

ISSN ONLINE 2782-1919

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ  
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



Том 6  
выпуск  
**3**  
2025

VOLUME 6  
ISSUE 3

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

# **УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

Включен в Перечень ВАК РФ и Единый государственный  
перечень научных изданий, уровень 3

**Том 6  
Выпуск 3**

**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., доц., 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 (*иностранный 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 the List of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation and Unified State List of Scientific Publication, Level 3

**Volume 6  
Issue 3**

**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:	<a href="http://comincon.ru">http://comincon.ru</a>

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 материалы и изделия**

*A.E. Бубнов, А.А. Сапунова, А.А. Титунин, Ю.Ю. Дубровина*

- 8 Эффективность использования цифровых моделей для прогнозирования теплопроводности древесно-минерального композита

*A.E. Bubnov, A.A. Sapunova, A.A.Titunin, Yu.Yu. Dubrovina*

The efficiency of using digital models for predicting the thermal conductivity of wood-mineral composites

*C.B. Федосов, М.О. Баканов, И.А. Кузнецов*

- 19 Оптимизация технологических режимов вспенивания пеностекла на основе детерминированной модели кинетики роста газовых пор с учетом многофакторных зависимостей

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

Optimization of foamed glass expansion process parameters based on a deterministic model of gas pore growth kinetics taking into account multi-factor dependencies

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

*Ф. Ндайизе, Н. А. Белькова, Т.И. Шелковникова, Е.И. Иващенко*

- 38 Оценка качества сырьевых материалов республики Бурунди для производства дорожных бетонов

*F. Ndayizeye, N.A. Belkova, T.I. Shelkovnikova, E.I. Ivashchenko*

Quality assessment of raw materials in the Republic of Burundi for road concrete production

*Г.В. Проваторова, К.М. Рябинина, А.В. Вихрев*

- 48 Улучшение характеристик асфальтобетонов путем их модификации

*G.V. Provatorova, K.M. Ryabinina, A.V. Vikhrev*

Improving the performance characteristics of asphalt concrete through their modification

*О.В. Ладыгина, И.А. Бессонов*

- 62 Проблемы организации транспортной системы города Ярославля

*O.V. Ladygina, I.A. Bessonov*

Issues in organizing the transportation system of the city of Yaroslavl

**Архитектура зданий и сооружений.**

**Творческие концепции архитектурной деятельности**

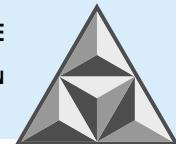
*Д.А. Личак, Н.А. Личак*

- 76 Архитектура Национального парка в Мали

*D.A. Lichak, N.A. Lichak*

Architecture of the National Park in Mali

- 87 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.115

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18

# Эффективность использования цифровых моделей для прогнозирования теплопроводности древесно-минерального композита

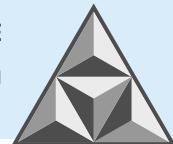
**А.Е. Бубнов, А.А. Сапунова, А.А. Титунин, Ю.Ю. Дубровина**

**Антон Евгеньевич Бубнов<sup>1</sup>, Анастасия Александровна Сапунова<sup>1,\*</sup>, Андрей Александрович Титунин<sup>1,2</sup>,  
Юлия Юрьевна Дубровина<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Кострома, Российская Федерация

<sup>2</sup>Костромской государственный университет, Кострома, Российская Федерация

*toshka1144@gmail.com, krilovaaa@yandex.ru\*, a\_titunin@kosgos.ru, dubrovinaay@mail.ru*



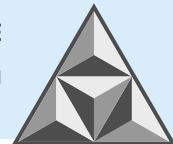
Рассматривается проблема выбора рационального состава древесно-минеральных композитов (ДМК) с использованием программного комплекса *Comsol Multiphysics*. Экспериментальная часть описывает процесс изготовления таких композитов в лабораторных условиях с включением магнезита и древесных опилок, а также представляет сравнительную оценку традиционного инструментального метода определения их теплопроводности с данными, получаемыми при использовании современных цифровых моделей. Доказана высокая эффективность применения цифрового моделирования состава и структуры строительного композита при исследовании теплопроводящих свойств ДМК. Подтверждена гипотеза о значимости влияния соотношения компонентов в смеси на коэффициент теплопроводности ДМК. Цифровая модель структуры композита позволит в будущем существенно сократить трудозатраты и время на проведение исследований такого рода.

**Ключевые слова:** древесно-минеральный композит, древесные опилки, магнезит, теплопроводность, программный комплекс *Comsol Multiphysics*, цифровые модели

**Для цитирования:**

Бубнов А.Е., Сапунова А.А., Титунин А.А., Дубровина Ю.Ю. Эффективность использования цифровых моделей для прогнозирования теплопроводности древесно-минерального композита // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 3. С. 8-18.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18

# The efficiency of using digital models for predicting the thermal conductivity of wood-mineral composites

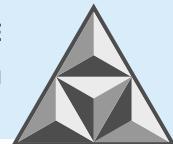
**A.E. Bubnov, A.A. Sapunova, A.A.Titunin, Yu.Yu. Dubrovina**

**Anton E. Bubnov<sup>1</sup>, Anastasiya A. Sapunova<sup>1,\*</sup>, Andrey A. Titunin<sup>1,2</sup>, Julia Yu. Dubrovina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russian Federation

<sup>2</sup>Kostroma State University, Kostroma, Russian Federation,

*toshall144@gmail.com, krilovaaa@yandex.ru\*, a\_titunin@kosgos.ru, dubrovinayy@mail.ru*



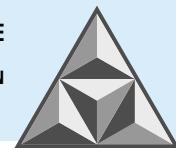
*This paper addresses the problem of selecting the optimal composition of wood-mineral composites (WMC) using the COMSOL Multiphysics software complex. The experimental part describes the laboratory process of manufacturing such composites with the inclusion of magnesite and wood sawdust, and provides a comparative assessment of the traditional instrumental method for determining their thermal conductivity versus a method based on modern digital models. The high efficiency of using digital modeling of the composition and structure of a building composite for investigating the thermal conductive properties of WMC is proven. The paper confirms the hypothesis on the significant impact of the component ratio in the mixture on the thermal conductivity coefficient of WMC. The digital model of the composite's structure will significantly reduce labor costs and time for conducting such research in the future.*

**Keywords:** wood-mineral composite, wood sawdust, magnesite, thermal conductivity, COMSOL Multiphysics software package, digital models

**For citation:**

Bubnov A.E., Sapunova A.A., Titunin A.A., Dubrovina Yu.Yu. The efficiency of using digital models for predicting the thermal conductivity of wood-mineral composites // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 3. P. 8-18. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18



## ВВЕДЕНИЕ

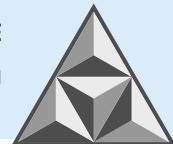
Современные технологии производства строительных материалов требуют постоянного совершенствования и оптимизации составов смесей. Одним из актуальных направлений является использование древесно-минеральных композитов (ДМК), которые находят широкое применение в самых различных отраслях, включая строительство и производство мебели. Это объясняется тем, что, наряду с высокой тепловой эффективностью и низкими удельными затратами на изготовление композитов, все больше внимания уделяется вопросам экологической безопасности применяемых материалов. Признанным фактом является то, что материалы на основе древесины являются более экологичными, чем традиционные (кирпич, газосиликат или бетон), и это может обеспечить комфортные и безопасные условия проживания. Кроме того, композиты на основе древесины имеют высокие теплоизоляционные показатели [1]. При этом, ввиду значительной вариабельности фракционного и породного состава древесного наполнителя, его плотности и влажности, подбор рационального состава смеси представляет собой проблему, требующую значительных затрат на изготовление опытных образцов [2-5].

Существует большое количество программ, позволяющих проводить комплексные расчеты и анализ материалов и строительных конструкций. Однако очень важно учитывать множество факторов, определяющих в итоге их эксплуатационные свойства [2]. В данной работе рассматривается эффективность применения цифровых моделей на основе программного комплекса (ПК) *Comsol Multiphysics* для анализа теплопроводности ДМК с достигаемым эффектом снижения трудозатрат и продолжительности эксперимента.

*Comsol Multiphysics* – мощная интерактивная среда для моделирования и расчетов научных и инженерных задач, основанных на дифференциальных уравнениях в частных производных методом конечных элементов. С этим программным пакетом можно расширять стандартные модели, использующие одно дифференциальное уравнение (прикладной режим) для расчета связанных между собой физических явлений [4].

Программа разработана в начале 2000-х гг. в Швеции (Королевский технический университет; авторы Литман и Суиди). Затем она совершенствовалась коллективом программистов и исследователей фирмы *Softline* (президент Карл Биттнер). Программа первоначально формировалась как дополнение к *MathLab*, а затем включила все функции расчета уравнений в частных производных в собственный код. *Comsol Multiphysics* позволяет добавлять произвольные уравнения, характеризующие свойства материалов, вводить граничные условия и отдельные члены уравнений, описывающие источники и теплоотдачу, и даже системы уравнений в частных производных. На основе выведенных уравнений могут создаваться новые физические объекты [5].

Основная проблема, с которой сталкиваются исследователи и производители [6, 7], заключается в необходимости определения рационального состава древесно-минерального композита, который обеспечивал бы требуемые эксплуатационные свойства. Традиционные методы требуют многократного изготовления опытных образцов с различным соотношением компонентов, что сопровождается существенными временными и финансовыми затратами. Ранее проведенные исследования [2] показали, что на изготовление одного состава смеси ДМК требуется в среднем 2 ч. Это время включает подготовку материалов, дозировку, смешивание древесного наполнителя, магнезита и других компонентов до получения однородной консистенции и формование образцов. Затем в течение 28 сут. (672 ч) происходит выдержка образцов. Такой период необходим для гидратации магнезиального вяжущего, удаления



излишков влаги и набора требуемой прочности ДМК. Данный этап очень важен для получения достоверных результатов измерения теплопроводности, так как структура материала должна стабилизироваться. Подготовка образцов и последующее измерение теплопроводности прибором ИПТ-МГ4 требуют в дальнейшем еще 2 ч с учетом количества дублированных опытов. Итого на изучение теплопроводности ДМК одного состава прямым методом требуется 676 ч. Временные затраты на определение теплопроводности ДМК с использованием созданных цифровых моделей определялись непосредственно в ходе экспериментальных исследований.

Цель работы – сокращение трудозатрат и времени на проведение исследований теплопроводности ДМК при тестировании новых смесей.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для получения древесно-минерального композита в качестве матрицы [8] использовали каустический магнезит ПМК-83, ТУ 2611-001-62571670-2009 АО «Торговый дом «ХИМПЭК»; массовая доля (на абсолютно сухое вещество) – 87.9%. В качестве заполнителя использовали древесные отходы в виде стружки от четырехсторонних стружечных станков с контролируемым фракционным составом. Для затворения магнезиального вяжущего использовали бишофит отечественного производства с содержанием шестиводного хлорида магния ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) - 97% [2].

Теплопроводность древесно-минерального композита на основе магнезиального вяжущего определялась двумя методами: инструментальным (с использованием прибора ИПТ-МГ4) и методом цифрового моделирования (с использованием ПК *Comsol Multiphysics*).

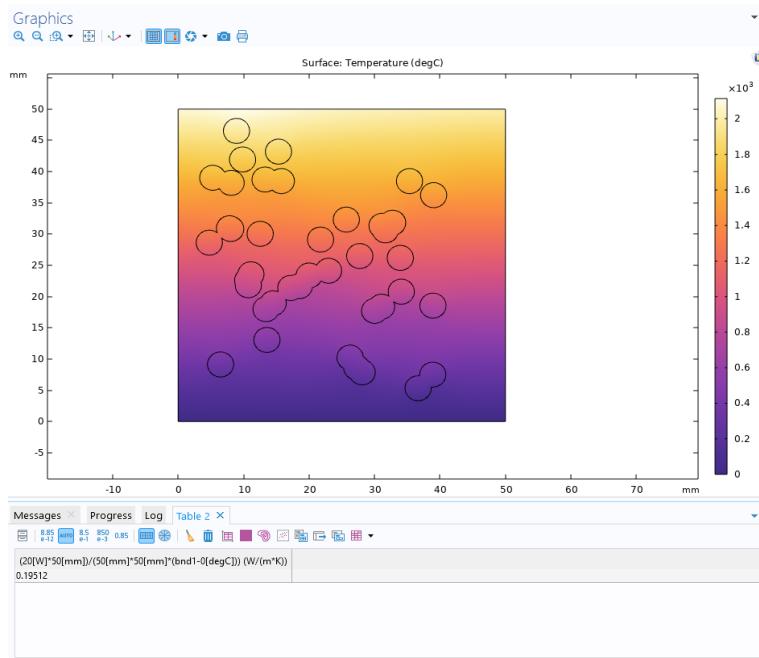
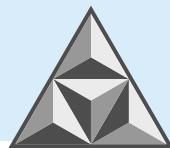
Образцы древесно-минерального композита изготавливали при различном соотношении компонентов древесной стружки и магнезита, %: 30/70, 25/70, 20/80. Количество образцов для каждого состава ДМК было одинаковым (равным 4).



**Рис. 1.** Внешний вид образца с процентным соотношением 20/80 компонентов смеси

**Fig. 1.** Appearance of the sample with the ratio of mixture components, 20/80

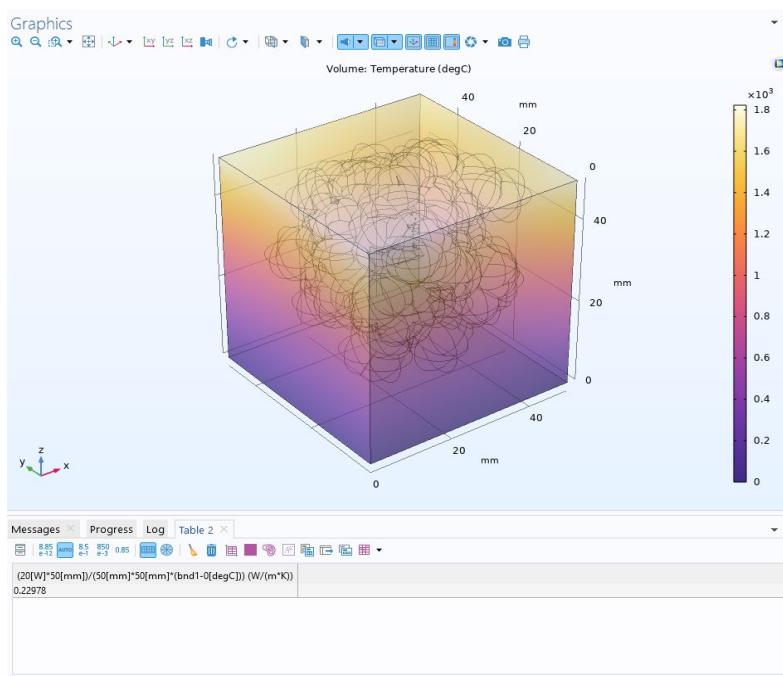
Теплопроводность ДМК в программном комплексе *Comsol Multiphysics* определялась в два этапа. Первый этап – расчет эквивалентной теплопроводности древесной стружки с включениями воздуха; создание 2D модели (рис. 2), представляющей собой прямоугольную область древесных частиц с включениями воздуха, случайное распределение которых задавалось при помощи скрипта *Java API* [9].



**Рис. 2.** Результат определения коэффициента теплопроводности древесной стружки с включениями воздуха для ДМК с соотношением компонентов 20/80 в ПК *Comsol Multiphysics*

**Fig. 2.** Result of determining the heat transfer coefficient of wood chips with air inclusions for wood-mineral composite with component ratio 20/80 in *Comsol Multiphysics*

Второй этап – нахождение коэффициента теплопроводности ДМК; создание 3D модели (рис. 3), представляющей собой геометрию куба из стружки, с включениями магнезита [9], распределенными при помощи Java API [10]. Для области, соответствующей древесной стружке, задается эквивалентная теплопроводность, рассчитанная на первом этапе (2D модель распределения древесной стружки с включениями воздуха).



**Рис. 3.** Результат определения теплопроводности ДМК соотношением компонентов 20/80 в ПК *Comsol Multiphysics*

**Fig. 3.** Result of determining the thermal conductivity of wood-mineral composite with a component ratio of 20/80 in *Comsol Multiphysics PC*



## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На этапе обсуждения результатов эксперимента проведено сравнение коэффициентов теплопроводности древесно-минерального композита, измеренных инструментальным методом и прогнозируемых, полученных с использованием цифровых моделей (табл. 1).

**Таблица 1.** Коэффициент теплопроводности композита при различном соотношении компонентов  
**Table 1.** Heat transfer coefficient of the composite at different component ratios

Соотношение компонентов Д:М, %	Воздух (%)	Коэффициент теплопроводности, Вт·м <sup>-1</sup> ·К <sup>-1</sup>						Отклонение от инструментального метода (%)	
		Инструментальный (прибор ИТП-МГ4)			Метод цифрового моделирования (ПК Comsol Multiphysics)				
		мин.	макс.	средн.	мин.	макс.	средн.		
30/70	30% ( $\lambda = 0.17334$ )	0.192	0.200	0.196	0.212	0.214	0.213	8.85	
25/75	25% ( $\lambda = 0.18373$ )	0.217	0.225	0.221	0.219	0.221	0.220	0.54	
20/80	20% ( $\lambda = 0.19512$ )	0.242	0.250	0.246	0.229	0.231	0.230	6.43	

Из табл. 1 видно, что цифровое моделирование структуры ДМК в программном комплексе *Comsol Multiphysics* позволяет достаточно точно определить значение коэффициента теплопроводности, хотя и наблюдаются некоторые расхождения с инструментальным методом. Как известно, погрешность измерений с помощью прибора ИТП-МГ4 составляет 7%. Эти расхождения могут быть связаны с погрешностями измерений, неточностями моделирования или неоднородностью исследуемого материала.

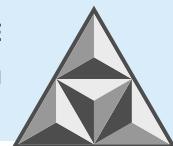
В ходе работы в ПК *Comsol Multiphysics* установлено, что на создание первых моделей (2D – древесная стружка и воздух; 3D – древесная стружка и магнезит) требуется время, равное 1.5 ч. Это включает в себя создание геометрии образца, написание кода *Java API* для случайного распределения частиц в плоскости модели, задание материалов и их свойств, создание сетки, настройку параметров и самого процесса расчета. Далее копирование существующих 2D и 3D моделей (включая геометрию, сетку, материалы, граничные условия), изменение параметров соотношения компонентов (стружка/магнезит, содержание воздуха) и выполнение расчетов компьютером заняло примерно 20 минут.

Использование метода цифрового моделирования структуры композита и использование ПК *Comsol Multiphysics* для изучения теплопроводности ДМК позволяет значительно быстрее и эффективнее проводить исследования, так как создание первых моделей займет всего 1.5 ч, а действия с изменением параметров существующих моделей потребуют 20 мин на каждый последующий расчет.

Из табл. 1 также видно, что при изменении соотношения компонентов смеси средние значения коэффициента теплопроводности, определенные методом цифрового моделирования, отличаются (от 0.007 до 0.010). В некоторых работах отмечалось, что увеличение размеров древесных частиц приводит к снижению теплопроводности ДМК. Композит при этом создавался на основе цемента и древесной «дробленки» [11]. Для проверки, значимы ли эти различия в нашем случае, использовали метод однофакторного дисперсионного анализа. В качестве изменяемого фактора (фактор *A*) принято соотношение компонентов древесного наполнителя и магнезита, %.

Фактор *A* изменяется на трех уровнях ( $m = 3$ ):  $a_1 = 30/70$ ,  $a_2 = 25/75$ ,  $a_3 = 20/80$ . Число дублированных опытов  $n = 4$  (на каждом уровне).

Выходная величина *Y* – теплопроводность ДМК, Вт·м<sup>-1</sup>·К<sup>-1</sup>.



Результаты определения выходной величины и статистических параметров на разных уровнях фактора  $A$  приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Результаты и статистические параметры уровней фактора  $A$

**Table 2.** Results and statistical parameters of factor  $A$  levels

Уровни фактора $A$		Коэффициент теплопроводности ДМК, $y_{ij}$ , $\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$	Среднее арифметическое уровня $\bar{y}_i$	Дисперсия уровня $S_i^2$
Соотношение компонентов $\Delta : M, \%$	Кодированное обозначение уровня			
30/70	$a_1$	0.2141; 0.2137; 0.2119; 0.2137	0.2133	$9.528\cdot 10^{-7}$
25/75	$a_2$	0.2195; 0.2198; 0.2209; 0.2191	0.2198	$5.624\cdot 10^{-7}$
20/80	$a_3$	0.2298; 0.2300; 0.2304; 0.2306	0.2304	$1.205\cdot 10^{-7}$

Проверка однородности дисперсий  $S_i^2$  на трех уровнях фактора  $A$  по критерию Кохрена  $G_p$  показала, что дисперсии однородны:  $G_p = 0.583$ ;  $G_t = 0,8$  (при  $q = 0.05$ ;  $m = 3$ ;  $f = 4 - 1 = 3$ );  $G_p < G_t$ . Поэтому следующим шагом стало вычисление дисперсии фактора  $A$ , которая характеризует рассеяние между средними арифметическим на каждом уровне фактора ( $\bar{y}_i$ ) и общим средним по эксперименту ( $\bar{y}$ ):

$$S_A^2 = \frac{n}{m-1} \sum_{i=1}^m (\bar{y}_i - \bar{y})^2, S_A^2 = 0.00029.$$

Остаточная дисперсия, которая характеризует среднее рассеяние в эксперименте между элементами выборки и средним арифметическим по всему эксперименту, была вычислена по формуле:

$$S_n^2 = \frac{1}{m(n-1)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_i)^2; S_n^2 = 5.452 \cdot 10^{-7}.$$

После этого проверена гипотеза о значимости влияния фактора  $A$  (соотношение компонентов смеси) на величину коэффициента теплопроводности. Для этого с помощью критерия Фишера оценивалась однородность дисперсии  $S_A^2$  и остаточной дисперсии  $S_n^2$ : расчетное значение критерия Фишера  $F_p = 528.76$ ; табличное значение критерия Фишера  $F_t = 4,26$  (при  $q = 0,05$ ;  $f_a = 2$ ;  $f_n = 3$  ( $4 - 1 = 9$ )).

Так как  $F_p > F_t$ , гипотеза о наличии эффекта взаимодействия между соотношением компонентов древесно-минерального композита и теплопроводностью подтверждается. При этом, с учетом большой разницы между  $F_p$  и  $F_t$ , можно утверждать о сильном влиянии соотношения компонентов смеси на коэффициент теплопроводности.

На завершающем этапе исследования нами выполнено попарное сравнение однородности средних арифметических на уровнях фактора  $A$  (по критерию Стьюдента).

Результаты расчетов представлены в табл. 3.

**Таблица 3.** Результаты проверки значимости различий

**Table 3.** Results of testing the significance of differences

Уровни фактора $A$	$t_p$	$t_t$	Значимость различий
$a_1$ и $a_2$	20.70	2.45	Значимы
$a_2$ и $a_3$	31.18	2.45	Значимы
$a_1$ и $a_3$	36.89	2.45	Значимы

Поскольку в трех случаях парного сравнения  $t_p > t_t$ , сделан вывод, что различия между уровнями фактора  $A$  значимы, причем они тем больше, чем больше значение  $t_p$ . Как и следовало



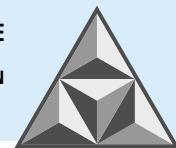
ожидать, максимальная разница получена между первым и третьим уровнем фактора  $A$ , а наименьшая – между первым и вторым. Это объясняется тем, что соотношение компонентов смеси ДМК определяется с учетом массы вещества. В этом случае, как отмечается в отдельных работах [2, 11], ввиду малой насыпной плотности древесной стружки даже незначительное увеличение массовой доли древесного наполнителя в составе смеси приводит к существенному увеличению объема. Следовательно, возрастает и количество воздушных включений, обладающих крайне низкой теплопроводностью. Поэтому при проведении дальнейших исследований, связанных с определением рационального состава ДМК, шаг варьирования доли компонентов не должен превышать 5%. Это позволит более точно определить соотношение компонентов смеси ДМК и максимально приблизиться к точке экстремума функции, описывающей изменение теплопроводности композита в зависимости от его состава.

