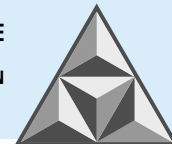
Расчет частот свободных колебаний башен по методам Фаддеева и Крылова

С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь

Сергей Анатольевич Тумаков, Григорий Николаевич Голубь*

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**



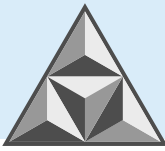
Изучается вопрос динамического расчета частот свободных колебаний для сооружений башенного типа. Предлагается при расчете реальной континуальной системы использовать схему в виде дискретной модели с заменой распределенных масс на сосредоточенные массы. Для решения задачи расчета частот собственных колебаний применены электронные таблицы. Теоретические основы расчета включают описание численных методов раскрытия определителя векового уравнения. Показаны алгоритмы вычислительных операций расчета свободных колебаний систем с конечным числом степеней свободы по методу Д.К. Фаддеева и методу А.Н. Крылова. Разобраны приемы определения корней характеристического уравнения n -степени. Приведены примеры расчета собственных колебаний сооружений башенного типа с пятью и шестью степенями свободы.

Ключевые слова: численные методы, матричные вычисления, частоты свободных колебаний, характеристическое уравнение, электронные таблицы

Для цитирования:

Тумаков С.А., Голубь Г.Н. Расчет свободных колебаний башен по методам Фаддеева и Крылова // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 1. С. 8-20.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-8-20



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-8-20

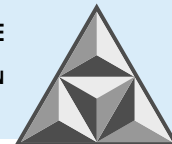
Calculation of free vibration frequencies of towers using Faddeev's and Krylov's methods

S.A. Tumakov, G.N. Golub

Sergey Anatolyevich Tumakov, Grigory Nikolaevich Golub*

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**



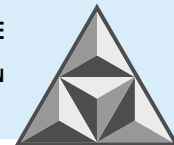
The paper considers the issue of dynamic calculation of free vibration frequencies for tower-type structures. The authors propose to use a scheme in the form of a discrete model with the replacement of distributed masses by concentrated masses when calculating a real continuum system. Spreadsheets were used to solve the problem of calculating natural vibration frequencies. The theoretical basis of the calculation includes a description of numerical methods for solving the determinant of the secular equation. The paper shows algorithms of computational operations for calculating free vibrations of systems with a finite number of freedom degrees using the method by D.K. Faddeev and the method by A.N. Krylov. The approaches to finding the roots of the n -degree characteristic equation are analysed. The paper contains calculation examples of natural vibrations of tower-type structures with five and six degrees of freedom.

Keywords: numerical methods, matrix calculations, free vibration frequencies, characteristic equation, spreadsheets

For citation:

Tumakov S.A., Golub G.N. Calculation of free vibrations frequencies of towers using Faddeev's and Krylov's methods // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. P. 8-20
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-8-20



ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена вопросу использования численных методов определения частот свободных колебаний систем с конечным числом степеней свободы. При этом коэффициенты характеристических уравнений вычисляются в матричном виде. Частоты свободных колебаний находятся при помощи стандартных функций электронных таблиц.

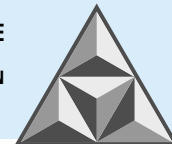
Динамический расчет в настоящее время является обязательной частью расчета зданий и сооружений для определения по СП 20.13330.2016 динамической пульсационной составляющей ветрового воздействия на проектируемое сооружение, зависящей от частот свободных колебаний проектируемого объекта [1, 2]. Кроме этого, для элементов зданий и сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям, расчет собственных колебаний позволит разработать конструктивные решения, исключающие возможность возникновения резонансных явлений.

Таким образом, знание частот собственных колебаний конструкций в частности и здания в целом является необходимым и актуальным.

Динамика – раздел человеческих знаний, изучающий движение материальных тел под действием сил, известна примерно с середины XVIII века. Динамика сооружений развивается с 20-х годов XX века. Это специальный раздел строительной механики, в котором исследуются поведение и критерии состояния систем под различными воздействиями, определяются основные закономерности и разрешающие уравнения расчета сооружений на действия динамических нагрузок. Краткий исторический обзор развития динамики сооружений приведен в [3]. Современное состояние и перспективы развития методов расчета конструкций при различных динамических воздействиях освещены в [4-6].

Здания являются системами с распределенными массами. С точки зрения строительной механики для описания колебательных процессов таких систем необходимо бесконечное число геометрических параметров. Поэтому количество степеней свободы для реальных зданий равно бесконечности. Точный динамический расчет систем с бесконечным числом степеней свободы возможен для отдельных простых конфигураций строительных систем. В большинстве случаев расчет континуальной системы заменяется расчетом дискретной модели, например, конечно-элементной. Однако и в этом случае динамический расчет зданий, моделированных системой с большим количеством конечных элементов, может вызвать определенные затруднения и неудобства. Данная проблема называется обобщенной алгебраической проблемой собственных значений высокого порядка, возникающей при применении численных методов к решению задач строительной механики на свободные колебания. Пути решения этой проблемы проанализированы в [7]. Для упрощения динамического расчета используется метод замены распределенных масс сосредоточенными [8, 9]. Анализ расчетов собственных значений частот здания с распределенными массами в конечно-элементной модели и заменяющей расчетной схемы здания в виде консоли с сосредоточенными массами приведен в [10]. Показано, что при выполнении определенных требований по частоте разбивки и количеству заменяющих масс расхождение в результатах расчета незначительно.

Современный расчет зданий и сооружений чаще всего выполняется с использованием пакетов прикладных программ на мощных быстродействующих компьютерах. Это касается многоэтажных зданий, а также зданий, состоящих из большого количества расчетных конструктивных элементов, приближенный расчет которых не может полностью соответствовать их реальному напряженно-деформированному состоянию. Современные



нормы диктуют обязательное условие расчета сооружений с учетом совместной работы с грунтовым основанием, что также требует применения вычислительной техники. Применяемые промышленные программные комплексы реализуют все статические и динамические расчеты. Однако для несложных расчетных систем, предварительных расчетов или в случаях, когда замена реальной модели конструкции дискретной моделью дает достаточную точность вычисления, прибегают к приближенным методам вычислений, которые позволяют находить искомые величины, не прибегая к помощи вычислительных комплексов.

Целью настоящей работы является исследование применения численных методов в электронных таблицах в матричных вычислениях и решениях характеристических уравнений, связанных с решением задачи собственных значений систем с конечным числом степеней свободы.

Актуальность исследования определяется необходимостью выполнения расчетов собственных колебаний систем для оценки пульсационной составляющей ветровой нагрузки на проектируемое сооружение.

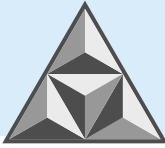
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Исследования проведены при помощи электронных таблиц для персональных компьютеров. Объектом исследования являются функции электронных таблиц применительно к решению задач собственных значений систем с пятью и шестью степенями свободы. Собственные значения найдены численными методами. Коэффициенты определителя векового уравнения определены по правилам строительной механики. Расчет коэффициентов характеристического уравнения сделан в матричной форме по методам Д.К. Фаддеева и А.Н. Крылова [11]. Проведенные исследования закрывают вопрос определения частот свободных колебаний систем с пятью и шестью степенями свободы с помощью электронных таблиц.

Считается, что прямой метод поиска коэффициентов характеристического уравнения и частот свободных колебаний подходит только для систем с небольшим количеством степеней свободы, так как с увеличением степеней свободы, а следовательно, и размерности матрицы векового уравнения сложность задачи очень быстро растет и требует привлечения вычислительной техники. Однако и в этом случае коэффициенты характеристического уравнения для матриц размерности 5×5 и выше определяются с погрешностями, вызываемыми ошибками округления. Сама задача нахождения корней характеристического уравнения часто оказывается плохо обусловленной. В настоящее время разработаны специальные алгоритмы и программы решения проблемы собственных значений для матриц большой размерности [12]. В настоящей работе для сооружений башенного типа показан расчет частот свободных колебаний для матриц размерности 5×5 , а также вычислительный прием, позволяющий определять коэффициенты и корни характеристического уравнения классическим методом для матриц размерности 6×6 .

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим задачу определения частот свободных колебаний сооружения башенного типа, моделированного по методу замены масс упругой системой с конечным числом степеней свободы. Для нахождения частот свободных колебаний ω упругой системы с n степенями свободы следует решить характеристическое уравнение, которое получается при раскрытии определителя, называемого вековым уравнением [13]:



$$\begin{vmatrix} \delta_{11}m_1 - \lambda & \delta_{12}m_2 & \dots & \delta_{1n}m_n \\ \delta_{21}m_1 & \delta_{22}m_2 - \lambda & \dots & \delta_{2n}m_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{n1}m_1 & \delta_{n2}m_2 & \dots & \delta_{nn}m_n - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (1)$$

где δ_{ij} – перемещения по направлению i от действия единичной силы по направлению j , вычисляемые по правилам строительной механики; $\lambda = 1/\omega^2$.

Результатом раскрытия определителя (1) является характеристическое алгебраическое уравнение, полином n -степени относительно λ :

$$\lambda^n + p_1\lambda^{n-1} + p_2\lambda^{n-2} + \dots + p_n = 0. \quad (2)$$

Коэффициенты p_i уравнения (2) можно найти несколькими вычислительными методами линейной алгебры. Покажем два метода, которые достаточно просто и удобно реализуются при помощи электронных таблиц. Применение электронных таблиц значительно облегчает вычисления частот собственных колебаний систем с числом степеней свободы больше трех. Создание алгоритмов расчета для сооружений с однотипными конструктивными схемами позволяет автоматизировать процесс определения частот собственных колебаний, существенно упрощает отдельные операции вычислений, ускоряет процесс расчета в целом и повышает его точность.

Приведем решение задачи раскрытия определителя (1) методом Фаддеева [11], согласно которому коэффициенты p_i вычисляются как следы некоторых матриц A_1, A_2, \dots, A_n , полученных по формулам преобразования:

$$A_1 = DM, p_1 = -tr(A_1), B_1 = A_1 + p_1E; \quad (3)$$

$$A_2 = A_1B_1, p_2 = -(1/2)tr(A_2), B_2 = A_2 + p_2E; \quad (4)$$

...

$$A_n = A_1B_{n-1}, p_n = -(1/n)tr(A_n), B_n = A_n + p_nE = 0, \quad (5)$$

где M – диагональная матрица масс, E – единичная матрица, D – матрица податливости, определяемая выражением:

$$D = \begin{vmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \dots & \delta_{1n} \\ \delta_{21} & \dots & \delta_{22} & \dots & \delta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \delta_{n1} & \delta_{n2} & \dots & \dots & \delta_{nn} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Найдем частоты свободных колебаний башни связи, моделированной по методу замены масс в виде консоли с пятью сосредоточенными массами и постоянной изгибной жесткостью $EI = \text{const}$ (рис. 1).

Загружаем последовательно расчетную схему пятью единичными силовыми факторами $J_i = 1$ и строим эпюры моментов. Перемещения δ_{ij} вычислим по формуле Максвелла-Мора перемножением единичных эпюр моментов (правило Верещагина). Для консоли перемножение единичных эпюр моментов несложно преобразовать:

$$\delta_{ii} = \frac{c_i^3}{3EI}; \quad (7)$$

$$\delta_{ij} = \frac{c_i^2}{2EI} \left(c_j - \frac{c_i}{3} \right), \quad (8)$$

где c_i, c_j – ординаты единичных эпюр моментов, причем при перемножении эпюр M_i и M_j в формулу (8) нужно подставлять $c_j > c_i$.

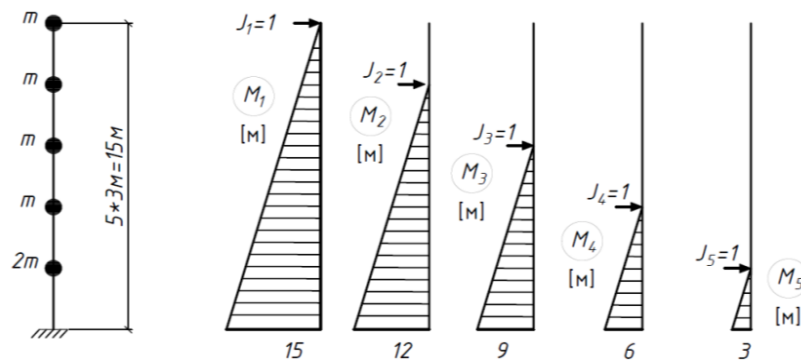
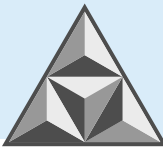


Рис. 1. Расчетная схема консоли с пятью сосредоточенными массами и единичные эпюры

Fig. 1. Calculation diagram of a console with five concentrated masses and unit diagrams

Заполняем матрицу податливости (6) вычисленными единичными перемещениями:

$$D = \frac{1}{EI} \begin{vmatrix} 1125 & 792 & 486 & 234 & 63 \\ 792 & 576 & 364.5 & 180 & 49.5 \\ 486 & 364.5 & 243 & 126 & 36 \\ 234 & 180 & 126 & 72 & 22.5 \\ 63 & 49.5 & 36 & 22.5 & 9 \end{vmatrix}.$$

Умножаем матрицу податливости на диагональную матрицу масс и получаем матрицу A_1 :

$$A_1 = \frac{m}{EI} \begin{vmatrix} 1125 & 792 & 486 & 234 & 126 \\ 792 & 576 & 364.5 & 180 & 99 \\ 486 & 364.5 & 243 & 126 & 72 \\ 234 & 180 & 126 & 72 & 45 \\ 63 & 49.5 & 36 & 22.5 & 18 \end{vmatrix}.$$

Коэффициент p_1 вычисляем как след матрицы A_1 :

$$p_1 = -tr(A_1) = -2.03 \cdot 10^3 \frac{m}{EI}.$$

Вычисляем по формуле (2) матрицу B_1 :

$$B_1 = \left(\frac{m}{EI}\right)^2 \begin{vmatrix} -909 & 792 & 486 & 234 & 126 \\ 792 & -1458 & 364.5 & 180 & 99 \\ 486 & 364.5 & -1791 & 126 & 72 \\ 234 & 180 & 126 & -1962 & 45 \\ 63 & 49.5 & 36 & 22.5 & -2016 \end{vmatrix}.$$

Выполняем в электронной таблице стандартные операции по сложению и перемножению матриц по формулам (4) и (5) и получаем остальные коэффициенты характеристического уравнения:

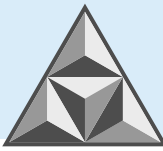
$$p_2 = -tr(A_2) = 1.22 \cdot 10^5 \frac{m^2}{(EI)^2}; \quad p_3 = -tr(A_3) = -1.11 \cdot 10^6 \frac{m^3}{(EI)^3};$$

$$p_4 = -tr(A_4) = 2.45 \cdot 10^6 \frac{m^4}{(EI)^4}; \quad p_5 = -tr(A_5) = -1.34 \cdot 10^6 \frac{m^5}{(EI)^5}.$$

Подставляем вычисленные коэффициенты p_i в формулу (2):

$$\lambda^5 - 2.03 \cdot 10^3 \frac{m\lambda^4}{EI} + 1.22 \cdot 10^5 \frac{m^2\lambda^3}{(EI)^2} - 1.11 \cdot 10^6 \frac{m^3\lambda^2}{(EI)^3} + 2.45 \cdot 10^6 \frac{m^4\lambda}{(EI)^4} - 1.34 \cdot 10^6 \frac{m^5}{(EI)^5} = 0.$$

Решаем полученное уравнение относительно λ в электронной таблице. Для этого в электронной таблице строим график функции $f(\lambda)$ и определяем интервалы, в которых данная функция меняет знак. Размер шага $\Delta\lambda$ определяем по графику. Корни уравнения в интервалах находим с использованием стандартной опции электронной таблицы «Подбор параметра» (закладка «Данные» в команде «Анализ если что»).



Получили следующие значения корней характеристического уравнения:

$$\lambda_5 = 0.821 \frac{m}{EI}; \quad \lambda_4 = 2.139 \frac{m}{EI}; \quad \lambda_3 = 7.569 \frac{m}{EI}; \quad \lambda_2 = 50.937 \frac{m}{EI}; \quad \lambda_1 = 1972.534 \frac{m}{EI}.$$

Частоты собственных колебаний получаем из λ как $\omega = \sqrt{1/\lambda}$:

$$\omega_1 = 0.0225 \sqrt{\frac{EI}{m}}; \quad \omega_2 = 0.1401 \sqrt{\frac{EI}{m}}; \quad \omega_3 = 0.3635 \sqrt{\frac{EI}{m}}; \quad \omega_4 = 0.6837 \sqrt{\frac{EI}{m}}; \quad \omega_5 = 1.1034 \sqrt{\frac{EI}{m}}.$$

Результаты расчетов проверены на ортогональность главных форм свободных колебаний.

Покажем раскрытие определителя методом Крылова [11], в соответствии с которым вычисление коэффициентов p_i характеристического полинома (2) сводится к решению линейной системы уравнений:

$$p_1 y_j^{(n-1)} + p_2 y_j^{(n-2)} + \dots + p_n y_j^{(0)} = -y_j^{(n)} \quad (j = 1, 2, \dots, n). \quad (9)$$

Коэффициенты в ней находятся по формулам:

$$y_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j^{(0)}; \quad y_i^{(2)} = \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j^{(1)}; \quad \dots; \quad y_i^{(n)} = \sum_{j=1}^n a_{ij} y_j^{(n-1)}. \quad (10)$$

Вычислим частоты свободных колебаний башни связи, моделированной по методу замены масс в виде консоли с шестью сосредоточенными массами и постоянной изгибной жесткостью $EI = \text{const}$ (рис. 2).

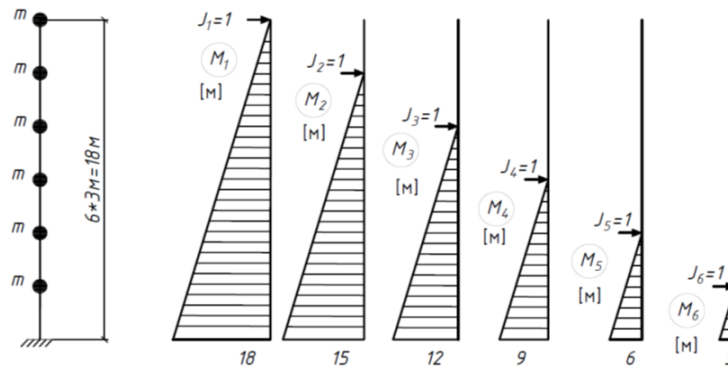


Рис. 2. Расчетная схема консоли с шестью сосредоточенными массами и единичные эпюры

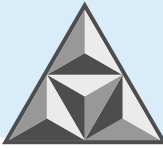
Fig. 2. Calculation diagram of a console with six concentrated masses and unit diagrams

Загружаем последовательно расчетную схему шестью единичными силовыми факторами $J_i = 1$ и строим эпюры моментов. Перемещения δ_{ij} вычисляются по формуле Максвелла-Мора стандартным перемножением единичных эпюр моментов (правило Верещагина). Применим следующий вычислительный прием. Поскольку расчетная схема имеет регулярный шаг расположения масс размером $s = 3$ м, вычисленные координаты масс и ординаты эпюр моментов можно представить в виде $c_i = k_i \cdot s$. Тогда перемножение единичных эпюр моментов несложно преобразовать к виду:

$$\delta_{ii} = s^3 \frac{k_i^3}{3EI}; \quad (11)$$

$$\delta_{ij} = s^3 \frac{k_i^2}{2EI} \left(k_j - \frac{k_i}{3} \right), \quad (12)$$

где k_i, k_j – множители кратности ординат единичных эпюр моментов ($k_1 = 6, k_2 = 5, k_3 = 4, k_4 = 3, k_5 = 2, k_6 = 1$), причем при перемножении эпюр M_i и M_j в формулу (8) нужно подставлять $k_j > k_i$.



Заполняем матрицу податливости (6) вычисленными единичными перемещениями:

$$D = \frac{s^3}{EI} \begin{vmatrix} 72 & 54.17 & 37.33 & 22.5 & 10.67 & 2.83 \\ 54.15 & 41.67 & 29.33 & 18.00 & 8.67 & 2.33 \\ 37.33 & 29.33 & 21.33 & 13.50 & 6.67 & 1.83 \\ 22.50 & 18.00 & 13.50 & 9.00 & 4.67 & 1.33 \\ 10.67 & 8.67 & 6.67 & 4.67 & 2.67 & 0.83 \\ 2.83 & 2.33 & 1.83 & 1.33 & 0.83 & 0.33 \end{vmatrix}.$$

Умножаем матрицу податливости на диагональную матрицу масс и получаем матрицу A:

$$A = \frac{ms^3}{EI} \begin{vmatrix} 72 & 54.17 & 37.33 & 22.5 & 10.67 & 2.83 \\ 54.15 & 41.67 & 29.33 & 18.00 & 8.67 & 2.33 \\ 37.33 & 29.33 & 21.33 & 13.50 & 6.67 & 1.83 \\ 22.50 & 18.00 & 13.50 & 9.00 & 4.67 & 1.33 \\ 10.67 & 8.67 & 6.67 & 4.67 & 2.67 & 0.83 \\ 2.83 & 2.33 & 1.83 & 1.33 & 0.83 & 0.33 \end{vmatrix}.$$

Выбираем начальный вектор $y^{(0)} = \begin{vmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{vmatrix}$.

Определяем координаты последующих векторов по методу Крылова, умножая матрицу A на координаты предыдущих векторов. Вычисления выполняем в электронной таблице.

$$y^{(1)} = A \cdot y^{(0)} = \frac{ms^3}{EI} \begin{vmatrix} 72 \\ 54.17 \\ 37.33 \\ 22.5 \\ 10.67 \\ 2.83 \end{vmatrix}; \quad y^{(2)} = A \cdot y^{(1)} = \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^2 \begin{vmatrix} 10140 \\ 7756 \\ 5453 \\ 3355 \\ 1622 \\ 439 \end{vmatrix};$$

$$y^{(3)} = A \cdot y^{(2)} = \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^3 \begin{vmatrix} 1.45 \cdot 10^6 \\ 1.11 \cdot 10^6 \\ 7.79 \cdot 10^5 \\ 4.80 \cdot 10^5 \\ 2.32 \cdot 10^5 \\ 6.28 \cdot 10^4 \end{vmatrix}; \quad y^{(4)} = A \cdot y^{(3)} = \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^4 \begin{vmatrix} 2.07 \cdot 10^8 \\ 1.58 \cdot 10^8 \\ 1.11 \cdot 10^8 \\ 6.85 \cdot 10^7 \\ 3.32 \cdot 10^7 \\ 8.96 \cdot 10^5 \end{vmatrix};$$

$$y^{(5)} = A \cdot y^{(4)} = \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^5 \begin{vmatrix} 2.95 \cdot 10^{10} \\ 2.26 \cdot 10^{10} \\ 1.59 \cdot 10^{10} \\ 9.79 \cdot 10^9 \\ 4.73 \cdot 10^9 \\ 1.28 \cdot 10^9 \end{vmatrix}; \quad y^{(6)} = A \cdot y^{(5)} = \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^6 \begin{vmatrix} 4.22 \cdot 10^{12} \\ 3.23 \cdot 10^{12} \\ 2.27 \cdot 10^{12} \\ 1.40 \cdot 10^{12} \\ 6.76 \cdot 10^{11} \\ 1.83 \cdot 10^{11} \end{vmatrix}.$$

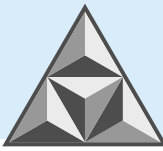
Подставляем полученные размеры векторов в выражение (9) и получаем систему уравнений относительно p_i . Решая полученную систему уравнений в электронной таблице при помощи стандартных встроенных функций МОБР и МУМНОЖ, получаем значения коэффициентов характеристического уравнения:

$$p_1 = -1.47 \cdot 10^2 \frac{ms^3}{EI}; \quad p_2 = 5.93 \cdot 10^2 \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^2; \quad p_3 = -3.18 \cdot 10^2 \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^3;$$

$$p_4 = 3.98 \cdot 10 \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^4; \quad p_5 = -1.25 \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^5; \quad p_6 = 1.07 \cdot 10^2 \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^6.$$

Подставляем вычисленные коэффициенты p_i в формулу (2):

$$\lambda^6 - 147\lambda^5 \frac{ms^3}{EI} + 593\lambda^4 \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^2 - 318\lambda^3 \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^3 + 39.8\lambda^2 \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^4 - 1.25\lambda \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^5 + 107 \left(\frac{ms^3}{EI}\right)^6 = 0.$$



Решаем полученное уравнение относительно λ в электронной таблице. Для этого в ней выполняем операции, аналогичные показанным выше для системы с пятью сосредоточенными массами. При этом корректируем значения корней, подставляя полученные размеры напрямую в вековое уравнение (1) при помощи стандартной функции МОПРЕД и опции «Подбор параметра» с закладки «Данные» в команде «Анализ если что».

Получаем следующие значения корней характеристического уравнения свободных колебаний системы с шестью сосредоточенными массами:

$$\lambda_6 = 0.0146 \frac{ms^3}{EI}; \quad \lambda_5 = 0.025 \frac{ms^3}{EI}; \quad \lambda_4 = 0.123 \frac{ms^3}{EI};$$

$$\lambda_3 = 0.443 \frac{ms^3}{EI}; \quad \lambda_2 = 3.530 \frac{ms^3}{EI}; \quad \lambda_1 = 142.832 \frac{ms^3}{EI}.$$

Частоты собственных колебаний получаем из λ как $\omega = \sqrt{1/\lambda}$:

$$\omega_1 = 0.0837 \sqrt{\frac{EI}{ms^3}}; \quad \omega_2 = 0.532 \sqrt{\frac{EI}{ms^3}}; \quad \omega_3 = 1.502 \sqrt{\frac{EI}{ms^3}},$$

$$\omega_4 = 2.857 \sqrt{\frac{EI}{ms^3}}; \quad \omega_5 = 6.325 \sqrt{\frac{EI}{ms^3}}; \quad \omega_6 = 8.272 \sqrt{\frac{EI}{ms^3}}$$

Результаты расчетов проверены на ортогональность главных форм свободных колебаний.

Расхождение с точным решением размера первой частоты собственных колебаний консольной балки с распределенной массой составляет менее 3%.

Произведенные расчеты в настоящем исследовании показаны для упругих систем с постоянной изгибной жесткостью. Однако примененные численные методы позволяют учитывать также ступенчатое изменение изгибной жесткости по высоте башни.

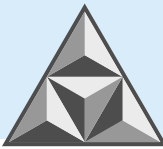
ВЫВОДЫ

Показана возможность применения численных методов Д.К. Фаддеева и А.Н. Крылова и электронных таблиц для расчета частот свободных колебаний элементов строительных конструкций. Выявлено, что результаты расчетов с использованием электронной таблицы находятся в корреляции с таковыми, полученными с применением промышленных пакетов программ.

Разработанная электронная таблица рекомендуется для практического использования в динамических расчетах сооружений башенного типа с конечным числом степеней свободы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Попов Н.А.** Рекомендации по уточненному динамическому расчету зданий и сооружений на действие пульсационной составляющей ветровой нагрузки. М.: ЦНИИСК. 2000. 45 с.
2. **Глушко А.П.** Ветровое воздействие, включая пульсационную составляющую ветровой нагрузки // *Молодой ученый*. 2024. № 22 (521). С. 100-101.
3. **Арсентьева А.А., Протасов А.М., Тумаков С.А.** Исторический обзор динамических воздействий на здания и сооружения: собственные колебания. Основные вопросы и задачи // *Семьдесят первая Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов высш. учеб. завед. с межд. уч.*: Сб. мат. Ч. 2. Ярославль, Ярославский гос. техн. ун-т. 2018. С. 764-766.
4. **Кулябко В.В.** Динамика сооружений и проявление аспектов науки и безопасности в строительных объектах и процессах // *Наука и безопасность*. 2012. № 5. С. 86-96.



5. **Tamrazyan A., Chernik V.** Equivalent viscous damping ratio for a RC column under seismic load after a fire // *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.*, 7, Tashkent, 11-14 ноября 2020 года. Tashkent, 2021. P. 012095. DOI: 10.1088/1757-899X/1030/1/012095.
6. **Темнов В.Г.** Автоматизированный расчет и оптимизация конструкций быстровозводимых зданий из унифицированных элементов на статические и динамические воздействия // *Вестник гражданских инженеров*. 2020. № 3 (80). С. 62-71. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-3-62-71.
7. **Игнатъев В.А., Ромашкин В.Н.** Алгебраическая проблема собственных векторов и собственных значений высокого порядка в задачах динамики и устойчивости конструкций // *Интернет-вестник ВолгГАСУ*. 2015. № 2 (38). С. 7.
8. **Лампси Б.Б., Хазов П.А., Кофорова О.М., Генералова А.А.** Методы определения собственных частот многоэтажных зданий // *Вестник Волж. регион. отд. Росс. акад. архитектуры и строит. наук*. 2016. № 19. С. 176-180.
9. **Хазов П.А., Кожанов Д.А., Анущенко А.М., Сатанов А.А.** Динамика строительных конструкций при экстремальных природных воздействиях: колебания, прочность, ресурс. Нижегородский гос. арх.-строит. ун-т. Нижний Новгород: 2022. 96 с.
10. **Спиридонов С.В., Ключникова О.Н.** Определение форм и частот собственных колебаний высотных зданий при расчете пульсационной составляющей ветровой нагрузки // *Вестник КИГИТ*. 2012. № 3 (21). С. 16-25.
11. **Фаддеев Д.К., Фаддеева В.Н.** Вычислительные методы линейной алгебры. М.: Физматгиз. 1960. 656 с.
12. **Bathe K.J.** *Finite Element Procedures*. New Jersey: Prentice Hall, 1996. 1051 p. URL: https://www.academia.edu/8326777/FEA_Finite_Element_Procedures_by_K_J_Bathe (дата обращения 28.12.2024)
13. **Волков А.С., Плотников Ю.Г.** Динамические расчеты упругих систем: учеб. пособие. ГОУ ВПО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения». Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2007. 95 с.

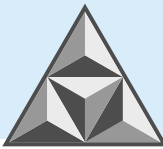
Поступила в редакцию 15.01.2025

Одобрена после рецензирования 21.02.2025

Принята к опубликованию 04.03.2025

REFERENCES

1. **Popov, N.A.** (2000), Rekomendatsii po utochnennomu dinamicheskomu raschetu zdaniy i sooruzheniy na deistvie pul'satsionnoj sostavlyayushchej vetrovoj nagruzki [Recommendations on the updated dynamic calculation of buildings and structures for the action of the pulsation component of wind load], TsNIISK, Moscow, Russia (in Russian).
2. **Glushko, A.P.** (2024), "Wind impact, including the pulsation component of the wind load", *Molodoj uchenyi [Young Scientist]*, vol. 22 (521), pp. 100-101 (in Russian).
3. **Arsentieva, A.A., Protasov, A.A. and Tumakov, S.A.** (2018), Historical review of dynamic effects on buildings and structures: natural vibrations. Basic questions and tasks, Sem'desyat pervaya Vseros. nauch.-tekhn. konf. studentov, magistrantov i aspirantov vyssh. ucheb. zaved. s mezhd. uch.: Sb. mat. [Seventy-first All-Russian Scientific and Technical Conf. of students, undergraduates and postgraduates of higher educational institutions with international studies: Collection of mat.], Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, pp. 764-766 (in Russian).
4. **Kulyabko, V.V.** (2012), "Dynamics of constructions and manifestation of science and safety aspects in construction objects and processes", *Nauka i bezopasnost' [Science and Safety]*, vol. 5, pp. 86-96 (in Russian).
5. **Tamrazyan A. and Chernik V.** (2021), "Equivalent viscous damping ratio for a RC column under seismic load after a fire", *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.*, 7, Tashkent, 11-14 Nov. 2020, Tashkent, p. 012095. DOI 10.1088/1757-899X/1030/1/012095.

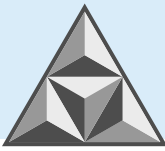


6. **Temnov, V.G.** (2020), "Automated calculation and optimisation of the structures of the fast-erected buildings from the unified elements for static and dynamic impacts", Vestnik grazhdanskikh inzhenerov [Vestnik of Civil Engineers], vol. 3 (80), pp. 62-71. DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-3-62-71 (in Russian).
7. **Ignatyev, V.A. and Romashkin, V.N.** (2015), "Algebraic problem of eigenvectors and high-order eigenvalues in the tasks of dynamics and stability of structures", Internet-vestnik VolgGASU, vol. 2, no. 38, p. 7 (in Russian).
8. **Lampsey, B.B., Khazov, P.A., Koforova, O.M. and Generalova, A.A.** (2016), "Methods for determining the natural frequencies of multi-storey buildings", Vestnik Volzh. region. otd. Ross. akad. arkhitektury i stroit. nauk, vol. 19, pp. 176-180 (in Russian).
9. **Khazov, P.A., Kozhanov, D.A., Anushchenko, A.M. and Satanov, A.A.** (2022), Dinamika stroitel'nykh konstrukcij pri ekstremal'nykh prirodnykh vozdeistviyakh: kolebaniya, prochnost', resurs [Dynamics of building structures under extreme natural influences: vibrations, strength, resource], Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering, Nizhny Novgorod, Russia (in Russian).
10. **Spiridonov S.V. and Klyuchnikova O.N.** (2012), "Determination of shapes and frequencies of natural vibrations of high-rise buildings when calculating the pulsation component of wind load", Vestnik KIGIT, vol. 3, no. 21, pp. 16-25 (in Russian).
11. **Faddeev, D.K. and Faddeeva V.N.** (1960), Vychislitel'nye metody lineinoi algebry [Computational Methods of Linear Algebra], Fizmatgiz, Moscow, UdSSR (in Russian).
12. **Bathe, K-J.** (1996), Finite Element Procedures, Prentice Hall, New Jersey. URL: https://www.academia.edu/8326777/FEA_Finite_Element_Procedures_by_K_J_Bathe (accessed 28.12.2024)
13. **Volkov, A.S. and Plotnikov, Yu.G.** (2007), Dinamicheskie raschety uprugikh sistem: ucheb. posobie [Dynamic calculations of elastic systems: textbook], Far Eastern State University of Railway Transport, Khabarovsk, Russia (in Russian).

Received 15.01.2025

Approved 21.02.2025

Accepted 04.03.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.9-13 : 691.335

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-21-30

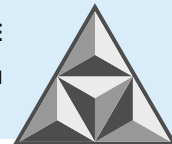
Моделирование процесса прогрева строительной конструкции с защитным огнестойким покрытием

С.В. Гергишан, А.А. Овчинников*, И.А. Ходова

Сергей Васильевич Гергишан, Александр Александрович Овчинников*, Ирина Анатольевна Ходова

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

gergishmpower@mail.ru, nisigasa@mail.ru, hodova_irina@bk.ru



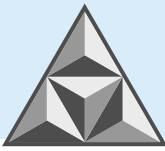
Рассматриваются вопросы повышения огнестойкости железобетонных строительных конструкций промышленных предприятий. Приведены данные о пожарах на промышленных предприятиях и объектах инфраструктуры, анализируется нанесенный ущерб. Предлагается авторская методика повышения огнестойкости конструкций путем нанесения на их поверхность защитных покрытий. При помощи программного средства ELCUT 6.6 проведены численные эксперименты для нестационарного теплопереноса при пожаре в закрытом помещении. Моделирование процесса прогрева плиты перекрытия доказывает эффективность применения огнезащитного покрытия, при этом огнестойкость конструкции повышается в четыре раза.

Ключевые слова: строительные конструкции, защитное покрытие, пожары, моделирование процесса прогрева, повышение огнестойкости

Для цитирования:

Гергишан С.В., Овчинников А.А., Ходова И.А. Моделирование процесса прогрева строительной конструкции с защитным огнестойким покрытием // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 1. С. 21-30. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-21-30



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-21-30

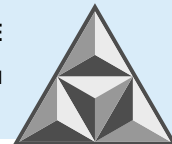
Modelling of the heating process of a building structure with a protective fire-resistant coating

S.V. Gergishan, A.A. Ovchinnikov*, I.A. Khodova

Sergey Vasilyevich Gergishan, Aleksandr Aleksandrovich Ovchinnikov*, Irina Anatolyevna Khodova

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

gergishmpower@mail.ru, nisigasa@mail.ru, hodova_irina@bk.ru



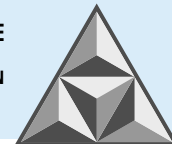
The paper considers the issues of increasing the fire resistance of reinforced concrete building structures of industrial enterprises. The authors provide data on fires at industrial enterprises and infrastructure facilities and analyse the damage caused. The paper offers the author's method of increasing the fire resistance of structures by applying protective coatings to their surface. The authors have performed numerical experiments for unsteady heat transfer in an indoor fire using the ELCUT 6.6 software tool. Modelling of the floor slab heating process proves the effectiveness of the fire protection coating, with a fourfold increase in the fire resistance of the structure.

Keywords: building structures, protective coating, fires, modelling of the heating process, fire resistance improvement

For citation:

Gergishan S.V., Ovchinnikov A.A., Khodova I.A. Modelling of the heating process of a building structure with a protective fire-resistant coating // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. P. 21-30. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-21-30



ВВЕДЕНИЕ

По данным Государственной противопожарной службы МЧС Российской Федерации, количество пожаров на промышленных предприятиях не снижается. Хотя в процентном соотношении гибель людей на пожарах за 2023 год на таких объектах составила лишь 1.3%, прямой материальный ущерб от пожаров является внушительным – около 20% в исчислении от общего ущерба [1]. Таким образом, повышение пожарной безопасности в производстве возводимых строительных объектов, как и ранее, требует активного решения.

Основными причинами пожаров являются неосторожное обращение с огнем и аварийный режим работы электротехнических установок в промышленных зданиях и сооружениях. В условиях проведения специальной военной операции возросло число пожаров на объектах топливно-энергетического комплекса Российской Федерации, возникающих в результате атак беспилотных средств поражения.

Пожары на опасных производственных объектах требуют особого внимания. Они не только создают риск жизни для работников, но и уничтожают оборудование, приводят к необратимым повреждениям капитальных строений. Для повышения огнестойкости строительных конструкций, обеспечения нераспространения огня и даже полной защиты зданий и сооружений от пожара применяют огнезащитные покрытия и футеровки. Применение таких покрытий позволяет избежать локальных возгораний, распространения огня, а также повреждения и разрушения строительных конструкций в результате высокотемпературного воздействия пламени и теплового излучения. Разработка защитных покрытий, а также оценка, диагностика и прогнозирование повышения огнестойкости строительных конструкций при их применении является актуальной научной задачей.

Приведем несколько примеров крупных пожаров на промышленных предприятиях в Российской Федерации, зафиксированных в России за последние два года [2]:

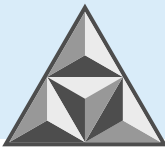
– 8 августа 2023 г. в Ковровском районе Владимирской обл. на предприятии по производству акриловых ванн возник пожар. Его площадь составила 4.1 тыс. м². По данным регионального Главного управления МЧС, эвакуированы 200 чел.; пострадавших в результате инцидента нет. Причиной пожара стал аварийный режим работы электросети;

– 15 декабря 2023 г. в поселке Бобровском Сысертского городского округа в Свердловской обл. загорелась кровля производственного цеха на площади 1.3 тыс. м². Из здания эвакуированы 40 чел. По данным регионального Главного управления МЧС, пострадавших при пожаре нет;

– 17 января 2024 г. в Шахтах Ростовской обл. произошел пожар на заводе «Авангард» в цехе по производству наполнителей для матрасов и подушек на площади 360 м². В результате происшествия пострадали 10 чел., при этом шестеро из них были госпитализированы.

Такие пожары на промышленных предприятиях и строительных объектах приводят к колоссальному материальному ущербу, причиняют вред жизни и здоровью наших соотечественников.

Наиболее распространенным строительным материалом, применяемым для промышленного и жилищного строительства, является железобетон. Огнестойкость железобетонных строительных конструкций определяется многими факторами и для стандартных элементов находится в пределах R45–R90. Основными факторами, оказывающими влияние на огнестойкость здания или сооружения в целом, являются габаритные параметры отдельных элементов, эксплуатационные нагрузки, толщина защитного слоя бетона, его вид и влажность, тип арматуры, параметры окружающей среды и др. [3].



Наиболее опасными железобетонными конструкциями при пожаре являются изгибаемые элементы перекрытия. Если пожар протекает под такими конструкциями, именно в перекрытиях быстрее всего достигаются температуры, приводящие к потере несущей способности и как следствие обрушению. При этом, если перекрытия являются жестким диском связи, обеспечивающим устойчивость здания, обрушение перекрытий приведет к разрушению здания в целом, даже если пожар локализован в одном помещении. Поэтому к таким элементам предъявляют требование повышенной огнестойкости – не ниже REI 60 [4].

Железобетон является композиционным материалом, где одновременно на восприятие нагрузок работают и бетон, и металлическая арматура. При этом бетон несет нагрузки на сжатие, а арматура – нагрузки на растяжение. При высокотемпературном воздействии тяжелый бетон на портландцементе интенсивно дегидратирует и разрушается в результате повторной гидратации свободной извести уже после ликвидации пожара [5]. Разрушение железобетонных конструкций, особенно изгибаемых, происходит в результате потери несущей способности металлической арматуры при достижении критической температуры [6]. Например, для балочной плиты перекрытия высотой 160 мм, длиной 5500 мм и шириной 1200 мм (из тяжелого бетона класса В25, с арматурой класса А400 Ø16 и защитным слоем 15 мм) временная длительно действующая нагрузка равна 6500 Па; критическая температура для арматуры составляет 560°C [7].

Значительное повышение огнестойкости типовых железобетонных конструкций может быть достигнуто при использовании огнезащитных покрытий различной природы. Наиболее перспективными являются покрытия на основе жаростойких вяжущих веществ, обеспечивающие высокую адгезию, огнеупорность и термостойкость; при этом сохраняются высокая прочность и низкая теплопроводность. В качестве одного из вариантов покрытия исследованы характеристики жаростойкого бетона на основе жидкого стекла с шамотным наполнителем [8-10].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Эффективность применения огнестойких покрытий можно оценить с использованием математического моделирования процесса нагрева конструкции с покрытием и без такового. Моделирование в данной работе осуществляли при помощи программного комплекса ELCUT 6.6.

Температурный режим для решения нестационарной задачи теплопередачи определяли согласно п. 6 ГОСТ 30247.0-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования»:

$$T - T_0 = 345 \lg(8 \tau + 1), \quad (1)$$

где T – температура среды, соответствующая времени τ , °C;

T_0 – температура среды до начала теплового воздействия (принимают равной температуре окружающей среды), в обычных условиях она составляет 20°C;

τ – время, исчисляемое от начала испытания, мин.

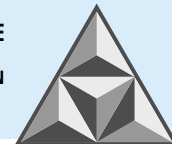
При моделировании распределения тепловых полей использовали уравнение теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) = -q(T) - c(T) p \frac{\partial T}{\partial \tau}, \quad (2)$$

где T – температура;

τ – время;

$\lambda_x(y, z)$ – компоненты тензора теплопроводности (в линейной постановке);



$\lambda(T)$ – теплопроводность как функция температуры, представленная кубическим сплайном (анизотропия не поддерживается в нелинейной постановке);

$q(T)$ – удельная мощность тепловыделения; в линейной постановке – константа, в нелинейной постановке – функция температуры, задаваемая кубическим сплайном;

$c(T)$ – удельная теплоемкость материала конструкции; в нелинейном случае – функция температуры, аппроксимированная кубическими сплайнами;

ρ – плотность материала конструкции.

Граничные условия теплового потока с нагреваемой стороны заданы суммой потоков, создаваемых конвекцией (3) и радиацией (4).

Конвекция

$$F_n = \alpha (T - T_0), \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи ($25 \text{ Вт} \cdot \text{К}^{-1} \cdot \text{м}^{-2}$);

T_0 – температура окружающей среды.

Радиация

$$F_n = \beta \cdot k_{SB} (T^4 - T_0^4), \quad (4)$$

где k_{SB} – константа Стефана-Больцмана ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$);

β – коэффициент поглощения поверхности ($\beta = 0.7$);

T_0 – температура поглощающей среды.

Граничные условия на противоположной стороне задаются только для условий естественной конвекции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования процесса нагрева конструкции представлены на рис. 1-3.

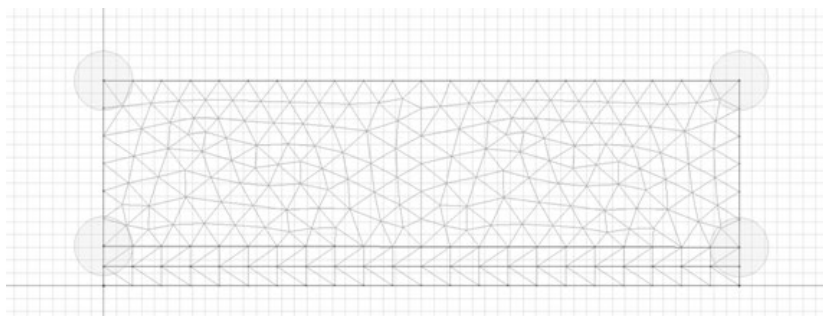


Рис. 1. Схема расположения слоев материала в конструкции

Fig. 1. Layout of material layers in the structure

На рис. 1 представлен вертикальный разрез монолитной плиты по оси рабочей арматуры. Верхний слой моделирует теплотехнические характеристики железобетонной конструкции, внутренний слой имеет характеристики стальной арматуры, а нижний – свойства защитного слоя бетона. Верхнее ребро на схеме задается уравнением конвекции (3) с теплотехническими параметрами для внутренних помещений с температурой воздуха 20°C . Нижнее ребро моделирует состояние пожара под плитой перекрытия по выражениям (3) и (4) с характеристиками, соответствующими условиям развивающегося пожара (1). Сетка конечных элементов имеет 245 узлов. Моделирование тепловых полей производится для бесконечной (неограниченной) пластины.