## ВЫВОДЫ

Разработанные в ПК *Comsol Multiphysics* модели структуры древесно-минерального композита позволяют с допустимой точностью прогнозировать его теплофизические свойства. Относительное отклонение коэффициентов теплопроводности, определенных с помощью цифровых моделей, от таковых, полученных инструментальным методом, сопоставимо с погрешностью измерений с использованием прибора ИТП-МГ4. Использование цифровых моделей древесно-минерального композита в программном комплексе *Comsol Multiphysics* дает возможность существенно сократить время и затраты на разработку новых составов. Полученные результаты подтверждают эффективность моделирования и его практическую значимость для определения рационального состава композитных материалов с требуемой теплопроводностью.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Долматов С.Н.** Анализ потенциальной емкости рынка и объемов потребления стеновых строительных материалов, ориентированных на индивидуальных застройщиков, применительно к технологии древесно-минеральных композитов // Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии. 2025. № 1 (33). С. 29-46. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29>.
- Сапунова А.А., Титунин А.А.** Влияние древесного наполнителя и магнезита на прочность композиционного материала // Умные композиты в строительстве. 2024. Т. 5. вып. 1. С. 19-30. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5049/view> (дата обращения 12.04.2025).
- Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцев И.С., Зайцева И.А.** Особенности использования отечественного и зарубежного инструментария имитационного моделирования строительных конструкций зданий и сооружений // Умные композиты в строительстве. 2023. Т. 4. вып. 2. С. 18-31. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5046/view> (дата обращения 02.04.2025).
- Бирюлин Г.В.** Теплофизические расчеты в конечно-элементном пакете COMSOL/FEMLAB. СПбГУИТМО, 2006. 89 с.
- Курушин А.А.** Решение мультифизических СВЧ задач с помощью САПР COMSOL-M. «One-Book», 2016. 376 с.
- Halil T.S., Yasemin S.** Mineral-bonded wood composites: An alternative building materials. 2021. URL: <https://www.intechopen.com/online-first/78047>. DOI: 10.5772/intechopen.98988 (дата обращения 12.04.2025).
- Наназашвили И.Х.** Строительные материалы из древесноцементной композиции. СПб.: Стройиздат, 1990. 415 с.
- Шитова И.Ю., Самошина Е.Н., Кислицына С.Н., Болтышев С.А.** Современные композиционные строительные материалы: учеб. пособие. Пенза: ПГУАС, 2015. 136 с.



9. **Пугачев О.В., Хан З.Т.** Моделирование теплопроводности композита с шаровыми включениями // Научный вестник МГТУ. Москва, 2017. С. 83-93.
10. **Venkateswaran P., Malav R.** Utilization of Comsol Multiphysics Java API for the integration of composite material module with a Customized user interface // Comsol Conference 2014 Bangalore.
11. **Долматов С.Н., Никончук А.В.** Исследование показателей теплопроводности древесно-цементных композитов // Хвойные boreal'noj зоны. 2019. Т. 37. № 5. С. 341-346.

*Поступила в редакцию 25.04.2025*

*Обзорена после рецензирования 13.07.2025*

*Принята к опубликованию 24.07.2025*

## REFERENCES

1. **Dolmatov, S.N.** (2025), “Analysis of the potential market capacity and consumption volumes of wall construction materials for individual developers in relation to the technology of wood-mineral composites”, *Bulletin of the Volga State University of Technology. Ser.: Materials. Constructions. Technologies*, vol. 1, no. 33, pp. 29-46. Available at: <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29> (Accessed: 12.04.2025) (in Russian).
2. **Sapunova, A.A. and Titunin, A.A.** (2024), “Influence of the share of wood filler and magnesite on the strength of composite”, *Smart Composite in Construction*, vol. 5, no. 1, pp. 19-30. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5049/view> (Accessed: 02.04.2025) (in Russian).
3. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N., Zaitsev, I.S. and Zaitseva, I.A.** (2023), “Features of using domestic and foreign tools for simulation modeling of building structures”, *Smart Composite in Construction*, vol. 4, no. 2, pp. 18-31. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5046/view> (Accessed: 02.04.2025) (in Russian).
4. **Biryulin, G.V.** (2006), *Teplofizicheskie raschety v konechno-elementnom pakete COMSOL/FEMLAB* [Thermophysical calculations in the finite element package COMSOL/FEMLAB]. Saint Petersburg: SPbGUITMO (in Russian).
5. **Kurushin, A.A.** (2016), *Reshenie multifizicheskikh SVCh zadach s pomoshch'yu SAPR COMSOL-M* [Solving multiphysics microwave problems using the CAD system COMSOL-M]. Moscow: One-Book (in Russian).
6. **Halil, T.S. and Yasemin, S.** (2021), Mineral-bonded wood composites: An alternative building materials. Available at: <https://www.intechopen.com/online-first/78047> (Accessed: 02.04.2025). DOI: 10.5772/intechopen.98988.
7. **Nanazashvili, I.Kh.** (1990), *Stroitel'nye materialy iz drevesno-tsementnoi kompozitsii* [Construction materials from wood-cement composition]. Leningrad: Stroyizdat (in Russian).
8. **Shitova, I.Yu., Soshina, E.N., Kislitsyna, S.N. and Boltyshev, S.A.** (2015), *Sovremennye kompozitsionnye stroitel'nye materialy* [Modern composite construction materials]. Penza: PGUAS (in Russian).
9. **Pugachev, O.V. and Khan, Z.T.** (2017), “Modeling the thermal conductivity of a composite with spherical inclusion”, *Scientific Bulletin of Moscow State Technical University*. Moscow, pp. 83-93 (in Russian).
10. **Venkateswaran, P. and Malav, R.** (2014), “Utilization of Comsol Multiphysics Java API for the integration of composite material module with a Customized user interface”, Comsol Conference 2014 Bangalore.
11. **Dolmatov, S.N. and Nikonchuk, A.V.** (2019), “Issledovanie pokazatelei teploprovodnosti drevesno-tsementnykh kompozitov” [Research on thermal conductivity indicators of wood-cement composites], *Khvoynye boreal'noj zony* [Conifers of the Boreal Zone], vol. 37, no. 5, pp. 341-346 (in Russian).

*Received 25.04.2025*

*Approved 13.07.2025*

*Accepted 24.07.2025*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 541.12.012.2 : 539.213.3

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-19-37

# Оптимизация технологических режимов вспенивания пеностекла на основе детерминированной модели кинетики роста газовых пор с учетом многофакторных зависимостей

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

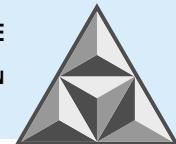
**Сергей Викторович Федосов<sup>1</sup>, Максим Олегович Баканов<sup>1,\*</sup>**

<sup>1</sup>Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва,  
Российская Федерация

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

**Илья Александрович Кузнецов<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Российская Федерация  
*ikuz1999@list.ru*



Представлена модель, реализация которой обеспечивает прогнозирование динамики роста газовых сферических полостей (пузырьков или пор) в процессе синтеза пеностекла. Она формализует взаимосвязь между физико-химическими свойствами стекольного расплава, экзогенными параметрами технологического процесса, эндогенными факторами сырьевой смеси и их воздействием на кинетику роста пузырьков. Ядром математической модели является конечно-разностная схема, реализующая численное интегрирование системы уравнений в частных производных, описывающих эволюцию системы «пузырек – расплав» во времени и пространстве. Разработанная имитационная модель функционирует как эффективный инструмент, позволяющий осуществлять вычислительные эксперименты и находить оптимальные пути совершенствования процесса вспенивания указанного строительного материала.

**Ключевые слова:** пеностекло, тепломассообмен, уравнение тепломассопереноса, вспенивание, рост пузырьков, модель первых принципов, конечно-разностная схема

**Для цитирования:**

Федосов С.В., Баканов М.О., Кузнецов И.А. Оптимизация технологических режимов вспенивания пеностекла на основе детерминированной модели кинетики роста газовых пор с учетом многофакторных зависимостей // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 3. С. 19-37.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-19-37



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-19-37

# Optimization of foamed glass expansion process parameters based on a deterministic model of gas pore growth kinetics taking into account multi-factor dependencies

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

**Sergey Viktorovich Fedosov<sup>1</sup>, Maksim Olegovich Bakanov<sup>1,\*</sup>,**

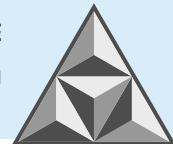
<sup>1</sup>National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russia

*fedorov-academic53@mail.ru, mask-13@mail.ru\**

**Ilya Aleksandrovich Kuznetsov<sup>2</sup>**

<sup>2</sup>Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Ivanovo, Russia

*ikuz1999@list.ru*



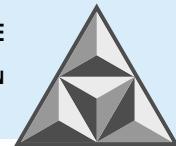
*The paper presents a model whose implementation enables the prediction of the growth dynamics of spherical gas cavities (pores/bubbles) during the foamed glass synthesis process. The model formalizes the interrelationship between the physicochemical properties of the glass melt, exogenous parameters of the technological process, endogenous factors of the raw material mixture, and their combined impact on bubble growth kinetics. The core of the mathematical model is a finite-difference scheme that performs numerical integration of a system of partial differential equations describing the spatiotemporal evolution of the “bubble-melt” system. The developed simulation model serves as an effective tool for conducting computational experiments and identifying optimal pathways for improving the foaming process of this construction material.*

**Keywords:** foamed glass, heat and mass transfer, heat and mass transfer equation, foaming, bubble growth, first-principles model, finite-difference scheme

**For citation:**

Fedorov S.V., Bakanov M.O., Kuznetsov I.A. Optimization of foamed glass expansion process parameters based on a deterministic model of gas pore growth kinetics taking into account multi-factor dependencies // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 3. P. 19-37.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-19-37



## ВВЕДЕНИЕ

Стекольная промышленность функционирует как критически важная подсистема в глобальном промышленном комплексе, производит дифференцированную номенклатуру продукции, значимость которой охватывает широкий спектр смежных отраслевых систем. Ассортимент включает как низкотехнологичные сегменты – изделия, основанные на базовых эксплуатационно-технических свойствах стекла как аморфного конструкционного материала (например, стеклянная тара и декоративные элементы), так и высокотехнологичные сегменты, где изделия эксплуатируются благодаря управлению сложными физическими явлениями в стекле – распространением электромагнитных волн, фотонными эффектами, высокоточными оптическими характеристиками, что находит применение в волоконно-оптических световодах, оптоэлектронных компонентах и устройствах.

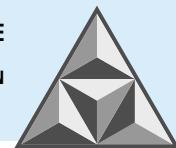
Физико-химические процессы, протекающие в ходе выплавки стекольного расплава, обладают высокой степенью нелинейности и взаимосвязанности, при этом процессы тепломассопереноса являются критически значимыми для динамики системы [1-3]. Параметризация модели требует учета не только физических условий (температурный режим, гранулометрический состав шихты), но и химико-термодинамических свойств материала. Химический потенциал кислорода (степень окисленности системы) и концентрации поливалентных ионов детерминируют кинетику газовыделения внутри пузырьков, что, в свою очередь, контролирует их рост.

Для анализа влияния множества независимых переменных (вязкость расплава; поверхностная энергия на границе раздела фаз; ионный состав расплава; экзогенные параметры процесса – начальный радиус зародышей пузырьков, градиент температуры во времени) на время роста пузырьков в пеностекле необходимо использовать универсальную детерминированную вычислительную модель.

В работе представлена модель для количественной оценки временной динамики пузырьков в пеностекле как функции от физических, химических и технологических переменных. Она служит универсальным вычислительным инструментом для оптимизации режимных параметров процесса вспенивания в системе производства пеностекла.

В рамках разрабатываемой модели пенообразования базовой вычислительной схемой служит подход, предложенный Арефманешем и Адвани [4]. Основанием является структурное допущение редуцированной геометрии: рассматривается изолированная сферическая полость (пузырек) с заданным начальным радиусом, обособленная конечным объемом стекольного расплава. Данное граничное условие представляет существенное упрощение реальной трехмерной системы, позволяя редуцировать пространственную размерность задачи до одномерной постановки в сферических координатах.

Ключевым аспектом моделирования динамики роста пузырьков является учет обратного влияния расширяющейся газовой фазы на процессы переноса в окружающей стеклянной матрице, а именно эволюция профилей концентрации диффундирующих компонентов (поливалентных ионов) в ограниченной стеклянной оболочке [5, 6]. При сферической симметрии системы и условии сохранения массы стекольного расплава (принятие постоянного объема матрицы) радиальное расширение пузырька детерминирует уменьшение толщины стеклянной оболочки. Рассмотренное прогрессирующее сжатие оболочки вызывает адиабатическое уменьшение профилей концентрации диффундирующих веществ, что существенно увеличивает локальные градиенты концентрации и, как следствие, молярную плотность потока этих компонентов согласно закону Фика [5, 6].



Динамика изолированной сферической газовой полости (пузырька) в условиях диффузионно-ограниченного роста или сжатия в бесконечной изотропной жидкой среде представляет собой классический исследовательский подход в физико-химической гидродинамике. Асимптотические аналитические решения для описания переходного изменения радиуса поры были подтверждены в ряде исследований. Так, Эпштейн и Плесет [7] разработали модель, учитывающую капиллярные силы (поверхностное натяжение), но пренебрегавшую эффектом подвижной границы раздела фаз, что исключало конвективный перенос из уравнения диффузии (квазистационарное приближение). Риди и Купер [8] сформулировали систему связанных нестационарных дифференциальных уравнений для растворения и роста сферических включений в бесконечной сплошной среде, учитывающую движение жидкой фазы. Однако эта методология игнорировала производную по времени в уравнении нестационарного массопереноса, заменяя ее аппроксимированным решением. Погрешность данного упрощения, приводящая к существенным отклонениям в прогнозировании кинетики пузырьков, была количественно оценена Кейблом и Эвансом [9], а также Дудой и Врентасом [10], выполнившими прямую численную верификацию уравнений [8]. Аналитические аппроксимации для временной зависимости радиуса также представлены Субраманьяном [11] с соавторами и Вайнбергом [12], с последующим сравнением с конечно-разностной схемой. Детальный анализ роли капиллярных сил провел Вайнберг [13], установивший замедляющее влияние поверхностного натяжения на скорость роста пузыря. Комплексное численное исследование диссипативных эффектов (вязкости), капиллярности, конвективного переноса и инерции в бесконечной среде провел Секели [14], выявивший доминирующую роль вязкости и незначительное влияние капиллярности вне начальной стадии процесса.

Асимптотические решения для частных случаев роста в бесконечной среде демонстрируют удовлетворительную сходимость с результатами конечно-разностных схем, принимаемых за эталонные. Однако в контексте технологической системы производства пеностекла начальные условия вспенивания (нанометровые пузырьки, низкотемпературный режим, высокая реология расплава) определяют необходимость одновременного учета капиллярных и вязкостных эффектов в разрабатываемой модели. Корректная параметризация эффекта подвижной границы фаз («движущаяся сфера»), капиллярности и диссипации требует применения численных методов решения системы уравнений роста, интегрированной с массопереносом в стекольном расплаве, с целью получения точного решения.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

### *Основные уравнения для модели роста пузырьков в стекольном расплаве*

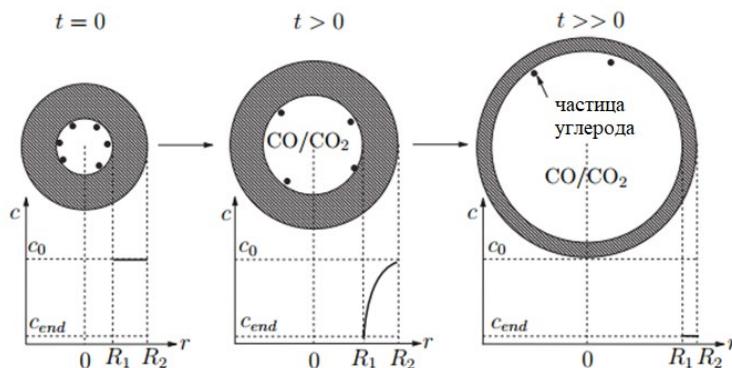
Математическая параметризация модели представлена в виде связанной системы дифференциальных уравнений. В ее вычислительном ядре содержится уравнение в частных производных параболического типа, описывающее поведение каждого диффундирующего компонента системы — поливалентных ионов и молекулярного (физически растворенного) кислорода. Это уравнение дополняется начальными условиями Коши и граничными условиями Дирихле или Неймана, что соответствует физике массопереноса.

Кроме того, модель включает три нелинейные обыкновенные дифференциальные уравнения, описывающие молярный поток кислорода через границу «стекло–газ», учитывающий как химически связанный кислород (в оксидах), так и физически растворенный, что отражает термодинамические и физические процессы, кинетику радиального роста



пузырька, а также экзогенный температурный режим, представляющий собой скорость нагрева, выступающую в роли управляющего параметра системы.

Концептуальная схема моделируемой физической системы (сферический пузырек в конечной оболочке стекольного расплава) представлена на рис. 1.

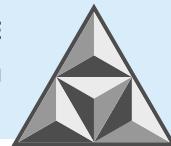


**Рис. 1.** Схема роста сферического пузырька в конечной оболочке стекольного расплава  
(c – концентрация,  $R_1$  – внутренний радиус,  $R_2$  – внешний радиус, t – время)

**Fig. 1.** Scheme of growth of a spherical bubble in the final shell of a glass melt  
(c is the concentration,  $R_1$  is the inner radius,  $R_2$  is the outer radius, t is the time)

Математическая формализация модели реализована в сферической системе координат с началом в центре масс пузырька. Основные допущения для математической модели:

1. Расплав стекла вокруг пузырька несжимаем, его плотность не меняется со временем и однородна во всех точках рассматриваемой расчетной области ( $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$  и  $\nabla \rho = 0$ );
2. Стекло ведет себя как ньютоновская жидкость, то есть его вязкость зависит только от состояния среды (температура, давление и химический состав) и не зависит от скорости деформации или скорости вытеснения;
3. Пузырек имеет строгую сферическую симметрию системы: аннулирование тангенциальных компонент скорости ( $v_0 = v_\phi = 0$ ) и угловых производных ( $\frac{\partial}{\partial \theta} = \frac{\partial}{\partial \phi} = 0$ ) приводит задачу к одномерной радиальной постановке;
4. В модели рассматривается только один изолированный пузырек, окруженный сферической стеклянной оболочкой;
5. На внешней границе стеклянной оболочки при радиусе  $r = R_2$  установлено граничное условие непроницаемости для газовых компонентов, выраженное в виде нулевой нормальной производной концентрации ( $\left.\frac{\partial c}{\partial r}\right|_{r=R_2} = 0$ ) (условие Неймана). Это условие обосновано гипотезой симметрии соседних ячеек пены и отражает отсутствие молекулярного потока через границу, что соответствует специфике массопереноса;
6. В газовой фазе пузырька предполагается состояние термодинамического равновесия, при котором парциальные давления компонентов С, СО и  $\text{CO}_2$  подчиняются закону действующих масс. Активность углерода принимается равной единице ( $a_c = 1$ ) на основании предположения о его избытке;
7. Гравитацией пренебрегают;
8. Диффузия газообразования (СО и  $\text{CO}_2$ ) в стеклянной матрице не учитывается из-за ее крайне низкой растворимости в стекле. Например, растворимость  $\text{CO}_2$  при 1173 К составляет  $7.92 \cdot 10^{-5}$  моль·м<sup>-3</sup>·Па<sup>-1</sup>, что значительно ниже (в  $10^3$ – $10^5$  раз) химической растворимости кислорода. Представленное существенное различие растворимости оправдывает



пренебрежение молярными потоками CO и CO<sub>2</sub> по закону Фика, поскольку их вклад в массоперенос через стеклянную матрицу является незначительным.

Пеностекло получают путем нагрева, например, углеродсодержащей сырьевой смеси до определенного температурного интервала, в котором происходит основное вспенивание. Вследствие этого систему рассматривают как неизотермическую. Однако для упрощения вычислительной модели принимается, что температура остается постоянной на каждом малом временном шаге, то есть в области пузырька и стеклянной оболочки отсутствует температурный градиент. Температурный режим определяется скоростью нагрева печи, в которой происходит вспенивание сырьевой смеси. В модели учитывается, что ключевые физико-химические свойства материала (вязкость, поверхностное натяжение, константы равновесия химических реакций и коэффициенты диффузии) зависят от температуры. При этом предполагается, что коэффициенты диффузии не зависят от концентрации поливалентных ионов в стеклянной оболочке и пространственного положения.

Согласно классическому уравнению неразрывности [15],

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -(\nabla \cdot \rho v), \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность жидкости;

$t$  – время;

$v$  – вектор среднемассовой скорости.

Для несжимаемой жидкости ( $\rho = \text{const}$ ) уравнение упрощается:

$$(\nabla \cdot v) = 0 \quad (2)$$

При сферической симметрии (отсутствие угловой зависимости) и постоянной плотности стекла получаем:

$$(\nabla \cdot v) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 v_r) = 0, \quad (3)$$

где  $r$  – радиальная координата,

$v_r$  – радиальная компонента скорости.

Интегрируя (3) по радиусу от внутреннего радиуса пузырька  $R_1$  до внешнего радиуса оболочки  $R_2$ , имеем:

$$r^2 v_r = \text{const} = R_1^2 v_{R1} \Rightarrow v_r = \frac{R_1^2}{r^2} v_{R1}, \quad (4)$$

где  $v_{R1}$  – скорость роста радиуса пузырька  $R_1$ ;  $v_{R1} = \frac{dR_1}{dt}$ .

С учетом ньютоновского поведения жидкости и пренебрежения гравитацией, уравнение импульса в сферической системе имеет вид [15]:

$$\rho \left[ \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] = -\frac{\partial p}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{rr}) + \frac{\tau_{\theta\theta} + \tau_{\phi\phi}}{r}, \quad (5)$$

где  $p$  – давление;

$\tau_{ij}$  – компоненты тензора вязких напряжений.

Для ньютоновской жидкости компоненты тензора напряжений выражаются через градиенты скорости:

$$\tau_{rr} = -2\mu \frac{\partial v_r}{\partial r}, \quad (6)$$



$$\tau_{\theta\theta} = \tau_{\phi\phi} = -2\mu \frac{v_r}{r}, \quad (7)$$

где  $\mu$  – динамическая вязкость.

Подставляя (6) и (7) в (5), получаем:

$$\rho \left( \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + 2\mu \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{2v_r}{r^2} \right]. \quad (8)$$

В условиях вспенивания стекольного расплава динамическая вязкость  $\mu$  находится в диапазоне  $10^{10} \div 10^4$  Па·с (температуры 873–1173 К), а число Рейнольдса ( $Re$ ) крайне мало ( $< 10^{-9}$ ). Это позволяет пренебречь инерционными членами слева в уравнении (8):

$$-\frac{\partial p}{\partial r} + 2\mu \left[ \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{2v_r}{r^2} \right] = 0. \quad (9)$$

Интегрирование уравнения (9) в пределах от  $r = R_1$  до  $r = R_2$  совместно с выражением для скорости (4) дает баланс давлений на границах стеклянной оболочки:

$$p_l(R_1) - p_l(R_2) = 0, \quad (10)$$

где  $p_l(R_1)$  и  $p_l(R_2)$  – давления жидкости на внутреннем и внешнем радиусах соответственно; при этом радиусы  $R_1$  и  $R_2$  зависят от времени.

Для учета влияния поверхностного натяжения на рост пузырька вводится дополнительный член в баланс сил на внутренней границе  $r = R_1$ . Иллюстрация зависимости роста поры от относительного радиуса во времени представлена на рис. 2.