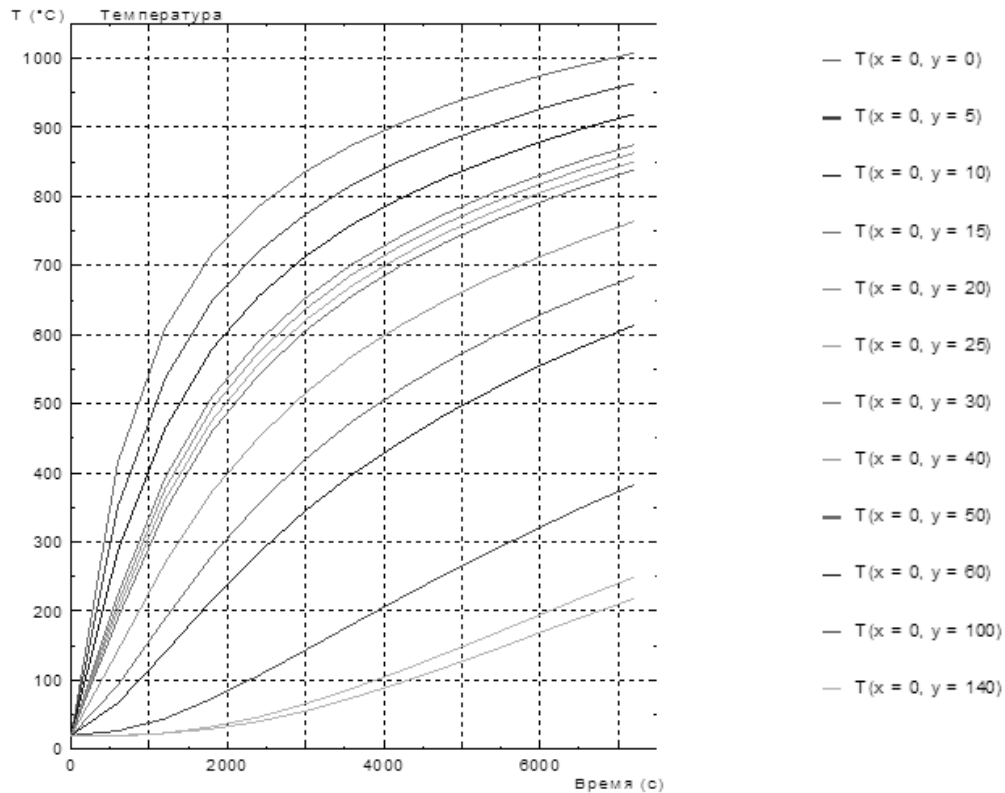
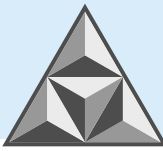


Рис. 2. Динамика изменения температуры во времени на различной глубине конструкции при ее нагреве без покрытия

Fig. 2. Dynamics of temperature change over time at different depth the structure when heating it uncovered

На рис. 1, 2 представлены графики изменения температуры от начального момента времени прогрева при пожаре конструкции на различной глубине. Они моделируют динамику разогрева слоев конструкции от нижнего ребра ($y = 0$ мм для конструкции без покрытия и $y = 20$ мм для конструкции с покрытием) с шагом 5 мм до глубины 40 мм и шагом 10 мм на глубине от 40 до 140 мм.

Анализ рис. 1, 2 указывает на адекватность модели, так как кривая, отвечающая процессу разогрева поверхности конструкции со стороны пожара, соответствует уравнению протекания пожара (1). Кривая, описывающая состояние поверхности с противоположной стороны конструкции, соответствует кондуктивному процессу разогрева с конвективным съемом теплоты – процесс с низкой кривизной графика (практически линейный инерциальный), обусловленный высокой теплоемкостью материала конструкции. Заметно выделяется группа кривых, для которых на различных временных этапах значения температур очень близки, и они практически не расходятся к конечному моменту времени моделирования пожара. Эти кривые отвечают процессу разогрева металлической арматуры и граничного слоя бетона (быстрый сквозной прогрев до очень близких температур по толщине). При достижении 560°C наблюдается потеря несущей способности конструкции.

Для рис. 2 характерным является экспоненциальный рост температуры в защитном слое бетона. Как следствие, строительная арматура интенсивно разогревается на ранних этапах пожара. В свою очередь, анализ рис. 3 показывает, что огнеупорное покрытие и защитный слой бетона, напротив, разогреваются медленно и более плавно; по глубине арматуры зависимости приобретают практически линейный характер.

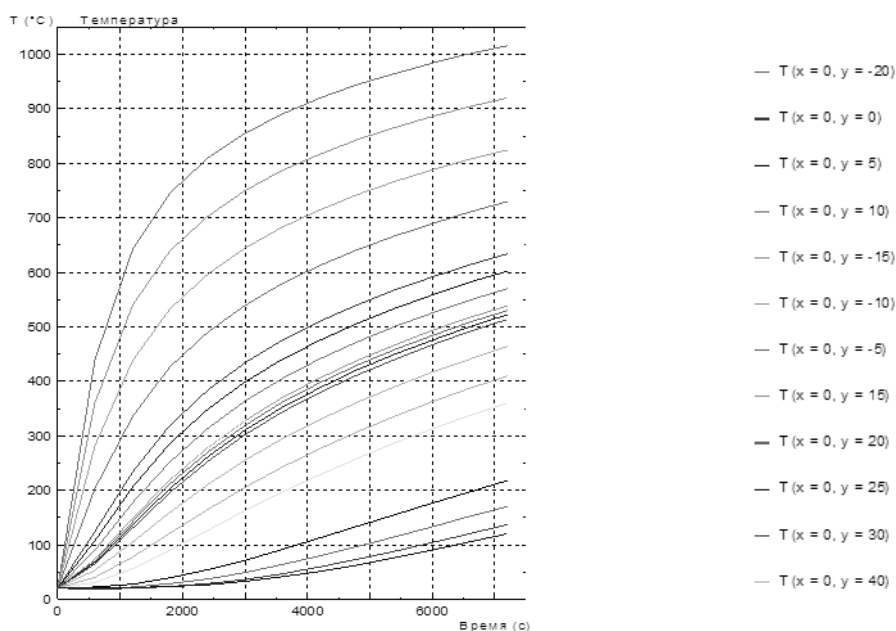
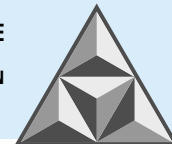


Рис. 3. Динамика изменения температуры во времени по глубине конструкции с огнеупорным покрытием при ее нагреве

Fig. 3. Dynamics of temperature change over time along the depth of the structure with refractory coating during its heating

Это обусловлено не только увеличенной толщиной слоя материала до арматуры со стороны пожара, но и физико-химическими процессами дегидратации материала, способствующими повышению теплоемкости покрытия и снижению ее теплопроводности.

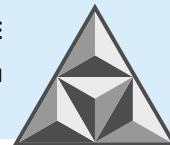
ВЫВОДЫ

1. Показано, что арматура в конструкции перекрытия прогревается до критической температуры уже через 2200 с (37 мин). Плита обеспечивает установленный предел огнестойкости по потере несущей способности R30.

2. Установлено, что использование огнеупорных покрытий из жаростойкого бетона позволяет в 4 раза увеличить предел огнестойкости типовых строительных конструкций. Время прогрева арматуры до критических температур в конструкции с покрытием из жаростойкого бетона (толщина 20 мм) замедляется до 7200 с (120 мин), что характерно для огнестойкости R120.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пожары и пожарная безопасность в 2023 году: информ.-аналитич. сб. П 46 Балашиха: ФГБУ ВНИИПО МЧС России, 2024. 110 с.
2. Крупные пожары на промышленных предприятиях в России в 2023-2024 годах // РИА Новости [сайт] URL: <https://ria.ru/20240124/pozhar-1923122923.html> (дата обращения 17.11.2024).
3. **Ройтман В.М.** Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М., Ассоциация «Пожнаука», 2001.
4. Свод правил СП 118.13330.2022. «СНиП 31-06-2009 Общественные здания и сооружения», Приказ МЧС России от 12 марта 2020 г. № 151 «Об утверждении свода правил СП 2.13130 «Системы противопожарной защиты. Обеспечение огнестойкости объектов защиты».
5. **Некрасов К.Д.** Жаростойкий бетон на портландцементе. М.: Стройиздат, 1969. 192 с.



6. Свод правил СП 468.1325800.2019 «Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности».
7. Пособие по расчету огнестойкости и огнесохранности железобетонных конструкций из тяжелого бетона (к СТО 36554501-006-2006). НИИЖБ, Москва. 2008. 123 с.
8. **Овчинников А.А.** Разработка составов жаростойкого бетона на жидком стекле с суперпластификатором: автореф. дисс... канд. техн. наук / ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный архитектурно-строительный университет». Иваново, 2003.
9. **Рудобашта С.П.** Математическое моделирование процессов электромагнитного нагрева строительных материалов // *Умные композиты в строительстве*. 2021. Т. 2. Вып. 3. С. 46-56. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5039/view> (дата обращения 12.01.2025).
10. **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: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5047/view> (дата обращения 12.01.2025).

Поступила в редакцию 24.01.2025

Одобрена после рецензирования 20.02.2025

Принята к опубликованию 04.03.2025

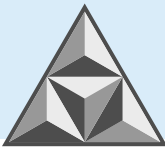
REFERENCES

1. *Fires and fire safety in 2023: information and analytical proceedings* (2024), Balashikha: FGBU VNIPO MES of Russia, 110 p. (In Russian).
2. Major fires at industrial enterprises in Russia in 2023-2024: official site RIA Novosti - Moscow (2024), available at: <https://ria.ru/20240124/pozhar-1923122923.html> (accessed on 17.11.2024) (in Russian).
3. **Roitman, V.M.** (2001), *Inzhenernye resheniya po otsenke ognestoikosti proektiruemykh i rekonstruiруemykh zdaniy [Engineering solutions for fire resistance assessment of designed and reconstructed buildings]*, Association 'Pojnauka', Moscow, Russia (in Russian).
4. *Code of rules SP 118.13330.2022* (2022). 'SNiP 31-06-2009 Public buildings and structures', Order of the Ministry of Emergency Situations of Russia from 12 March 2020 N 151 "On approval of the set of rules SP 2.13130" Fire protection systems. Ensuring fire resistance of defence objects', Moscow, Russia (in Russian).
5. **Nekrasov, K.D.** (1969), *Zharostoikiy beton na portlandtsemente [Heat-resistant concrete on Portland cement]*, Stroyizdat, Moscow, UdSSR (in Russian).
6. *Code of Regulations SP 468.1325800.2019* (2019). 'Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring fire resistance and fire protection', Moscow, Russia (in Russian).
7. *Manual on calculation of fire resistance and fire safety of reinforced concrete structures made of heavy concrete* (to STO 36554501-006-2006) (2008), NIIZhB, Moscow, Russia (in Russian).
8. **Ovchinnikov, A.A.** (2003), Development of heat-resistant concrete compositions on liquid glass with superplasticiser: Abstract of diss. cand. tech. sc., Ivanovo State University of Architecture and Civil Engineering, Ivanovo, Russia.
9. **Rudobashta, S.P.** (2021), "Mathematical modeling of electromagnetic heating processes of building materials", *Uмnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 2, no. 3, pp. 46-56, available at: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/5039/view> (accessed 12.01.2025) (in Russian).
10. **Lazarev, A.A., Fedotov, I.Yu. and Andreev, R.N.** (2023), "Modelling of the high-temperature effects of fire on glazing of building embrasures using a moving heat source" // *Uмnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 4, no. 3, pp. 8-17, available at: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/5047/view> (accessed 10.01.2025) (in Russian).

Received 24.01.2025

Approved 20.02.2025

Accepted 04.03.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.175

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-31-45

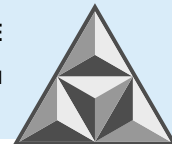
Композитная полимерная арматура: анализ опыта производства

Т.А. Низина, Н.С. Леонтьев

Татьяна Анатольевна Низина*, **Никита Сергеевич Леонтьев**

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,
Саранск, Российская Федерация

*nizinata@yandex.ru**, *sollers113@mail.ru*



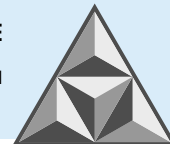
Проанализированы основные преимущества и недостатки строительной полимерной арматуры. Использован опыт научных исследований и промышленного производства ООО «Кабельные системы» (г. Саранск). Дана общая информация о типах композитной арматуры и соответствующей нормативной документации в Российской Федерации. Проведен сравнительный анализ свойств композитной полимерной и стальной арматуры. Выявлено влияние состава эпоксидного связующего и армирующих волокон на важнейшие потребительские характеристики композитной арматуры в целом и, в частности, на прочность ее сцепления с бетоном. Даны рекомендации по применению композитной полимерной арматуры для решения комплексных задач в современном строительстве.

Ключевые слова: композитная арматура, коррозионная стойкость, щелочестойкость, бетон, полимерное связующее, опесчаненная поверхность

Для цитирования:

Низина Т.А., Леонтьев Н.С. Композитная полимерная арматура: анализ опыта производства // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып.1. С. 31-45.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-31-45



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-31-45

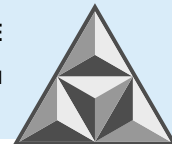
Composite polymer reinforcement: analysis of production experience

T.A. Nizina, N.S. Leont'ev

Tatyana Anatolyevna Nizina*, **Nikita Sergeevich Leont'ev**

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogaryov, Saransk, Russian Federation

*nizinata@yandex.ru**, *sollers113@mail.ru*



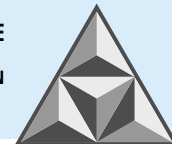
The authors have analysed the main advantages and disadvantages of construction polymer reinforcement. The authors used the experience of scientific research and industrial production of OOO 'Cable Systems' (Saransk, Russia). The paper provides general information about the types of composite reinforcement and the relevant regulatory documentation in the Russian Federation. The authors have performed a comparative analysis of the properties of composite polymer and steel reinforcement. The authors have revealed the impact of the composition of epoxy binder and reinforcing fibres on the most important consumer characteristics of composite reinforcement in general and, in particular, on the bond strength of composite reinforcement with concrete. The paper gives recommendations on the application of polymer composite reinforcement in solving complex problems in modern construction.

Keywords: composite reinforcement, corrosion resistance, alkali resistance, concrete, polymer binder, sandy surface

For citation:

Nizina T.A., Leont'ev N.S. Composite polymer reinforcement: analysis of production experience // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. P. 31-45.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-31-45



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время железобетон является одним из основных конструктивных материалов в строительстве, без которого невозможно обойтись в обозримой перспективе. Большинство гражданских, промышленных и специальных зданий и сооружений возводится с применением железобетонных конструкций. Однако применяемая в железобетоне арматурная сталь, помимо неоспоримых преимуществ, имеет и ряд существенных недостатков:

- низкая коррозионная стойкость;
- высокий удельный вес и недостаточная прочность при растяжении относительно средней плотности;
- ограниченность сырьевой базы.

Ввиду указанных недостатков происходит преждевременный выход из строя железобетонных конструкций в условиях действия агрессивных сред, сокращаются межремонтные интервалы. Поэтому целесообразность применения стальной арматуры снижается, в том числе – по экономическим соображениям. В этой связи с середины XX столетия активно проводятся исследования по созданию альтернативы стальной арматуры – композитной полимерной арматуры (ранее называемой стеклопластиковой). Данное строительное изделие, помимо прочностных и деформативных характеристик, должно обладать особыми показателями: стойкостью к агрессивным средам, радиопрозрачностью, магнитоинертностью и т.д.

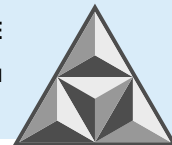
Арматуру композитную полимерную (АКП), как правило, относят к относительно новому виду строительных изделий. Однако еще в 1941 году отечественный ученый А.К. Буров впервые предложил использовать стеклянные волокна для армирования бетонных конструкций. В 1950-е годы было известно три способа армирования:

- дисперсное (распределенное по всему объему материала);
- армирование сплошными композитными обоймами по поверхности конструкций;
- армирование стеклопластиковой арматурой [1].

В 60-е годы XX века в Советском Союзе приступили к исследованию свойств стеклопластиковых стержней прямоугольного и круглого сечений и начато опытное изготовление композитной арматуры со следующими характеристиками:

- плотность 1800-2000 кг·м⁻³;
- предел прочности при растяжении – до 1500 МПа;
- модуль упругости – до 50000 МПа при содержании волокна по массе около 80% [2].

Первый нормативный документ Р-16-78 «Рекомендации по расчету конструкций со стеклопластиковой арматурой» по применению АКП разработан в Научно-исследовательском, проектно-конструкторском технологическом институте бетона и железобетона Госстроя СССР (НИИЖБ им. А.А. Гвоздева) в 1978 году. Он был предназначен для расчета конструкций с преднапряженной композитной арматурой. С начала 70-х годов XX столетия стеклопластиковая арматура стала применяться в мостовых конструкциях: в 1975 году в Амурской области построен мост, деревянные элементы которого были армированы преднапряженной композитной арматурой; в 1981 году в Приморском крае построен мост, стальные балки которого были преднапряжены стеклопластиковой арматурой; в 1989 году в



г. Облудье (Еврейская автономная область) возведен мост, в котором стеклопластиковая арматура была применена в составе железобетонных балок.

За рубежом (Германия, 1986 год) был построен автомобильный мост с использованием предварительно напряженной композитной арматуры [3]. В Японии в 1997 году разработаны нормы по расчету и строительству бетонных конструкций с АКП [4]. С начала XXI века исследования по изучению свойств и применению АКП проводятся в Германии, Японии, Нидерландах, США, Канаде, Англии, Франции и других странах [2].

Арматура композитная полимерная является высокоориентированным волокнистым материалом и представляет собой стержень из однонаправленных непрерывных волокон, расположенных в матрице из термореактивного связующего с равномерно расположенным на поверхности анкерочным слоем. Волокна являются основой АКП; в основном применяются стеклянные, базальтовые, арамидные и углеродные волокна.

Тип волокон имеет большое влияние на физико-механические свойства композитной арматуры. В подавляющем большинстве на производствах АКП применяются стеклянные волокна, которые уступают базальтовым и углеродным по прочности на растяжение и модулю упругости, но обладают сравнительно низкой стоимостью. АКП, изготовленная из углеродного волокна, имеет наибольший предел прочности при растяжении и модули упругости. Однако стоимость углеродного волокна в десятки раз превышает стоимость базальтового и стеклянного волокон [5].

В качестве связующего в полимерной арматуре выступают эпоксидные смолы (ЭД-20, KER-828 и другие аналоги). Отвердителем данных смол чаще всего являются термореактивный изометилтетрагидрофталевый ангидрид (изо-МТГФА). Также для отверждения используют ароматические амины, которые придают полимерной арматуре теплостойкость и устойчивость к агрессивным средам [6]. Основную роль при обеспечении щелочестойкости играет состав связующего, существенно влияющий на долговечность армированных конструкций [7].

Известно, что применение ангидридов (изо-МТГФА) приводит к значительному уменьшению щелочестойкости. Согласно ГОСТ 31938-2022, нормируется снижение предела прочности сцепления с бетоном после выдержки в щелочной среде. При разрушении полимерной матрицы щелочной раствор проникает вглубь материала и начинает химически взаимодействовать с волокном, разрушая его, приводя к снижению прочности арматурного стержня. Наиболее подвержены такому разрушению стеклянные волокна.

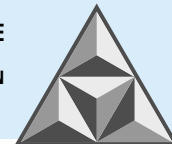
Базальтовые и арамидные волокна являются более стойкими, а углеродное волокно полностью устойчиво к воздействию щелочей.

В [8] достаточно подробно дается сравнительная оценка стойкости в щелочных средах бетонов следующих связующих АКП:

- эпоксиангидритное – эпоксидиановая смола ЭД-20 производства ФКП «Завод имени Я.М. Свердлова» с отвердителем изо-МТГФА производства ООО «АО Реахим»;
- эпоксаминное – двухкомпонентное эпоксидное связующее Этал-370У производства АО «ЭНЦП Эпитал», в состав которого входит аминный отвердитель.

В результате испытаний и исследований [8] были сделаны следующие выводы:

- щелочная среда бетона приводит к диффузному набуханию и деструкции эпоксидных связующих АКП;
- эпоксидоаминное связующее демонстрирует значительно бóльшую щелочестойкость по сравнению с эпоксиангидритным.



Существуют различные способы производства АКП: пултрузия; бесфильтровая нидлтрузия или плэйнтрузия с последующей термообработкой формируемых стержней [9]. При пултрузии ровинговые нити, пропитанные связующим, проходят через фильеру круглого сечения; на выходе из фильеры стержень обматывается жгутом с натягом (большинство производителей используют прочные швейные нити), затем обмотанный по спирали стержень покрывается песком, в результате чего образуется вдавленный или постоянного сечения опесчаненный профиль. При нидлтрузии отсутствует фильера и круглый стержень формируется за счет спиральной обмотки одной или двумя нитями волокна. Образующие стержень нити волокна и нити обмотки имеют один тип, но могут отличаться по плотности. Параметры периодического профиля (диаметр, высота и шаг поперечных выступов) АКП различны в зависимости от применяемой технологии и регламентируются согласно ГОСТ 31938-2022.

Нормативная база по применению композитной арматуры

Следует отметить, что в России долгое время отсутствовала нормативная база по полимерной арматуре. Однако с 2014 года введены несколько нормативно-технических документов, что способствовало активизации применения АКП в строительстве. Так, обновленный ГОСТ 31938-2022 содержит следующие отличия:

- добавлен сортамент с нормами по соответствию площади сечения и массе;
- регламентированы типы профилей;
- добавлены сведения о материалах для производства АКП и пр.

Также были разработаны и введены государственные стандарты РФ: ГОСТ 32486-2021 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения структурных и термомеханических характеристик», ГОСТ 32487-2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения характеристик стойкости к агрессивным средам» и ГОСТ 32492-2015 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик». В качестве правил проектирования конструкций из бетона, армированных полимерной арматурой, в 2018 году были введены СП 295.1325800.2017 и СП 405.1325800.2018 в которых установлены основные нормативные и расчетные характеристики АКП и фибры, указан порядок расчета по двум предельным состояниям, даны рекомендации для проектирования конструкций с предварительно напряженной полимерной арматурой. Расчет конструкций с применением АКП стал возможен с помощью современных программных комплексов: в ПК ЛИРА 10.8 внесены библиотеки материалов композитной арматуры по ГОСТ 31938-2022; в данном комплексе реализованы положения СП 295.1325800.2017 и Приложения Л СП 63.13330.2012. Характеристики полимерной арматуры и корректирующие коэффициенты можно использовать в автоматическом режиме, а также изменять. Кроме того, возможность выбора АКП в качестве арматуры для железобетонных конструкций уже предоставляется в последних версиях ПК SCAD Office.

Сравнение прочностных характеристик композитной и стальной арматуры

Одной из важных характеристик арматуры является предел прочности при растяжении. На рис. 1 даны совмещенные диаграммы растяжения АКП со стеклянными волокнами и стальной арматуры А400 и А500С, приведенные соответственно в [10] и [11].

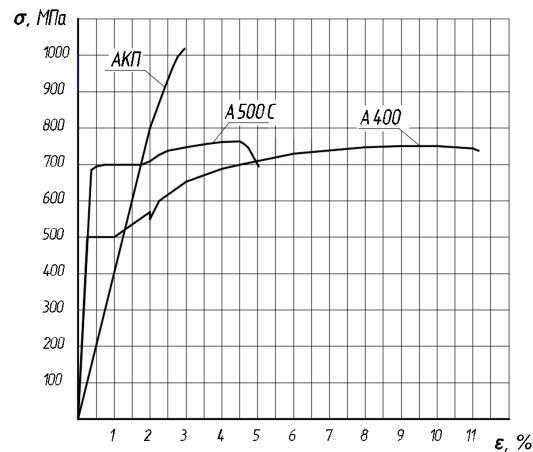
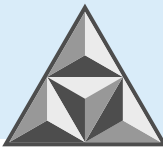


Рис. 1. Диаграммы «напряжение – относительная деформация» стальной арматуры классов А400, А500С и композитной арматуры со стеклянными волокнами [10, 11]

Fig. 1. Stress - relative strain diagrams of steel reinforcement of classes А400, А500С and composite reinforcement with glass fibres [10, 11]

Анализ рис. 1 указывает на линейное поведение АКП, вплоть до разрушения. При этом отсутствует площадка текучести (как у хрупкого материала), а предел прочности АКП существенно выше предела прочности стальной арматуры. Но при выполнении расчетов конструкций с АКП необходимо учитывать их долговременные свойства. В табл. 1 представлены пути определения расчетных значений сопротивления растяжению для стальной арматуры и АКП, согласно СП 63.13330.2018 и СП 295.1325800.2017 соответственно (расчет по предельным состояниям первой группы).