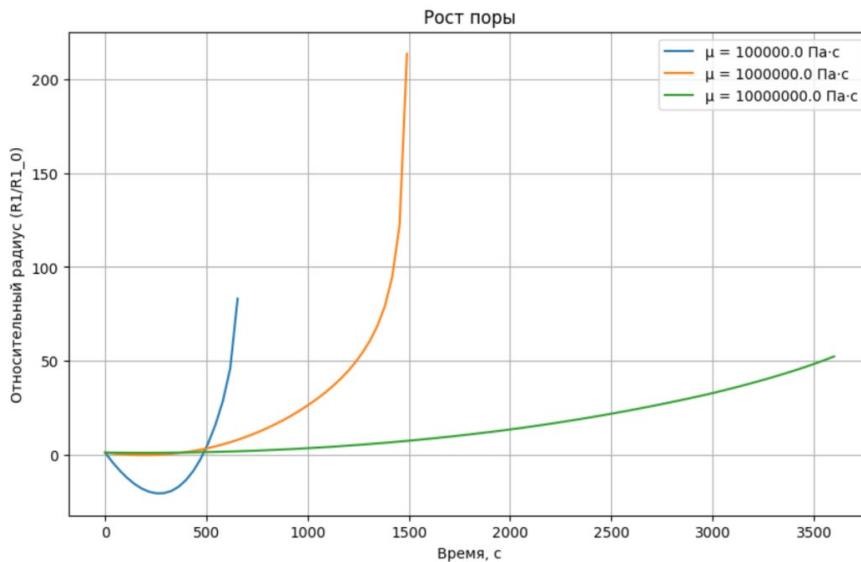
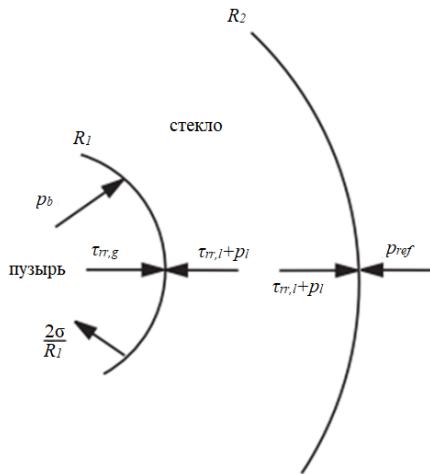
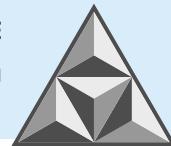


Рис. 2. Схема роста пузырьков во времени

Fig. 2. Bubble growth pattern over time

Для определения различных давлений, действующих в стеклофазе при  $r = R_1$  и  $r = R_2$ , а также влияния поверхностного натяжения при  $r = R_1$  на рост пузырька выводится баланс сил. При отсутствии внешних сил, действующих на жидкость, баланс сил может быть получен в соответствии с рис. 3.



**Рис. 3.** Баланс сил над пузырьковой оболочкой (стрелки указывают направление силы)  
**Fig. 3.** The balance of forces above the bubble shell (arrows indicate the direction of force)

#### Границные условия и баланс сил на границах пузырька

Как указано ранее (допущение 5), внешняя граница при  $r = R_2$  не является реальной границей раздела, а соответствует границе стеклянной оболочки соседнего пузырька. Рассматривается единичный пузырек с его оболочкой, поэтому эталонным считается давление, приложенное ко всей системе (пузырь + стеклянная оболочка). Из-за симметрии структуры ячеек пены давление  $p_{ref}$  на границе  $r = R_2$  соответствует давлению окружающего газа в процессе пенообразования.

Баланс сил на внутренней и внешней границах оболочки записывается следующим образом:

- На внутренней границе  $r = R_1$ :

$$p_b + \tau_{rr,g}(R_1) = p_l(R_1) + \tau_{rr,l}(R_1) + \frac{2\sigma}{R_1}. \quad (11)$$

- На внешней границе  $r = R_2$ :

$$p_{ref} = p_l(R_2) + \tau_{rr,l}(R_2), \quad (12)$$

где  $p_b$  – давление газа внутри пузырька;

$\sigma$  – поверхностное натяжение, зависящее от температуры;

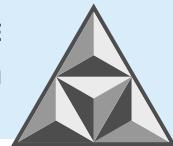
$\tau_{rr,g}$  и  $\tau_{rr,l}$  – радиальные компоненты тензора вязких напряжений в газовой и жидкой фазах соответственно.

Поскольку вязкие напряжения в газовой фазе малы по сравнению с жидкой фазой, величиной  $\tau_{rr,g}$  можно пренебречь. Для ньютоновской жидкости (допущение 2) компоненты  $\tau_{rr,l}$  на границах связаны со скоростями роста радиусов:

$$\tau_{rr,l}(R_1) = \frac{4\mu}{R_1} \frac{dR_1}{dt}, \quad \tau_{rr,l}(R_2) = \frac{4\mu}{R_2} \frac{dR_2}{dt}. \quad (13)$$

Из уравнений баланса сил и давления следует уравнение роста пузырька:

$$p_b - p_{ref} - \frac{2\sigma}{R_1} - 4\mu \left( \frac{1}{R_1} \frac{dR_1}{dt} - \frac{1}{R_2} \frac{dR_2}{dt} \right) = 0. \quad (14)$$



### Связь радиусов оболочки и несжимаемости

Объем стеклянной оболочки  $V_l$  считается постоянным (допущение 1):

$$V_l = \frac{4}{3}\pi(R_2^3 - R_1^3) = \text{const.} \quad (15)$$

Отсюда внешний радиус выражается через внутренний:

$$R_2 = \left(\frac{3V_l}{4\pi} + R_1^3\right)^{\frac{1}{3}}. \quad (16)$$

Дифференцируя по времени, получаем скорость изменения  $R_2$  через  $R_1$ :

$$\frac{dR_2}{dt} = \frac{R_1^2}{\left(\frac{3V_l}{4\pi} + R_1^3\right)^{\frac{2}{3}}} \frac{dR_1}{dt}. \quad (17)$$

Объединяя (16), (18) и (19), формуируем уравнение роста пузырька:

$$\frac{dR_1}{dt} = \frac{\left(\frac{3V_l}{4\pi} + R_1^3\right)^{\frac{2}{3}}}{4\mu \frac{3V_l}{4\pi}} (\Delta p R_1 - 2\sigma), \quad (18)$$

где  $\Delta p = p_b - p_{ref}$  – избыточное давление внутри пузырька.

### Массоперенос в стеклянной оболочке

Для описания массопереноса химических компонентов  $i$  в стеклянной оболочке используется уравнение диффузии с учетом конвекции и химических реакций:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + v_r \frac{\partial c_i}{\partial r} = D_i \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) + \psi_i, \quad (19)$$

где  $c_i$  – концентрация компонента  $i$ ;

$D_i$  – коэффициент взаимной диффузии, зависящий от температуры, но не от концентрации и положения;

$v_r$  – радиальная скорость расширения оболочки;

$\psi_i$  – источник или сток, обусловленный реакциями восстановления – окисления.

### Начальные и граничные условия

- Начальные условия при  $t = 0$ :

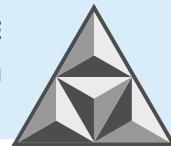
$$c_i(r, 0) = c_{i,0}, R_1(0) = R_{1,0}, R_2(0) = R_{2,0}, \frac{dR_1}{dt}(0) = 0, \psi_i = 0. \quad (20)$$

- Граничные условия:

На внутренней границе  $r = R_1$  поток компонента  $i$  связан с массопереносом кислорода к газовой фазе:

$$D_i \frac{\partial c_i}{\partial r} \Big|_{r=R_1} = k_i c_{i,ox}, \quad (21)$$

где  $k_i$  – коэффициент массопереноса кислорода, а индекс  $ox$  обозначает окисленную форму поливалентного иона или физически растворенный кислород.



На внешней границе  $r = R_2$  отсутствует обмен массой:

$$\left. \frac{\partial c_i}{\partial r} \right|_{r=R_2} = 0. \quad (22)$$

В модели предполагается, что коэффициент  $k_i$  достаточно велик, что отражает мгновенное потребление кислорода на границе раздела.

#### *Давление внутри пузырька и химическое равновесие*

Газ внутри пузырька образуется в результате окисления углерода до CO и CO<sub>2</sub>. Общее давление газа в пузырьке при изотермических условиях определяется уравнением состояния идеального газа:

$$p_{b,tot} = \frac{(n_{CO_2} + n_{CO} + n_{b,0})R_g T}{V_b}, \quad (23)$$

где  $n_{b,0}$  – начальное количество газов без CO и CO<sub>2</sub>;

$V_b$  – объем пузырька;

$R_g$  – универсальная газовая постоянная;

$T$  – температура.

Начальное количество газов рассчитываем по формуле:

$$n_{b,0} = \frac{p_{b,0} \frac{4}{3} \pi R_{1,0}^3}{R_g T_0}, \quad (24)$$

где  $p_{b,0}$  – начальное давление, определяемое из уравнения баланса сил при отсутствии роста пузырька:

$$p_{b,0} = p_{ref} + \left. \frac{2\sigma}{R_1} \right|_{t=0}. \quad (25)$$

Константа равновесия реакции восстановления – окисления внутри пузырька задается через парциальные активности компонентов:

$$K_{p,b}(T) = \frac{a_{CO}^2}{a_{CO_2} a_C}. \quad (26)$$

Для идеальных газов активности связаны с парциальными давлениями, при этом активность углерода принимается равной единице ( $a_C = 1$ ).

Молярный баланс кислорода между CO и CO<sub>2</sub> выражается:

$$n'_{O_2} = n_{CO_2} + \frac{1}{2} n_{CO}. \quad (27)$$

Решение системы приводит к квадратному уравнению для количества молей CO:

$$n_{CO}^2 + \frac{K'_{p,b} V_b}{2R_g T} n_{CO} - \frac{K'_{p,b} V_b}{R_g T} n'_{O_2} = 0. \quad (28)$$

Получаем:

$$n_{CO} = -\frac{K'_{p,b} V_b}{4R_g T} + \sqrt{\left( \frac{K'_{p,b} V_b}{4R_g T} \right)^2 + \frac{K'_{p,b} V_b}{R_g T} n'_{O_2}}. \quad (28)$$



Количество  $n_{CO_2}$  определяем из уравнения (27).

На каждом временном шаге давление в пузырьке вычисляем по формуле (23) с учетом текущего радиуса  $R_1$ .

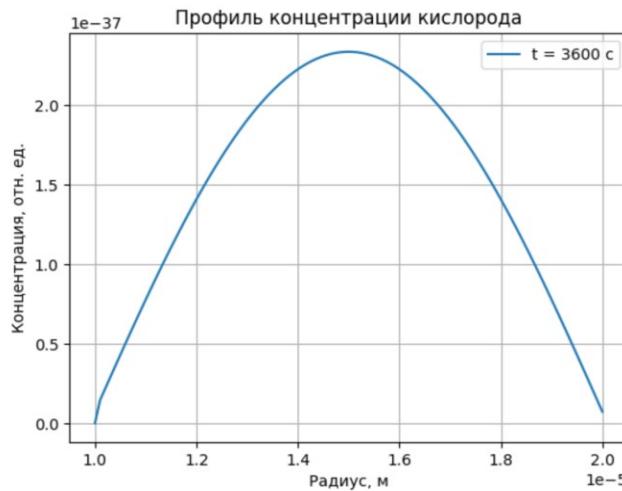


Рис. 4. Профиль концентрации кислорода

Fig. 4. Oxygen concentration profile

$R_1$  рассчитываем из уравнения роста (18) (см. рис. 4).

#### Скорость нагрева

В процессе моделирования температура в системе считается пространственно однородной на каждом временном шаге, то есть в области стеклянной оболочки и внутри пузырька отсутствуют температурные градиенты. Режим задается как функция времени с постоянной скоростью нагрева.

Температура  $T(t)$  описывается следующим образом:

$$T(t) = \begin{cases} T_0 + ht, & t < t_{foam}, \\ T_{foam}, & t \geq t_{foam}, \end{cases} \quad (30)$$

где  $T_0$  – начальная температура, при которой начинается процедура расчета;

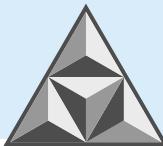
$t_{foam}$  – время, когда достигается конечная температура всепенивания.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Описание диффузии физически растворенного кислорода и поливалентных ионов в стекольном расплаве с учетом локального термодинамического равновесия окислительно-восстановительных реакций и движения жидкой сферы не поддается аналитическому решению. Даже при упрощенной сферической геометрии уравнение диффузии остается сложным.

При постоянном объеме стеклянной оболочки  $V_l$  (допущение 1) уравнение массопереноса (21) для компонента  $i$  можно упростить.

Поскольку растущий пузырек сжимает диффузионную область ( $R_2 - R_1$ ), которая уменьшается с каждым времененным шагом, радиусы  $R_1(t)$  и  $R_2(t)$  изменяются во времени. Это усложняет построение вычислительной сетки, требующей обновления на каждом шаге.



Для решения этой задачи применяется преобразование координат по Лагранжу, широко используемое в аэродинамике. Оно позволяет перейти от неподвижной системы координат  $r$  к движущейся системе с новой пространственной переменной  $\xi$ , связанной с текущими радиусами оболочки, и безразмерному времени  $\theta$ . Это устраниет конвективный член из уравнения диффузии и упрощает численное решение.

#### *Основные уравнения модели*

- Уравнение роста пузырька:

$$\frac{dR_1}{dt} = \frac{\left(\frac{3V_l}{4\pi} + R_1^3\right)^{\frac{2}{3}}}{4\mu \frac{3V_l}{4\pi}} (\Delta p R_1 - 2\sigma). \quad (31)$$

- Уравнение диффузии с конвекцией и химической реакцией:

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} = D_i \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left( r^2 \frac{\partial c_i}{\partial r} \right) - \frac{R_1^2}{r^2} \frac{dR_1}{dt} \frac{\partial c_i}{\partial r} + \psi_i. \quad (32)$$

- Уравнение скорости нагрева:

$$T(t) = \begin{cases} T_0 + ht, & t < t_{foam}, \\ T_{foam}, & t \geq t_{foam}. \end{cases} \quad (33)$$

#### *Преобразование координат по Лагранжу*

Определяется безразмерная пространственная переменная  $\xi$ , связывающая радиус  $r$  с текущими границами диффузационной области:

$$\xi = \frac{r^3 - R_1^3}{(R_2^3 - R_1^3)} R_1 \leq r \leq R_2. \quad (34)$$

Объем стеклянной оболочки постоянен:

$$V_l = \frac{4}{3}\pi(R_2^3 - R_1^3) = const. \quad (35)$$

Введена константа:

$$\beta = (R_2^3 - R_1^3) = const. \quad (36)$$

Для упрощения и обобщения модели вводятся безразмерные переменные и группы:

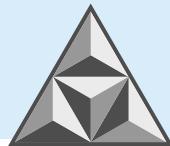
- Безразмерное время:

$$\theta = \frac{D_{ref} \cdot t}{\beta^{\frac{2}{3}}}, \quad (37)$$

где  $D_{ref}$  — эталонный коэффициент диффузии (например, для  $Fe^{3+}$  при  $t = 0$ ).

- Безразмерная температура:

$$T^* = \frac{ht + T_0}{T_0}. \quad (38)$$



- Безразмерный радиус пузырька:

$$\xi = \frac{R_1}{\beta^{\frac{1}{3}}}. \quad (39)$$

- Безразмерные параметры, включающие вязкость и поверхностное натяжение:

$$\eta = \frac{\Delta p \beta^{\frac{2}{3}}}{\mu_0 D_{ref}}. \quad (40)$$

$$\varphi = \frac{\sigma \beta^{\frac{1}{3}}}{\mu_0 D_{ref}}, \quad (41)$$

где  $\mu_0$  и  $\sigma_0$  – значения вязкости и поверхностного натяжения при  $t = 0$ .

В безразмерной форме уравнение (20) преобразуется к виду:

$$\frac{d\xi}{d\theta} = \frac{(1 + \xi^3)}{4z(T^*)} (\eta\xi - 2\varphi f(T^*)), \quad (42)$$

где функции  $z(T^*)$  и  $f(T^*)$  описывают температурную зависимость вязкости и поверхностного натяжения соответственно.

Массовый баланс кислорода на внутренней границе оболочки выражается через концентрации и диффузионные потоки:

$$\frac{\partial n^*}{\partial \theta} = \frac{9\xi^4}{c_{tot} D_{ref}} \sum_i \omega_{i,ox} D_{i,ox} z(T^*)^{-d_{i,ox}} \left. \frac{\partial c_{i,ox}}{\partial \xi} \right|_{\xi=0}, \quad (43)$$

где индексы обозначают различные окисленные формы и компоненты.

Уравнение скорости нагрева в безразмерной форме:

$$\frac{\partial T^*}{\partial \theta} = \frac{h \beta^{\frac{2}{3}}}{T_0 D_{ref}}. \quad (44)$$

При изотермических условиях и пренебрежении ростом пузырька уравнение диффузии сводится к классической задаче диффузии в сферических координатах. При больших радиусах и тонкой оболочке задача приближается к диффузии в плоской пластине, для которой известны следующие аналитические решения:

- Для малых времен (число Фурье  $Fo \ll 0.1$ ) концентрация описывается функцией ошибок:

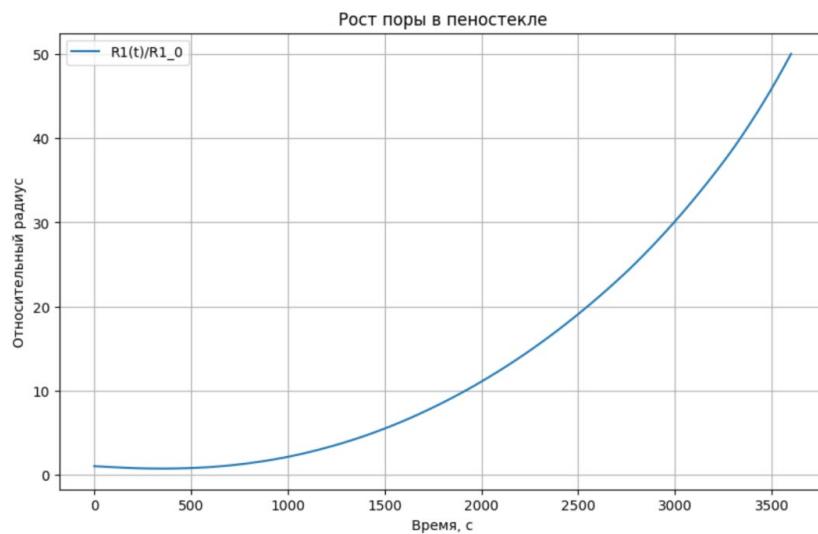
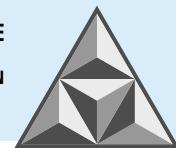
$$\frac{c}{c_0} = erfc \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right). \quad (45)$$

- Для больших времен:

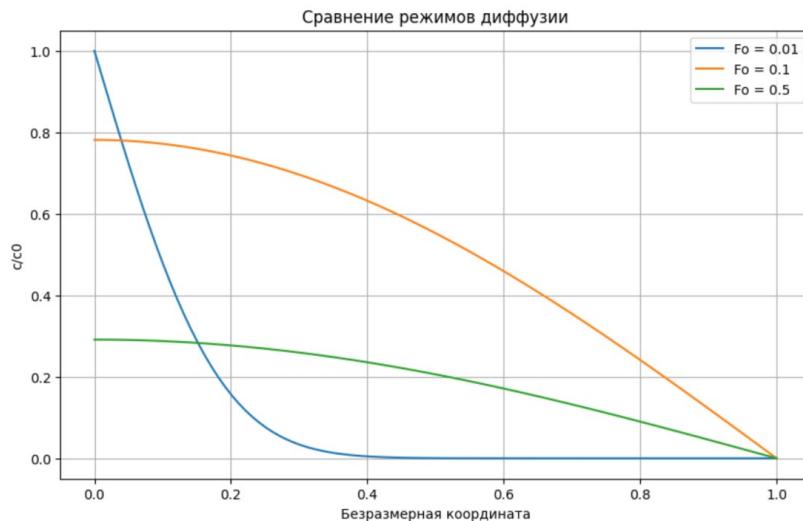
$$\frac{c}{c_0} = exp \left( -\frac{\pi Dt}{4d^2} \right) cos \left( \frac{\pi x}{2d} \right), \quad (46)$$

где  $d$  – толщина оболочки,  $x$  – пространственная координата.

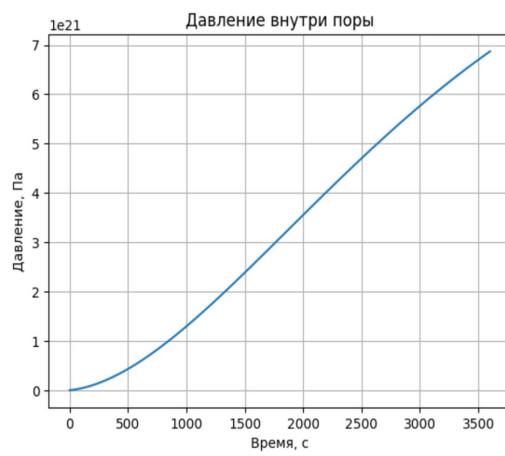
Графические результаты представлены на рис. 5-8.



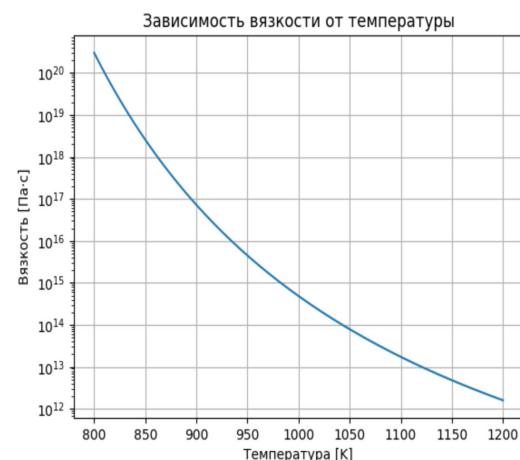
**Рис. 5.** Рост поры в пеностекле  
**Fig. 5.** The growth of pores in foam glass



**Рис. 6.** Сравнение режимов диффузии для массопереноса частиц  $i$  в стекле  
**Fig. 6.** Comparison of diffusion modes for mass transfer of  $I$  particles in glass



**Рис. 7.** Зависимость давления внутри поры во времени  
**Fig. 7.** The dependence of pressure inside the pore over time



**Рис. 8.** График зависимости вязкости от температуры  
**Fig. 8.** Graph of viscosity versus temperature



Отмечаем, что данная модель базируется на методологии, формализующей следующие процессы:

- диффузионный массоперенос в стеклянной матрице;
- влияние окислительно-восстановительных равновесий поливалентных ионов и физически растворенного кислорода на транспортные процессы и эволюцию концентрационных профилей.

Параметризация модели требует задания входных параметров:

- ионный состав стекла (концентрации поливалентных ионов и кислорода);
- начальный радиус зародышей пузырьков;
- начальная толщина стеклянной оболочки.

Скорость радиального роста пузырька (кинетика) определяется следующими параметрами:

- суммарная концентрация поливалентных ионов;
- степень окисленности системы;
- динамическая вязкость стекольного расплава;
- поверхностное натяжение на границе фаз, оказывающее максимальное влияние на начальной стадии при радиусе пузырька около 0.1 мм.

Верификация модели показала адекватность прогноза на ранних стадиях роста, однако выявила систематическое завышение итоговой высоты пористой структуры. Возможные системные причины расхождения включают:

- потери реакционноспособных газов через открытую пористую структуру до и во время спекания, что приводит к преждевременной инициации реакций и дефициту восстановителя после герметизации пор;
- критическая роль морфологии порообразователя: гранулометрический состав, тип восстановителя, распределение в дисперсной фазе (0.2-0.6 мас%); неоднородность распределения, вызывающая вариабельность газогенерации.