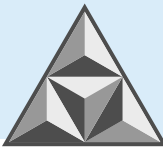
Таблица 1. Формулы для определения расчетных значений сопротивления растяжению для стальной и композитной арматуры (первая группа предельных состояний)

Table 1. Formulas for determining design values of tensile strength for steel and composite reinforcement (first group of limit states)

Стальная арматура	Арматура композитная полимерная	
	Длительная нагрузка	Кратковременная нагрузка
$R_s = \frac{R_{s,n}}{\gamma_s},$ <p>где γ_s – коэффициент надежности по арматуре, принимаемый равным 1.15, $R_{s,n}$ – нормативное значение сопротивления растяжению</p>	$R_f = \gamma_{f,l} \times R_{f,n},$ <p>где $\gamma_{f,l}$ – коэффициент снижения сопротивления растяжению (от 0.3 до 0.6 в зависимости от типа волокна), $R_{f,n}$ – нормативное значение сопротивления растяжению</p>	$R_f = \frac{\gamma_{f1} \times R_{f,n}}{\gamma_f},$ <p>где γ_f – коэффициент надежности по материалу (1.2 или 1.5 в зависимости от значения коэффициента вариации), γ_{f1} – коэффициент, учитывающий условия эксплуатации конструкции (от 0.7 до 1.0), $R_{f,n}$ – нормативное значение сопротивления растяжению</p>

Согласно СП 295.1325800.2017, минимальные значения предела прочности при растяжении $R_{f,n}$ у АКП составляют от 800 до 1400 МПа в зависимости от типа волокна. У АКП, в отличие от стальной арматуры, есть два расчетных сопротивления растяжению.

Первое сопротивление – расчетное при длительных нагрузках R_f ; для его получения необходимо ввести коэффициент снижения сопротивления растяжению (коэффициент длительности), принимаемый от 0.3 до 0.6 в зависимости от типа волокна АКП. Применение данного коэффициента обусловлено тем, что АКП обладает ползучестью, что не позволяет полностью использовать ее прочностные свойства. Исходя из опыта членов авторского коллектива по производству АКП, считаем, что данный коэффициент можно было бы поднять для некоторых производителей арматуры при условии проведения специальных длительных испытаний, подтверждающих эффективную работу арматурных стержней.



Второе сопротивление – расчетное сопротивление растяжению при кратковременных нагрузках, равное произведению нормативного сопротивления растяжению (принятому равным пределу прочности) на коэффициент, учитывающий щелочестойкость и принимаемый в зависимости от условий эксплуатации (от 0.7 до 1.0). Полученное значение необходимо поделить на коэффициент надежности по материалу (1.2 или 1.5, в зависимости от коэффициента вариации, согласно СП 295.1325800.2017).

Для стальной арматуры, согласно СП 63.13330.2018, нормативное значение сопротивления растяжению $R_{s,n}$ зависит от класса арматуры и составляет от 240 (для А240) до 1920 МПа (для К1900). Для получения расчетного сопротивления стальной арматуры R_s и расчета по предельным состояниям первой группы вводят уменьшающий коэффициент надежности, равный 1.15, согласно СП 63.13330.2018.

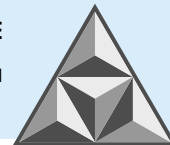
Сдерживающим фактором применения АКП является низкий модуль упругости при растяжении E_f относительно данной характеристики стальной арматуры [12], минимальное значение которого для арматуры со стеклянными волокнами, согласно ГОСТ 31938-2022, составляет 50 000 МПа. При равных нагрузках прогибы конструкций с АКП будут кратно выше, чем у конструкций со стальной арматурой. Поэтому в конструкциях, не рассчитываемых на прогибы, таких как плита на упругом основании, применение АКП наиболее целесообразно. Ширина раскрытия трещин в конструкциях с АКП будет значительно превышать данный параметр у железобетонных аналогов, так как она обратно пропорциональна модулю упругости арматуры. В незначительной мере это превышение компенсируется за счет максимальной ширины раскрытия трещин, которая для АКП немного выше, чем для стальной арматуры (согласно СП 295.1325800.2017, у стальной арматуры $a_{crs} = 0.3; 0.4$ мм, у АКП $a_{crsf} = 0.5; 0.7$ мм, при длительных и кратковременных нагрузках соответственно). Это означает, что при расчете по второй группе предельных состояний при равных нагрузках общая площадь сечения АКП будет значительно превышать общую площадь сечения стальной арматуры. В конструкциях с преднапряженной АКП уменьшаются прогибы и ширина раскрытия трещин, но в современном строительстве преднапряжение композитной арматуры не получило широкого распространения. В основном это связано с трудностями по подготовке оснастки при проведении предварительного напряжения АКП [13].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как уже отмечалось выше, на прочностные и деформативные свойства АКП влияет тип волокон. Однако полимерное связующее также влияет на физико-механические характеристики арматуры. Полимерная матрица, помимо коррозионной стойкости арматуры, призвана обеспечивать равномерное распределение напряжений между волокнами. Для максимального использования прочности волокон в АКП полимерное связующее должно выдерживать более высокие предельные деформации, чем сами волокна. При соответствии прочностных характеристик связующего и волокон достигаются наилучшие физико-механические характеристики АКП.

При производстве композитной арматуры полимерные связующие могут подвергаться различным способам модификации, что отражается на конечных характеристиках АКП, в частности, огнестойкости, сцеплении с бетоном, прочности на срез, прочности при сжатии и растяжении, а также модуле упругости [14].

Для оценки качества производимой в ООО «Кабельные системы» (г. Саранск) АКП были проведены исследования по влиянию состава эпоксидного связующего и типа армирующих волокон на характеристики композитной арматуры, в частности, предел прочности и модуль



упругости при растяжении. Испытания проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 31938-2022 и ГОСТ 32492-2015.

Экспериментальные исследования осуществляли на универсальной гидравлической разрывной машине Р-50, предназначенной для статических испытаний стандартных образцов конструкционных материалов на растяжение, сжатие и изгиб с усилием до 50000 кгс. Условия проведения испытаний: температура воздуха 22°C, влажность 50%. Объектом испытаний являлись арматурные стержни:

- арматура стеклокомпозитная (АСК) диаметром 10 мм и длиной 300 мм из рядовой производственной партии; полимерная матрица: эпоксидиановая смола ЭД-20 и отвердитель изо-МТГФА;

- арматура базальтокомпозитная (АБК) диаметром 10 мм и длиной 300 мм из опытно-экспериментальной партии; полимерная матрица: модифицированное эпоксидное связующее двухкомпонентное горячего отверждения.

Результаты сравнительных испытаний АСК и АБК приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты сравнительных испытаний стеклокомпозитной и базальтокомпозитной арматуры

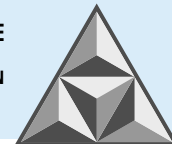
Table 2. Results of comparative tests of glass-composite and basalt-composite reinforcement

Измеряемый показатель, ед. измерения	Нормативное значение (ГОСТ 31938-2022)		Нормативная документация на метод испытания	Результаты испытаний	
	АСК	АБК		АСК	АБК
Номинальный диаметр, мм	Не менее 9.5	Не менее 9.5	ГОСТ 31938-2022	9.54	10.05
Предел прочности при растяжении, МПа	Не менее 1000	Не менее 1000	ГОСТ 32492-2015	1180	1590
Модуль упругости при растяжении, ГПа	Не менее 50.0	Не менее 50.0	ГОСТ 32492-2015	51.5	54.0

Испытанные стержни АСК и АБК по показателям предела прочности при растяжении и модулю упругости соответствуют ГОСТ 31938-2022. Установлено, что показатели предела прочности обеих партий образцов значительно превышают нормируемые значения. При этом показатели АБК превосходят соответствующие показатели АСК. Проведенные исследования показали, что применение модифицированного эпоксидного связующего и базальтовых волокон приводит к значительному повышению механических свойств композитных стержней и, как следствие, способствует улучшению эксплуатационных характеристик композитной полимерной арматуры.

Как известно, наличие сцепления цементного бетона с поверхностью арматурных стержней в течение всего периода эксплуатации обеспечивает несущую способность армированной бетонной конструкции. Прочная связь стальной арматуры с бетоном обеспечивается за счет геометрии стержня, адгезии, а также сил трения, возникающих при усадке бетона в результате обжатия стержня и адгезии [15]. Совместная работа АКП и бетона зависит от типа профиля стержня и обеспечивается сцеплением между обмоткой стержня нитью из скрученного волокна либо за счет вдавленного профиля стержня или нанесения песчаного покрытия. При этом показатели прочности сцепления с бетоном у различных типов профиля существенно отличаются. В [16] показано, что наибольшее сцепление с бетоном имеет арматура с опесчаненной поверхностью.

Для оценки прочности сцепления арматуры с бетоном, нормируемой согласно ГОСТ 31938-2022, проведены экспериментальные испытания производимой в ООО «Кабельные системы» (г. Саранск) арматуры стеклокомпозитной (АСК).



АСК получали на основе смолы ЭД-20, отверждаемой изо-МТГФА (диаметр 10 мм, длина 300 мм), с опесчаненной поверхностью. Длина сцепления арматурных стержней с бетоном составляла от 44 до 46 мм. Образцы формировались в форме куба со стороной 100 мм, класс бетона по прочности при сжатии – В25, возраст образцов при испытании – 28 сут. Испытания проводили при температуре 22°C и относительной влажности воздуха 50%; результаты после статистической обработки приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты испытаний по определению прочности сцепления стеклокомпозитной арматуры с бетоном
Table 3. Test results for determining the bond strength of glass composite reinforcement with concrete

Измеряемый показатель, ед. измерения	Нормативное значение (ГОСТ 31938-2022)	Обозначение нормативной документации на метод испытания	Результаты испытаний
Номинальный диаметр, мм	Не менее 9,5	ГОСТ 31938-2022	9.54
Предел прочности сцепления с бетоном, МПа	Не менее 12	ГОСТ 32492-2015	19.86

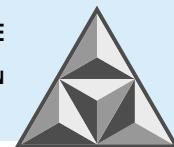
По результатам испытаний установлено, что стержни АСК по показателю предела прочности сцепления с бетоном отвечают требованиям ГОСТ 31938-2022. При этом данный показатель значительно превышает нормируемые значения. Стержни выдерживаются с частичным разрушением цементного камня в зоне сцепления, песок срезается с поверхности стержня. На основании полученных данных можно рекомендовать арматуру композитную полимерную с опесчаненной поверхностью производства ООО «Кабельные системы» (Республика Мордовия, г. Саранск) для армирования бетонных изделий и конструкций.

СРАВНЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ И ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ СВОЙСТВ КОМПОЗИТНОЙ И СТАЛЬНОЙ АРМАТУРЫ

Известно, что широкое использование АКП ограничивают также требования противопожарной безопасности. По ГОСТ 31938-2022 установлена минимальная температура стеклования T_g , составляющая не менее 90°C. Данная температура показывает предельную рабочую температуру полимерной матрицы в АКП. При ее превышении происходит переход матрицы из стеклообразного состояния в упруго-эластическое, и АКП теряет свои эксплуатационные свойства (для сравнения: стальная арматура марки А400 при нагреве до 600°C полностью сохраняет эксплуатационные свойства). Поэтому, учитывая требования противопожарной безопасности, в Российской Федерации использовать АКП в несущих конструкциях возможно только при осуществлении дополнительных мероприятий по нанесению огнезащитных составов и увеличению толщины защитного слоя бетона.

Стоимость арматуры также существенно влияет на технико-экономические показатели возводимых конструкций. При проведении сравнительного анализа АКП со стеклянными волокнами и стальной арматурой выявлены примерно одинаковые цены на равные диаметры (краткий обзор рынка по состоянию на декабрь 2024 года приведен в табл. 4).

Также необходимо отметить, что стержни композитной арматуры, в отличие от стальной, невозможно соединять в каркас с помощью электросварки и нельзя сгибать непосредственно на площадке строительства (гнуемые стержни из АСК можно подготавливать только в условиях производства), что неудобно и приводит к удорожанию процесса армирования. Стыки АКП внахлестку также увеличивают стоимость армируемых конструкций за счет повышенного расхода. Однако АКП может поставляться в бухтах, что уменьшает количество соединений.

**Таблица 4.** Обзор стоимости стальной и композитной арматуры**Table 4.** Cost overview of steel and composite reinforcement

Диаметр, мм	Стоимость стальной арматуры А500С за 1 пог. м, руб., согласно [17]	Средняя стоимость АКП со стеклянными волокнами за 1 пог. м, руб., согласно [18, 19]
6	12	11
8	22	23
10	34	35
12	49	45

Многие производители считают низкую плотность ($1800 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ против $7850 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ у стали), одним из главных преимуществ АКП. При типовом армировании это влияет на общую массу армируемой конструкции незначительно, однако низкий вес АКП положительно сказывается на транспортных расходах. Так, композитная арматура длиной 50.0 м и диаметром до 10.0 мм может быть скручена в бухту диаметром до 1.0 м. Примером подтверждающим возможное снижение логистических расходов, является тот факт, что в стандартный грузовой полуприцеп вмещается около 6000 м² готовой сетки из АКП диаметром 10.0 мм с шириной ячейки 150.0 мм; для стальной сетки при тех же параметрах объем был бы не более 2500 м².

Важным аспектом сравнения полимерной и стальной арматуры является оценка их влияния на термическое сопротивление ограждающей конструкции. Хотя коэффициент теплопроводности у АКП значительно ниже, чем у стальной арматуры, использование композитной арматуры не обеспечивает существенного снижения теплопотерь, так как основным проводником тепла в конструкции является больший по объему бетон.

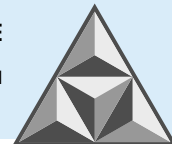
АКП является радиопрозрачным и магнитоинертным материалом, что позволяет использовать ее в специальных сооружениях; однако из-за диэлектрических свойств АКП допускается применять не все технологии электропрогрева бетона в зимний период.

Широкой областью применения армированных конструкций могут являться объекты транспортной инфраструктуры, для эффективной эксплуатации которых следует учитывать отрицательные факторы, влияющие на долговечность материалов и конструкций, и, соответственно, принимать меры, снижающие влияние агрессивных сред. Данные конструкции, помимо нагрузок и температур, подвержены воздействию агрессивных сред, в результате чего в материалах развиваются коррозионные процессы, что значительно снижает срок их эксплуатации. Стальная арматура не может противостоять процессам, которые приводят к образованию трещин, отслоению защитного слоя бетона, деформации и потере прочности. Неоспоримым преимуществом АКП перед стальной арматурой является высокая коррозионная стойкость. Благодаря этому свойству АКП может успешно применяться в конструкциях, эксплуатация которых связана с риском коррозии арматуры; для ее применения не требуются меры специальной защиты, в результате чего уменьшаются расходы на эксплуатацию сооружений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С учетом вышеизложенного, существенными преимуществами композитной полимерной арматуры перед стальной являются: стойкость к агрессивным средам, радиопрозрачность, магнитоинертность, низкий вес в контексте транспортировки. На основании этого можно выделить наиболее целесообразные случаи применения АКП:

- армирование конструкций, лежащих на упругом основании, где расчет по второй группе предельных состояний не является определяющим;
- армирование конструкций, подвергающихся действию агрессивных сред;

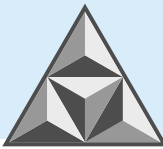


– армирование преднапряженных конструкций, при условии разработки для этого оптимальной оснастки;

– армирование специальных конструкций с повышенными требованиями по радиопрозрачности и магнитоинертности.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Фролов Н.П.** Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции. М.: Стройиздат, 1980. 104 с.
2. **Степанова В.Ф., Степанов А.Ю., Жирков Е.П.** Арматура композитная полимерная. М.: Бумажник, 2013. 200 с.
3. **Клементьев А.О., Смердов М.Н.** Обзор литературы по применению в железобетонных пролетных строениях мостов неметаллической композитной арматурой // *Вестник Уральского гос. ун-та путей сообщения*. 2013. № 4 (20). С. 74-80.
4. **Овчинников И.И., Овчинников И.Г., Ильченко Е.Д., Михалдыкин Е.С.** Систематизация и анализ нормативно технической документации по применению полимерных композиционных материалов в транспортном строительстве. Часть 1. // *Интернет-журнал «Наукоедение»* Том 9. 2017. №1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN117.pdf> (дата обращения 19.01.2025).
5. **Кебер М.Л., Виноградов В.М., Головкин Г.С., и др.; под ред. Берлина А.А.** Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология: учеб. пособие. СПб.: Профессия, 2008. 560 с.
6. **Кочнова З.А., Жаворонок Е.С., Чалых А.Е.** Эпоксидные смолы и отвердители: промышленные продукты. М.: Пэйнт-Медиа, 2006. 200 с.
7. **Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я.** Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия, 1981. 271 с.
8. **Хозин В.Г., Зыкова Е.С., Фахрутдинова В.Х., Гиздатуллин А.Р.** Влияние щелочной среды бетона на эпоксидные связующие и полимеркомпозитную арматуру // *Строительные материалы*. 2015. № 1. С. 41-44.
9. **Старовойтова И.А., Хозин В.Г., Сулейманов А.М., Халикова Р.А., Зыкова Е.С., Абдулхакова А.А., Муртазина А.И., Хадеев Э.П.** Одноосноориентированные армированные пластики: анализ состояния, проблемы и перспективы развития // *Изв. КГАСУ*. 2012. № 4 (22). С. 332-339.
10. **Лобанов Д.С.** Экспериментальные исследования деформационных и прочностных свойств полимерных композиционных материалов и панелей с наполнителем: дисс. ... канд. техн. наук. М., 2015. 148 с.
11. **Рогатнев Ю.Ф., Джавид М.М.** Сравнительный анализ опытных значений деформативных и прочностных характеристик арматуры классов А400, А500С и А600 // *Строительная механика и конструкции*. 2014. № 2 (9). С. 92-99.
12. **Гиль А.И., Бадалова Е.Н., Лазовский Е.Д.** Стеклопластиковая и углепластиковая арматура в строительстве: преимущества, недостатки, перспективы применения // *Вестник Полоцкого гос. ун-та*. 2015. Сер. Ф. № 16. С. 48-53.
13. **Белуцкий И.Ю., Сим А.Д.** Специфика проектирования, изготовления конструкций, напряженно-армированных низко модульной композитной арматурой // *Вестник Сибирского гос. ун-та путей сообщения*. 2020. № 3 (54) С. 38-45.
14. **Беккер А.Т., Уманский А.М.** Полимерное связующее композитной арматуры. Виды, характеристики и перспективы модификации // *Вестник науки и образования*. 2018. №3 (39). С. 22-27.
15. **Бондаренко В.М., Суворкин Д.Г.** Железобетонные и каменные конструкции: учебник для вузов. М.: Высш. школа, 1987. 384 с.
16. **Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р.** Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях // *Строительные материалы*. 2017. № 11. С. 30-38.
17. Официальный сайт МЕТАЛЛСЕРВИС. Арматура рифленая. URL: https://mc.ru/metalloprokat/armatura_riflenaya_a3/mark/a500s (дата обращения 09.01.2025).
18. Официальный сайт МЕГАСТРОЙ. Арматуры и прутки стеклопластиковые. URL: [https://saransk.megastroy.com/catalog/armatura?field142\[\]=стеклопластиковая](https://saransk.megastroy.com/catalog/armatura?field142[]=стеклопластиковая) (дата обращения 09.01.2025).



19. Официальный сайт Лемана ПРО (Леруа Мерлен). Арматура стеклопластиковая. URL: <https://saransk.lemanapro.ru/catalogue/armatura/stekloplastikovaya> (дата обращения 09.01.2025).

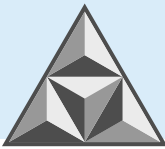
Поступила в редакцию 22.01.2025

Одобрена после рецензирования 21.02.2025

Принята к опубликованию 04.03.2025

REFERENCES

1. **Frolov, N.P.** (1980), *Stekloplastikovaya armatura i stekloplastbetonnye konstruksii [Glass-fibre reinforcement and glass-fibre reinforced concrete structures]*, Stroyizdat, Moscow, 104 p. (in Russian).
2. **Stepanova, V.F., Stepanov, A.Yu. and Zhirkov, E.P.** (2013), *Armaturnaya kompozitnaya polimernaya [Composite polymer armature]*, Boumazhnik, Moscow, Russia, 200 p. (in Russian).
3. **Klementiev, A.O. and Smerdov, M.N.** (2013), "Literature review on the application of non-metallic composite reinforcement in reinforced concrete bridge spans", *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of Ural State University of Railway Engineering]*, vol. 4, no. 20, pp. 74-80 (in Russian).
4. **Ovchinnikov, I.I., Ovchinnikov, I.G., Ilchenko, E.D. and Mikhaldykin, E.S.** (2017), "Systematisation and analysis of normative and technical documentation on the use of polymer composite materials in transport construction", part 1, *Internet journal 'Naukovedenie'*, vol. 9, no. 1, Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/32TVN117.pdf> (accessed 19.01.2025) (in Russian).
5. **Keber, M.L., Vinogradov, V.M., Golovkin, G.S. et al.** (2008), *Polimernye kompozitsionnye materialy: struktura, svoystva, tekhnologiya: ucheb. posobie [Polymer composite materials: structure, properties, technology: textbook]*, in Berlin A.A. ed., Profession, SPb., Russia, 560 p. (in Russian).
6. **Kochkova, Z.A., Zhavoronok, E.S. and Chalykh, A.E.** (2006), *Epoksidnye smoly i otverditeli: promyshlennyye produkty [Epoxy resins and hardeners: industrial products]*, Paint-Media, Moscow, Russia, 200 p. (in Russian).
7. **Tarnopolsky, Yu.M. and Kintsis, T.Ya.** (1981), *Metody staticheskikh ispytaniy armirovannykh plastikov [Methods of static tests of reinforced plastics]*, Izd-vo 'Khimiya', Moscow, 271 p. (in Russian).
8. **Khozin, V.G., Zykova, E.S., Fakhrutdinova, V.H. and Gizdatullin, A.R.** (2015), "Effect of alkaline environment of concrete on epoxy binders and polymer composite reinforcement", *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, no. 1, pp. 41-44 (in Russian).
9. **Starovoitova, I.A., Khozin, V.G., Suleymanov, A.M., Khalikova, R.A., Zykova, E.S., Abdulkhakova, A.A., Murtazina, A.I. and Khadeev, E.P.** (2012), 'Uniaxially oriented reinforced plastics: analysis of the state, problems and prospects of development', *Izv. KGASU [Proceedings of KGASU]*, vol. 4, no. 22, pp. 332-339 (in Russian).
10. **Lobanov, D.S.** (2015), Experimental investigations of deformation and strength properties of polymer composite materials and panels with filler: Ph.D. Thesis cand. tech. sc., Moscow, Russia, 148 p.
11. **Rogatnev, Yu.F. and Javid, M.M.** (2014), "Comparative analysis of experimental values of deformation and strength characteristics of reinforcement of classes A400, A500C and A600b", *Stroitel'naya mekhanika i konstruksii [Construction Mechanics and Structures]*, vol. 2, no. 9, pp. 92-99 (in Russian).
12. **Gil, A.I., Badalova, E.N. and Lazovsky, E.D.** (2015), Fiberglass and carbon fibre reinforcement in construction: advantages, disadvantages, prospects of application, *Vestnik Polotskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Polotsk State University]*, Ser. F, no. 16, pp. 48-53 (in Russian).
13. **Belutsky, I.Y. and Sim, A.D.** (2020), "Specificity of design, fabrication of structures stress-reinforced with low-modulus composite reinforcement", *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniya [Bulletin of Siberian State University of Railway Engineering]*, vol. 3, no. 54, pp. 38-45 (in Russian).
14. **Becker, A.T. and Umansky, A.M.** (2018), "Polymer binder of composite reinforcement. Types, characteristics and prospects of modification", *Vestnik nauki i obrazovaniya [Bulletin of Science and Education]*, vol. 3, no. 39, pp. 22-27 (in Russian).
15. **Bondarenko, V.M. and Suvorkin, D.G.** (1987), *Zhelezobetonnye i kamennyye konstruksii: uchebnyy dlya vuzov [Reinforced concrete and stone structures: textbook for universities]*, Vysh. shkola, Moscow, 384 p. (in Russian).

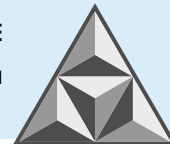


16. **Khozin, V.G. and Gizdatullin, A.R.** (2017), "Compatibility of polymer-composite reinforcement with cement concrete in structures", *Stroitel'nye materialy [Construction Materials]*, no. 11, pp. 30-38 (in Russian).
17. The official site METALSERVICE. Fluted armature. Available at: https://mc.ru/metalloprokat/armatura_riflenaya_a3/mark/a500s (accessed 09.01.2025) (in Russian).
18. The official site of MEGASTROY. (2025), Fibreglass reinforcements and bars. Available at: [https://saransk.megastroy.com/catalog/armatura?field142\[\]=стеклопластиковая](https://saransk.megastroy.com/catalog/armatura?field142[]=стеклопластиковая) (accessed 09.01.2025) (in Russian).
19. The official site of Leman PRO (Leroy Merlin). (2025), Fibreglass reinforcement. Available at: <https://saransk.lemanapro.ru/catalogue/armatura/stekloplastikovaya/> (accessed 09.01.2025) (in Russian).

Received 22.01.2025

Approved 21.02.2025

Accepted 04.03.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.731.85

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-46-59

Метод деформируемого симплекса применительно к изучению прочности и водостойкости асфальтогранулобетона в зависимости от его состава

Е.С. Буданова, В.А. Ярмолинский, Е.А. Гриценко, Е.С. Егоров

Екатерина Сергеевна Буданова^{1*,2}, Владимир Аполенарьевич Ярмолинский², Егор Сергеевич Егоров¹

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация,

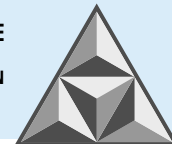
²Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация

*budanovaes@ystu.ru**, *1057289@madiasu.onmicrosoft.com*, *egoroves@ystu.ru*

Елена Александровна Гриценко³

³Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Российская Федерация

gritsencko.lena@yandex.ru



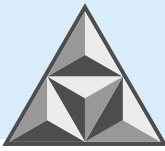
Исследованы факторы, влияющие на эффективность применения технологии холодного ресайклинга для ремонта автомобильных дорог. Изучено влияние состава асфальтогранулобетона на его прочность при непрямом растяжении на раскол и коэффициент водостойкости. Применен способ оценки порядка поверхности отклика в ортогональном планировании для двух факторов; на плоскости приведены аргументы столбчатых диаграмм с численными значениями функции и аппликатами. С использованием метода деформируемого симплекса получена характеристика ожидаемой трехмерной формы поверхности отклика. Результаты исследований позволяют минимизировать время, необходимое для проведения проектных работ в области дорожного строительства, и добиться существенной экономии материалов и трудовых ресурсов.

Ключевые слова: холодный ресайклинг, асфальтогранулобетонная смесь, дорожная одежда, скелетный материал, прочность, водостойкость, планирование эксперимента

Для цитирования:

Буданова Е.А., Ярмолинский В.А., Гриценко Е.А., Егоров Е.С. Метод деформируемого симплекса применительно к изучению прочности и водостойкости асфальтогранулобетона в зависимости от его состава // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 1. С. 46-59.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-46-59



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-46-59

The deformable simplex method applied to the study of strength and water resistance of asphalt granuloconcrete depending on its composition

E.S Budanova, V.A. Yarmolinsky, E.A. Gritsenko, E.S. Egorov

Ekaterina Sergeevna Budanova^{1*}, Vladimir Apolenaryevich Yarmolinsky², Egor Sergeevich Egorov¹

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

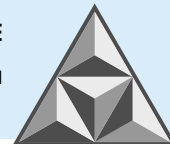
²Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, Moscow, Russian Federation

*budanovaes@ystu.ru**, *1057289@madiasu.onmicrosoft.com*, *egoroves@ystu.ru*

Elena Aleksandrovna Gritsenko³

³Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

gritsencko.lena@yandex.ru



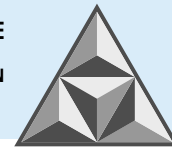
The paper investigates the factors affecting the effectiveness of cold recycling technology for road repair. The authors have investigated the effect of asphalt granuloconcrete composition on indirect split tensile strength and water resistance coefficient. The authors applied the method of response surface order estimation in orthogonal planning for two factors. The arguments of bar diagrams with numerical values of the function and applications are given on the plan view. Using the deformable simplex method, the authors constructed and characterised the expected three-dimensional shape of the response surface. The results minimise the time required for design work in road construction and achieve significant savings on materials and labour.

Keywords: cold recycling, asphalt granular concrete mix, road pavement, strength, water resistance, experiment planning

For citation:

Budanova E.A., Yarmolinsky V.A., Gritsenko E.A., Egorov E.S. The deformable simplex method applied to the study of strength and water resistance of asphalt granuloconcrete depending on its composition // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. P. 46-59. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-46-59



ВВЕДЕНИЕ

Холодный ресайклинг был разработан в 1930-х годах в США как альтернативный метод восстановления асфальтобетонных покрытий холодным способом. В России такая технология впервые применена под руководством Г.С. Бахраха на опытных участках трассы М1 «Беларусь». В 2002 году были разработаны первые «Методические рекомендации по восстановлению асфальтобетонных покрытий и оснований автомобильных дорог способами холодной регенерации». С момента возникновения и по настоящее время технология холодного ресайклинга развивается по двум направлениям: первое – модернизация техники и способов регенерации, второе – расширение рецептур применяемых смесей [1, 2].

Развитие технологии, с точки зрения появления оборудования различных модификаций по мощности, производительности и автоматизации, обусловлено достижением цели создания конструктивных дорожных слоев с высокими физико-механическими свойствами.

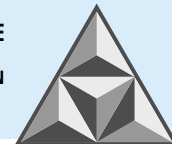
Существенную роль в эффективности применения холодного ресайклинга играет рационально подобранный состав асфальтогранулобетонной смеси. Данный вопрос на сегодняшний день остается открытым [3-7]. Нормативные документы, регламентирующие холодную регенерацию, носят рекомендательный характер, и не учитывают процесс структурообразования материалов, что препятствует дальнейшему прогнозированию эксплуатационных свойств конструктивного слоя дорожной одежды [8].

При выполнении работ по холодному ресайклингу необходимо предварительное проектирование состава смеси с учетом требований к исходному сырью. Компонентами, входящими в состав смеси, являются асфальтогранулят и/или переработанный асфальтобетон (RAP), скелетный материал, вяжущее, вода, а также (в отдельных случаях) минеральный порошок и улучшающие добавки.

Подбор состава включает назначение вида и количества вяжущего, а также определение рационального гранулометрического состава смеси. В действующих нормативных документах в качестве вяжущих фигурируют как минеральные, так и органические вещества, или же их комбинация; при этом отсутствуют сведения, в каких случаях следует применять тот или иной вариант. В части назначения количества вяжущего также присутствуют неточности: оно находится в диапазоне 2-4% сверх массы минерального заполнителя, при этом неясно, когда требуется использовать 2% вяжущих, а в каких условиях рекомендуется увеличить расход до 4%.

Помимо основных компонентов в составе асфальтогранулобетона, часто возникает необходимость дополнительного введения в него щебня, песка или щебеночно-песчаной смеси [9]. Вводимый каменный материал качественно отличается от гранул асфальтогранулята, а следовательно, различна их способность к участию в процессах структурообразования. Компонентный и агрегатный составы смеси формируют тип макроструктуры материала и его физико-механические свойства. Структурообразование асфальтогранулобетонов, являющихся сложными композитами, в настоящее время до конца не изучено, что связано с большим количеством факторов и эффектов взаимодействия компонентов смеси, степень влияния которых затруднительно прогнозировать на этапе проектирования состава [4].

Обеспечение эффективности холодного ресайклинга конструктивных слоев дорожных одежд особенно важно в неблагоприятных природно-климатических условиях эксплуатации автомобильных дорог. Избыточность увлажнения, частые переходы температур через нулевую отметку в совокупности с интенсивными динамическими нагрузками создают особые условия для обеспечения заданных уровней надежности региональных и межмуниципальных автомобильно-дорожных сетей страны [10].



Целью исследования является изучение формы и порядка поверхностей отклика функциональных зависимостей физико-механических свойств асфальтогранулобетона от количества вяжущего и доли асфальтогранулята. Задачи подобного рода решаются с использованием нелинейного программирования, при этом подходящим является метод деформируемого симплекса [11].

В основу теории планирования эксперимента заложены вероятностно-статистические методы, которые позволяют назначить минимально необходимое число опытов и порядок их проведения для получения количественной зависимости между изучаемым параметром и факторами, на него влияющими.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Математическая задача планирования эксперимента состоит в написании уравнения поверхности отклика, оценке порядка и наличия экстремальных областей и точек в назначенной области варьирования факторов. Количество опытов, необходимых для построения поверхности отклика при ортогональном планировании, определялось ее порядком и числом факторов. Его можно оценить по уравнениям:

$$\text{– для поверхностей первого порядка: } n = 2^k; \quad (1)$$

$$\text{– для поверхностей второго порядка: } n = 2^k + 2 \cdot k + n_0, \quad (2)$$

где k – число факторов;

n_0 – число опытов в центре плана.

При неизвестном порядке поверхности отклика, чтобы сэкономить материалы и трудовые ресурсы, планирование следует начинать с линейной зависимости функции от факторов, а в случае неадекватности линейного уравнения экспериментальным данным формируют опытную матрицу второго порядка.

Таким образом, перед планированием эксперимента с выводом математического уравнения, включающего свободный член, линейные коэффициенты, эффекты взаимодействия и квадратичные эффекты, представляет интерес оценить ожидаемый порядок функциональной зависимости.

Порядок поверхности отклика в ортогональном планировании для двух факторов можно наглядно оценить на объемном 3d-графике при построении на плоскости аргументов столбчатых диаграмм с численными значениями функции и соединении их вершин линиями-аппликатами, по прямолинейности или изгибу которых можно охарактеризовать форму поверхности отклика. Чтобы построить такой график для двух факторов, необходимо провести девять испытаний.

Количество опытов для оценки формы поверхности можно уменьшить проведением исследований в вершинах начального и деформированного симплекса и в центре плана с построением 3d-диаграмм, соединяя вершины линиями-аппликатами. Для испытаний функции двух переменных необходимо провести семь опытов.

Значительное влияние на свойства асфальтогранулобетона оказывает добавление в качестве вяжущего портландцемента с совместным введением щебеночно-песчаной смеси (ЩПС), при этом снижение доли асфальтогранулята оказывает положительное влияние на прочность получаемых образцов.

Для построения исходного симплекса и последующего проведения опытов в качестве факторов назначены портландцемент М500 (ПЦ) и скелетный материал – ЩПС. Размерные координаты и интервалы варьирования факторов ПЦ (x_1) и ЩПС (x_2) в центре начального симплекса даны в табл. 1.

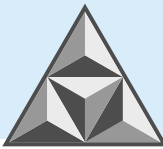


Таблица 1. Интервал варьирования и значения факторов

Table 1. Variation interval and values of factors

Фактор	Значение фактора в центре начального симплекса, $x_{i/0}$, %		Интервал варьирования фактора, Δx_i , %
ПЦ	$x_{1/0}$	2 сверх массы	2
ЩПС	$x_{2/0}$	50 к массе асфальтогранулята	50

Количество опытов в начальном симплексе принято $k + 1$. При числе факторов $k = 2$ число опытов равно $2 + 1 = 3$ и начальным симплексом является треугольник.

Экспериментальные цилиндрические образцы асфальтогранулобетонной смеси диаметром 101.6 мм, высотой (63.5 ± 2.5) мм и массой 1150 г изготовлены с применением уплотнителя Маршалла в соответствии с методикой, изложенной в ОДМ 218.6.1.005-2021 (Приложение Б).

В качестве параметра оптимизации приняты предел прочности при непрямом растяжении и коэффициент водостойкости. Испытание экспериментальных образцов выполняли с учетом сроков достижения ими проектного возраста 7 сут. (рис. 1).



Рис. 1. Процесс испытания опытных образцов: *a* – водонасыщение; *б* – термостатирование; *в* – испытание на гидравлическом прессе

Fig. 1. Testing process of prototypes: *a* – water saturation; *b* – thermostating; *c* – hydraulic press test

Для определения коэффициента водостойкости опытные образцы разделены на две экспериментальные группы по три образца в каждой:

- группа 1 – образцы, выдержанные на воздухе;
- группа 2 – водонасыщенные образцы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

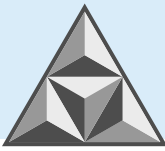
Факторы определены нами в каждом опыте начального симплекса:

Опыт № 1.

– Фактор X_1 :

$$C_{1/1} = K_1 = \sqrt{\frac{1}{2i(i+1)}} = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 1(1+1)}} = 0.5.$$

$$x_{1/1} = x_{1/0} + C_{1/1} \cdot \Delta x_1 = 2 + 0.5 \cdot 2 = 3.00\%.$$



– Фактор X_2 :

$$C_{2/1} = K_2 = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 2(2+1)}} = 0.29.$$

$$x_{2/1} = 50 + 0.29 \cdot 50 = 64.50\%.$$

Опыт № 2.

– Фактор X_1 :

$$C_{1/2} = -R_1 = -\sqrt{\frac{i}{2(i+1)}} = -\sqrt{\frac{1}{2(1+1)}} = -0.5.$$

$$x_{1/2} = x_{1/0} + C_{1/2} \cdot \Delta x_1 = 2 - 0.5 \cdot 2 = 1.00\%.$$

– Фактор X_2 :

$$C_{2/2} = K_2 = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot 2(2+1)}} = 0.29.$$

$$x_{2/2} = 50 + 0.29 \cdot 50 = 64.50\%.$$

Опыт № 3.

– Фактор X_1 :

$$C_{1/3} = 0.$$

$$x_{1/3} = x_{1/0} + C_{1/3} \cdot \Delta x_1 = 2 + 0 \cdot 2 = 2.00\%.$$

– Фактор X_2 :

$$C_{2/3} = -R_2 = -\sqrt{\frac{i}{2(i+1)}} = -\sqrt{\frac{2}{2(2+1)}} = -0.57.$$

$$x_{2/3} = 50 - 0.57 \cdot 50 = 21.50\%.$$

Значения факторов в опытах 1-3 начального симплекса представлены в табл. 2.

Таблица 2. Значения факторов в начальном симплексе

Table 2. Factor values in the initial simplex

№ опыта в начальном симплексе	Значение фактора в начальном симплексе, %	
	X_1 (ПЦ)	X_2 (ПЦ/АГ)
1	3.00	64.50
2	1.00	64.50
3	2.00	21.50

Для дальнейшего исследования влияния состава асфальтогранулобетона на его свойства выполнено расширение факторного пространства за счет деформации начального симплекса с коэффициентами растяжения его вершин $\alpha_{\text{раст}} = 0.5$ и сжатия $\alpha_{\text{сж}} = -0.5$.

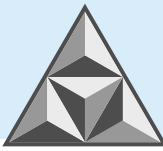
Преобразованная формула вычисления координаты новой вершины симплекса в отраженной точке определена:

$$x_{i \text{ нов}} = \left(2 \cdot \frac{\sum x_{ij}}{k} \right) - x_{i \text{ зам}}, \quad (3)$$

где $x_{i \text{ нов}}$ – координата новой точки (новой вершины) симплекса для i -переменной;

$x_{i \text{ зам}}$ – координата заменяемой точки;

$(\sum x_{ij})/k$ – среднее значение из координат всех вершин симплекса, кроме заменяемой.



Среднее значение из координат всех k -вершин симплекса находят в соответствии с формулой:

$$\frac{\sum x_{ij}}{k} = \bar{x}_i, \quad (4)$$

При деформации симплекса значения новых координат отраженной точки $\ddot{x}_{i \text{ нов}}$ вычислены по формуле:

$$\ddot{x}_{i \text{ нов}} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}), \quad (5)$$

где α – коэффициент деформации (растяжения или сжатия) симплекса.

Опыт № 4.

Растяжение симплекса относительно вершины 1.

Определено среднее значение для расхода портландцемента из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{1.0 + 2.0}{2} = 1.50\%;$$

$$\ddot{x}_{1/4} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 1.5 + 0.5(1.5 - 3.0) = 0.75\%.$$

Определено среднее значение для ЩПС из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{64,5 + 21,5}{2} = 43.00\%;$$

$$\ddot{x}_{2/4} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 43 + 0.5(43 - 64.5) = 32.25\%.$$

Опыт № 5.

Растяжение симплекса относительно вершины 2.

Определено среднее значение для расхода портландцемента из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{3.0 + 2.0}{2} = 2.50\%;$$

$$\ddot{x}_{1/5} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 2.5 + 0.5(2.5 - 1.0) = 3.25\%.$$

Определено среднее значение для ЩПС из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{64,5 + 21,5}{2} = 43.00\%;$$

$$\ddot{x}_{2/5} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 43.0 + 0.5(43.0 - 64.5) = 32.25\%.$$

Опыт № 6.

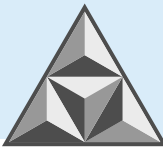
Растяжение симплекса относительно вершины 3.

Определено среднее значение для расхода портландцемента из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{3.0 + 1.0}{2} = 2.00\%;$$

$$\ddot{x}_{1/6} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i \text{ зам}}) = 2.0 + 0.5(2.0 - 2.0) = 2.00\%.$$

Определено среднее значение для ЩПС из координат всех k -вершин симплекса, кроме заменяемой:



$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{64.5 + 64.5}{2} = 64.50\%;$$

$$\ddot{x}_{2/6} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i_{\text{зам}}}) = 64.5 + 0.5(64.5 - 21.5) = 86.00\%.$$

Опыт № 7.

Для определения координат вершины 7 внутри начального симплекса произведено сжатие его относительно вершины 3 с коэффициентом сжатия $\alpha_{\text{сж}} = -0.5$ и для факторов X_1 (ПЦ) и X_2 (ЩПС) выполнены расчеты:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{3.0 + 1.0}{2} = 2.00\%;$$

$$\ddot{x}_{1/7} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i_{\text{зам}}}) = 2.0 - 0.5(2.0 - 2.0) = 2.00\%;$$

$$\bar{x}_i = \frac{\sum x_{ij}}{k} = \frac{64.5 + 64.5}{2} = 64.50\%;$$

$$\ddot{x}_{2/7} = \bar{x}_i + \alpha(\bar{x}_i - x_{i_{\text{зам}}}) = 64.5 - 0.5(64.5 - 21.5) = 43.00\%.$$

Вычисленные значения в каждом опыте представлены в табл. 3.

Таблица 3. Значения факторов в деформированном симплексе

Table 3. Factor values in the deformed simplex

№ опыта	Значение фактора в опыте, %	
	X_1 (ПЦ)	X_2 (ЩПС)
1	Начальный симплекс	
2		
3		
4	0.75	32.25
5	3.25	32.25
6	2.00	86.00
7	2.00	43.00

Область варьирования факторов отражена на рис. 2.

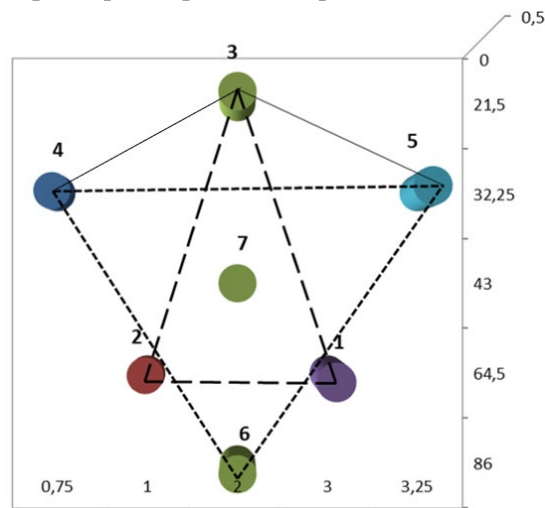


Рис. 2. Область варьирования значений факторов эксперимента: опыты 1-3 – начальный симплекс; опыты 4-6 – растянутый симплекс; опыт 7 – сжатые условия опыта 3

Fig. 2. The range of variation of values for the experiment factors: experiments 1-3 – initial simplex; experiments 4-6 – stretched simplex; experiment 7 – compressed conditions of experiment 3

Результаты испытаний образцов асфальтогранулобетона на предел прочности при прямом растяжении и водостойкость приведены в табл. 4.

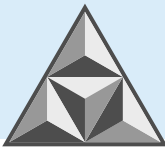


Таблица 4. Прочность и водостойкость при различном составе асфальтогранулобетона

Table 4. Strength and water resistance with different compositions of asphalt granulocrete

№ опыта	Значение фактора в опыте, %		Среднее значение предела прочности на растяжение, $R_{раст}$, МПа		Коэффициент водостойкости (TRS)
	X_1 (ПЦ)	X_2 (ЩПС)	Группа 1	Группа 2	
1	3.00	64.50	0.32	0.29	0.91
2	1.00	64.50	0.12	0.08	0.67
3	2.00	21.50	0.22	0.20	0.91
4	0.75	32.25	0.17	0.10	0.56
5	3.25	32.25	0.37	0.25	0.68
6	2.00	86.00	0.20	0.18	0.90
7	2.00	43.00	0.26	0.18	0.69

Зависимость прочности при непрямом растяжении образцов асфальтогранулобетона групп 1 (выдержанные на воздухе) (а, б) и 2 (водонасыщенные) (в, г) от расхода ПЦ и доли ЩПС показана в табл. 5 и на рис. 3.