Оптимизация вязкотермического технологического окна обработки выявила следующие особенности:

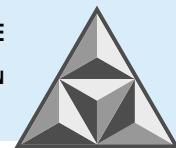
- при низких температурах спекания наблюдается неполная консолидация пор, что приводит к нарушению граничных условий;
- при высоких температурах спекания и вспенивания возникают неконтролируемая нуклеация и неоднородность оболочек, что приводит к преждевременному коллапсу пор; критическое снижение вязкости расплава способствует развитию неустойчивости Рэлея – Плато и разрушению внешнего слоя с потерями газа.

В общем и целом разработанная имитационная модель функционирует как инструмент, позволяющий находить наиболее подходящие пути совершенствования процесса вспенивания исследуемого строительного материала.

## ВЫВОДЫ

Представлена детерминированная модель, описывающая кинетику роста изолированных газовых пор в дисперсной системе (спеченный стеклянный порошок с газообразователем низкой концентрации). Динамика единичных пузырьков находится в корреляции с макроскопическим расширением пористой структуры.

Анализ ключевых параметров – начального радиуса пузырьков, зависимого от гранулометрического состава порошка, и градиента нагрева – подтвердил их существенное влияние на кинетику роста пузырьков. Выбор дисперсности частиц, которая оказывает влияние на морфологию зародышей (плотность, толщина оболочки), является критическим фактором оптимизации процесса получения пеностекла.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Fedosov S.V., Bakanov M.O.** Application of «micro-processes» method for modeling heat conduction and diffusion processes in canonical bodies // *ChemChemTech*. 2020. Vol. 63. No. 10. P. 90-95. DOI 10.6060/ivkkt.20206310.6275.
2. **Баканов М.О.** Моделирование высокотемпературных процессов в технологии пеностекла. Часть 1: Формирование динамики циклических нестационарных двумерных температурных полей // *Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2021. № 2. С. 87-102. DOI 10.25686/2542-114X.2021.2.87.
3. **Fedosov S.V., Bakanov M.O., Kuznetsov I.A.** Mathematical Modeling and Experimental Investigation of the Process of Non-Stationary Heat Transfer in a Block Foam Glass Sample at the Annealing Stage // *Int. J. Comput. Civ. Struct. Eng.* 2023. Vol. 19. No. 1. P. 190-203. DOI 10.22337/2587-9618-2023-19-1-190-203.
4. **Arefmanesh A., Advani S.G.** Diffusion induced growth of a gas bubble in a viscoelastic fluid // *Rheol. Acta*, 30:274–283, 1991.
5. **Федосов С.В., Баканов М.О.** Разработка комплексного подхода к математическому моделированию процесса термической обработки пеностекольной шихты. Ч. 1. Физические представления о процессе // *Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2017. № 2. С. 95-100.
6. **Fedosov S.V., Bakanov M.O.** Modelling of Temperature Field Distribution of the Foam Glass Batch in Terms of Thermal Treatment of Foam Glass // *Int. J. Comput. Civ. Struct. Eng.* 2017. Vol. 13. No. 3. P. 112-118.
7. **Epstein P.S., Plesset M.S.** On the stability of gas bubbles in liquid-gas solutions // *J. Chem. Phys.*, 18(11):1505-1509, 1950.
8. **Readey D.W., Cooper A.R.** Molecular diffusion with a moving boundary and spherical symmetry // *Chem. Eng. Sci.*, 21:917-922, 1966.
9. **Cable M., Evans D.J.** Spherically symmetrical diffusion-controlled growth or dissolution of a sphere // *J. Appl. Phys.*, 38(7):2899-2906, 1967.
10. **Duda J.L., Vrentas J.S.** Mathematical Analysis of bubble dissolution // *AIChE J.*, 15(3):351-356, 1969.
11. **Subramanian R.S., Chi Bo.** Bubble dissolution with chemical reaction // *Chem. Eng. Sci.*, 35:2185-2194, 1980.
12. **Weinberg M.C., Onorato P.I.K., Uhlmann D.R.** Behavior of bubbles in glass melts: I, dissolution of a stationary bubble containing a single gas. // *J. Am. Ceram Soc.*, 63(3-4):175-180, 1980.
13. **Weinberg M.C.** Surface tension effects in gas bubble dissolution and growth // *Chem. Eng. Sci.*, 36:137-141, 1981.
14. **Szekely J., Martins G.P., Fang S.D.** Bubble growth by diffusion, the effect of viscosity, inertia and surface tension // *VDI Berichte*, 182:13-22, 1972.
15. **Bird R.B., Stewart W.E., Lightfoot E.N.** Transport Phenomena. John Wiley & Sons, Inc., sec. ed., 2001.

*Поступила в редакцию 01.07.2025*

*Одобрена после рецензирования 16.07.2025*

*Принята к опубликованию 24.07.2025*

## REFERENCES

1. **Fedosov, S.V. and Bakanov, M.O.** (2020), "Application of «micro-processes» method for modeling heat conduction and diffusion processes in canonical bodies", *ChemChemTech*, vol. 63, no. 10, pp. 90-95. DOI: 10.6060/ivkkt.20206310.6275.
2. **Bakanov, M.O.** (2021), "Modeling of high-temperature processes in foamed glass technology. Part 1: Formation of the dynamics of cyclic non-stationary two-dimensional temperature fields", *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Bulletin of the Volga State University of Technology. Series: Materials. Constructions. Technologies]*, no. 2, pp. 87-102. DOI: 10.25686/2542-114X.2021.2.87 (in Russian).
3. **Fedosov, S.V., Bakanov, M.O. and Kuznetsov, I.A.** (2023), "Mathematical modeling and experimental investigation of the process of non-stationary heat transfer in a block foam glass sample at the annealing stage", *Int. J. Comput. Civ. Struct. Eng.*, vol. 19, no. 1, pp. 190-203. DOI: 10.22337/2587-9618-2023-19-1-190-203.

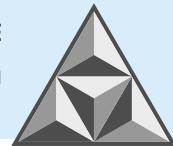


4. **Arefmanesh, A. and Advani, S.G.** (1991), "Diffusion induced growth of a gas bubble in a viscoelastic fluid", *Rheologica Acta*, no. 30, pp. 274-283.
5. **Fedosov, S.V. and Bakanov, M.O.** (2017), "Development of a comprehensive approach to mathematical modeling of the heat treatment process of foamed glass batch". Part 1. Physical concepts of the process, *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Materialy. Konstruktsii. Tekhnologii [Bulletin of the Volga State University of Technology. Ser.: Materials. Constructions. Technologies]*, no. 2, pp. 95-100 (in Russian).
6. **Fedosov, S.V. and Bakanov, M.O.** (2017), "Modelling of temperature field distribution of the foam glass batch in terms of thermal treatment of foam glass", *Int. J. Comput. Civ. Struct. Eng.*, vol. 13, no. 3, pp. 112-118.
7. **Epstein, P.S. and Plesset, M.S.** (1950), "On the stability of gas bubbles in liquid-gas solution", *J. Chem. Phys.*, vol. 18, no. 11, pp. 1505-1509.
8. **Readey, D.W. and Cooper, A.R.** (1966), "Molecular diffusion with a moving boundary and spherical symmetry", *Chem. Eng. Sci.*, no. 21, pp. 917-922.
9. **Cable, M. and Evans, D.J.** (1967), "Spherically symmetrical diffusion-controlled growth or dissolution of a sphere", *J. Appl. Phys.*, vol. 38, no. 7, pp. 2899-2906.
10. **Duda, J.L. and Vrentas, J.S.** (1969), "Mathematical analysis of bubble dissolution", *AIChE J.*, vol. 15, no. 3, pp. 351-356.
11. **Subramanian, R.S. and Chi, B.** (1980), "Bubble dissolution with chemical reaction", *Chem. Eng. Sci.*, no. 35, pp. 2185-2194.
12. **Weinberg, M.C., Onorato, P.I.K. and Uhlmann, D.R.** (1980), "Behavior of bubbles in glass melts: I, dissolution of a stationary bubble containing a single gas", *J. Amer. Ceram. Soc.*, vol. 63, no. 3-4, pp. 175-180.
13. **Weinberg, M.C.** (1981), "Surface tension effects in gas bubble dissolution and growth", *Chem. Eng. Sci.*, no. 36, pp. 137-141.
14. **Szekely, J., Martins, G.P. and Fang, S.D.** (1972), "Bubble growth by diffusion, the effect of viscosity, inertia and surface tension", *VDI Berichte*, no. 182, pp. 13-22.
15. **Bird, R.B., Stewart, W.E. and Lightfoot, E.N.** (2001), *Transport phenomena*. 2nd edn. New York: John Wiley & Sons, Inc.

*Received 01.07.2025*

*Approved 16.07.2025*

*Accepted 24.07. 2025*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.3

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-38-47

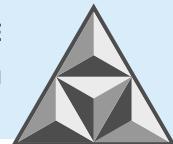
# Оценка качества сырьевых материалов республики Бурунди для производства дорожных бетонов

**Ф. Ндайизейе, Н. А. Белькова, Т.И. Шелковникова, Е.И. Иващенко**

**Фуади Ндайизейе, Наталья Анатольевна Белькова\*, Татьяна Иннокентьевна Шелковникова,  
Елена Ивановна Иващенко**

Воронежский государственный технический университет, Воронеж, Российская Федерация

*ndayizeyefouadi779@gmail.com, verlnata@mail.ru\*, tschelk@mail.ru, ivachenko@cchgeu.ru*



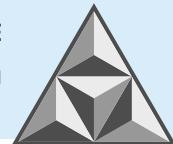
Проведены исследования песка и щебня, взятых из двух рек в Республике Бурунди, на соответствие характеристик нормативным показателям и для оценки возможности получения на их основе цементных дорожных бетонов. Установлено, что цемент, производимый бурундийской компанией BUCECO (BURUNDI CEMENT COMPANY), может быть использован только для устройства оснований дорожного полотна; для покрытия дорог допускается применение цемента от Tanzania Portland Cement. Установлено, что материалы заполнителей (песок и щебень) пригодны для производства дорожных бетонов после предварительного обогащения. Предложены основные технологические мероприятия, обеспечивающие заданный уровень качества дорожного строительства в Бурунди при использовании местного сырья.

**Ключевые слова:** дорожные бетоны Бурунди, сырьевые материалы, качество, цемент, песок, щебень

**Для цитирования:**

Ндайизе Ф., Белькова Н. А., Шелковникова Т.И., Иващенко Е.И. Оценка качества сырьевых материалов республики Бурунди для производства дорожных бетонов // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 3. С. 38-47. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-38-47



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-38-47

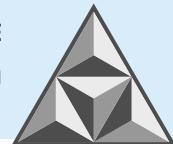
# Quality assessment of raw materials in the Republic of Burundi for road concrete production

**F. Ndayizeye, N.A. Belkova, T.I. Shelkovnikova, E.I. Ivashchenko**

**Fuadi Ndayizeye, Natalya Anatolyevna Belkova\*, Tatyana Innokentievna Shelkovnikova,  
Elena Ivanovna Ivashchenko**

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russian Federation

*ndayizeyefouadi779@gmail.com, verlnata@mail.ru\*, tschelk@mail.ru, ivachenko@cchgeu.ru*



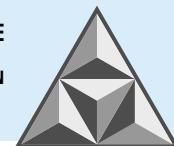
*Studies were conducted on sand and crushed stone sourced from two rivers in the Republic of Burundi to assess their compliance with standard specifications and their suitability for producing cement-based road concrete. It was established that cement produced by the Burundian company BUCECO (BURUNDI CEMENT COMPANY) is only suitable for the construction of roadbed foundations; for pavement surfaces, the use of cement from Tanzania Portland Cement is recommended. The study found that the aggregate materials (sand and crushed stone) are suitable for the production of road concrete after preliminary processing. Key technological measures are proposed to ensure the required quality standards for Burundian road construction using local raw materials.*

**Keywords:** Burundian road concrete, raw materials, quality, cement, sand, crushed stone

**For citation:**

Ndayizeye F., Belkova N.A., Shelkovnikova T.I., Ivashchenko E.I. Quality assessment of raw materials in the Republic of Burundi for road concrete production // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 3. P. 38-47. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-38-47



## ВВЕДЕНИЕ

Перспективы использования цементных бетонов для дорожного строительства в различных условиях их эксплуатации постоянно расширяются. Это обусловлено их преимуществом по сравнению с асфальтобетонами – прежде всего, достаточно высокой прочностью, независимостью деформативных свойств от характеристик окружающей среды, высокой износостойкостью. Если рассматривать потребности Республики Бурунди в материалах для строительства дорог, то, по данным Дорожного управления, 46% дорог Бурунди находятся в плохом состоянии и нуждаются в восстановлении [1, 2]. Таким образом, проблема подбора и оптимизации составов для устройства дорожного полотна является актуальной. При этом и к дорожным бетонам, и к сырьевым материалам для их изготовления предъявляются особые требования.

Целью настоящего исследования является оценка качества и определение области применения основных сырьевых материалов для тяжелых бетонов в Бурунди.

Основные задачи исследования:

- определение основных свойств сырьевых материалов для дорожных бетонов в Республике Бурунди;
- оценка оптимальной области применения исследованных сырьевых материалов;
- обоснование нормативных требований к сырьевым материалам и свойствам бетонов для применения на дорогах Республики Бурунди.

В настоящей работе проведен анализ литературных источников [3-5], который показал, что на территории Бурунди практически отсутствует собственная система нормативной документации. При производстве продукции и оценке ее качества используются французские и европейские нормативные документы. При этом многие из них полностью соответствуют российским нормативным документам, а значительная часть стандартов актуализирована на территории РФ в виде международных. Это касается, в частности, требований к сырьевым материалам для бетонов и основным методам определения их свойств [6].

Для проектирования дорог и производства дорожных материалов используют ряд нормативных документов – СП 34.13330.2021 «Свод правил. Автомобильные дороги» и ГОСТ Р 59300-2021 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси бетонные для устройства слоев оснований и покрытий. Технические условия». Согласно этим документам, для основных слоев дорожного полотна может быть использован цементный бетон с классами В30 и В<sub>тв</sub> 4,0 (для монолитного покрытия), а также классами В7,5 и В<sub>тв</sub> 1,2 (для монолитного основания).

По ГОСТ Р 59300-2021 к сырьевым материалам для бетонов предъявляют следующие требования:

1. Бетонная смесь характеризуется несколькими показателями, среди которых фигурируют: показатель удобоукладываемости (подвижность П1...П5); сохраняемость свойств во времени (классы С1-С4).

2. Особые требования предъявляются к цементам. Так, по вещественному составу используют цементы следующих типов:

- для оснований – ЦЕМ II/A-Ш, ЦЕМ II/B, ЦЕМ III/A, ЦЕМ V/A;
- для покрытий – ЦЕМ I, ЦЕМ II/A-Ш.

Также нормируются: показатели нормальной густоты цементного теста ( $\leq 30\%$ ); содержание трехкальциевого алюмината ( $\leq 8\%$ ); удельная поверхность частиц цемента при измерении методом Блейна ( $280\text{--}400 \text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$ ).

3. В качестве мелкого заполнителя могут применяться природные и дробленые пески с модулем крупности 2.3...2.8, содержанием пылевидных и глинистых частиц не более 2% и содержанием глины в комках не более 0.25%.



4. В качестве крупного заполнителя применяется фракционированный щебень с содержанием зерен пластинчатой и игловатой формы («лещадной») не более 15%; зерен слабых пород в щебне должно быть не более 5% от массы. Также нормируются показатели содержания пылевидных и глинистых частиц (не более 2%) и глины в комках (не более 0.25%). Марка по прочности должна быть не ниже M400 (для основания) и M800 (для покрытия дорог).

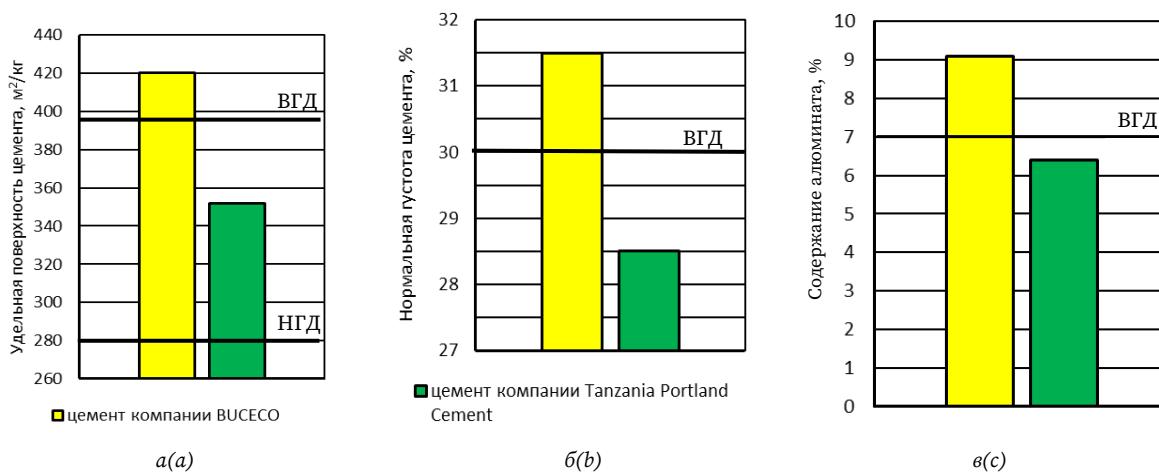
В случае, если имеется несоответствие свойств крупного и мелкого заполнителей по содержанию примесей, улучшить характеристики можно различными способами [7-13]. Так, в [10, 11] предлагается обогащение заполнителей путем их промывки и фракционирования.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Проведена оценка качества сырья, необходимого для производства дорожных бетонов. В качестве объектов исследования использовали:

- цементы двух производителей – ЦЕМ II/В-П 32,5 М компании *BUCECO (BURUNDI CEMENT COMPANY)* и ЦЕМ I 42,5 Н компании *TWIGA (Tanzania Portland Cement)*;
- песок природный, отобранный из рек Рувиронза и Музази;
- щебень валунов из рек Рувиронза и Музази.

Характеристики портландцемента крупных компаний Бурунди приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Результаты оценки основных свойств портландцемента: *a* – удельная поверхность; *b* – нормальная густота; *c* – содержание трехкальциевого алюмината

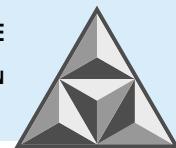
**Fig. 1.** The results of the assessment of the main properties of Portland cement:  
*a* – specific surface area; *b* – normal density; *c* – content of tricalcium aluminate

Свойства сырья и материалов определяли в соответствии с методиками, приведенными в российских и международных нормативных документах.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

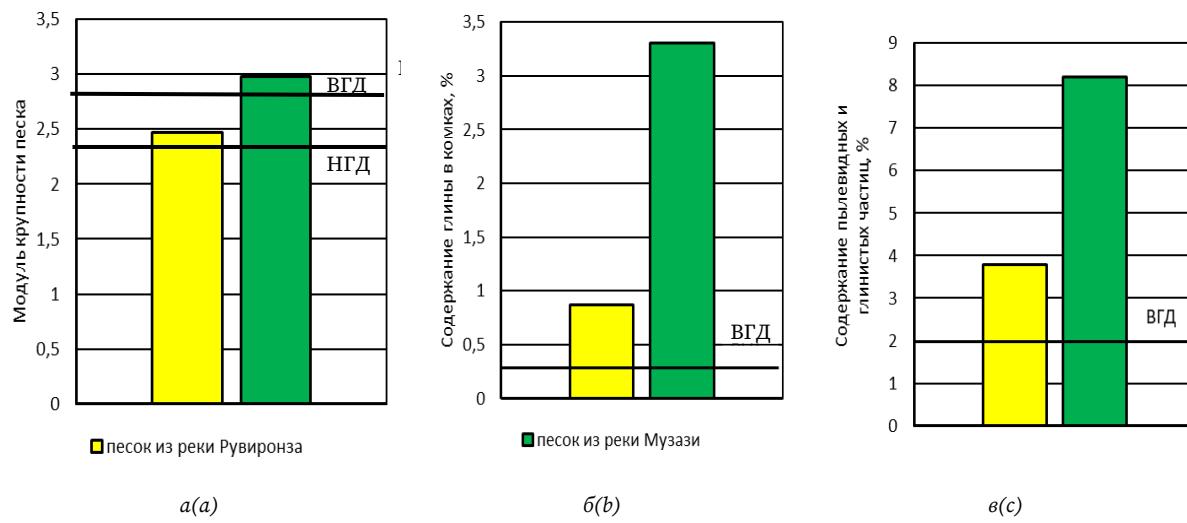
На представленных диаграммах обозначены заданные нормативами границы допусков (для бетона покрытия дорожного полотна) – верхние (ВГД) и нижние (НГД).

Как следует из данных, представленных на рис. 1, основные характеристики портландцемента компании *BUCECO* не соответствуют нормативным требованиям по всем показателям. Однако определение предела прочности при изгибе показало, что полученное значение составляет 6.05 МПа (выше нормы 6.0 МПа). При этом величина удельной поверхности выходит за верхнюю границу ( $400 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$ ), то есть цемент имеет высокую степень помола. Цемент компании *TWIGA* имеет основные показатели, не выходящие за нормативные границы допуска. Следует отдельно отметить существенное превышение количества



трехкальциевого алюмината в цементе компании *BUCECO* над ВГД, что является основным препятствием для его применения в дорожных бетонах.

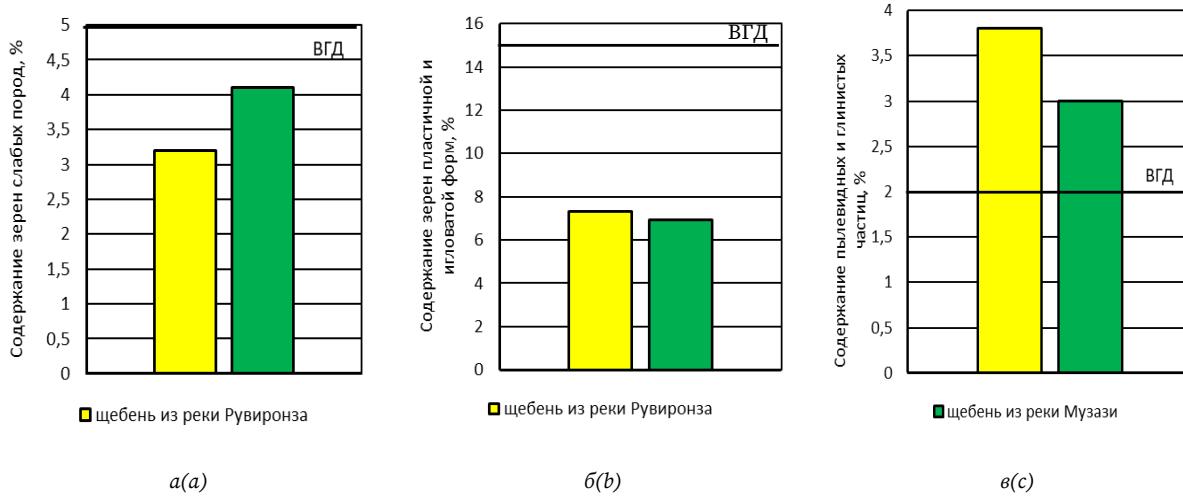
Характеристики песков из рек Рувиронза и Музази (рис. 2) не соответствуют нормативным требованиям по содержанию глины в комках и пылевидных и глинистых частиц.