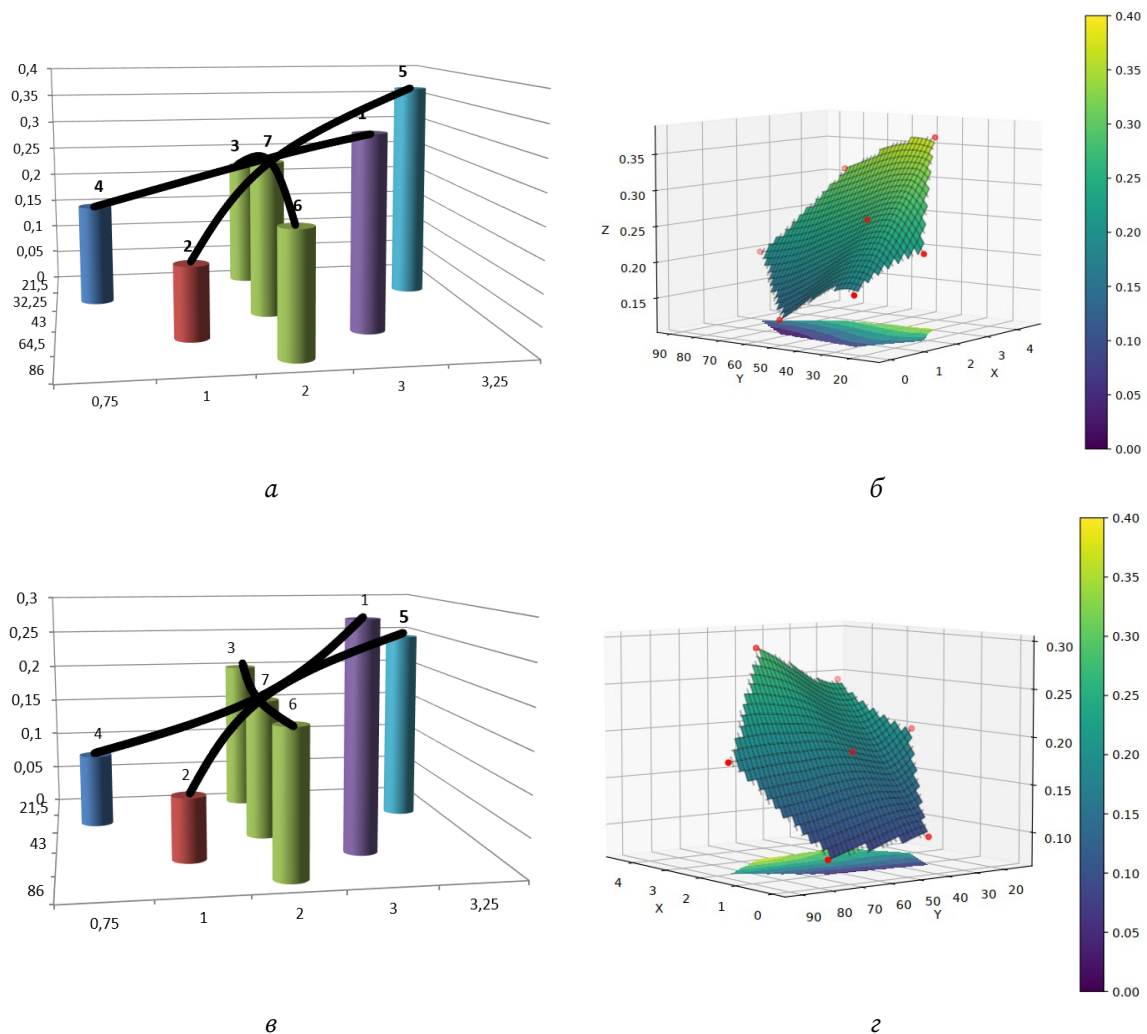


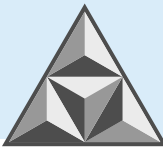
Рис. 3. Зависимость прочности образцов групп 1 (а, б) и 2 (в, г) от расхода ПЦ и ЩПС:

а, в – в виде столбчатой диаграммы; б, г – трехмерная поверхность;

— — профили аппликаты по вершинам 1-7-4, 2-7-5, 3-7-6

Fig. 3. Dependence of group 1 (a, b) and group 2 (c, d) samples' strength on Portland cement and crushed stone-sand mixture consumption: a, c - as a column diagram; b, d - three-dimensional surface;

— — profiles of applications on the tops of 1-7-4, 2-7-5, 3-7-6

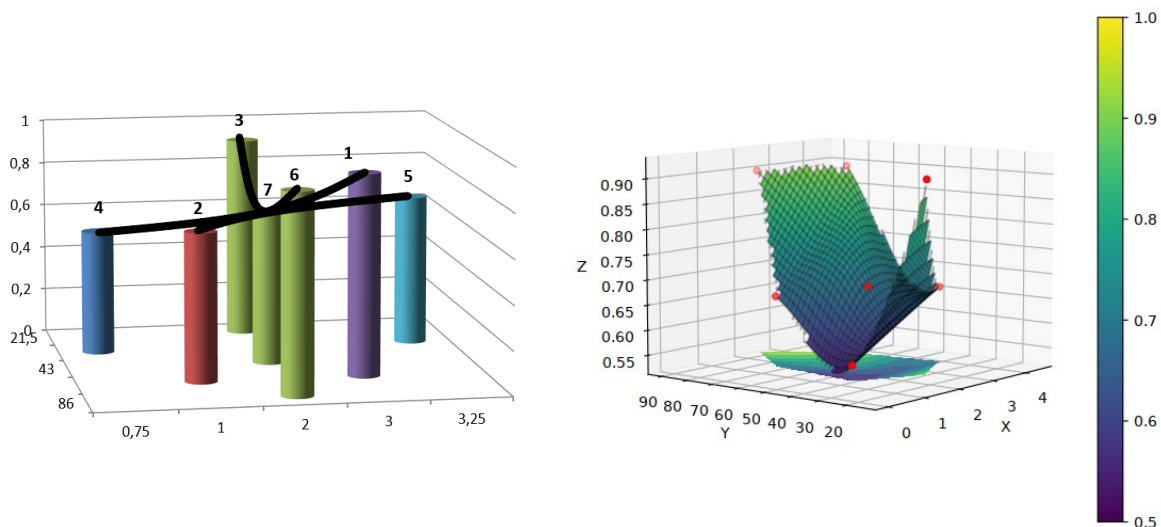
**Таблица 5.** Зависимость прочности образцов групп 1 и 2 от расхода портландцемента и щебеночно-песчаной смеси**Table 5.** Dependence of group 1 and 2 samples' strength on Portland cement and crushed stone-sand mixture flow rate

Расход ПЦ, %	Прочность образцов из группы 1 / группы 2, при различном содержании скелетного материала (ЩПС), %				
	21.50	32.25	43.00	64.50	86.00
0.75		0.17 / 0.10			
1.00				0.12 / 0.08	
2.00	0.22		0.26 / 0.18		0.20 / 0.18
3.00				0.32 / 0.29	
3.25		0.37			

Коэффициент водостойкости оценен нами как отношение значений прочности образцов группы 2 (водонасыщенные) к значению прочности образцов группы 1 (выдержанные на воздухе). Зависимость коэффициента водостойкости от расхода портландцемента и доли скелетного материала показана в табл. 6 и отражена на рис. 4.

Таблица 6. Зависимость водостойкости образцов от расхода портландцемента и щебеночно-песчаной смеси**Table 6.** Dependence of water resistance of samples on the consumption of Portland cement and crushed stone-sand mixture

Расход ПЦ, %	Содержание ЩПС, %				
	21.50	32.25	43.00	64.50	86.00
0.75		0,56			
1.00				0.67	
2.00	0.91		0.69		0.90
3.00				0.91	
3.25		0.68			

**Рис. 4.** Зависимость водостойкости образцов от расхода ПЦ и ЩПС:

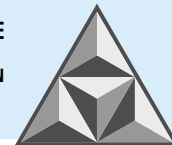
a – в виде столбчатой диаграммы, *b* – трехмерная поверхность;

— — профили аппликаты по вершинам 1-7-4, 2-7-5, 3-7-6

Fig. 4. Dependence of water resistance of samples on the flow rate of Portland cement and crushed stone-sand mixture: *a* – as a bar diagram, *b* – three-dimensional surface;

— — profiles of applications on the tops 1-7-4, 2-7-5, 3-7-6

Полученные значения коэффициента водостойкости асфальтогранулобетона доказывают прямое влияние рассматриваемых факторов в заданном пространстве на функцию отклика. Гиперповерхность отклика функциональной зависимости коэффициента водостойкости отвечает направляющей параболического цилиндра (поверхность второго порядка).



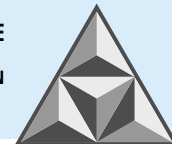
ВЫВОДЫ

Применение метода деформируемого симплекса (метод Нелдера-Мида) к изучению прочности и водостойкости асфальтогранулобетона в зависимости от его состава обеспечивает экономию материальных ресурсов и времени за счет сокращения числа опытов. Полученные поверхности функции отклика не являются плоскостями, что свидетельствует о нелинейной зависимости отклика от варьирования факторов. Зависимости второго порядка характеризуются такими поверхностями, как сфера, параболоид, эллипсоид, гиперболоид, цилиндр и конус.

Поверхность отклика зависимости прочности асфальтогранулобетона от входящих компонентов в виде столбчатых диаграмм близка по форме к сегменту чаши и гиперболического параболоида, а для коэффициента водостойкости – к направляющей параболического цилиндра. Однако при отражении результатов в виде поверхности сглаживания прослеживаются искривления, свидетельствующие о зависимостях более высокого порядка или влиянии внешних факторов вне выбранного факторного пространства.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Ярмолинский В.А., Буданова Е.С.** Холодный ресайклинг дорожных конструкций: учеб. пособие / Москва: Московский автомобильно-дорожный гос. техн. ун-т, 2024. 112 с.
2. Технология холодного ресайклинга [Электронный ресурс]. – URL: http://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/infomaterial_1/kaltrecycler/kaltrecycling_technologie/kaltrecycling_handbuch/_RU (дата обращения 12.11.2024).
3. **Никишин В.Е.** Опыт применения ресурсосберегающей технологии холодного ресайклинга // *Техническое регулирование в транспортном строительстве*. 2020. № 1 (40). С. 15-18.
4. **Ярмолинский В.А., Буданова Е.С.** Влияние состава асфальтогранулобетонных смесей на эффективность холодного ресайклинга // *Вестник Московского автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та*. 2024. № 2 (77). С. 3-10.
5. **Буданова Е.С., Ярмолинский В.А.** Холодный ресайклинг. Повышение эффективности использования на территории РФ // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3, № 2. С. 54-67. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5042/view>. DOI: 10.52957/27821919_2022_2_54 (дата обращения 12.12.2024).
6. **Ярмолинский В.А., Жабкин М.О.** Выбор оптимального количества вяжущего при холодном ресайклинге асфальтобетонных покрытий // *Вестник Московского автомобильно-дорожного гос. техн. ун-та*. 2021. № 2 (65). С. 49-55.
7. **Лазарева Т. Л.** Оптимизация состава холодной асфальтобетонной смеси с целью повышения эффективности ремонтных работ на автомобильных дорогах юга Дальнего Востока / Т. Л. Лазарева, Н. И. Ярмолинская // *Транспорт: наука, техника, управление: науч. информ. сб.* 2020. № 6. С. 9-14. DOI: 10.36535/0236-1914-2020-06-2.
8. **Буданова Е.С., Ярмолинский В.А., Борисов А.С., Кучинов Н.С.** Проблемы эффективного применения технологии холодного ресайклинга дорожных одежд // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, № 1. С. 31-42.
9. **Яконцева О.В., Щепетева Л.С.** Влияние зернового состава асфальтобетона на показатели физико-механических свойств // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2020. № 3. С. 71-76. DOI: 10.15593/24111678/2020.03.09.
10. **Кудрявцев А.Н.** Учет структурных разрушений неукрепленного каменного материала оснований при проектировании дорожных одежд: дисс. ... канд. техн. наук. Москва, 2021. 213 с.



11. **Елсуфьев К.А., Муравьева Я.И., Вдовых П.Е.** Метод оптимизации Нелдера-Мида // *Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы: сб. статей IX Межд. науч.-практ. конф.: в 4 ч. Пенза, 30 декабря 2017 года. Ч. 1.* Пенза: "Наука и Просвещение" (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. С. 113-116.

Поступила в редакцию 21.01.2025

Одобрена после рецензирования 06.03.2025

Принята к опубликованию 14.03.2025

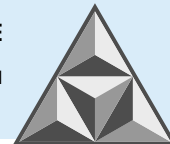
REFERENCES

1. **Yarmolinsky, V.A. and Budanova, E.S.** (2024), Kholodniy resayikling dorozhnykh konstruktсий: ucheb. posobie [Cold recycling of road structures: textbook], Moscow: Moscow Automobile and Road State Technical University, 112 p. (in Russian).
2. Technology of cold recycling [Electronic resource]. Available at: http://media.wirtgen-group.com/media/02_wirtgen/infomaterial_1/kaltrecycler/kaltrecycling_technologie/kaltrecycling_handbuch/_RU (accessed 12.11.2024) (in Russian).
3. **Nikishin, V.E.** (2020), "Experience of application of resource-saving cold recycling technology", *Technical regulation in transport construction*, vol. 1, no. 40, pp. 15-18 (in Russian).
4. **Yarmolinsky, V.A. and Budanova, E.S.** (2024), "Impact of asphalt granuloconcrete mixes composition on the efficiency of cold recycling", *Bulletin of the Moscow Automobile and Road State Technical University*, vol. 2, no. 77, pp. 3-10 (in Russian).
5. **Budanova, E.S. and Yarmolinsky, V.A.** (2022), "Cold recycling. Improving the efficiency of use in the territory of the Russian Federation", *Smart Composite in Construction*, vol. 3, no. 2, pp. 54-67 [online]. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N2_2022 (In Russian) (accessed 12.12.2024).
6. **Yarmolinsky, V.A. and Zhabkin, M.O.** (2021), Selection of the optimal amount of binder during cold recycling of asphalt concrete pavements, *Bulletin of Moscow Automobile and Road State Technical University*, vol. 2, no. 65, pp. 49-55 (in Russian).
7. **Lazareva, T.L. and Yarmolinskaya, N.I.** (2020), "Optimisation of cold asphalt-concrete mixture composition to improve the efficiency of repair works on motor roads in the south of the Far East", *Transport: nauka, tekhnika, upravlenie: nauchno. inform. sb.*, no. 6, pp. 9-14. DOI 10.36535/0236-1914-2020-06-2 (in Russian).
8. **Budanova, E.S., Yarmolinsky, V.A., Borisov, A.S. and Kuchinov, N.S.** (2024), "Challenges of effective use of cold-in-place recycling technology of road pavements", *Smart Composite in Construction*, vol. 5, no. 1, pp. 31-42 (in Russian).
9. **Yakontseva, O.V. and Shchepeteva, L.S.** (2020), "Influence of asphalt concrete grain composition on physical and mechanical properties", *Transport. Transportnye sooruzheniya. Ekologiya*, no. 3, pp. 71-76. DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.03.09> (in Russian).
10. **Kudryavtsev, A.N.** (2021), Consideration of Structural Fractures of Unreinforced Stone Base Material in Design of Road Pavements. Diss. of cand. tech. sc. Moscow, Russia, 213 p.
11. **Elsufiev, K.A., Muravyeva, Ya.I. and Vdovych, P.E.** (2017), 'Nelder-Mida optimisation method', *Breakthrough scientific research: issues, patterns, perspectives: collection of proceedings of IX Mezhd. nauch.-prakt. conf.: in 4 parts. Penza, 30 December 2017, part 1, Penza: 'Nauka i Prosveshchenie'*, pp. 113-116 (in Russian).

Received 21.01.2025

Approved 06.03.2025

Accepted 14.03.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.7./8, 531.7 : 544.576

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-60-72

Оценка размеров частиц битумной суспензии с помощью фотосъемки и обработки данных седиментации

**Ю.Э. Васильев, Г.Ш. Малазоня, А.В. Кочетков,
А.Ф. Иванов, Д.А. Кочетков**

Юрий Эммануилович Васильев¹, Георгий Шалвович Малазоня¹, Дмитрий Андреевич Кочетков¹

¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация

dsm@madi.ru, geo.rnd1749@gmail.com, kdasoni@mail.ru

Андрей Викторович Кочетков^{2*, 3}

²ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, Российская Федерация

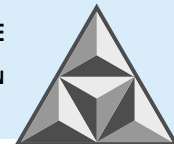
³Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация

*soni.81@mail.ru**

Александр Федорович Иванов⁴

⁴Поволжское отделение Российской академии транспорта, Саратов, Российская Федерация

IvanovAF@mgsu.ru



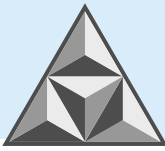
Решена задача получения технологического передела – трехкомпонентной системы «микродиспергированное минеральное зерно – микродиспергированная частица вязкого битума – вода» при последовательном дозировании компонентов сырья на асфальтобетонном заводе. Для исключения расслаивания битумной суспензии, обеспечения ее перевозки автосамосвалами, хранения в грунтовом котловане и погрузки необходимо приготавливать суспензию вязкой консистенции. Предлагается отказаться от разогрева битума в зимний период и использовать готовые материалы для дорожного строительства в холодном виде. Добавление минеральных компонентов позволит производить на российских предприятиях холодные аналоги асфальтобетонных смесей длительного хранения.

Ключевые слова: битум, суспензия, методы дисперсионного анализа, световая микроскопия, фотоседиментация, гравиметрия

Для цитирования:

Васильев Ю.Э., Малазоня Г.Ш., Кочетков А.В., Иванов А.Ф., Кочетков Д.А. Оценка размеров частиц битумной суспензии с помощью фотосъемки и обработки данных седиментации // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 5, вып. 1. С. 60-72.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-60-72



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-60-72

Estimation of bitumen suspension particle size using photography and sedimentation data processing

**Yu.E. Vasiliev, G.Sh. Malazonia, A.V. Kochetkov,
A.F. Ivanov, D.A. Kochetkov**

Yury Emmanuilovich Vasil'ev¹, Georgy Shalvovich Malazoniya¹, Dmitry Andreevich Kochetkov¹

¹Moscow Automobile and Road Engineering State Technical University, Moscow, Russian Federation
dsm@madi.ru, geo.rnd1749@gmail.com, kdasoni@mail.ru

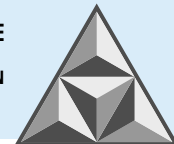
Andrey Viktorovich Kochetkov^{2*,3}

²FAI "ROSDORNII", Moscow, Russian Federation

³Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
*soni.81@mail.ru**

Aleksandr Fedorovich Ivanov⁴

⁴Volga Region Branch of the Russian Academy of Transport, Saratov, Russian Federation
IvanovAF@mgsu.ru



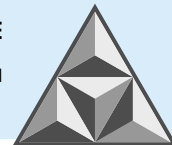
The paper solves the task of obtaining the technological conversion - three-component system 'microdispersed mineral grain - microdispersed particle of viscous bitumen - water' at consecutive dosing of raw material components at the asphalt-concrete plant. It is necessary to prepare the bitumen suspension of viscous consistency to avoid delamination of bitumen slurry, to ensure its transportation by dump trucks, storage in the excavation and loading. The authors propose to refuse to heat bitumen in winter and to use ready-made materials for road construction in cold form. The addition of mineral components will make it possible to produce cold analogues of long-term storage asphalt concrete mixtures at Russian enterprises.

Keywords: bitumen, suspension, dispersion analysis methods, light microscopy, photosedimentation, gravimetry

For citation:

Vasiliev Yu.E., Malazonia G.Sh., Kochetkov A.V., Ivanov A.F., Kochetkov D.A. Estimation of bitumen suspension particle size using photography and sedimentation data processing // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. P. 60-72. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-60-72



ВВЕДЕНИЕ

В истории отечественного дорожного хозяйства остался малоизвестным феноменальный результат, когда в 1989 г. в Саратовской области было построено 750 км новых автомобильных дорог общего пользования в условиях острого дефицита фондируемых дорожно-строительных материалов. Это было достигнуто за счет применения технологии круглогодичного строительства, при этом даже асфальтобетонные слои устраивались при отрицательных температурах.

«В период с 1975 года до декабря 1991 года дорожные работы в Саратовской области обеспечивались структурой областного исполнительного комитета Администрации Саратовской области – Саратовским дорожным ремонтно-строительным управлением ПРСО «Саратовавтодор» под руководством Нолия Петровича Самотеева. В этот период была построена опорная сеть автомобильных дорог, соединены с областным центром все районы области. Общая протяженность построенных и реконструированных в это период автомобильных дорог составила порядка 8.5 тыс. километров»¹.

Одним из эффективных решений, обеспечивших возможность круглогодичного строительства дорог, явилось применение так называемой «саратовской» технологии влажных холодных асфальтобетонных смесей на основе диспергированного вязкого битума. Эта технология была разработана проф. Н.А. Горнаевым в Дорожной исследовательской лаборатории Министерства автомобильных дорог РСФСР при Саратовском политехническом институте.

Холодные смеси производили с использованием твердых эмульгаторов на асфальтобетонных заводах г. Саратова (без выделения вредных газообразных веществ), а также на всей территории Саратовской и Самарской (тогда Куйбышевской) областей. Их транспортировали речными судами летом и круглогодично – по железной дороге. Для перевозки по автомобильным дорогам применяли не только самосвалы, но и бортовой грузовой транспорт. Дорожные строительные материалы складировали в буртах и на складах.

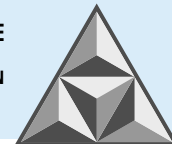
Такая технология отличалась от горячей применением существующих рецептур минеральной части в холодном состоянии, в которую добавлялась вода до достижения вязкого тиксотропного состояния и постадийного связанного дозирования горячего вязкого битума. Смесей производили на типовых асфальтобетонных заводах, которые оснащались системами подачи воды.

В качестве твердого эмульгатора применяли различные минеральные порошки, в том числе – пыль асфальтобетонного завода, известь и другие аналоги. Выпускались различные составы мелкозернистого и крупнозернистого асфальтобетона, литые асфальтобетоны, ремонтные холодные смеси. Технология была использована в регионах с устойчивым теплым летним климатом в Оренбургской, Самарской и Волгоградской областях, а также в Крыму и Казахстане. В Саратове такие материалы использовали при устройстве шестиполосных магистральных дорог.

Постановка прикладной задачи

В дорожном строительстве наблюдается устойчивая тенденция поиска асфальтовых материалов и полуфабрикатов, которые при температуре воздуха могут длительное время сохранять технологические характеристики, а после укладки и уплотнения (формирования

¹ https://sarobldor.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=9&Itemid=3



каркаса укаткой) – приобретать новые свойства. Такие материалы принято называть холодными асфальтобетонами или органоминеральными материалами. Особенностью материалов с дисперсным битумом является растянутость во времени процессов формирования структуры и высокая сопротивляемость внешним воздействиям.

Диспергирование органического вяжущего является основным процессом структурообразования на стадии приготовления асфальтовых смесей с дисперсным битумом. Критерием оптимизации состава и технологии приготовления асфальтовых материалов с битумом следует считать дисперсность, которая влияет на протекание процессов структурообразования в последующих технологических переделах и в итоге – на свойства дорожной одежды.

Поставлена задача получения первого технологического передела (полуфабриката), обладающего отличительными признаками вышеуказанных смесей, производимых по саратовской технологии. Такой полуфабрикат назван полидисперсной битумной суспензией (ПБС) – трехкомпонентной системой «микродиспергированное минеральное зерно – микродиспергированная частица вязкого битума – вода».

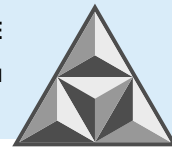
Фактически авторами настоящей работы разработана технология получения и применения устойчивых (квазиустойчивых) битумных суспензий, разнообразных по составу и свойствам. Это подтверждается рядом отечественных публикаций [1-4]. Российские исследования, достаточно полно отражающие научно-технический уровень разработки темы, приведены в [5-9]. В качестве нормативных документов использованы ГОСТ 22662-77 «Порошки металлические. Методы седиментационного анализа» и ГОСТ 23402-78 «Порошки металлические. Микроскопический метод определения размеров частиц». Зарубежные аналоги представлены в [10-15]. Приведенные в них данные были использованы при разработке методических вопросов, решаемых в рамках представленного исследования.