**Рис. 2.** Оценка свойств песка: *a* – модуль крупности; *b* – содержание глины в комках; *c* – содержание пылевидных и илистых частиц

**Fig. 2.** Sand properties: *a* – modulus of size; *b* – clay content in lumps; *c* – content of dust and silt particles

При этом количество пылевидных и глинистых частиц песка из реки Рувиронза превышает нормативные значения примерно в два раза (3.8% при допустимом показателе 2.0%); для песка же из реки Музази этот показатель выше в 4 раза (8.2%). По содержанию количества глины в комках песок из реки Музази является более загрязненным (превышение в 13 раз). Показатель модуля крупности для песка из реки Рувиронза находится в заданных стандартом границах; для песка из реки Музази этот показатель немного завышен (2.98 против верхнего граничного значения 2.80).



**Рис. 3.** Результаты оценки свойств щебня: *a* – содержание зерен слабых пород; *b* – содержание зерен пластинчатой и игловатой формы; *c* – содержание пылевидных и илистых частиц

**Fig. 3.** Crushed stone properties assessment results: *a* – content of soft rock grains; *b* – content of grains of lamellar and needle shape; *c* – content of dust and silt particles

Для щебня, взятого из этих рек, также наблюдается несоответствие по этим показателям (превышение в 2.0-2.5 раз, см. рис. 3). Марки по прочности соответствуют M800 и M1000 для



щебня из рек Рувиронза и Музази соответственно. При этом количество зерен слабых пород и «лещадных» частиц находится в пределах нормативных значений.

В рамках исследований проведен анализ полученных данных и определена область применения указанных сырьевых материалов.

Область применения цементов для дорожных бетонов определяется не только их физико-механическими характеристиками, но и допустимым минералогическим составом. Так, цемент компании *BUCECO* относится к типу ЦЕМ II/ В-П (портландцемент с минеральными добавками). Следовательно, согласно ГОСТ Р 59300-2021, а также в соответствии с полученными результатами исследования, этот цемент может быть использован только для бетона основания дорожного полотна. В то же время цемент, производимый компанией *TWIGA*, имеет другой тип – ЦЕМ I (портландцемент без активных минеральных добавок). При этом, как показано в данной работе, его основные технические характеристики не выходят за установленные границы, следовательно, именно этот цемент может быть использован для бетонов при устройстве покрытия дорожного полотна.

В качестве мелкого заполнителя для бетона в дорожном покрытии может применяться песок из реки Рувиронза, так как его модуль крупности соответствует нормативному показателю. В качестве крупного заполнителя бетонов как для основания, так и для покрытия дорожного полотна пригодными являются любые из исследованных материалов, поскольку они отвечают необходимым требованиям и по прочности, и по форме зерен.

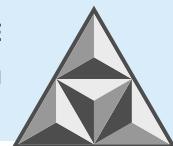
## ВЫВОДЫ

Для получения дорожных бетонов в условиях Республики Бурунди допускается использование портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н компании *TWIGA*. Согласно результатам исследований, для песка и щебня наблюдается несоответствие по показателям содержания примесей, поэтому их применение в качестве заполнителей для бетонов дорожного полотна требует предварительного обогащения.

Корректировка свойств сырья Бурунди для дорожного строительства возможна также за счет использования армирующих волокон или добавок-модификаторов различного типа.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Бигиримана Ж., Павлов А.П.** Особенности условий эксплуатации автомобильного транспорта в Бурунди // Вестник МАДИ. 2020. № 1(60). С. 38-42.
- Ntunzwenimana J.B.** Stratégie nationale en matière de planification et de gestion du secteur du transport et son plan d'actions 2018-2027 au Burundi. Bujumbura. 2018. 199 p.
- Lapidus A.A., Ndayiragije Y.** Integrated Quality Index of Organizational and Technological Solutions for Implementation of Burundian Capital Master Plan // Mat. Sci. Forum. 2018. Vol. 931. P. 1295-1300.
- Meijer F., Visscher H.** Quality control of constructions: European trends and developments // Int. J. of Law in the Built Envir. 2017. Vol. 9. № 2. P. 143-161.
- Белькова Н.А., Ндайизе耶 Ф., Шмитъко Е.И.** Обоснование нормативных и технических требований к характеристикам автомобильных дорог в республике Бурунди // Химия, физика и механика материалов. 2023. № 3(38). С. 69-80.
- Усачев С.М., Кукина О.Б., Ками К.** Исследование свойств сырьевых материалов для бетонов в республике Бурунди // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. № 1(69). С. 36-46.
- Кукина О. Б., Волокитина О.А., Волков В.В., Шуваев Д.И., Чунихина А.С.** Проектирование конструктивных слоев оснований фундаментов сооружений и дорожных одежд на модифицированных глинистых грунтах // Строительная механика и конструкции. 2022. № 2(33). С. 158-167.



8. **Федорович П.Л.** Теоретические и практические основы минимизации содержания цемента в бетоне путем формирования оптимального зернового состава // Вопросы внедрения норм проектирования и стандартов Европейского союза в области строительства: сб. науч.-техн. ст. (мат. науч.-метод. сем.), 29 мая 2012 г., Минск, 2012. Ч. 2. С. 155-165.
9. **Федорович П.Л.** О технологии обогащения мелкого заполнителя для бетона // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. Минск: Изд. центр БГУ, 2016. Вып. 8. С. 290-306.
10. **Корсак Л.Л.** Экологические проблемы использования отходов добычи и переработки кварцевых песков и разработка аэродинамического способа обогащения // Горный инф.-аналит. бюл. 2004. № 11. С. 305-306.
11. **Терешкин И.П.** Перспективы обогащения природных песков Ускляйского месторождения Республики Мордовия для цементных бетонов и строительных растворов // Инженерный вестник Дона. 2019. № 9(60). С. 47.
12. **Смирнов Д.С.** Цементобетон для дорожных покрытий на местных инертных материалах Республики Татарстан // Межд. форум KAZAN DIGITAL WEEK – 2021: Сб. мат. Казань, 21-24 сентября 2021 г. Ч. 1. Казань: ГБУ «НЦБЖД», 2021. С. 158-162.
13. **Степанова М.П., Белькова Н.А., Баранов Е.В.** Оптимизация состава бетона для основания и покрытия дорог // Вестник Инженерной школы Дальневосточного фед. ун-та. 2023. № 1(54). С. 83-89. DOI: 10.24866/2227-6858/2023-1/83-89.

*Поступила в редакцию 06.06.2025*

*Одобрена после рецензирования 01.07.2025*

*Принята к опубликованию 24.07.2025*

## REFERENCES

1. **Bigirimana, J. and Pavlov, A.P.** (2020), “Features of the operating conditions of road transport in Burundi”, *Bul. MADI*, vol. 1, no. 60, pp. 38-42 (in Russian).
2. **Ntunzwenimana, J.B.** (2018), Stratégie nationale en matière de planification et de gestion du secteur du transport et son plan d'actions 2018-2027 au Burundi. Bujumbura.
3. **Lapidus, A.A. and Ndayiragije, Y.** (2018), “Integrated Quality Index of Organizational and Technological Solutions for Implementation of Burundian Capital Master Plan”, *Mat. Sci. Forum*, vol. 931, pp. 1295-1300.
4. **Meijer, F. and Visscher, H.** (2017), “Quality control of constructions: European trends and developments”, *Int. J. of Law in the Built Envir.*, vol. 9, no 2, pp. 143-161.
5. **Belkova, N.A., Ndayizeye, F. and Shmitko, E.I.** (2023), “Justification of regulatory and technical requirements for the characteristics of roads in the Republic of Burundi, Chemistry”, *Phys. Mech. Mat.*, vol. 3, no. 38, pp. 69-80 (in Russian).
6. **Usachev, S.M., Kukina, O.B. and Kami, K.** (2023), “Study of the properties of raw materials for concrete in the Republic of Burundi”, *Sci. J. Constr. Arch.*, vol. 1, no. 69, pp. 36-46 (in Russian).
7. **Kukina, O.B., Volokitina, O. A., Volkov, V.V., Shuvaev, D. I. and Chunikhina, A.S.** (2022), Design of structural layers of foundations of structures and pavements on modified clay soils”, *Construction mechanics and structures*, vol. 2, no. 33, pp. 158-167(in Russian).
8. **Fedorovich, P.L.** (2012), Theoretical and practical foundations for minimizing the content of cement in concrete by forming an optimal grain composition, *Iss. of implementation of design standards and standards of the European Union in the field of construction: Sat. sci. techn. Art. (mat. sci.-method. sem.)*, May 29, Minsk, 2012, Part 2, pp. 155-165 (in Russian).
9. **Fedorovich, P.L.** (2016), On the technology of enrichment of fine aggregate for concrete, *Problems of modern concrete and reinforced concrete: Sat. sci. Art.*, Minsk: Ed. BSU Center, no. 8, pp. 290-306 (in Russian).
10. **Korsak, L.L.** (2004), “Environmental problems of using waste from the extraction and processing of quartz sands and the development of an aerodynamic enrichment method”, *Mining Inf. Analyt. Bul.*, no. 11, pp. 305-306 (in Russian).
11. **Tereshkin, I.P.** (2019), “Prospects for enrichment of natural sands of the Usklyaysky field of the Republic of Mordovia for cement concrete and mortar”, *Eng. Bul. of the Don*, vol. 9, no. 60, p. 47 (in Russian).

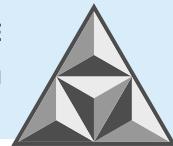


12. **Smirnov, D.S.** (2021), Cement concrete for road surfaces on local inert materials of the Republic of Tatarstan, KAZAN DIGITAL WEEK Int. Forum - 2021: Collect. mat., Kazan, September 21-24, Part 1. Kazan: GBU "NCBZD", pp. 158-162 (in Russian).
13. **Stepanova, M.P., Belkova, N.A. and Baranov, E.V.** (2023), "Optimization of concrete composition for the base and road pavement", *Bul. of the Engin. School of the Far East. Fed. Univer.*, vol. 1, no. 54, pp. 83-89 (in Russian). DOI 10.24866/2227-6858/2023-1/83-89.

*Received 06.06.2025*

*Approved 01.07.2025*

*Accepted 24.07.2025*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.72

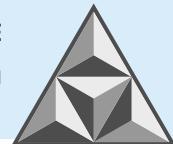
DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-48-61

# Улучшение характеристик асфальтобетонов путем их модификации

**Г.В. Проваторова, К.М. Рябинина, А.В. Вихрев**

Галина Владимировна Проваторова\*, Ксения Михайловна Рябинина, Александр Владимирович Вихрев  
Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых, Владимир,  
Российская Федерация

*asf.inst@yandex.ru\**, *kseniyaya92@mail.ru*, *user1268@gmail.com*



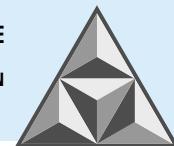
*Вопросы повышения качества и увеличения срока службы асфальтобетонов при проектировании и строительстве дорожных покрытий требуют привлечения новых методов и технологий приготовления смесей, а также применения модифицирующих добавок для получения строительного материала с комплексом требуемых свойств. Введение добавок-модификаторов в битум позволяет добиться качественного изменения его характеристик, однако это часто приводит к усложнению процесса и повышению стоимости конечного продукта. В настоящей работе предлагается применить новый способ модификации состава, суть которого сводится к внесению добавки не в битум, а непосредственно в асфальтобетонную смесь.*

**Ключевые слова:** битум, асфальтобетон, модификация, термоэластопласт «ДорАрм», проектирование состава, дорожные покрытия, срок службы

**Для цитирования:**

Проваторова Г.В., Рябинина К.М., Вихрев А.В. Улучшение характеристик асфальтобетонов путем их модификации // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 3. С. 48-61.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-48-61



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-48-61

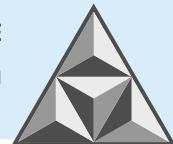
# Improving the performance characteristics of asphalt concrete through their modification

**G.V. Provatorova, K.M. Ryabinina, A.V. Vikhrev**

**Galina Vladimirovna Provatorova\*, Kseniya Mikhailovna Ryabinina, Aleksandr Vladimirovich Vikhrev**

Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov, Vladimir, Russian Federation

*asf.inst@yandex.ru\**, *kseniyaya92@mail.ru*, *user1268@gmail.com*



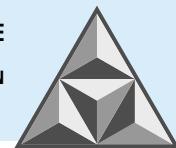
*Enhancing the quality and service life of asphalt concrete in the design and construction of road pavements requires the adoption of new mix production methods and technologies, as well as the use of modifying additives to create a construction material with a comprehensive set of required properties. Introducing modifier additives into bitumen can qualitatively improve its characteristics; however, this often leads to a more complex process and increased cost of the final product. This paper proposes a new method for modifying the composition, which involves introducing the additive directly into the asphalt concrete mix rather than into the bitumen.*

**Keywords:** bitumen, asphalt concrete, modification, thermoplastic elastomer “DorArm”, mix design, road pavements, service life

**For citation:**

Provatorova G.V., Ryabinina K.M., Vikhrev A.V. Improving the performance characteristics of asphalt concrete through their modification // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 3. P. 48-61 URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-48-61



## ВВЕДЕНИЕ

Неудовлетворительные сроки эксплуатации дорожных покрытий являются большой проблемой при значительном росте загруженности дорог, утяжелении транспортного потока и требуют привлечения к решению новых методов, материалов и технологий. Кратковременная устойчивость асфальтовых покрытий обусловлена качеством применяемых материалов, особенно битума. Именно битум наиболее чувствителен к воздействию механических нагрузок транспорта и климатических факторов, определяющих состояние дорожного полотна [1].

Одним из способов повышения качества дорожно-строительных связующих веществ является их модификация, направленная на улучшение адгезионных характеристик, прочности и устойчивости к деформации. Это положительно сказывается на эксплуатационных свойствах дорожного покрытия [2].

В последнее время стали применять новую технологию модификации, при которой добавка вводится не в битум, а непосредственно в смеситель. Благодаря такому приготовлению асфальтобетонной смеси обеспечивается создание высоконадежного дорожного покрытия, которое обладает способностью эффективно противостоять образованию трещин даже при воздействии экстремально низких температур окружающей среды. Помимо этого, данная технология гарантирует высокие показатели сопротивления разрушению вследствие длительных циклических нагрузок, сохраняет целостность структуры и при повышенных температурах, минимизируя риск возникновения деформаций сдвига и обеспечивая надежную защиту от формирования колеи, возникающей под влиянием интенсивного движения автотранспорта.

Термоэластопластичные добавки, вводимые в состав асфальтобетонных смесей, выполняют роль эффективного пластифицирующего компонента, способствующего повышению сдвиговой и водоустойчивости, ударопрочности, сопротивляемости усталости материала, предотвращению расслоений, образованию колеи и трещин в покрытии. Модифицирование приводит к значительному продлению срока эксплуатации автодорог (долговечность повышается на 30%). Для производителей модифицированных и полимерно-битумных вяжущих, асфальтобетонных смесей и подрядных организаций, занятых устройством покрытий, особый интерес представляет «сухой» способ введения добавок в асфальтобетонную смесь [3, 4].

Целью данного исследования являются:

- определение оптимального количества вводимой в битум добавки и исследование свойств вяжущего;
- улучшение основных показателей асфальтобетонной смеси на основе полученных модификаций без значительного удорожания в производстве, главным образом, ввиду того, что термоэластопласт вводится непосредственно в смесь;
- увеличение срока службы асфальтобетонного покрытия, что, в свою очередь, позволит снизить затраты дорожных организаций на эксплуатацию дорог.

Задача исследования заключалась в анализе эффективности влияния модификации на изменение характеристик асфальтобетонов, в том числе – их прочностные показатели.



## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В данном исследовании проводили сравнительный анализ смеси без добавки и с добавлением в нее термоэластопласта «ДорАрм». «ДорАрм» представляет собой модификатор, полученный путем включения в состав активного резинового порошка, производимого посредством девулканизации резиновой крошки. В состав продукта введены целевые и функциональные добавки, предназначенные для улучшения эксплуатационных характеристик асфальтобетонных смесей [4].

Асфальтобетонные смеси, содержащие модификатор «ДорАрм», согласно рекомендациям производителя, оптимальны для применения в верхнем и нижнем слоях покрытия, а также в верхнем слое основания дорожной конструкции.

«ДорАрм» выполняет двойную функцию (дисперсное армирования и стабилизация), обеспечивая существенное снижение степени стекания вяжущего, что удовлетворяет требованиям стандартов ГОСТ Р 58406.1-2020, ГОСТ Р 58406.2-2020, ГОСТ 31015-2002 и ГОСТ 9128-2013. Модификатор поставляется в форме порошка или гранул (рис. 1) и предназначен для введения в асфальтобетонную смесь методом сухого смешивания. В состав модификатора «ДорАрм» входят:

- активный резиновый порошок с размером частиц менее 0.8 мм;
- функциональные добавки, включающие стабилизирующие, структурообразующие, адгезионные и модифицирующие элементы [4].

Требования к свойствам модификатора «ДорАрм» приведены в табл. 1.

**Таблица 1.** Показатели свойств модификатора «ДорАрм»

**Table 1.** Properties of the DorArm modifier

№ п/п	Наименование показателя, Единица измерения	Нормативные значения	Метод испытания
1	Остаток на сите 2.5 мм при просеивании, %, не более	10	по 8.5
2	Индекс агломерации (слеживаемость), баллы, не менее	10	по ГОСТ 55419
3	Насыпная плотность, $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$	$0.47 \pm 0.02$	по ГОСТ 55419
4	Влажность, % по массе, не более	5	по ГОСТ 58406.1
5	Термостойкость, %	5	по ГОСТ 58406.1

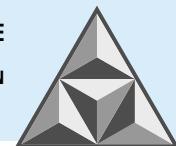


**Рис. 1.** Внешний вид  
модификатора «ДорАрм»  
**Fig 1.** Appearance of the  
DorArm modifier

В качестве исходных материалов для производства модификатора «ДорАрм» применяют:

- активированный порошок, получаемый путем измельчения отходов резины;
- специальные целевые и функциональные добавки на основе полимерных соединений, выполняющие роль катализирующих агентов и соответствующие требованиям ГОСТ Р 55419-2013.

Основным сырьем для производства активного резинового порошка служит девулканизированная резиновая крошка, извлекаемая из отработанных автомобильных покрышек или отходов производства резинотехнических изделий (вторичное сырье).



Важно отметить, что в процессе подготовки сырья исключают посторонние механические примеси – песок, древесные частицы, глинистые включения, стекло или камни [5].

Исследование проводили на базе дорожной лаборатории ООО «ДСУ №3». В качестве базового вяжущего материала был взят битум марки БНД 70/100, который широко используется во Владимирской области.

Применение модификатора «ДорАрм» предполагает одновременное его дозирование совместно с битумом. Добавку модификатора вводят в смесительный аппарат, причем подача осуществляют сразу же вслед за битумом, спустя 1-3 с. Продолжительность последующего смешивания состава должна составлять минимум 25 с. Предварительное нагревание модификатора перед его добавлением в смесь не осуществляют.

С момента выхода готовой модифицированной асфальтобетонной смеси с завода до ее укладки на дорогу должно пройти не менее 30 мин. Это время отвечает периоду транспортировки смеси в кузовах самосвалов до участка строительства дороги [6].

Методика исследования включает [7, 8]:

- лабораторные испытания битума нефтяного дорожного марки БНД 70/100;
- лабораторные испытания асфальтобетонной смеси, приготовленной с применением битума нефтяного дорожного (см. рис. 2) и модификатора «ДорАрм».



**Рис. 2.** Лабораторные испытания битума нефтяного дорожного БНД 70/100

**Fig. 2.** Laboratory tests of petroleum road bitumen BND 70/100

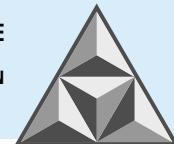
Проектирование состава асфальтобетонной смеси А16Вн проводили в дорожной лаборатории ГУП ДСУ-3 (г. Владимир) в соответствии с ГОСТ Р 58406.10.

На первом этапе определяли оптимальный гранулометрический состав смеси, после чего рассчитывали требуемое содержание вяжущего.

Из полученной в результате подбора минеральной части в ходе двух параллельных серий испытаний изготавливали асфальтобетонную смесь на основе стандартного битума БНД 70/100, а также смесь, модифицированную «ДорАрм».

Для корректного изготовления, последующих испытаний материала и анализа результатов был составлен технологический регламент, включающий следующие стадии:

- получение асфальтобетонной смеси в лабораторной мешалке по действующей методике, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 58406.10;
- формование не менее трех образцов (одного состава) испытуемого асфальтобетона (рис. 3);
- лабораторные исследования каждой серии образцов асфальтобетона по ГОСТ Р 58406.2-2020 (см. рис. 4);
- ланжирование полученных в ходе лабораторных исследований результатов, анализ выявленных закономерностей и составление рекомендаций.



**Рис. 3.** Изготовление асфальтобетонных образцов

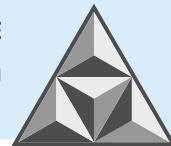
**Fig. 3.** Manufacture of asphalt concrete samples



**Рис. 4.** Лабораторные испытания стандартных образцов асфальтобетона по ГОСТ Р 58406.2-2020

**Fig. 4.** Laboratory tests of standard asphalt concrete samples according to GOST R 58406.2-2020

Дальнейшие исследования осуществляли на образцах асфальтобетонной смеси заданного типа и осуществляли анализ полученных результатов с учетом работ [9, 10].



## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты испытаний представлены на рис. 5.

**Результаты лабораторных испытаний**

№ п/п	Наименование показателя	Единица измерения	Требования ГОСТ 33133-2014, ГОСТ Р 58829- 2020 к БНД 70/100	Фактические значения
1.	Глубина проникания иглы при 25 °C	0,1 мм	71-100	89
2.	Температура размягчения по кольцу и шару	°C	не ниже 47	47,8
3.	Растяжимость при температуре 0°C	см	не менее 3,7	5,01
4.	Максимально усилие при растяжении при температуре 0°C и скорости растяжения 1 см/мин	Н	-	77,15
5.	Температура хрупкости	°C	не выше -18	-24
6.	Изменение массы образца после старения	%	не более 0,6	0,3
7.	Изменение температуры размягчения после старения	°C	не более 7	7,0
8.	Динамическая вязкость при температуре 60°C при скорости сдвига 1,5 с <sup>-1</sup>	Пас.	не менее 100	222,91
9.	Динамическая вязкость при температуре 60°C при скорости сдвига 1,5 с <sup>-1</sup> после старения	Пас.	не менее 220	773,57
10.	Коэффициент изменения динамической вязкости после старения		не более 3,5	3,47
11.	Температура вспышки	°C	не ниже 230	290
12.	Диапазон смешивания	°C	-	154,5-160,1
13.	Диапазон уплотнения	°C	-	142,8-147,9

**Рис. 5.** Результаты лабораторных исследований битума нефтяного дорожного марки БНД 70/100

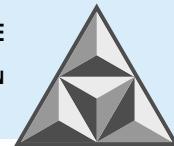
**Fig. 5.** Results of laboratory tests of road bitumen of the BND 70/100 brand

Рецепт асфальтобетонной смеси разрабатывался по стандартной методике: производили подбор оптимального зернового состава асфальтобетонной смеси и определяли оптимальное содержание вяжущего в смеси (рис. 6, 7).