Близким аналогом предлагаемого технического решения являются строительные пасты для заделки щелей в деревянных полах, состоящие из микрорамора, пигмента, вяжущего (акрил) и воды. Существенным отличием предлагаемой технологии является последовательное дозирование применяемых компонентов (вяжущего, твердого эмульгатора, воды).

Основной идеей отечественной научной школы разработки составов при производстве асфальтобетонных смесей является обволакивание каменного зерна (щебня, песка, отсева, частиц минерального порошка) пленкой вяжущего (битумом, полимербитумом).

В данном же случае применяется альтернативная технология: частица диспергированного вязкого битума опудрена минеральным порошком и помещена в водную среду. Добавление воды препятствует слипанию частиц вяжущего компонента и каменного материала. В летний период под действием тепла и транспортной нагрузки вяжущее переходит в пленочное состояние. Материал для дорожного строительства приобретает особые свойства, например, к нему не применяются требования по морозостойкости.

Идея полуфабриката в настоящей статье возникла при анализе работы [1] и паспорта научной специальности 2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей, а конкретно – п. 16. Вопросы организации производства, механизации и автоматизации технологических процессов производственных предприятий, обеспечивающих строительство, реконструкцию и эксплуатацию транспортных сооружений материалами, полуфабрикатами и изделиями. В указанном пункте паспорта специальности отдельно выделен термин «полуфабрикат», который по смыслу отличается от терминов «материалы» и «изделия».



Добавление в данный полуфабрикат других веществ в рамках заданной рецептуры без их разогрева позволяет получать холодные влажные аналоги асфальтобетонных смесей типа А, Б, В, Г, Д, а также литые асфальтобетоны, эмульсионно-минеральные и ремонтные смеси, мастики, вяжущие для асфальтогранулята, пропитки и материалы для ремонта крыш [2-4].

А.Ф. Ивановым [4] экспериментально установлен срок хранения специально отобранной мелкофракционной составляющей холодных асфальтобетонных смесей на основе диспергированного вязкого битума в условиях ограниченного доступа воздуха. Он составляет более 40 лет, что является выигрышным по сравнению со сроком хранения битумной эмульсии (≤ 1 мес.). Разведенная водой смесь может находиться в полусухом (рыхлом, рис. 1), влажном и жидком состоянии. Она хранится в буртах или в закрытых складах в мешках.

Находясь в пластичном состоянии, битумная суспензия под воздействием внешних сил обладает способностью деформироваться без разрыва сплошности и сохранять форму после прекращения воздействия.

При этом остается открытым вопрос технического нормирования и регулирования данного полуфабриката. Одним из важных показателей является определение количества вяжущего в нем, а также седиментационная устойчивость в зависимости от кислотности-щелочности и морфологии применяемого каменного материала.

Для совершенствования предложенной технологии необходимо установить взаимосвязь между дисперсностью композиций и их физико-химическими свойствами. Для этого целесообразно использовать экспериментальную методику оценки размеров частиц, разработанную в настоящем исследовании

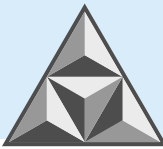
Твердые эмульгаторы из осадочных пород, имеющие большую удельную площадь поверхности, более устойчивы к изменению физико-химических свойств по сравнению с твердыми эмульгаторами из изверженных пород. Поверхность проезжей части после распределения разжиженной суспензии автобетоносмесителем в виде тонкого обеспыливающего слоя представлена на рис. 2.



Рис. 1. Битумная суспензия в рыхлом состоянии (фото авторов)
Fig. 1. Bitumen suspension in a loose state (photo by the authors)



Рис. 2. Проезжая часть после распределения жидкой суспензии в виде тонкого обеспыливающего слоя
Fig. 2. Road surface after spreading the suspension slurry as a thin dedusting layer



Со временем происходит изменение однородности состава смеси. Наблюдается разделение на зоны с повышенным содержанием диспергированного битума («черная вода») и светлые зоны с высоким содержанием водной взвеси минерального порошка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Цель исследования – разработка простого и технически доступного метода анализа размеров частиц битумной суспензии с помощью цифровой фотосъемки и обработки изображений процесса седиментации.

Состав битумной суспензии, мас%:

- известняковый минеральный порошок – 33;
- вода техническая – 34;
- битум марки БНД 90/130 – 33.

Битумную суспензию готовили следующим образом. Твердый эмульгатор в виде известнякового минерального порошка с температурой 18°C дозировали и подавали в смеситель (200 кг), куда при непрерывном перемешивании вводили воду (80 л) с температурой 18°C до получения сметанообразной консистенции, по внешнему виду похожей на цементный раствор, затем подавали битум (40 кг) с температурой 155°C.

В процессе перемешивания битума с суспензией твердого эмульгатора смесь распалась на частицы сферической формы со средним диаметром 1 мкм. В аппарат добавляли 20 л воды и производили перемешивание в течение 30 с, далее подавали битум (40 кг) и вновь смешивали 30 с. Для разведения суспензии добавляли 40 л воды, после чего вводили 40 кг битума и продолжали перемешивание в течение 30 с.

Готовую битумную суспензию выгружали в ковш подъемника, а затем – в металлическую емкость, размещенную в кузове автосамосвала, и доставляли к месту производства работ.

Приготовленная битумная смесь, похожая на пластилин темно-серого цвета, легко разбавлялась холодной водой до жидкой консистенции; при этом битумные частицы были неразличимы невооруженным глазом.

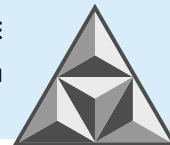
Визуально в суспензии содержалось избыточное количество воды. Суспензия быстро расслаивалась с самопроизвольным отделением наиболее тонкодисперсной части битума и минерального порошка в виде жидкости черного цвета.

Для оценки размера частиц битумной суспензии использовали методическую базу [5] и ГОСТ 23402–78, вооружившись портативным цифровым микроскопом DM 200-2 (Китайская Народная Республика) с увеличением $\times 200$ (рис. 3).



Рис. 3. Цифровой микроскоп DM 200-2

Fig. 3. DM 200-2 Digital Microscope



Системные требования для установки программного обеспечения цифрового микроскопа: ОС Windows XP SP2 / Vista / Windows 7 / Mac OS; процессор: Pentium IV 1.0G, Celeron, AMD Athlon; CD-ROM; свободный USB-порт; 512 MB RAM; 100 MB свободного места на диске; видеокарта: 16-bit.

Для получения достоверных результатов измерения повторяли 10 раз и подсчитывали средние значения размеров частиц.

Средний диаметр частиц битума, определяемый с помощью указанного цифрового микроскопа с измерительной шкалой, составлял около 1 мкм.

Авторами подобран состав, пригодный для длительного хранения в герметичной таре с сохранением технологических и функциональных свойств. Готовую битумную суспензию расфасовывали в мешки массой 30-40 кг из синтетической ткани, внутри которых дополнительно помещали также мешок из полиэтилена (для снижения потери влажности смеси), и отправляли на склад.

Битумную суспензию впоследствии применяли для различных целей (ремонт трещин на асфальтобетонном покрытии и кровли на зданиях, приготовление материалов для ремонта выбоин на асфальтобетонных покрытиях автомобильных дорог и городских улиц).

В сертифицированную многофункциональную лабораторию ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет» суспензию доставляли в стеклянных герметичных емкостях и мешках. Битумная суспензия, которая находилась в мешках, из-за незначительного повреждения тары частично потеряла влажность, однако при разведении водой и перемешивании она переходила в требуемое текучее состояние.

Для испытаний применяли секундомер и линейку. Образцы суспензии из стеклянной герметичной емкости и мешка разводили водой и помещали в стеклянные цилиндры диаметром 20 мм и высотой 70 мм (на фото, размещенном слева, приведен цилиндр с разведенной суспензией из стеклянной герметичной емкости).

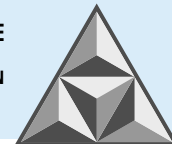
Приготовленную суспензию тщательно перемешивали в течение 2-3 мин стеклянной палочкой до тех пор, пока не устанавливалось равномерное распределение частиц по всему объему. После встряхивания производили фотографирование образцов суспензий с использованием секундомера (цена деления 0.2 с) и линейки (цена деления 1.0 мм) спустя различное время от начала гомогенизации. Секундомер позволяет установить время осаждения частиц суспензии, а линейка – зафиксировать толщину слоя осадка с различными цветовыми оттенками и момент завершения процесса осаждения частиц битумной суспензии.

Состояние суспензий в разведенном состоянии непосредственно после гомогенизации и фотофиксации процесса седиментации спустя 39 и 3062 с от начала процесса представлены на рис. 4.



Рис. 4. Вид суспензий после гомогенизации встряхиванием и фотофиксации процесса седиментации спустя 39 (а) и 3062 с (б) от его начала

Fig. 4. View of suspensions after homogenization by shaking and photo fixation of the sedimentation process from the beginning: a – 39 seconds; b – 3062 seconds



Отдельно отметим, что вид суспензий на рис. 4 относится к одной экспериментальной серии. Принципиальное отличие проб, приведенных на рис. 4, а и 4, б, заключается во времени проявления контрастных границ между темным и светлым фоном для битумных суспензий, приготовленных из герметичной стеклянной емкости и мешка. Если для осажденной суспензии из мешка осадок был одного цвета (черного), то изображение осажденной битумной суспензии из герметичной стеклянной емкости через 3062 с (рис. 4, б) имеет два участка разного цвета (серого в нижней части и черного сверху).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ фотографий показывает, что частично обезвоженная битумная суспензия, хранившаяся в негерметичной таре (цилиндр на рисунке справа) после разведения водой осаждается в основном в течение первой минуты. Это можно объяснить тем, что в процессе длительного хранения (5 лет) произошло образование агрегатов из битумных и крупных минеральных частиц. Такой вывод базируется на том, что на дне цилиндра отсутствует слой осадка из минерального порошка белого цвета.

На поверхности осадка наблюдается тонкий слой частиц минерального порошка белого цвета, а также дисперсная взвесь. Эти наблюдения показывают, что не весь объем тонкодисперсных минеральных частиц задействован в стабилизации на стадии приготовления суспензии. Поэтому, вероятно, можно получать суспензии и с повышенным содержанием битума.

Более детальные визуальные и инструментальные исследования проводились для битумной суспензии из герметичной тары (на фотографии – цилиндр, расположенный слева).

Установлено, что процесс седиментации практически завершается спустя $\tau = 3062$ с от его начала; при этом образуется столб осадка из частиц битумной суспензии высотой 17 мм (100% высоты).

Для определения фактического размера битумных частиц из различных горизонтов столба осаждения с помощью пипетки отбирали пробы и с помощью цифрового микроскопа определяли их средний диаметр.

На рис. 5 приведены результаты анализа яркости черно-белых цифровых изображений столба седиментации частиц битумной суспензии. Как видно из рис. 5, яркость изображений возрастает в процессе седиментации частиц по глубине осадка в суспензии.

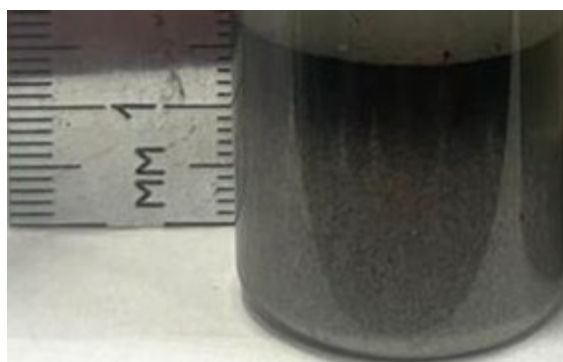
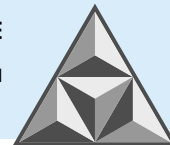


Рис. 5. Изменение яркости и контрастности изображения столба осажденных частиц суспензии
Fig. 5. Changing the brightness and contrast of the image of the column of precipitated suspension particles

Видно, что на осажденном участке изображение в верхней части более темное, тогда как внизу, в придонной части, оно гораздо светлее. Имеется две контрастные границы, при этом верхняя – более резкая (резкость – третья производная). Авторы данного исследования более



темный участок назвали «битумная вода», или «битумная взвесь». При этом седиментационная устойчивость сохранялась на протяжении всего периода наблюдения. По результатам наблюдений сформулированы рекомендации по выбору увеличения микроскопа в зависимости от размеров исследуемого объекта (в миллиметрах). Необходимые соотношения для цифрового аппарата представлены в табл. 1.

Таблица 1. Соотношение видимой области и увеличения для цифрового микроскопа

Table 1. Visible Area to Magnification Ratio for Digital Microscope

Увеличение	×10	×20	×30	×50	×100	×150	×200
Видимая область, мм	50 × 38	25 × 19	17 × 13	10 × 7.5	5 × 3.8	3.3 × 2.5	2.5 × 1.9

Авторами разработан программный модуль анализа светотехнических показателей (контрастности, светлоты, резкости) на основе расчета отношения яркостей выбранных участков. При отображении фотографии на экране монитора каждая точка будет представлена в формате RGB. При фотографировании используется эталон. Статистическая обработка проводится с помощью программного обеспечения Microsoft Excel. Программный модуль подтверждает возможность определения контрастности границ между темным и светлым участком фотоизображения осажденной битумной суспензии и завершения процесса.

Установлено, что на поверхности осадка визуальное выраженного темного цвета (на уровне высоты 100%) средний диаметр битумных частиц составляет 0.4 мкм, в середине осадка (на уровне высоты 75%) он равен 12.0 мкм, а в нижней части столба осадка (на уровне высоты 50%) – достигает уже 110.0 мкм.

В качестве примера практической реализации методики на рис. 6 приводится снятая фотография битумной суспензии, разведенной водой на асфальтобетонном заводе в Кувандыкском городском округе (Оренбургская обл.).

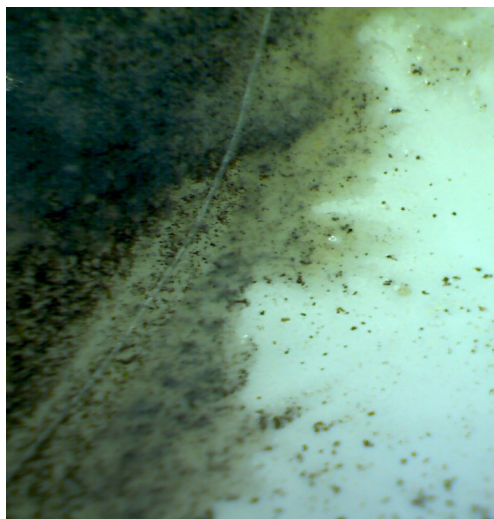
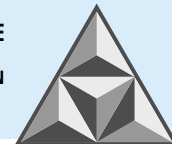


Рис. 6. Фотография заводской битумной суспензии после разведения ее водой

Fig. 6. Photograph of a factory bitumen suspension after dilution with water

Для сравнительной оценки размера битумных капель слева помещен волос человека (белая параболическая линия на рис. 6). Хорошо видно, что размер битумных частиц меньше диаметра волоса (последний легко замеряется микрометром). Также отмечается, что в данной полидисперсной системе наблюдается несколько фракций частиц, различающихся по размеру.



ВЫВОДЫ

1. Показана возможность появления в отечественном дорожном хозяйстве новой технологии обращения с битумными вяжущими при производстве последних, их хранении, транспортировании и применении в виде полидисперсной суспензии, а также разработки методологических основ их нормирования и контроля качества.

2. Результаты предлагается рассматривать как первый этап реализации программы исследований в области проектирования и строительства дорог с использованием современных цифровых методов обработки экспериментальных данных, что позволит в дальнейшем усовершенствовать предлагаемые технологические решения.

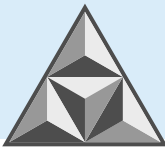
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Игнатъев А.А.** Функционально устойчивые дорожные гранулированные смеси (пределы) длительного хранения: спец. 2.1.8. Автореф. дисс... д-ра техн. наук. ФАУ «РОСДОРНИИ», Москва, 2024. DOI: 10.18720/SPBPU/2/r24-18.
2. Патент РФ № 2662493 Способ получения битумной эмульсии и битумная эмульсия. А.В. Кочетков. Оpubл. 26.07.2018.
3. **Кочетков А.В.** Битумная суспензия на твердом эмульгаторе // Транспортные сооружения. 2018. №4. [Электронный ресурс]. URL: <https://t-s.today/PDF/15SATS418.pdf> (дата обращения 10.01.2025). DOI: 10.15862/15SATS418.
4. **Кочетков А.В., Андронов С.Ю., Иванов А.Ф. [и др.]**. Битумная суспензия: моногр.; под ред. Ю.Э. Васильева, Н.Е. Кокодеевой. Саратов: Саратовский гос. техн. ун-т им. Ю.А. Гагарина, 2019. 192 с.
5. **Романовский С.И.** Физическая седиментология. Л.: Недра, 1988. 240 с.
6. **Фролов Ю.Г.** Курс коллоидной химии. М.: Альянс, 2004. 424 с.
7. **Шапиро Л., Стокман Дж.** Компьютерное зрение. М.: Бином, 2006. 762 с.
8. **Кэлби С.** Цифровая фотография. М.: Вильямс, 2011. В 2 т. Т. 1. 224 с.; Т. 2. 258 с.
9. **Сазановец М.А., Игнатенко А.В.** Метод анализа скорости седиментации частиц в водных средах // Труды БГТУ. 2013. № 4: Химия, технология орган. веществ и биотехнология. С. 48-50.
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*. 2016. 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 Article (PDF Available) // *Materials* 11 (11):2148, October 2018. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. **Celauro Clara, Praticò Filippo.** Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses // *Construction and Building Materials* 170:245-253, May 2018. 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 // *Appl. Sci.* 8 (11):2191, November 2018 with 32 Reads. 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* 159:508-516, January 2018. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
15. **Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan.** Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // *Appl. Sciences* 8 (12):2581, December 2018. DOI: 10.3390/app8122581.

Поступила в редакцию 21.01.2025

Одобрена после рецензирования 17.02.2025

Принята к опубликованию 14.03.2025



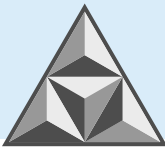
REFERENCES

1. **Ignatyev, A.A.** (2024), Functionally stable road granulated mixtures (redesigns) of long-term storage: Author's thesis... Dr. Tech. Sci. FAI 'ROSDORNII', Moscow, Russia. DOI 10.18720/SPBPU/2/r24-18 (in Russian).
2. **Kochetkov, A.V.** (2018), Method of obtaining bitumen emulsion and bitumen emulsion. Pat. RU No. 2662493, Russia.
3. **Kochetkov, A.V.** (2018), Bitumen suspension on solid emulsifier, *Transport Structures*, no. 4. Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS418.pdf>. DOI: 10.15862/15SATS418 (in Russian).
4. **Kochetkov, A.V., Andronov, S.Yu., Ivanov, A.F. et al.** (2019), *Bitumnaya suspenziya: monogr. [Bitumen suspension: a monograph]*, edited by Yu.E. Vasiliev, N.E. Kokodeeva, Saratov: Saratov State Technological University named after Yu.A. Gagarin, 192 p. (In Russian).
5. **Romanovsky, S.I.** (1988), *Fizicheskaya sedimentologiya [Physical sedimentology]*, L.: Nedra, 240 p. (in Russian)
6. **Frolov, Yu.G.** (2004), *Kurs kolloidnoj khimii [Course of colloid chemistry]*, Moscow: Alliance, 424 p. (in Russian).
7. **Shapiro, L. and Stockman, J.** (2006), *Komp'yuternoe zrenie [Computer Vision]*, Moscow: Binom, 762 p. (in Russian).
8. **Calby, S.** (2011). *Tsifrovaya fotografiya [Digital Photography]*, M.: Williams, In 2 vols, vol. 1, 224 p.; vol. 2, 258 p.
9. **Sazanovets, M.A. and Ignatenko, A.V.** (2013), Method for analysing the sedimentation rate of particles in aqueous media, *Proceedings of BSTU: Chemistry, Technology of Organic Substances and Biotechnology*, no. 4, pp. 48-50 (in Russian).
10. **Di, Yu, Wensheng, W., Yongchun, Ch. and Yafeng, G.** (2016), Laboratory investigation on the properties of asphalt mixtures modified with double-adding admixtures and sensitivity analysis, *Journ. Traffic and Transport. Eng.* DOI: 10.1016/j.jtte.2016.09.002.
11. **Yongchun, Cheng, Di, Yu, Guojin, Tan and Chunfeng, Zhu** (2018), Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber – Diatomite – Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles Article (PDF Available), *Materials* 11 (11):2148, October 2018. DOI: 10.3390/ma11112148.
12. **Celauro, C., Praticò, F.** (2018), Asphalt mixtures modified with basalt fibres for surface courses, *Construction and Building Materials*, 170:245-253. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.03.058.
13. **Yafeng, Gong, Haipeng, Bi, and Chunyu, Liang** (2018), Shurong Wang Microstructure Analysis of Modified Asphalt Mixtures under Freeze-Thaw Cycles Based on CT Scanning Technology, *Appl. Sci.*, 8 (11):2191, November 2018. DOI: 10.3390/app8112191.
14. **Xiao, Q., Aiqin, Sh., Yinchuan, G. and Zhennan, Li** (2018), Characterization of asphalt mastics reinforced with basalt fibers, *Construction and Building Materials* 159:508-516. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.11.012.
15. **Yafeng, Gong, Haipeng, Bi, Zhenhong, Tian and Guojin, Tan** (2018), Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles, *Appl. Sci.*, 8 (12):2581, December 2018. DOI: 10.3390/app8122581.

Received 21.01.2025

Approved 17.02.2025

Accepted 14.03.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 316.3

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-73-83

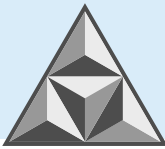
Тенденции развития креативных пространств: Ярославский опыт

Н.А. Личак, Н.Е. Ушакова, И.Д. Малышев

Наталья Алексеевна Личак, Наталья Евгеньевна Ушакова, Иван Денисович Малышев

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

lichakna@ystu.ru, ushakovane@ystu.ru, drogonoid5@mail.ru



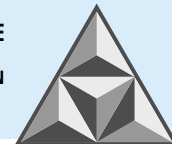
Представлены тенденции развития креативных пространств в современном городе. Изучен положительный опыт их создания в Ярославле с целью трансформации неиспользуемых промышленных территорий «Textil» на площадях действующей фабрики «Красный Перекоп» и организации нового пространства на месте бывшего мукомольного завода № 1. Методами сбора данных явились объективный анализ, наблюдение, фотофиксация и опрос. Концептуальной основой в методологии исследования стал подход к пониманию креативности как динамичной части культурного капитала. В этом контексте креативные пространства представляют точки роста социальных изменений в обществе и сознании людей. Обладая свойством многофункциональности, они способствуют формированию цельного архитектурного облика города с учетом концентрированной совокупности общечеловеческих, культурных ценностей и ресурсов. Арт-кластер на современном этапе является синергией искусства архитектуры, культуры и бизнеса.

Ключевые слова: креативные пространства, Ярославль, архитектурный и культурный капитал, методы исследования

Для цитирования:

Личак Н. А., Ушакова Н. Е., Малышев И.Д. Тенденции развития креативных пространств: ярославский опыт // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 1. С. 73-83.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-73-83



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-73-83

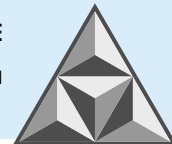
Trends in the development of creative spaces: the experience of Yaroslavl

N.A. Lichak, N.E. Ushakova, I.D. Malyshev

Natalia Alekseevna Lichak, Natalia Evgenievna Ushakova, Ivan Denisovich Malyshev

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation,

lichakna@ystu.ru, ushakovane@ystu.ru, drogonoid5@mail.ru



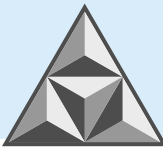
The paper presents trends in the development of creative spaces in the modern city. The authors have studied the positive experience of their creation in Yaroslavl in order to transform the unused industrial areas 'Textil' on the premises of the existing factory 'Krasny Perekop' and to organise a new space on the site of the former flour mill No. 1. The methods of data collection are objective analysis, observation, photo-fixation and survey. The conceptual basis in the research methodology is the approach to understanding creativity as a dynamic part of cultural capital. In this context, creative spaces represent points of growth of social changes in society and people's consciousness. Possessing the property of multifunctionality, they contribute to the formation of the integral architectural image of the city, taking into account the concentrated totality of universal and cultural values and resources. Art cluster at the present stage is a synergy of the art of architecture, culture and business.

Keywords: creative spaces, Yaroslavl, architectural and cultural capital, research methods

For citation:

Lichak N.A., Ushakova N.E., Malyshev I.D. Trends in the development of creative spaces: the experience of Yaroslavl // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 1. P. 73-83.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-1-73-83



ВВЕДЕНИЕ

Появление свободных творческих пространств является одной из тенденций современной урбанистики и архитектуры. На таких территориях могут быть соединены архитектурные бизнес-идеи и общественные интересы. Возможность привлечения активных граждан и архитекторов-творцов с их проектами дает возможность по-новому посмотреть и оценить городские пространства. Ведь креативные пространства изначально рассчитаны на людей, имеющих неординарный подход к реализации своих идей.

Функциями развития креативных городских пространств является их трансформация, формирование инновационного потенциала, туристическая активность, актуализация досуга молодых людей, развитие бизнес-идей.

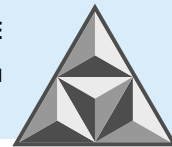
Привлечение инвесторов к реализации проектов, связанных с креативными пространствами, приводит к тому, что различные площади, ранее использовавшиеся под технические цели, получают новый статус и развитие. Бизнесмены и местные органы власти получают прибыль, творчески ориентированные люди – территорию для созидания и духовного развития, а жители города убеждаются в востребованности и перспективности своего города [1, 2].

Исследования по вопросам креативных городских пространств ведутся в России и за рубежом с 1960-х годов. Значимые результаты в области специфики и трендов креативных индустрий, их способности вступать в эффективные коллаборации с другими индустриями оценены отечественными учеными – С.И. Прохоровым, Б.В. Лабудиным, И.Б. Ардашкиным, Л.А. Коробейниковым, Ю.В. Перминовой, А.А. Погорельцевым, Г.Е. Гун, А.И. Киселевой, Д.С. Меньшиковой, С.Б. Турковским, Е.Н. Серовым, А.Г. Черных, О.В. Тюриной и др. [3-5]. Зарубежные авторы – П. Бурдье, А. Лефевр, М. де Серто, Р. Флорида, Ч. Лэндри [6, 7] изучали проявление творческих инициатив на креативных пространствах, ориентируясь на потребности жителей города и предпринимателей. Вместе с тем велись дискуссии о том, какие движущие силы увеличивают потенциал культурного капитала, каким образом они влияют на другие социальные процессы. Новейшие тенденции развития креативных пространств, хорошо зарекомендовавшие себя в западных странах, постепенно приживаются и в российской экономике, стимулируя потенциал участников и объединяя не связанные, на первый взгляд, идеи в единый креативный сектор с получением как творческой, так и материальной выгоды.

Структурирование творческого городского пространства невозможно без внедрения проектной деятельности, обособлено направленной на трансформацию свободных территорий, оставшихся от индустриальной экономики – помещений заводов и фабрик, промышленных конструкций, пунктов размещения, интересных локаций, с тем, чтобы они не были потеряны для развития города и качества жизни граждан.

ИСТОРИЧЕСКАЯ СПРАВКА

Потребность в развитии креативных пространств появилась на рубеже последних столетий в западных странах. Реалии постиндустриальной экономики изменили назначение промышленных предприятий; часть помещений производственного и непроизводственного характера стали приспособлять под нужды предпринимателей. С одной стороны, рыночная стоимость в центральных районах американских городов была достаточно высока. Вместе с тем полупустующие помещения успешно приспособлялись под творческие мастерские



архитекторов и дизайнеров, художников, барменов, рестораторов, менеджеров от искусства. Освободившиеся площади на территории английских городов завоевали популярность среди арендаторов офисных помещений, поскольку они способствовали созданию новых рабочих мест. Таким путем дополнительно наполнялся и местный бюджет [7]. Соответственно, местные органы власти стали активно подключаться к делу трансформационных изменений креативных индустрий, возглавляя поиски партнеров как с одной, так и с другой стороны на государственном уровне.

Зарубежный опыт был успешно реализован и на российских предприятиях. В частности, в Москве в 2003 году появились локации Центра дизайна «ARTPLAY», размещенные на бывших промышленных территориях Нижней Сыромятнической улицы. Более 25 000 квадратных метров бывшего стекольного предприятия отведено теперь под проект «Флакон». Также перепрофилировались территории старейших заводов по производству вин в Москве, Самаре и Ярославле [7].

МАНУФАКТУРА КУЛЬТУРЫ: КРЕАТИВНЫЕ ПРОСТРАНСТВА В ЯРОСЛАВЛЕ

Ярославль – динамично развивающийся город, устремленный в будущее, который еще два десятилетия назад считался промышленным. В каждом из районов города располагались различные предприятия. На современном этапе в городе активно реконструируются и озеленяются площади, развивается транспортная система, строятся новые жилищные комплексы («Династия», «Сердце Ярославля» и др.).

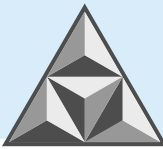
Изучение креативных пространств проводилось с помощью методов наблюдения, анализа, фотофиксации и опроса.

Креативность, как признак производства продукта любого типа, влияет на исследования культурного капитала. Возникает фокус на результативности применения и агентивности – способности носителей идентифицировать свои потребности и действовать в личных интересах, что концентрирует исследования на динамике и вариативности изменений. В последнее время наблюдается увеличение количества креативных пространств, что, несомненно, навеяно современными тенденциями.

Словосочетание «креативное пространство» имеет несколько творческих синонимов. Данное понятие является часто употребляемым в отношении к монообъектам, в то время как большие локации объединены названием «кластер» [6].

Территория, на которой обычно размещаются творческие мастерские или офисы, могут быть доступны для общественности. Свободные площади, open-office необходимы для человека, чтобы осуществлять в современном обществе процесс созидания [7]. Переосмысливая трансформацию промышленных площадей в культурное и офисное пространство, следует отметить тенденцию, которая включает в себя вовлечение новых ресурсов вокруг данной территории [8]. Получается своего рода «город в городе», а объединение людей по интересам приводит к социализации и формированию новой системы ценностных установок каждого участника [9].

В ходе детального изучения темы нами случайным образом опрашивались жители г. Ярославля (100 чел.). В качестве креативных пространств в Ярославле респондентами были указаны «Лампа», «Тепло», «Happy Space», «Балкон», (Кировский район), «Облака» (Заволжский район) и, как пример удавшегося встраивания в городской ландшафт Ярославля, пространство



«Textil» на территории действующей фабрики «Красный Перекоп» (Красноперекопский район).

Анализ ответов 63% респондентов выявил частое использование слова «атмосферный» для описания таких креативных пространств. Данный термин, по-видимому, отражает комплексное восприятие жителями Ярославля дизайна, событий и активности, определяющих характер посещения. Все респонденты подчеркнули значимость визуальной составляющей для привлекательности (98%), что стало вполне ожидаемым в эпоху коммуникаций. В ходе уточняющих вопросов нами выявлено также стремление к сохранению микроистории локации и ожидание контроля со стороны городских властей за процессами реновации и дизайнерскими решениями (73%).

Примером является общественная дискуссия о будущем работ по межеванию и планировке территории бывшего мукомольного завода на Которосльской набережной в Кировском районе города (рис. 1). Речь идет о территории площадью почти в 4 га, на которой располагаются корпуса мукомольного завода в Ярославле.

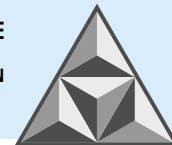


Рис. 1. Застройка территории бывшего мукомольного завода № 1 (фото: А. Мамонтова) [10]

Fig. 1. Development of the territory of the former flour mill No. 1 (photo: A. Mamontova) [10]

В 2020-2024 гг. был подготовлен проект реновации производственных зданий. Предполагается развитие и модернизация данных территорий, реконструкция мануфактуры под жилую и деловую зоны. Внутренняя планировка в здании будет зависеть от потребностей будущих арендаторов [10]. Проект работ планируется реализовать в четыре этапа. На первом этапе, кроме реконструкции размольного корпуса, планируется снос бывшей проходной (Мукомольный пер., 6, корп. 3), а вместе с ней – зданий склада, хозяйственных и других пристроек. Здание и помещения бывшего заводоуправления будут представлять общественно-деловую зону. На территории, свободной от застройки, разместят подземную парковку, вмещающую 225 автомобилей.

Второй этап будет включать реконструкцию здания механической мастерской под гостиницу, снос пристроек к ней, а также ветхого дома на смежной территории (Республиканская ул., 93а) и размещение на ней магазина.



На третьем этапе предусматривают приспособление под использование двухэтажного объекта культурного наследия «Дом жилой мукомольной мельницы Крохоняткиных-Вахрамеевых» (ул. Республиканская, 97).

На заключительном этапе запланирована реставрация церкви Петра Митрополита, расположенной на территории бывшего завода.

Нами установлено, что все участники вышеуказанного опроса, включая экспертов, признали важность креативных пространств для формирования позитивного имиджа города. Приоритетными названы культурно-досуговая и просветительская функции (69%), в то время как коммерческая рассматривается как сопутствующая. При этом 22% участников опроса отдельно высказались в пользу организации свободной продажи авторской продукции.

Если акцентироваться на наблюдениях за работой команды «Текстиль», отметим, что она включала исследование и актуализацию индустриального наследия Ярославля, создание проектов в сфере современной культуры. Опираясь на неравнодушных людей и культурно-исторические ресурсы, организаторы реализовывали концепцию «города-сада» [11] для горожан и туристов (рис. 2).

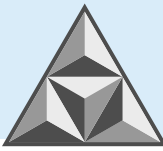
В 2022 году, юбилейном для Ярославской Большой мануфактуры, режиссер Я. Лобачев представил документальный фильм «Нити основы», посвященный деятельности культурного центра Textil. В фильме отражены этапы становления креативного пространства на Красном Перекопе в Ярославле. Показано, как команда собирала архив устных историй фабричных старожилов, какие культурные события на основе этого архива были реализованы, а также, что такое индустриальное наследие и как фабричный район стал микромоделью всей страны.



Рис. 2. Индустриальное наследие Ярославской Большой мануфактуры (фабрики «Красный Перекоп», фото: А. Моргунов) [12]

Fig. 2. Industrial heritage of the Yaroslavl Great Manufactory (Krasny Perekop factory, photo: A. Morgunov) [12]

К сожалению, в декабре 2024 года поступило сообщение, что проект «Текстиль» частично закрыт. По предварительным данным, причина заключалась в том, что фабрика подняла арендную плату, и в итоге проект самостоятельно не справился с возросшей финансовой нагрузкой. Вполне возможно, заводу срочно потребовались новые площади для расширения производства.



Однако следует отметить те проекты, которые были запланированы командой в ходе интеграции всех видов искусства, включая пластические – архитектуру и дизайн, а также интернет-технологии. Так, в «Музее-Фабрике» постоянными экспозициями стали [12]:

1. Выставка «Периферия будущего». Социокультурное программирование фабрики и формирование картины будущего фабричного района. Выставка, разработанная архитектором С. Кремневым, стала бы одним из разделов «Музея-Фабрики», связав прошлое с будущим, став инструментом соучастия, сбора и анализа данных, объединения интересов стейкхолдеров.

2. Лаборатория «Между фабрикой и музеем» задумывалась как серия встреч, образовательных и менторских мероприятий для творческих профессионалов из Ярославля, формирования сообщества, предложения материала для новых проектов, поиска форм осмысления и проблематизации индустриального наследия языком искусства. Экспозицию «Музея-Фабрики» дополнили бы произведения современного искусства, разработанные при участии куратора А. Вальковского.

3. Вечер стабильности. Спектакль-историодрама осмысливал период 1960-1985 гг. в истории «Красного Перекопа» посредством онлайн-технологий, саунд-дизайна, перформативных практик и соучастия зрителей. Разработанный С. Никитиным-Римским метод историодрамы позволил бы актуализировать переживание фабричных сюжетов на основе подлинных документов и архива устных историй.

4. Аудиопрогулка «На месте фабрики парк». Размышления о судьбе необычной городской территории – Петропавловского парка, места основания Ярославской Большой мануфактуры, сформировали озвученные исторические документы и голоса фабричных старожилов, которые легли бы в основу материала для аудиопрогулки, созданной при участии театрального композитора В. Пешкова.

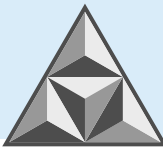
Каждый экскурсионный маршрут охватывал часть пространства промышленного предприятия прошлого с погружением в фабричную среду. Руководство организации первоначально активно поддерживало проект и его участников, вкладывая материальные активы в развитие творческого потенциала его создателей.

В то же время творческие личности, заинтересованные в сохранении истории, культуры и архитектуры, часто имеют различный взгляд на трансформацию городских пространств. Все договоры по этой части реализуются медленно. По мере изменения политической и экономической ситуации отношение к таким локациям во многих случаях трансформировалось в сторону возврата к первоначальному содержанию промышленного объекта.

Таким образом, современная городская культура подразумевает постоянные изменения в пространственно-временном континууме, сознании людей и культуре города. Важно, что свободных пространств в Ярославле становится все меньше; город вовлекается в стремнину финансовых потоков. За этим следуют изменения, связанные с размещением производства и организацией новых объектов на фабриках и заводах, востребованных в настоящее время в малой степени или неполной мере.

ВЫВОДЫ

Настоящее исследование, проведенное с целью поиска и описания креативных пространств города Ярославля, показывает, что городские арт-пространства могут быть использованы на качественно новом уровне, начиная от бизнес-точек и завершая реализацией разнообразных творческих, архитектурных и дизайнерских проектов. Жизнь, возвращенная неиспользуемым помещениям фабрик и заводов, означает развитие города на 25-30 лет. В креативных кластерах



появятся люди с новым творческим потенциалом и смелыми решениями в архитектурном, дизайнерском и урбанистическом стиле. Туристы, привлекаемые в такие зоны, ощутят себя активными участниками формирования новых пространств. Город, развивающийся по определенным канонам, будет притягивать новых людей, а с ними – свежие идеи и пространства для трансформации и формирования положительного образа мегаполиса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Баранов А.В., Котлярова О.В.** Практические исследования креативных городских пространств: региональный аспект // *Вестник экспертного совета*. 2020. № 2-3 (21-22). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/prakticheskie-issledovaniya-kreativnyh-gorodskih-prostranstv-regionalnyy-aspekt> (дата обращения 17.01.2025).
2. Креативные пространства: экономика, тенденции и прогнозы // [Электронный ресурс] URL: <https://cre.ru/analytics/73427> (дата обращения 17.01.2025).
3. **Прохоров С.И.** Формирование креативного пространства в современном мегаполисе // *Вестник РГГУ. Сер. «Философия. Социология. Искусствоведение»*. 2021. № 1. С. 100–110.
4. **Ардашкин И.Б., Коробейникова Л.А., Перминова Ю.В.** Терминологическое измерение культурного капитала: грани взаимодействия // *Вестник Томского гос. ун-та. Культурология и искусствоведение*. 2024. № 54. С. 5-20.
5. **Гун Г.Е., Киселева А.И., Меньщикова Д.С.** Креативные пространства как локации новых форматов продвижения искусства (на примере Театр Talk, г. Магнитогорск) // *Культура и цивилизация*. 2024. Том 14. № 2А. С. 279-290.
6. **Терехова Т.Г., Терехова Е.С.** Феномен ревитализации промышленных территорий Москвы в креативные пространства // *Современные проблемы высшего образования. Творчество в дистанционном формате: Мат. VI межд. науч.-практ. конф., Москва, 15-25 апреля 2021 года / Под общ. ред. С.М. Низамутдиновой*. М.: ООО «Учебный центр «Перспектива», 2021. С. 595-601.
7. **Тукмакова М.И., Фахрутдинова И.А.** Архитектурные принципы формирования креативных пространств // *Изв. Казанского гос. арх.-строит. ун-та*. 2018. № 4 (46). С. 116-124.
8. В Ярославле планируется ревитализация земли мукомольного завода // [Электронный ресурс] URL: <https://yaroslavl-news.net/society/2024/07/22/267489.html> (дата обращения 17.01.2025).
9. **Осипян Е.Т., Романов Д.А.** Комплексная модернизация территории мукомольного завода № 1 в г. Ярославле: Сб. статей. С-Пб: Санкт-Петербург. гос. арх.-строит. ун-т, 2019. С. 67-70.
10. Завод превратят в ЖК? В Ярославле назначили обсуждения по новому проекту застройки на набережной // [Электронный ресурс] URL: <https://76.ru/text/gorod/2024/06/25/73751408> (дата обращения 17.01.2025).
11. **Личак Н.А., Личак Д.А.** Концепция «города»: утопия, воплощенная в строительстве социалистического Ярославля // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Том 3. № 1. С. 73-81.
12. Интернет-журнал «Текстиль» // [Электронный ресурс] URL: <https://txtl.space> (дата обращения 17.01.2025).

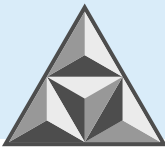
Поступила в редакцию 17.02.2025

Одобрена после рецензирования 07.03.2025

Принята к опубликованию 14.03.2025

REFERENCES

1. **Baranov, A.V. and Kotlyarova, O.V.** (2020), "Practical research of creative urban spaces: regional aspect", *Bulletin of the Expert Council*, vol. 2-3, no 21-22. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/prakticheskie-issledovaniya-kreativnyh-gorodskih-prostranstv-regionalnyy-aspekt> (accessed 17.01.2025) (in Russian).
2. Creative spaces: economics, trends and forecasts. Available at: <https://cre.ru/analytics/73427> (accessed 17.01.2025) (in Russian).

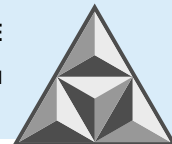


3. **Prokhorov, S.I.** (2021), 'Formation of creative space in the modern megapolis', *Vestnik RGGU. Ser. «Filosofiya. Sotsiologiya. Iskusstvovedenie» [Bulletin of Russian State University for the Humanities. Ser. 'Philosophy. Sociology. Art History']*, no. 1, pp. 100-110 (in Russian).
4. **Ardashkin, I.B., Korobeinikova, L.A. and Perminova, Yu.V.** (2024), "Terminological dimension of cultural capital: facets of interaction", *Vestnik Tomskogo gos. un-ta. Kul'turologiya i iskusstvovedenie [Bulletin of Tomsk State University. Kulturology and Art History]*, no. 54, pp. 5-20 (in Russian).
5. **Gun, G.E., Kiseleva, A.I. and Menshchikova, D.S.** (2024), "Creative spaces as locations of new formats of art promotion (on the example of Talk Theatre, Magnitogorsk)", *Kul'tura i tsivilizatsiya [Culture and Civilisation]*, vol. 14, no. 2A, pp. 279-290 (in Russian).
6. **Terekhova, T.G. and Terekhova, E.S.** (2021), The phenomenon of revitalisation of Moscow industrial territories into creative spaces, *Modern Problems of Higher Education. Creativity in distance format: Proc. VI Inter. sci. pract. conf., Moscow, 15-25 April 2021*, ed. by S.M. Nizamutdinova. Moscow: OOO "Training Centre "Perspektiva", pp. 595-601 (in Russian).
7. **Tukmakova, M.I. and Fakhrutdinova, I.A.** (2018), Architectural principles of formation of creative spaces, *Izv. Kazanskogo gos. arkh.-stroit. un-ta [Proceedings of the Kazan State University of Architecture and Civil Engineering]*, vol. 4, no. 46, pp. 116-124 (in Russian).
8. Yaroslavl plans to revitalise flour mill land. Available at <https://yaroslavl-news.net/society/2024/07/22/267489.html> (accessed 17.01.2025) (in Russian).
9. **Osipyan, E.T. and Romanov, D.A.** (2019), Integrated modernisation of the territory of flour mill No. 1 in Yaroslavl: Collection of articles. S-Pb: St. Petersburg State University of Arch. and Civ. Eng., pp. 67-70 (in Russian).
10. Will the factory be turned into a housing estate? In Yaroslavl appointed discussions on a new project of development on the embankment. Available at: <https://76.ru/text/gorod/2024/06/25/73751408> (accessed 17.01.2025) (in Russian).
11. **Lichak, N.A. and Lichak, D.A.** (2022), "The Concept of the "Garden City": The Utopia Realized in the Construction of Socialist Yaroslavl", *Smart Composite in Construction*, vol. 3, no. 1, pp. 73-81 (in Russian).
12. Internet magazine "Textile". Available at: <https://txtl.space> (accessed 17.01.2025) (in Russian).

Received 17.02.2025

Approved 07.03.2025

Accepted 14.03.2025



ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция строго придерживается норм и правил международной публикационной этики.

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

Представление статьи в журнал подразумевает следующее:

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

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

Авторские права

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

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

Приватность

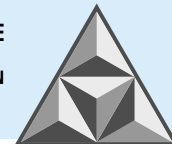
Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте данного журнала, используются исключительно для достижения целей, совпадающих с миссией журнала; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

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

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

Рубрики журнала

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



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

Статьи, направляемые в журнал, должны удовлетворять следующим требованиям:

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

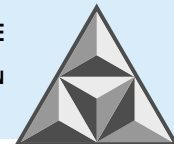
Статьи должны представлять сжатое, конкретное изложение результатов, без повторения одних и тех же данных в тексте, рисунках и таблицах.

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

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

Структура статьи

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



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

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

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

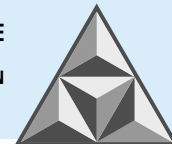
Основной текст научной статьи рекомендуется излагать согласно структуре IMRAD, содержащей следующие заголовки: Введение, Экспериментальная часть, Результаты и их обсуждение, Выводы, Список источников. Каждый заголовок приводится прописными буквами высотой 12 пт и выделяется одной пустой строкой перед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

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

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

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

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



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

Формат

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

Оформление литературных ссылок

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

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

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

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

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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

Поступила в редакцию

Одобрена после рецензирования

Принята к опубликованию



REFERENCES

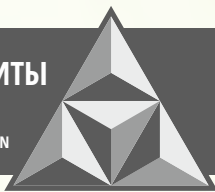
1. **Treybaks, E.A.** (2017) Utilization of unique properties of glued wood CLT panels in the construction of public buildings, *Innovatsii v nauke*, 10(71), pp. 68-69 (in Russian).
2. **Ammari, M.S., Belhadj, B., Bederina, M., Ferhat, A. & Quéneudec, M.** (2020) Contribution of hybrid fibers on the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

Received

Approved

Accepted

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



ТОМ 6, ВЫПУСК 1, 2025 | VOL. 6, ISS. 1, 2025