**Состав асфальтобетонной смеси №4.3/2023**

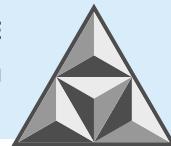
А1Бви по ГОСТ Р 58406.2-2020

№ п/п	Наименование материалов	Состав а/б смеси при подборе, % (битум сверх 100%)	Средняя и истинная плотность, г/см <sup>3</sup>	Зерновой состав(прошло через сито с отверстиями мм), % от массы												
				22,4	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063	
1	Шебень габбро-диабаз фр. 11,2-16 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чекжавара"	2,96	100,00	94,08	10,80	1,32	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59	
2	Шебень габбро-диабаз фр. 8-11,2 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чекжавара"	2,98	100,00	100,00	94,94	8,04	0,56	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	
3	Шебень габбро-диабаз фр. 4-8 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чекжавара"	2,96	100,00	100,00	100,00	93,88	38,68	3,68	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30	
4	Песок дробленый М1400, габбро-диабаз, ООО "ПГК", месторождение "Чекжавара"	3,06	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	94,78	66,33	45,18	30,35	23,79	14,46	9,65		
5	Минеральный порошок МП-2 ЗАО "Завод Ковровский доломит молотый"	2,89	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,18	86,24		
2. Зерновой состав асфальтобетонной смеси																
1	Шебень габбро-диабаз фр. 11,2-16 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чекжавара"	26,0	26,0	24,5	2,8	0,3	0,2	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,2		
2	Шебень габбро-диабаз фр. 8-11,2 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чекжавара"	8,0	8,0	8,0	7,6	0,6	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0		
2	Шебень габбро-диабаз фр. 4-8 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чекжавара"	13,0	13,0	13,0	12,2	5,0	0,5	0,0	0	0	0	0	0,0	0,0		
3	Песок дробленый М1400, габбро-диабаз, ООО "ПГК", месторождение "Чекжавара"	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	46,4	32,5	22,1	14,9	11,7	7,1	4,7		
4	Минеральный порошок МП-2 ЗАО "Завод Ковровский доломит молотый"	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9	3,4		
5	Сумма	100,0	100,0	98,5	76,4	66,1	58,2	50,9	36,5	26,1	18,9	15,7	11,0	8,3		
6	Зерновой состав по ГОСТ Р 58406.2-2020			100,0	100,0	90,0	-	70,0	55,0	-	-	-	20,0	12,0		
7	Зерновые составы фактические			100,0	98,5	76,4	66,1	58,2	50,9	36,5	26,1	18,9	15,7	11,0	8,3	



3. Состав асфальтобетонной смеси						
№ п/п	Наименование материалов	Насыпная плотность г/см³	Состав минеральной части асфальтобетон- ной смеси, % (битум сверх 100%)	Состав минеральной части асфальтобетонно- й смеси, % (битум в 100%)	Дозировка, кг на 1 тонну	Дозировка материалов на замес, кг
						25
						фракция
4. Физические и эксплуатационные показатели асфальтобетонной смеси						
№ п/п	Наименование показателей	Требования ГОСТ Р 58406.2-2020	Проектные показатели			
1	Объемная плотность, г/см³		2,640			
2	Максимальная плотность, г/см³		2,740			
3	Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), %	не менее 12	16,0			
4	Содержание воздушных пустот, %	от 2,5 до 4,5	3,6			
5	Пустоты, наполненные битумным вяжущим (ПНБ), %	67-80	77,2			
6	Средняя глубина колеи, мм	не более 4,5	4,4			
7	Коэффициент водостойкости	не менее 0,85	0,88			
8	Удельное содержание радионуклидов, Бк/кг	до 740	41,2			
9	Диапазон смещивания, °C		157,3-162,9			
10	Диапазон уплотнения, °C		145,8-150,9			
5. Предельно допустимые отклонения отдельных показателей от состава						
№ п/п	Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 58406.2-2020	Фактические значения	Границы отклонения		
				минимальная	максимальная	
1	Содержание воздушных пустот, % от объема	± 1,4	3,6	2,2	5,0	
2	Количество вяжущего в смеси (сверх 100 %), %	± 0,5	4,5	4,0	5,0	
3	Количество вяжущего в смеси (в 100 %), %	± 0,5	4,3	3,8	4,8	
4	Проход через сито, на один размер меньше номинального максимального размера (сито 11,2 мм), % по массе	± 6,0	76,4	70,4	82,4	
5	Проход через сито 4 мм, % по массе	± 6,0	50,9	44,9	56,9	
6	Проход через сито 2 мм, % по массе	± 6,0	36,5	30,5	42,5	
7	Проход через сито 0,125 мм, % по массе	± 4,0	11,0	7,0	15,0	
8	Проход через сито 0,063 мм, % по массе	± 4,0	8,3	4,3	12,3	
6. Зерновой состав асфальтобетонной смеси А16Вн						

**Рис. 6.** Определение оптимального зернового состава асфальтобетонной смеси А16Вн на основе битума БНД 70/100  
**Fig. 6.** Determination of the optimal grain composition of the A16Vn asphalt mixture based on BND 70/100 bitumen



**Состав асфальтобетонной смеси №4.3/2023**  
A16Bn с добавкой ДорАрм по ГОСТ Р 58406.2-2020

№ п/п	Наименование материалов	Состав а/б смеси при подборе, % (битум сверх 100%)	Средняя и истинная плотность, г/см³	Зерновой состав(прошло через сито с отверстиями мм), % от массы											
				22,4	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
1	Щебень габбро-диабаз фр. 11,2-16 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"		2,96	100,00	94,08	10,80	1,32	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,59
2	Щебень габбро-диабаз фр. 8-11,2 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"		2,98	100,00	100,00	94,94	8,04	0,56	0,36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
3	Щебень габбро-диабаз фр. 4-8 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"		2,96	100,00	100,00	100,00	93,88	38,68	3,68	0,32	0,00	0,00	0,00	0,00	0,30
4	Песок дробленый М1400, габбро-диабаз, ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"		3,06	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	94,78	66,33	45,18	30,35	23,79	14,46	9,65
5	Минеральный порошок МП-2 ЗАО "Завод Ковровский доломит молотый"		2,89	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	98,18	86,24	

**2. Зерновой состав асфальтобетонной смеси**

	Состав смеси	%		22,4	16	11,2	8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
1	Щебень габбро-диабаз фр. 11,2-16 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"	26,0		26,0	24,5	2,8	0,3	0,2	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,2
2	Щебень габбро-диабаз фр. 8-11,2 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"	8,0		8,0	8,0	7,6	0,6	0,0	0,0	0,0	0	0	0	0,0	0,0
2	Щебень габбро-диабаз фр. 4-8 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"	13,0		13,0	13,0	13,0	12,2	5,0	0,5	0,0	0	0	0	0,0	0,0
3	Песок дробленый М1400, габбро-диабаз, ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"	49,0		49,0	49,0	49,0	49,0	49,0	46,4	32,5	22,1	14,9	11,7	7,1	4,7
4	Минеральный порошок МП-2 ЗАО "Завод Ковровский доломит молотый"	4,0		4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	3,9	3,4
5	Сумма	100,0		100,0	98,5	76,4	66,1	58,2	50,9	36,5	26,1	18,9	15,7	11,0	8,3
6	Зерновой состав по ГОСТ Р 58406.2-2020			100,0	100,0	90,0	-	-	70,0	55,0	-	-	-	20,0	12,0
7	Зерновые составы фактические			100,0	98,5	76,4	66,1	58,2	50,9	36,5	26,1	18,9	15,7	11,0	8,3

**3. Состав асфальтобетонной смеси**

№ п/п	Наименование материалов	Насыпная плотность г/см³	Состав минеральной части асфальтобетон- ной смеси, % (битум сверх 100%)	Состав минеральной части асфальтобетонно- й смеси, % (битум в 100%)	Дозировка, кг на 1 тонну	Дозировка материалов на замес, кг							
						25							
						Фракция		количество					
1	Щебень габбро-диабаз фр. 11,2-16 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"	1,65	26,0	25,0	249,8			16-22,4					0,4
2	Щебень габбро-диабаз фр. 8-11,2 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"		8,0	7,7	76,8			8-16					7,8
3	Щебень габбро-диабаз фр. 4-8 М1400 ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"	1,69	13,0	12,5	124,9			4-8					3,7
4	Песок дробленый М1400, габбро-диабаз, ООО "ПГК", месторождение "Чевжавара"	1,70	49,0	47,1	470,7			0-4					11,2
5	Минеральный порошок МП-2 ЗАО "Завод Ковровский доломит молотый"		4,0	3,8	38,4								1,0
6	Модификатор ДорАрм		0,40	0,38	3,8								0,1
7	Битум БНД 70-100 ООО "ЛУКОЙЛ- Нижегороднефтегринтс"		4,1	3,9	39,4								1,0
8	Сумма	104,1	100,4	1000,0				сумма					25,00

**4. Физические и эксплуатационные показатели асфальтобетонной смеси**

№ п/п	Наименование показателей	Требования ГОСТ Р 58406.2-2020	Проектные показатели			
			минимальная	максимальная	минимальная	максимальная
1	Объемная плотность, г/см³				2,640	
2	Максимальная плотность, г/см³				2,740	
3	Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), %	не менее 12			15,7	
4	Содержание воздушных пустот, %	от 2,5 до 4,5			3,6	
5	Пустоты, наполненные битумным вяжущим (ПНБ), %	67-80			76,7	
6	Средняя глубина колен, мм	не более 4,5			4,4	
7	Коэффициент водостойкости	не менее 0,85			0,88	
8	Удельное содержание радионуклидов, Бк/кг	до 740			41,2	
9	Диапазон смешивания, °С				157,3-162,9	
10	Диапазон уплотнения, °С				145,8-150,9	

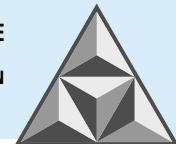
**5. Предельно допустимые отклонения отдельных показателей от состава**

№ п/п	Наименование показателя	Требования ГОСТ Р 58406.2-2020	Фактические значения	Границы отклонения	
				минимальная	максимальная
1	Содержание воздушных пустот, % от объема	± 1,4	3,6	2,2	5,0
2	Количество вяжущего в смеси (сверх 100 %), %	± 0,5	4,1	3,6	4,6
3	Количество вяжущего в смеси (в 100 %), %	± 0,5	3,9	3,4	4,4
4	Проход через сито, на один размер меньше номинального максимального размера (сито 11,2 мм), % по массе	± 6,0	76,4	70,4	82,4
5	Проход через сито 4 мм, % по массе	± 6,0	50,9	44,9	56,9
6	Проход через сито 2 мм, % по массе	± 6,0	36,5	30,5	42,5
7	Проход через сито 0,125 мм, % по массе	± 4,0	11,0	7,0	15,0
8	Проход через сито 0,063 мм, % по массе	± 4,0	8,3	4,3	12,3

**Рис. 7.** Подбор состава асфальтобетонной смеси A16Bn с включением модификатора «ДорАрм»

**Fig. 7.** Selection of the composition of the A16Vn asphalt concrete mixture with the DorArm modifier

Протоколы испытаний базового состава асфальтобетона и асфальтобетона с включением модификатора «ДорАрм» приведены на рис. 8.

**ПРОТОКОЛ № 1/А16Вн**

лабораторных испытаний асфальтобетонной смеси

Вид и тип а/б смеси: A16Bn  
 Место отбора пробы: Мешалка лабораторная МЛА-30  
 Дата отбора пробы: 19.03.2024 г.

**Результаты лабораторных испытаний**

№ п/п	Наименование показателя	Ед. измерения	Фактическое значение	Требование ГОСТ Р 58406.2-2020/рецепта
1.	Объемная плотность	г/см³	2,640	-
2.	Коэффициент водостойкости		0,88	не менее 0,85
2.	Средняя глубина колеи	мм	4,4	не более 4,5
3.	Содержание воздушных пустот		3,65	от 2,0 до 4,5 до 2,2 до 5,0
5.	Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ)		15,70	не менее 12
6.	Пустоты, наполненные битумным вяжущим (ПНВ)		76,75	67-80
4.	Максимальная плотность	г/см³	2,740	-

**Зерновой состав минеральной части асфальтобетонной смеси**

№ п/п	Наименование	Размер зерен, мм								
		22,4	16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	0,125	0,063	менее 0,063
1.	Частные остатки, г.	0,00	61,50	377,88	266,88	296,08	241,35	421,59	63,24	205,38
2.	Частные остатки, %	0,00	3,18	19,54	13,80	15,31	12,48	21,80	3,27	10,62
3.	Полные остатки, %	0,00	3,18	22,72	36,52	51,83	64,31	86,11	89,38	100,00
4.	Полные проходы, %	100,00	96,82	77,28	63,48	48,17	35,69	13,89	10,62	
5.	Полные проходы по рецепту	-	-	70,4- 82,4	-	44,9- 56,9	30,5- 42,5	7,0- 15,0	4,3- 12,3	

Масса навески после экстрагирования: 1933,9

Масса навески до экстрагирования: 2025,3

Содержание битума в 100% смеси: 4,51%

Содержание битума сверх 100 %: 4,73%

**ПРОТОКОЛ № 2/А16Вн**

лабораторных испытаний асфальтобетонной смеси

Вид и тип а/б смеси: A16Bn + ДорАрм  
 Место отбора пробы: Мешалка лабораторная МЛА-30  
 Дата отбора пробы: 19.03.2024 г.

**Результаты лабораторных испытаний**

№ п/п	Наименование показателя	Ед. измерения	Фактическое значение	Требование ГОСТ Р 58406.2-2020/рецепта
1.	Объемная плотность	г/см³	2,645	-
2.	Коэффициент водостойкости		0,88	не менее 0,85
2.	Средняя глубина колеи	мм	3,0	не более 4,5
3.	Содержание воздушных пустот		3,50	от 2,0 до 4,5 до 2,2 до 5,0
5.	Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ)		15,50	не менее 12
6.	Пустоты, наполненные битумным вяжущим (ПНВ)		77,40	67-80
4.	Максимальная плотность	г/см³	2,741	-

**Зерновой состав минеральной части асфальтобетонной смеси**

№ п/п	Наименование	Размер зерен, мм								
		22,4	16,0	11,2	8,0	4,0	2,0	0,125	0,063	менее 0,063
1.	Частные остатки, г.	0,00	66,85	479,51	308,14	203,06	195,76	506,40	45,53	115,84
2.	Частные остатки, %	0,00	3,48	24,96	16,04	10,57	10,19	26,36	2,37	6,03
3.	Полные остатки, %	0,00	3,48	28,44	44,48	55,05	65,24	91,60	93,97	100,00
4.	Полные проходы, %	100,00	96,52	71,56	55,52	44,95	34,76	8,40	6,03	
5.	Полные проходы по рецепту	-	-	70,4- 82,4	-	44,9- 56,9	30,5- 42,5	7,0- 15,0	4,3- 12,3	

Масса навески после экстрагирования: 1921,1

Масса навески до экстрагирования: 2012,2

Содержание битума в 100% смеси: 4,53%

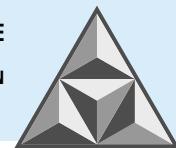
Содержание битума сверх 100 %: 4,74%

**Рис. 8. Результаты лабораторных испытаний асфальтобетонной смеси**

по ГОСТ Р 58406.2-2020 и с включением модификатора «ДорАрм»

**Fig. 8. Results of laboratory tests of asphalt concrete mixture according to GOST R 58406.2-2020 and with the DorArm modifier**

Из полученной смеси изготовлены и испытаны образцы асфальтобетона при устройстве покрытий дорожных одежд на объектах, возводимых ГУП ДСУ-3 во Владимирской области. В большинстве случаев исследовали смесь, проектированную под требования к асфальтобетону марки А16Вн. Рассматриваемый эффект заключается в улучшении



удобоукладываемости смеси и уменьшении эффекта колеообразования, что должно повысить эффективность работы асфальтоукладчиков и улучшить эксплуатационные характеристики устраиваемых покрытий (рис. 9).



**Рис. 9.** Акт комиссионного обследования контрольного участка с ROADLINER MVNB-R  
**Fig. 9.** Commissioned inspection report of the control section with ROADLINER MVNB-R

Результаты лабораторных исследований подтвердили эффективность предложенной авторами методики, основанной на непосредственном введении модификатора «ДорАрм» в смеситель на этапе приготовления асфальтобетонной смеси.

## ВЫВОДЫ

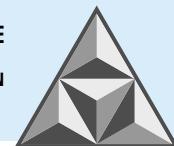
Внесение модификатора «ДорАрм» в асфальтосмесительную установку позволяет исключить из технологической цепочки этап производства полимербитумного вяжущего. Эффект достигается за счет снижения затрат людских ресурсов и уменьшения энергозатрат. Кроме того, при введении указанного модификатора в смеситель не требуется нагревание, что упрощает технологический процесс.

Анализ результатов лабораторных исследований подтвердил улучшение физико-механических и эксплуатационных показателей асфальтобетонных смесей, изготовленных по предлагаемой технологии.

Можно предположить, что введение модификатора «ДорАрм» непосредственно в смесительную установку на конечном этапе приготовления асфальтобетонной смеси позволит увеличить межремонтные сроки покрытий дорожных одежд и снизить производственные и эксплуатационные затраты строительных организаций.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Кирюхин Г.Н.** Стратегия выбора битумных вяжущих при проектировании и строительстве асфальтобетонных покрытий // Автомобильные дороги. 2015. Вып. 5. С. 98-102.
2. **Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Макеев П.В., Фролов В.А.** Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестник ТГТУ. 2016. Том 22. № 2. С. 264-271.
3. **Проваторова Г.В., Рябинина К.М.** Улучшение свойств асфальтобетонов путем их модификации, сравнительный анализ применяемых добавок // Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации: Электр. сб. ст. V Межд. науч. конф. Новополоцк, 2024. С. 190-193. URL: <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/44344/1/267-274.pdf> (дата обращения 06.06.2025).
4. Технический паспорт добавки «АрмДор» (сопроводительный документ добавки).
5. **Zhelezko E., Zhelezko T., Urakov L. et al.** // Automobile roads. 2002. № 1. Р. 12-14.



6. **Вихрев А.В., Кандашкина Ю.С.** Перспективы использования неокисленного битума в дорожном строительстве // Строительные материалы. 2025. № 1-2. С. 108-113.
7. **Гандельман И., Закревская Л., Проваторова Г.** Влияние модифицированных связующих на технологические и эксплуатационные свойства композиционных строительных материалов // Межд. науч. конф. по энергетике, охране окружающей среды и строительству (EECE-2018). Сер. MATEC Web of Conf. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824503017> (дата обращения 06.06.2025).
8. **Проваторова Г., Вихрев А.** Modification of Bitumen for Road Construction // MPCPE: Int. Conf. Mat. Physics, Build. Struct. Technol. in Constr., Ind. and Prod. Eng. 2021. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=48131479> (дата обращения 06.06.2025).
9. **Проваторова Г.В., Рябинина К.М.** Применение габбро-диабазов при приготовлении асфальтобетонных смесей // Умные композиты в строительстве. 2022. Т. 3. Вып. 2. С. 68-79. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5042/view>
10. **Ryabinina K.M., Provatorova G.V.** Investigation of the properties of asphalt concrete on polymer-modified bitumen // Construction Materials and Products. 2022. 5 (4). P. 19-29. DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-19-29>.

Поступила в редакцию 07.07.2025

Одобрена после рецензирования 21.07.2025

Принята к опубликованию 04.08.2025

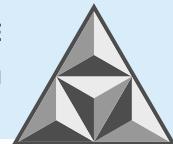
## REFERENCES

1. **Kiryukhin, G.N.** (2015), "Strategy for selecting bitumen binders in the design and construction of asphalt concrete pavements", *Automobile Roads magazine*, Iss. 5, pp. 98-102 (in Russian).
2. **Belyaev, P.S., Polushkin, D.L., Makeev, P.V. and Frolov, V.A.** (2016), "Petroleum Bitumen Modified by Polymer Materials for Asphalt Concrete Surfacing with Improved Operational Performance", *Bul. TSTU*, vol. 22, no. 2, pp. 264-271 (in Russian).
3. **Provatorova, G.V. and Ryabinina, K.M.** (2024), Improving the properties of asphalt concrete by modifying them. Comparative analysis of the additives used, *Architectural and construction complex: problems, prospects, innovations, Electr. Coll. Art. V Inter. Sci. Conf.*, Novopolotsk, pp. 190-193. <https://elib.psu.by/bitstream/123456789/44344/1/267-274.pdf> (in Russian).
4. Technical Passport of the ArmDor additive (accompanying document of the additive) (in Russian).
5. **Zhelezko, E., Zhelezko, T. and Uralev, L. et al.** (2002), *Automobile roads [electronic resource]*, no. 1, pp. 12-14.
6. **Vikhrev, A.V. and Kandashkina, Yu.S.** (2025), "Prospects for the use of unoxidized bitumen in road construction", *J. Constr. Mat.*, no. 1-2, pp. 108-113. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=80660605> (in Russian).
7. **Gandelman, I., Zakrevskaya, L. and Provatorova, G.** (2018), The influence of modified binders on the technological and operational properties of composite building materials, in: *Electr. publ., Int. Sci. Conf. on Energy, Environment and Construction (EECE-2018)*. Ser. MATEC, Web of Conf. DOI: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201824503017> (in Russian).
8. **Provatorova, G. and Vikhrev, A.** (2018), Modification of Bitumen for Road Construction, *MPCPE: Int. Conf. Mat. Physics, Build. Struct. Technol. in Constr., Ind. and Prod. Eng.*, 2021. <https://elibrary.ru/item.asp?id=48131479> (in Russian).
9. **Provatorova, G.V. and Ryabinina, K.M.** (2022), "Application of gabbro-diabase in the preparation of asphalt mixtures", *Smart Composite in Construction*, vol. 3, no. 2, pp. 68-79 [online]. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5042/view> (in Russian).
10. **Ryabinina, K.M. and Provatorova, G.V.** (2022), "Investigation of the properties of asphalt concrete on polymer-modified bitumen", *Construction Materials and Products*, vol. 5, no. 4, pp. 19-29. DOI: <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2022-5-4-19-29> (in Russian).

Received 07.07.2025

Approved 21.07.2025

Accepted 04.08.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-62-75

# Проблемы организации транспортной системы города Ярославля

**О.В. Ладыгина, И.А. Бессонов**

**Ольга Викторовна Ладыгина\*, Илья Александрович Бессонов**

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация  
*o\_ladigina@mail.ru\**, *loko7600@mail.ru*



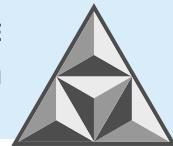
Проведен анализ текущей ситуации на улично-дорожной сети города Ярославля и выявлен ряд проблем развития транспортной системы. Предложены мероприятия, способствующие уменьшению заторов в городе, включая изменение параметров улиц для увеличения пропускной способности и внедрение интеллектуальных транспортных систем. Рассматривается возможность устройства кольцевых пересечений, внедрения реверсивного движения для использования максимальной ширины проезжей части с попеременным движением в «час пик» и строительство пересечений в разных уровнях для уменьшения числа конфликтных точек. Строительство обособленных полос общественного транспорта будет способствовать повышению его привлекательности. В качестве альтернативных видов транспорта предложены электропоезд, речной трамвай, велосипед и средства индивидуальной мобильности. Однако в настоящее время альтернативный транспорт в Ярославле не может в полной мере конкурировать с личным. В связи с этим необходимо создавать инфраструктуру, обеспечивающую приоритет общественного транспорта и регулярно обновлять подвижной состав.

**Ключевые слова:** транспортная система Ярославля, улично-дорожная сеть, заторы, альтернатива, пересечения, организация движения

**Для цитирования:**

Ладыгина О.В., Бессонов И.А. Проблемы организации транспортной системы города Ярославля. // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 3. С. 62-75.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-62-75



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-62-75

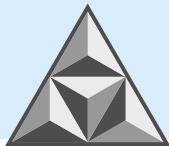
# Issues in organizing the transportation system of the city of Yaroslavl

**O.V. Ladygina, I.A. Bessonov**

**Olga Viktorovna Ladygina\*, Ilya Alekandrovich Bessonov**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

*o\_ladigina@mail.ru\**, *loko7600@mail.ru*



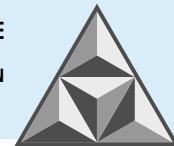
*The paper gives an analysis of the current situation on the street and road network of Yaroslavl, identifying a number of issues in the development of the transportation system. Measures to reduce traffic congestion in the city are proposed, including changes to street parameters to increase capacity and the implementation of intelligent transportation systems (ITS). The paper explores the possibility of constructing roundabouts, introducing reversible lanes to maximize the use of the roadway width with alternating traffic flow during rush hours, and building grade-separated interchanges to reduce the number of conflict points. The construction of dedicated public transport lanes will help increase its attractiveness. Alternative modes of transport proposed include electric trains, river trams, bicycles, and personal mobility devices (PMDs). However, at present, alternative transport in Yaroslavl cannot fully compete with private cars. In this regard, it is necessary to develop infrastructure that prioritizes public transport and to regularly update the vehicle fleet.*

**Keywords:** Yaroslavl transportation system, street and road network, traffic congestion, alternatives, intersections, traffic management

**For citation:**

Ladygina O.V., Bessonov I.A. Issues in organizing the transportation system of the city of Yaroslavl // Smart Composite in Construction. 2025. Vol. 6, Iss. 3. P. 62-75.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-62-75



## ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные дороги играют важнейшую роль в экономическом развитии Ярославского региона [1]. В условиях стремительного роста урбанизации и увеличения числа транспортных средств совершенствование инфраструктуры становится жизненно важной задачей. Не стоит забывать и о долгосрочном градостроительном планировании: анализ транспортных потоков помогает определить, где необходимо строить улицы, автомобильные дороги, развязки в разных уровнях или развивать велосипедную инфраструктуру [2].

По результатам исследований доказано, что рост количества транспортных средств, пропорциональный увеличению численности населения, постепенно приводит к образованию заторов и «пробок» [3]. В течение дня пересечения дорог работают на пределе пропускной способности, а в часы пик исчерпывают ее [4].

Современная транспортная модель не удовлетворяет потребностям людей. Основной причиной этого является то, что принципы, на которых основана эта система, не соответствуют современным требованиям и стандартам [5]. Главной характеристикой заторов на автомобильных дорогах является повышение плотности потока транспортных средств, который значительно превышает пропускную способность дорог [6]. Режим пропускной способности оказывается крайне неустойчивым [7].

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Транспортная система в городе Ярославле несовершенна; при этом она играет одну из главенствующих ролей в обеспечении удобств и безопасности городского движения, удовлетворении постоянно растущих культурно-бытовых потребностей горожан [8]. Связь между окраинными районами и центром осуществляется посредством мостовых переходов. Малое их количество в Ярославле является одной из причин возникновения заторов на улично-дорожной сети (УДС). Важную роль в планировке и развитии УДС играет существующие логистические связи внутри города (трамвайные пути, железная дорога). Их маршруты препятствуют динамичному развитию УДС. Также одной из существенных проблем УДС является текущий ремонт; зачастую после весеннего потепления и схода снежного покрова с большей интенсивностью образуются дефекты покрытия (выбоины, трещины продольные и поперечные, просадки и т.д.). Эти факторы способствуют замедлению скорости движения автомобилей.

В последнее время очень остро стоит и проблема зимнего содержания автомобильных дорог. Только за зимний период 2021-2022 годов в Ярославской области зарегистрировано 77 дорожно-транспортных происшествий, в которых 4 человека погибли и 112 получили ранения. Причиной чаще всего является несвоевременная уборка твердых осадков, а также образование зимней скользкости [9].

При выполнении работ по обследованию объектов транспортной инфраструктуры установлено [10], что для решения существующих проблем заторов в городе нужно применить комплексный подход к изучению безопасности транспортных потоков и интенсивности движения [5]. Кроме этого, важно проводить мероприятия по снижению напряженности на дорогах за счет:

- перераспределения транспортных потоков в обход центральной части города, устройства местных проездов для связи районов;
- внедрения полос движения общественного транспорта;



- обустройства подземных и надземных парковочных мест, устройства подземных или надземных пешеходных переходов;
- введения в pilotном режиме реверсивного движения для увеличения пропускной способности самых загруженных улиц города;
- обустройства специально выделенных маршрутов – полос движения для средств индивидуальной мобильности (велосипедов, самокатов, роликов);
- планомерного развития водного и трамвайного транспорта для снижения нагрузки на улично-дорожную сеть;
- внедрения инновационных способов организации движения с использованием интеллектуальных транспортных систем;
- сужения ширины отдельных полос движения и увеличения за счет этого количества полос движения;
- строительства новой транспортной инфраструктуры (дублирующих дорог, светофорных объектов, мостовых переходов, транспортных развязок, тоннелей, путепроводов);
- устройства кольцевых пересечений, пересечений в разных уровнях.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для решения проблем заторов проводят мероприятия по разгрузке УДС с использованием альтернативного транспорта.

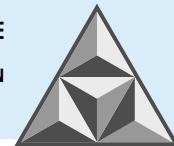
Первым альтернативным видом общественного транспорта являются электропоезда. Ярославль развивается в направлении организации «Легкого метро» – городских электропоездов, курсирующих по существующим железнодорожным путям. По состоянию на январь 2025 года разработана схема движения электропоездов в черте города; завершение реализации проекта намечено на 2027 год.

Вторым видом альтернативного транспорта для жителей города и туристов является речной. Преимуществами этого вида транспорта являются высокие провозные способности на водоемах и реках, а также низкая себестоимость перевозок. Его недостатки: низкая скорость движения; ограниченность перевозок; зависимость от глубин водоемов и рек, навигационный период и погодные условия, ненадежность перевозок и отсутствие уверенности в сохранности груза [11]. В период навигации (с мая по октябрь) от Ярославского речного порта выполняются регулярные рейсы на теплоходах «Москва», «Метеор».

Основные проблемы общественного транспорта заключаются в меньшем комфорте по сравнению с автомобилем и такой же зависимости от дорожной ситуации, что и у личного транспорта. Следствием замены индивидуального транспорта общественным будет являться разгрузка главных улиц города [12]. В Ярославле система общественного транспорта быстро модернизируется [13]. Общественный транспорт может использоваться как наиболее эффективный способ передвижения для большого количества людей [14].

Для повышения привлекательности общественного транспорта необходимо обустроить обособленные полосы движения, предоставить приоритет «зеленых фаз» на перекрестках [15], а также обеспечить нейтраллизацию некоторых парковок там, где это мешает движению, путем их запрета или изменения вида.

Троллейбус как часть общественного транспорта обладает достоинствами и недостатками. К его достоинствам можно отнести экономичность эксплуатации, экологическую безопасность, простоту эксплуатации и ремонта, легкий запуск электродвигателя в холодное время года. Главным недостатком троллейбусного сообщения является низкая маневренность [16].



Четвертым альтернативным транспортом в Ярославле можно считать трамвай. В начале XXI столетия произошел резкий рывок в развитии автомобилестроения, что способствовало приобретению личных автомобилей и, вследствие этого, демонтажу существующего путевого хозяйства. Для повышения привлекательности трамваев среди горожан и туристов необходимы модернизация и обновление трамвайных парков, включая замену устаревших моделей более современными. Модернизация может также включать обновление инфраструктуры трамвайных путей и остановок, чтобы сделать систему более удобной и доступной для пассажиров [17].

Пятым альтернативным транспортом в Ярославле является велосипед. Велосипед не только способствует укрепления здоровья, но и дает свободу передвижения – возможность выбирать маршрут самому и по тем местам, где не может проехать автомобиль. Однако в последние десятилетия, в связи со стремительным ростом числа владельцев моторизованных транспортных средств, велосипеды стали использоваться реже, им уделяется мало внимания [18]. Изменить эту тенденцию можно за счет строительства новой велосипедной инфраструктуры.

Велосипедные дорожки оказывают значительное влияние на маршруты движения и безопасность в городах на долгие годы вперед [19].

Для решения проблем заторов проводятся мероприятия по разгрузке УДС при усовершенствовании существующих путей движения. Одним из методов может стать введение дополнительных участков с односторонним движением. Главным преимуществом одностороннего движения является сокращение числа конфликтных точек за счет устранения пересечения со встречным транспортным потоком. Во многих частях города, особенно в центре, парковки занимают немалую площадь, и зачастую водители паркуют автомобили на краях полос движения, что снижает пропускную способность улицы и создает условия для возникновения заторов. Непрекращающаяся автомобилизация тоже приносит свои плоды: центр города имеет высокую концентрацию рабочих мест и рекреационных пространств, следовательно, проблема парковок становится все более острой.

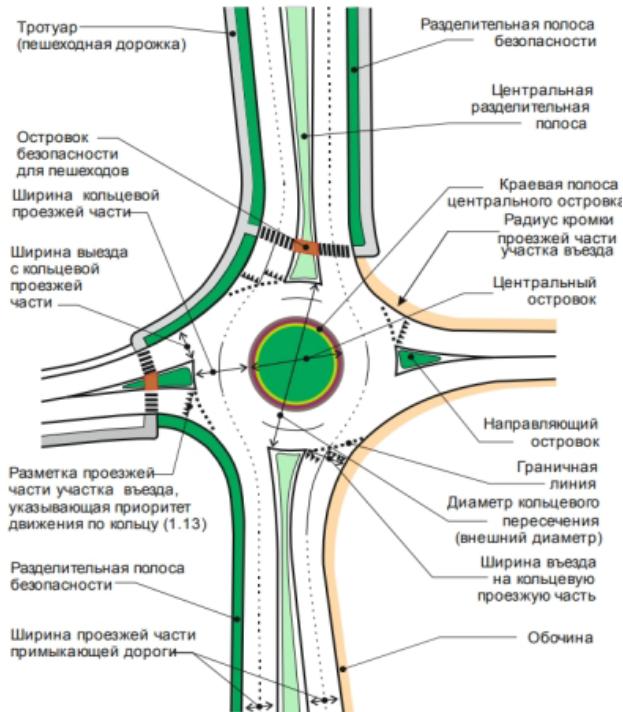
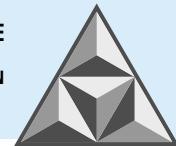
Для улучшения качества жизни необходимо провести мероприятия по благоустройству центра города – сделать исторический центр Ярославля пешеходным [20]. С изменением дорожной ситуации и улично-дорожной сети нельзя обойти стороной корректировку парковочного пространства. Очень часто водители проезжают один и тот же участок дороги несколько раз в поисках парковочного места. Увеличение числа мест для парковки может решить эту проблему, но эффективность этой меры мала [21].

Помимо парковок, необходимо устраивать кольцевые пересечения для решения проблем заторов на перекрестках.

Кольцевые пересечения классифицируют: по диаметру и по типу (мини-кольцевые пересечения); кольцевые пересечения на неполных транспортных развязках; кольцевые пересечения с зоной переплетения в пределах кольцевой проезжей части и совмещенные кольцевые пересечения [22].

Выбор типа кольцевого пересечения осуществляется на основе анализа значений суточной интенсивности, интенсивности движения на въездах и распределения интенсивности движения между выездами. Важно также оценить состав транспортных потоков, характеристики пешеходного движения и наличие свободных площадей [23].

При планировке кольцевых пересечений необходимо учитывать связь между геометрическими элементами пересечения. Безопасность движения и высокая пропускная способность обеспечиваются только взаимной увязкой всех геометрических элементов [22], изображенных на рис. 1.



**Рис. 1.** Основные планировочные элементы и геометрические параметры кольцевого пересечения [22]

**Fig. 1.** Main planning elements and geometric parameters of a roundabout intersection [22]

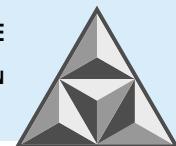
За рубежом была отмечена высокая эффективность применения мини-кольцевых пересечений. Отсюда возникает необходимость проведения соответствующих исследований в отечественной практике с дальнейшим внедрением результатов в УДС городов России [24]. Известно также, что кольцевые пересечения представляют сложность для водителей грузовых транспортных средств [25]. Поэтому простые пересечения рационально преобразовывать в кольцевые при условии увеличении интенсивности движения, а также при соблюдении вышеупомянутых требований к их организации.

С целью наблюдения за дорожным потоком, выделения и трассирования движущихся объектов, выполнения захвата кадров с государственными регистрационными знаками транспортных средств и распознавания буквенно-символьных изображений на номерах [26] используют камеры высокого разрешения (рис. 2).



**Рис. 2.** Отслеживание транспортного потока по средствам камеры [27]

**Fig. 2.** Traffic flow tracking using a camera [27]



Для регулирования дорожного движения необходимо устанавливать светофоры. При этом, в настоящее время происходит внедрение так называемых «умных» светофоров. Таким светофором управляет специальная программа, позволяющая устройству самостоятельно принимать решения, на основе поступающей информации о транспортном потоке [26].

В городах, где уже используются такие системы, функционирует ситуационный центр, который помогает выделять приоритет автомобилям экстренных служб [26], в режиме реального времени отслеживать транспортный поток и менять режимы светофоров в зависимости от напряженности движения.

Также одним из способов решения проблем заторов на улицах города является реверсивное движение. Для организации этого вида проезда требуется проработка всех нюансов. Согласно Правилам дорожного движения, применяют различные обозначения для информирования водителей о такой возможности – специальные дорожные знаки, специальную разметку, реверсивный светофор [28].

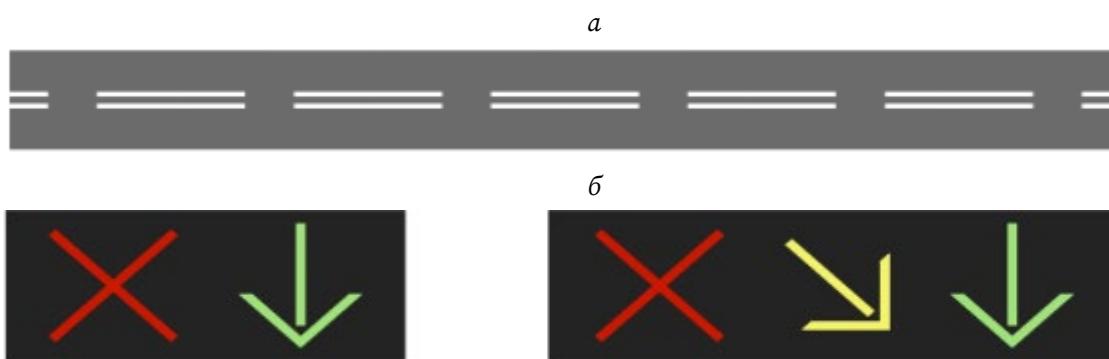
При въезде на дорогу с реверсивным движением устанавливают знак 5.8 «Реверсивное движение», с окончанием такого участка – знак 5.9 «Конец реверсивного движения», при выезде на дорогу с реверсивным движением – знак 5.10 «Выезд на дорогу с реверсивным движением» (рис. 3).



**Рис. 3.** Технические средства организации реверсивного движения представлены в последовательности (5.8; 5.9; 5.10) [29]  
**Fig. 3.** Technical means for organizing reverse movement are presented in the following sequence (5.8; 5.9; 5.10) [29]

«Дорожная горизонтальная разметка». Для обозначения полос реверсивного движения используется специальная разметка 1.9 белого цвета; она показывает границы полос реверсивного движения (рис. 4, а).

Для движения личного и общественного транспорта по реверсивным полосам применяют реверсивные светофоры [29] двух и трех цветов (рис. 4, б).



**Рис. 4.** Технические средства организации реверсивного движения [29]  
**Fig. 4.** Technical means of organizing reverse movement [29]

Реверсивное движение позволяет эффективно использовать существующую транспортную сеть по направлениям транспортных потоков в утренние и вечерние «часы пик» без реконструкции существующей УДС [30].



Важной деталью при решении проблем «пробок» является установка автоматизированных систем управления дорожным движением (АСУДД), что улучшает общую транспортную ситуацию в городе. Установлено, что это снижает число дорожно-транспортных происшествий на 10-20% и сокращает время в пути на 15-20% [31].

Современные АСУДД реализуют различные стратегии, например, автоматическое управление транспортными потоками, которое позволяет делить выпуск автомобилей на автомагистраль для поддержания оптимального уровня ее загрузки. В результате автоматизированные системы управления дорожным движением обеспечивают эффективное управление с учетом реальной транспортной ситуации [32].

При этом эффективным способом борьбы с «пробками» на улично-дорожной сети города Ярославля является строительство пересечений в разных уровнях. При проектировании развязок необходимо выбирать пересечение в самом высоком классе. В стесненных условиях допускается устраивать транспортные развязки более низких классов [33]. Любое снижение скорости движения транспортного потока, по сравнению с расчетной скоростью, приводит к потерям времени и соответствующим экономическим издержкам [34].

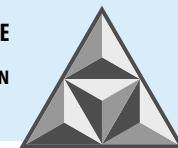
## ВЫВОДЫ

Проектирование и строительство эффективной городской транспортной системы является одной из ключевых задач развития Ярославля. Транспортная система в городе несовершенна и требует преобразования. Реорганизация дорожного движения позволит устранить заторы на магистральных улицах, решить вопросы с отсутствием парковочных мест в центре города и недостаточностью пешеходных пространств.

Для преодоления указанных проблем необходимо развивать альтернативные виды транспорта, создать велосипедную инфраструктуру, а также оптимизировать дорожное движение. При этом модернизацию транспортной системы следует осуществлять комплексно, с учетом индивидуальных особенностей города.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- 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. Вып. 1. С. 31-42.
- Федотов И.С.** Анализ транспортных потоков для снижения заторов в городах // Вестник науки. 2025. Т. 4. № 1(82). С. 908-912.
- Исаков К., Дуйшебаев С.С., Алтыбаев А.Ш.** История развития городов и анализ причин возникновения транспортных заторов на улицах г. Бишкек // Вестник Кыргызского гос. ун-та строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исanova. 2014. № 3. С. 80-83.
- Справочник по безопасности дорожного движения / Под ред. проф. В.В. Сильянова. М.: МАДИ, 2001. 754 с.
- Корнев А.В., Шабуров С.С.** Транспортные заторы. Варианты решения проблемы // Молодежный вестник ИрГТУ. 2021. Т. 11. № 1. С. 58-63.
- Тулина А.В.** О причинах возникновения заторов на автомобильных дорогах // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 113-4. С. 147-149.
- Щеголева Н.В., Гусев В.А., Ворожейкин М.А.** Образование заторов в транспортном потоке // Техническое регулирование в транспортном строительстве. 2016. № 5(19). С. 25-28.
- Исаков К., Стасенко Л. Н., Бузурманкулова Т.А.** Зависимость образования заторов от интенсивности и числа полос движения // Вестник Кыргызского гос. ун-та строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исanova. 2015. № 2. С. 38-44.



9. **Бессонов И.А., Симонова А.В.** Зимнее содержание автомобильных дорог Ярославской области // 75-я Всерос. науч.-техн. конф. студентов, магистрантов и аспирантов, Ярославль: ЯГТУ, 2022. С. 500-503.
10. **Кочетков А.В., Семенова Н.С., Иванов А.Ф., Чижиков И.А.** Применение беспилотных летательных аппаратов для обследования объектов транспортной инфраструктуры // Умные композиты в строительстве. 2022. Т. 3, № 4. С. 28-38.
11. **Барабкин Д.С., Айдарханов А.А.** Перспективы развития транспортной системы в Санкт-Петербурге // *AlfaBuild*. 2018. № 1(3). С. 24-32.
12. **Пагин В.В., Оганесян Т.Л.** Анализ транспортной системы города Краснодара: проблемы и способы решения // Экономика и бизнес: теория и практика. 2022. № 10-2(92). С. 132-136.
13. **Hidalgo Dario and Carrigan Aileen.** Cities Asia Latin America Modernizing Public Transportation. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.wri.org/research/modernizing-public-transportation> (Дата обращения 04.04.2025).
14. Reimagining Public Transport [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.wri.org/initiatives/reimagining-public-transport> (Дата обращения 06.05.2025).
15. **Вейнбендер Т.Л., Морозов Г.Н.** Влияние дорожных заторов мегаполисов на экономику стран // Успехи современной науки и образования. 2016. Т. 3. № 11. С. 23-26.
16. **Игнатов А.В., Басков В.Н.** К вопросу об актуальности развития городского наземного электрического транспорта // Вестник Донецкой акад. автомобильного транспорта. 2018. № 1. С. 64-69.
17. **Зимин В.А., Близнюк В.Ю.** О проблемах в развитии общественного транспорта в городе Самара и их решении // Human Progress. 2024. Т. 10. № 4. С. 1-9.
18. Technical Guideline FOR BICYCLE INFRASTRUCTURE DESIGN IN URBAN AREA. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://healthbridge.ca/dist/library/technical-guideline-for-bicycle-infrastructure-design-in-urban-area-en.pdf> (Дата обращения 06.04.2025).
19. **Adriazola-Steil Claudia, Pérez-Barbosa David, Batista Bruno, Luke Nikita, Wei Li, Sharpin Bray Anna, Bech Lotte, Colbeck Jason, Erikson Anne, Harms Lucas, Hartmann Anders, McLeod Ken and Nout Lennart.** Safe Bicycle Lane Design Principles: Responding to Cycling Needs in Cities during COVID and Beyond [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://www.wri.org/research/safe-bicycle-lane-design-principles> (Дата обращения 05.05.2025).
20. В мэрии назвали новые пешеходные улицы в центре Ярославля // YAR NEWS Ярославский информационный портал 19.07.2023. Режим доступа: [https://www.yarnews.net/news/show/yaroslavl/70364/v\\_merii\\_nazvali\\_novye\\_peshehodnye\\_ulicy\\_v\\_centre\\_yaroslavlya.htm](https://www.yarnews.net/news/show/yaroslavl/70364/v_merii_nazvali_novye_peshehodnye_ulicy_v_centre_yaroslavlya.htm) (дата обращения 24.02.2025).
21. **Григорьев Д.А.** Эффективность мероприятий по борьбе с заторами // Обществознание и социальная психология. 2022. № 10(40). С. 138-140.
22. ОДМ 218.2.071-2016 Методические рекомендации по проектированию кольцевых пересечений при строительстве и реконструкции автомобильных дорог [Электронный ресурс] / Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов «Кодекс». – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746292.pdf> (Дата обращения 01.02.2025).
23. Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения. Повышение эффективности использования кольцевых развязок.
24. **Яшкина Н.Т.** Особенности проектирования кольцевых пересечений в условиях большого города // Мат. 69-й студ. науч. конф. [Электронный ресурс] / Брянск: БГТУ, 2014. 780 с. Режим доступа: [https://www.tu-bryansk.ru/upload/old\\_server/news/nis/m69k.pdf](https://www.tu-bryansk.ru/upload/old_server/news/nis/m69k.pdf)
25. **Никитин Н.А., Савина Ю.Э.** Анализ эффективности различных конфигураций кольцевых пересечений при проектировании выезда из нового жилого района // Информ. технологии и инновации на транспорте: Мат. 5-й Межд. науч.-практ. конф., Орел, 22–23 мая 2019 года / Под общ. ред. А.Н. Новикова. Орел: Орловский гос. ун-т им. И.С. Тургенева, 2020. С. 127-135.
26. Центр2м Интеллектуальные транспортные системы [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://center2m.ru/intellektualnye-transportnye-sistemy> (Дата обращения 28.12.2024).
27. VOCORD Интеллектуальные транспортные системы [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.vocord.ru/solutions/intellektualnye-transportnye-sistemy/> (Дата обращения 10.01.2024).



28. Общество с ограниченной ответственностью «Промышленная точка» Знаки реверсивного светофора и правила движения [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://prompoint.ru/blog/znaki-reversivnogo-svetofora-i-pravila-dvizheniya/> (Дата обращения 26.03.2024).
29. Колеса.ru [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.kolesa.ru/article/reversivnoe-dvizhenie-kak-ono-rabotaet-i-chto-budet-esli-vyekhat-pod-krasnyy-signal/> (Дата обращения 20.02.2024).
30. Организация реверсивного движения на автомобильных дорогах [Электронный ресурс]: Режим доступа: <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/11466/1/113-ntm-22.pdf> (Дата обращения 26.03.2024).
31. Артемова С.Г., Сомова К.В., Муковнин А.С. Обоснование предложений по применению реверсивного движения на улично-дорожной сети г. Волгограда // Вестник Волгоградского гос. арх.-строит. ун-та. Сер.: Строительство и архитектура. 2018. № 54(73). С. 97-105.
32. Серова Е.Ю. Возможные пути повышения пропускной способности улично-дорожной сети города // Вестник Волгоградского гос. арх.-строит. ун-та. 2016. Вып. 46(65). С. 84-94.
33. СП 396.1325800.2018 Улицы и дороги населённых пунктов. М.: Стандартинформ, 2019.
34. Прозоровская А.А., Степанчук А.В. Исследование пропускной способности пересечений магистральных улиц в разных уровнях // Вестник Ульяновского гос. техн.ун-та. 2013. № 4(64). С. 65-68. [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21125761> (Дата обращения 17.04.2024).

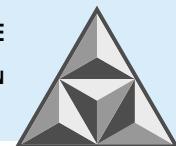
*Поступила в редакцию 10.07.2025*

*Одобрена после рецензирования 22.07.2025*

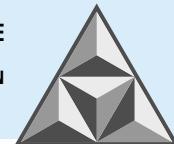
*Принята к опубликованию 04.08.2025*

## REFERENCES

1. Budanova E.S., Yarmolinskiy 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 [online]. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5049/view> (in Russian).
2. Fedotov, I.S., 2025. “Analysis of traffic flows to reduce congestion in cities”, *Vestnik Nauki*, vol. 4, no. 1(82), pp. 908-912 (in Russian).
3. Isakov, K., Duishebaev, S.S. and Altybaev, A.Sh. (2014), “History of urban development and analysis of the causes of traffic congestion on the streets of Bishkek”, *Vestnik Kyrgyzskogo gos. un-ta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova* [Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov], no. 3, pp. 80-83 (in Russian).
4. Silyanov, V.V. ed. (2001). Spravochnik po bezopasnosti dorozhnogo dvizheniya [Road Safety Handbook]. Moscow: MADI (in Russian).
5. Kornev, A.V. and Shaburov, S.S. (2021). “Traffic jams. Solution options”, *Molodezhniy Vestnik IrGTU* [Youth Bulletin of Irkutsk State Technical University], vol. 11, no.1, pp. 58-63 (in Russian).
6. Tulina, A.V. (2024), “On the causes of traffic congestion on roads”, *Tendentsii razvitiya nauki i obrazovaniya* [Trends in the Development of Science and Education], no. 113-4, pp. 147-149 (in Russian).
7. Shchegoleva, N.V., Gusev, V.A. and Vorozheikin, M.A. (2016), “The formation of traffic jams in the traffic flow”, *Tekhnicheskoe regulirovanie v transportnom stroitel'stve* [Technical Regulation in Transport Construction], vol. 5, no.19, pp. 25-28 (in Russian).
8. Isakov, K., Stasenko, L.N. and Buzurmankulova, T.A. (2015), “The dependence of traffic congestion on traffic intensity and the number of lanes”, *Vestnik Kyrgyzskogo gos. un-ta stroitel'stva, transporta i arkhitektury im. N. Isanova* [Bulletin of the Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov], no. 2, pp. 38-44 (in Russian).
9. Bessonov, I.A. and Simonova, A.V. (2022), “Winter maintenance of roads in the Yaroslavl region”. In: \*75-ya Vseross. nauch.-tekhn. konf. studentov, magistrantov i aspirantov\* [75th All-Russ. Sci. Tech. Conf. of Students, Undergraduates and Postgraduates]. Yaroslavl: YaGTU, pp. 500-503 (in Russian)



10. Kochetkov, A.V., Semenova, N.S., Ivanov, A.F. and Chizhikov, I.A. (2022), "Unmanned Aerial Vehicles Use for the Inspection of Transport Infrastructure Facilities", *Smart Composite in Construction*, vol. 3, no. 4, pp. 28-38 [online]. Available at: <https://chemintech.ru/ru/nauka/issue/5044/view> (in Russian).
11. Barabkin, D.S. and Aidarkhanov, A.A. (2018), "Prospects for the development of the transport system in St. Petersburg", *AlfaBuild*, vol. 1, no. 3, pp. 24-32 (in Russian).
12. Pagin, V.V. and Oganesyan, T.L. (2022), "Analysis of the transport system of the city of Krasnodar: problems and solutions", *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika [Economics and Business: Theory and Practice]*, vol. 10, no. 2(92), pp. 132-136 (in Russian).
13. Hidalgo, D. and Carrigan, A. Cities Asia Latin America Modernizing Public Transportation. [online] Available at: <https://www.wri.org/research/modernizing-public-transportation> (Accessed 4 April 2025).
14. World Resources Institute (WRI), Reimagining Public Transport. [online] Available at: <https://www.wri.org/initiatives/reimagining-public-transport> (Accessed 6 May 2025).
15. Weinbender, T.L. and Morozov, G.N. (2016), "The impact of road congestion in megacities on the economies of countries", *Uspekhi sovremennoj nauki i obrazovaniya [Advances in Modern Science and Education]*, vol. 3, no. 11, pp. 23-26 (in Russian).
16. Ignatov, A.V. and Baskov, V.N. (2018), "On the relevance of developing urban surface electric transport", *Vestnik Donetskoy akad. avtomobil'nogo transporta [Bulletin of the Donetsk Academy of Automobile Transport]*, no. 1, pp. 64-69 (in Russian).
17. Zimin, V.A. and Bliznyuk, V.Yu. (2024), "On the issues in the development of public transport in the city of Samara and their solution", *Human Progress*, vol. 10, no. 4, pp. 1-9 (in Russian).
18. HealthBridge, Technical Guideline for Bicycle Infrastructure Design in Urban Area. [online] Available at: <https://healthbridge.ca/dist/library/technical-guideline-for-bicycle-infrastructure-design-in-urban-area-en.pdf> [Accessed 6 April 2025].
19. Adriazola-Steil, C., Pérez-Barbosa, D., Batista, B., Luke, N., Wei, L., Sharpin, A.B., Bech, L., Colbeck, J., Erikson, A., Harms, L., Hartmann, A., McLeod, K. and Nout, L. Safe Bicycle Lane Design Principles: Responding to Cycling Needs in Cities during COVID and Beyond. [online] Available at: <https://www.wri.org/research/safe-bicycle-lane-design-principles> [Accessed 5 May 2025].
20. Yar News (2023), "The city hall named new pedestrian streets in the center of Yaroslavl", 19 July [online]. Available at: [https://www.yarnews.net/news/show/yaroslavl/70364/v\\_merii\\_nazvali\\_novye\\_peshehodnye\\_ulicy\\_v\\_centre\\_yaroslavlya.htm](https://www.yarnews.net/news/show/yaroslavl/70364/v_merii_nazvali_novye_peshehodnye_ulicy_v_centre_yaroslavlya.htm) [Accessed 24 February 2025] (in Russian).
21. Grigoriev, D.A. (2022), "The effectiveness of traffic congestion measures", *Obshchestvoznanie i sotsial'naya psichologiya [Social Science and Social Psychology]*, vol. 10, no. 40, pp. 138-140 (in Russian).
22. Rosavtodor (2016), \*ODM 218.2.071-2016 Metodicheskie rekomendatsii po proektirovaniyu kol'tsevykh peresechenij pri stroitel'stve i rekonstruktsii avtomobil'nykh dorog [Guidelines for the design of roundabouts in the construction and reconstruction of highways] [online]. Kodeks: Elektronnyy fond pravovykh i normativno-tehnicheskikh dokumentov. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746292.pdf> [Accessed 1 February 2025] (in Russian).
23. Methodological recommendations for the development and implementation of traffic management measures. Improving the efficiency of using roundabouts (in Russian).
24. Yashkina, N.T. (2014), "Features of designing roundabouts in a large city", In: *Mat. 69-j stud. nauch. konf. [Proc. of the 69th Stud. Sci. Conf.]* [online]. Bryansk: BGTU. Available at: [https://www.tubryansk.ru/upload/old\\_server/news/nis/m69k.pdf](https://www.tubryansk.ru/upload/old_server/news/nis/m69k.pdf) (in Russian)
25. Nikitin, N.A. and Savina, Yu.E. (2020), "Analysis of the effectiveness of various roundabout configurations when designing an exit from a new residential area", In: Novikov, A.N. (ed.) *Inform. tekhnologii i innovatsii na transporte: Mat. 5-j Mezhd. nauch.-prakt. konf., Oryol, 22-23 maya 2019 goda [Information Technologies and Innovations in Transport: Proc. of the 5th Inter. Sci. Pract. Conf., Oryol, May 22-23, 2019]*. Oryol: Orlovskiy gos. un-t im. I.S. Turgeneva [Oryol State University named after I.S. Turgenev], pp. 127-135 (in Russian).
26. Tsentr2M. "Intelligent transport systems" [online]. Available at: <https://center2m.ru/intellektualnye-transportnye-sistemy> [Accessed 28 December 2024] (in Russian).

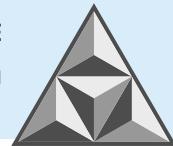


27. VOCORD, “Intelligent transport systems” [online]. Available at: <https://www.vocord.ru/solutions/intellektualnye-transportnye-sistemy/> [Accessed 10 January 2024] (in Russian).
28. Promyshlennaya Tochka LLC, “Reversible traffic light signs and traffic rules” [online]. Available at: <https://prompoint.ru/blog/znaki-reversivnogo-svetofora-i-pravila-dvizheniya/> [Accessed 26 March 2024] (in Russian).
29. Kolesa.ru, “Reversible movement: how it works and what will happen if you drive through a red signal” [online]. Available at: <https://www.kolesa.ru/article/reversivnoe-dvizhenie-kak-ono-rabotaet-i-chto-budet-esli-vyekhat-pod-krasnyy-signal/> [Accessed 20 February 2024] (in Russian).
30. “Organization of reversible traffic on highways” [online]. Available at: <https://elar.usfeu.ru/bitstream/123456789/11466/1/113-ntm-22.pdf> [Accessed 26 March 2024] (in Russian).
31. **Artemova, S.G., Somova, K.V. and Mukovnin, A.S.** (2018), “Substantiation of proposals for the use of reversible traffic on the street and road network of Volgograd”, *Vestnik Volgogradskogo gos. arkh.-stroit.un-ta. Ser.: Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture]*, vol. 54, no. 73, pp. 97-105 (in Russian).
32. **Serova, E.Yu.** (2016), “Possible ways to increase the capacity of the urban street and road network”, *Vestnik Volgogradskogo gos. arkh.-stroit. un-ta [Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering]*, 46(65), pp. 84-94 (in Russian).
33. Minstroy Rossii (2019), SP 396.1325800.2018 Ulitsy i dorogi naselennykh punktov [Set of Rules 396.1325800.2018 Streets and roads of settlements]. Moscow: Standartinform (in Russian).
34. **Prozorovskaya, A.A. and Stepanchuk, A.V.** (2013), “Study of the capacity of intersections of main streets at different levels”, *Vestnik Ul'yanovskogo gos. tekhn. un-ta [Bulletin of the Ulyanovsk State Technical University]*, vol. 4, no. 64, pp. 65-68 [online]. Available at: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21125761> [Accessed 17 April 2024] (in Russian).

*Received 10.07.2025*

*Approved 22.07.2025*

*Accepted 04.08.2025*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 910.4

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-76-86

# Архитектура Национального парка в Мали

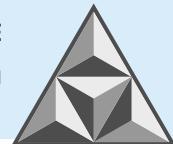
**Д.А. Личак, Н.А. Личак**

**Дмитрий Алексеевич Личак<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Ярославский государственный университет им. К.Д. Ушинского, Ярославль, Российская Федерация  
*d\_lichak@mail.ru*

**Наталия Алексеевна Личак<sup>2,\*</sup>**

<sup>2</sup>Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация  
*lichakna@ystu.ru\**



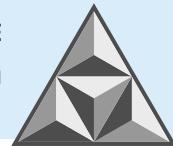
Республика Мали известна своей уникальной архитектурой и богатым историко-культурным наследием, привлекающим туристов. В ходе развития городской территории предполагается сделать акцент на создание парковых пространств. Представлен краткий обзор архитектурных построек на территории Национального парка. При их создании архитекторы вдохновлялись творческими концепциями и традиционными строительными техниками народов Мали. Используемые в парке строительные материалы отличает экологичность, они идеально вписываются в окружающую среду, создавая ощущение единства с природой и формируя часть культурного ландшафта. Посетители Национального парка Мали, наслаждаясь уникальными пейзажами, одновременно впитывают дух Республики Мали через ее архитектурное наследие.

**Ключевые слова:** архитектура Мали, Национальный парк, творческие концепции, культура, туристические маршруты

**Для цитирования:**

Личак Д.А., Личак Н.А. Архитектура Национального парка в Мали // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 3. С. 76-86. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-76-86



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-76-86

# Architecture of the National Park in Mali

**D.A. Lichak, N.A. Lichak**

**Dmitry Alekseevich Lichak<sup>1</sup>**

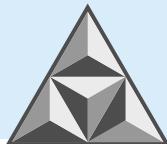
<sup>1</sup>Yaroslavl State University named after K.D. Ushinsky, Yaroslavl, Russian Federation

*d\_lichak@mail.ru*

**Nataliya Alekseevna Lichak<sup>2,\*</sup>**

<sup>2</sup>Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

*lichakna@ystu.ru\**



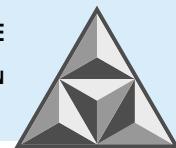
*The Republic of Mali is renowned for its unique architecture and rich historical and cultural heritage, which attracts tourists. As part of urban development initiatives, there is a focus on creating park spaces. This paper provides a brief overview of the architectural structures within the National Park. In their design, the architects drew inspiration from the creative concepts and traditional building techniques of Mali's peoples. The construction materials used in the park are eco-friendly and blend seamlessly into the natural surroundings, creating a sense of unity with nature and forming part of the cultural landscape. Visitors to Mali's National Park, while enjoying the unique landscapes, simultaneously absorb the spirit of the Republic of Mali through its architectural heritage.*

**Keywords:** Malian architecture, National Park, creative concepts, culture, tourist routes

**For citation:**

Lichak D.A., Lichak N.A. Architecture of the National Park in Mali // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 3. P. 76-86. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6456/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-76-86



## ВВЕДЕНИЕ

История развития человечества начиналась в Африке. На протяжении тысячелетий на данной территории рождались крупные цивилизации и могущественные державы. Республика Мали, расположенная в Западной Африке, является страной с богатой историей, культурой и архитектурным наследием. Рассматриваемое государство гордится большим количеством интересных мест, которые возвеличивают его значение в регионе и мире – от древних мечетей до потрясающих природных ландшафтов.

Мали было основано как торговое государство с централизованной властью. Из арабских хроник XI-XIV столетий и источников устного народного творчества можно узнать об истории ранее проживающих на этой территории этносов и кланов. В доисламский период здесь основывались крупные города и возникали городские поселения с множеством жителей. В полисах процветало каменное строительство, а в богатых домах появлялись остекленные окна. Города превращались в большие культурные центры, а в университетах собирались огромные библиотеки; при этом число студентов приближалось к десяткам тысяч.

Вторая половина XX в. явилась одним из наиболее трудных и важных периодов в истории Мали. В 1960 г. была образована независимая Республика Мали, что дало новый толчок развитию городов данной страны, но также обострило уже имеющиеся проблемы и создало новые [1].

Большинство городов Республики Мали невелики; среди них стоит выделить Дженне и Томбукту. Число жителей Дженне составляет 12 152 чел., а численность жителей Томбукту – 31 962 чел. Во второй половине XX столетия им были свойственны все проблемы, характерные для небольших городов: низкий уровень развития промышленности, безработица, отток населения и его малограмматность, недостаток квалифицированных кадров, антисанитария, нехватка финансов, засуха, голод.

Мопти – самый яркий пример средних по численности городов Мали. Он имеет свои особенности вследствие расположения в точке слияния рек Нигер и Бани, из-за чего в период половодья превращается в три острова, соединенных между собой дамбами. Это всегда обостряло проблемы, указанные выше [2].

Крупнейший город – Бамако, столица Мали, насчитывает более 600 тыс. жителей. Перед ним стояли те же проблемы, что и перед Дженне и Томбукту, хотя были и специфические – слишком активный приток населения и нехватка жилья.

В последние годы население Бамако возросло и превысило 1 млн. человек, что привело к росту спроса на жилье и общественные объекты. В ходе развития городской территории предполагалось сделать акцент на создание парковых пространств.

Истории отечественной архитектуры в Республике Мали уделяется достаточно большое внимание; она воспринимается как важнейшая часть национального культурного наследия. По возможности, публикуются исследования памятников традиционной архитектуры (во франкоязычной литературе используется термин *l'architecture vernaculaire*, что означает «народная архитектура»). В городе Мопти действует Центр земляной архитектуры, финансируемый фондом Ага Хана. Опираясь на исследования по архитектуре Мали, специалисты отмечают иллюстрированную монографию В. Шийнса «Народная архитектура догонов в Мали. Типологическая эволюция и будущее всемирного наследия» [3], до сих пор являющуюся наиболее обстоятельным трудом, посвященным архитектуре этого народа. Однако и монография В. Шийнса страдает тем же недостатком, что и остальная литература: в ней описываются только те памятники, которые внесены в охранную зону ЮНЕСКО.



## *Создание парковой зоны как культурного пространства*

Ухудшение условий проживания в современном городе связано с уплотнением городской застройки и различными видами загрязнений, например, сверхвысокой концентрацией пыли, канцерогенных соединений серы, азота, тяжелых металлов, электромагнитным, радиоактивным, тепловым излучениями, вибрацией и шумом. Немаловажным является и визуальное загрязнение, связанное с уничтожением зеленых насаждений, возникновением стихийных свалок и пр. [4]. Это провоцирует возникновение стрессовых ситуаций, ухудшает условия проживания в городе и определяет необходимость поиска резервов для повышения уровня комфортности городской застройки.

Актуальной становится проблема организации новых городских, а также сохранения и переустройства старых парков.

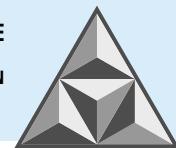
Город можно рассматривать как живой организм, который может быть подвержен многочисленным внутренним и внешним изменениям. С развитием урбанистики как науки городские власти стараются влиять на такие процессы все более активно, чтобы дать толчок к развитию или предотвратить упадок города [5]. Один из инструментов воздействия – создание открытого городского пространства, в частности, городского парка [6]. Данная территория обычно служит для обеспечения отдыха посетителей.

Люди приходят в парки, чтобы дышать свежим воздухом, участвовать в массовых празднествах, заниматься спортом, отдохнуть в кафе или ресторане. Зеленые насаждения и ухоженные водоемы также способствуют улучшению качества воздуха и экосистемы в городе. Создание парковых пространств обеспечивает возникновение новых локаций для встреч друзей, семейных прогулок, проведения праздников. Наличие городских парков означает повышение качества жизни, помогает жителям ближе узнать друг друга в безопасной обстановке.

Перечислим некоторые современные мировые тренды развития рекреационных парковых территорий [7]:

- Экологичность и устойчивость строительных материалов; используют переработанные и возобновляемые материалы, что способствует снижению углеродного следа объектов благоустройства.
- Цифровизация и «умные» системы. В парках все чаще внедряют сенсорные системы, автоматизированное освещение и информационные панели. Это позволяет жителям получать оперативные сведения о событиях, погодных условиях и состоянии оборудования.
- Безопасность, инклюзивность и адаптивность пространства. Объекты проектируют так, чтобы каждый мог чувствовать себя комфортно – от малышей до пожилых людей, а также лиц с ограниченными возможностями.
- Эстетика, искусство и уникальность парковых инсталляций; художественные инсталляции, топиарные и резиновые фигуры, скульптуры и декоративные элементы позволяют создавать индивидуальный облик каждой территории.
- Модульность и многофункциональность объектов; комплексные архитектурные и творческие решения, объединяющие элементы для детских игр, спортивные площадки и зоны отдыха становятся оптимальным выбором для современных парков.

Видов городских парков очень много. Каждый тип имеет свои особенности и предназначение. Однако современные реалии диктуют необходимость совмещать различные парковые функции и, соответственно, проектировать парки в виде многофункциональных комплексов. Стоит отметить, что почти всегда городские парки являются муниципальной собственностью и полностью содержатся за счет городского бюджета. Существуют многофункциональные городские парки для массового отдыха всех возрастных групп; они, основном, предназначены для пешеходов.



## *Парковое пространство для жителей Бамако*

Бамако – столица Мали, расположена на берегу реки Нигер, в месте слияния долин Нигера и Сенегала. Быстро увеличивающийся территориально, город богат большими территориями лесов и парков, что дает возможность сохранить достаточное количество зеленых насаждений. Сегодня в парке произрастают лимонные деревья, папайя, манго. Зеленые массивы ботанического и зоологического садов, в которых собраны образцы флоры и фауны тропической Африки, поражают великолепием.

Национальный парк Мали, расположенный в одноименной африканской стране, представляет собой уникальный симбиоз природного ландшафта и архитектурного наследия. В отличие от многих других заповедников, на данной территории архитектура играет ключевую роль, подчеркивая культурную идентичность региона и создавая гармоничное пространство для взаимодействия человека и природы. Национальный парк Бауле относится к мировым памятникам культурного наследия и находится под охраной ЮНЕСКО. Примечательно, что на территории парка сохранились археологические памятники эпохи палеолита, что подогревает интерес туристов.

Отдельно отметим, что во второй половине XX столетия в городах Мали существовало довольно много различных проблем: низкий уровень развития экономики, засуха, голод и антисанитария, малограмотность населения, нехватка квалифицированных кадров, безработица. Города развивались медленно, испытывая большие сложности, что не могло не сказаться на внешнем облике улиц и жизни городского населения. До XX столетия в Национальном парке наблюдалось разнообразие животных. Однако из-за деятельности браконьеров животный мир парка существенно пострадал; специалисты до сих пор работают над его восстановлением. Скудная фауна в XX столетии стала причиной того, что даже экологический туризм не пользовался спросом. Туристическая инфраструктура здесь была развита недостаточно; в парке проводили сафари.

Для исправления ситуации к процессу сохранения в городе зеленых насаждений подключились местные органы власти. Большое значение придавалось африканской архитектуре и культурному пространству. Работа заключалась в благоустройстве общественных зон в интересах жителей города. Архитектура парка была вдохновлена традиционными строительными техниками народов Мали, такими как использование глиняного кирпича (банко), деревянных балок и соломенных крыш. Эти материалы удачно вписались в окружающую среду, создали ощущение единства с природой.

Национальный парк Бамако (площадь 103 га) был построен в рамках более крупного охраняемого лесного заповедника площадью 2100 га, который образует значительный зеленый пояс на преимущественно засушливой земле [8]. В соответствии с условиями государственно-частного партнерства, правительство предложило Культурному фонду Ага Хана, который провел ранее реставрацию памятников архитектуры – глинобитных мечетей в Мопти, Томбукту и Дженне, спроектировать развитие территории парка. Эта территория представляет собой большой полукруглый каньон с охраняемым лесом, расположенным под террасами плато Кулуба, между Национальным музеем и комплексом Президентского дворца.

Одним из ярких примеров проектирования явился Центр для посетителей, выполненный в стиле суданской архитектуры с характерными высокими глиняными стенами, узкими окнами и террасами, защищающими от палящего солнца. Формы зданий и входные зоны (см. рис. 1) во многом напоминают древние сооружения Тимбукту и Дженне, внесенные в список Всемирного наследия ЮНЕСКО.



**Рис. 1.** Входная зона Национального парка Мали [9]

**Fig. 1.** Entrance area of the National Park of Mali [9]

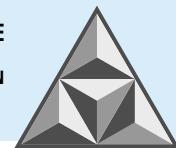
Учитывая природные достопримечательности, большие размеры и расположение рядом с Национальным музейным комплексом, парк проектировали таким образом, чтобы использовать большие открытые пространства для проведения досуга и образовательных мероприятий для широкой публики, школьных групп и туристов (рис. 2).



**Рис. 2.** Строительство стен в Национальном парке Мали [9]

**Fig. 2.** Wall construction of the National Park of Mali [9]

Проект предусматривал объединение территорий Национального музея, Ботанического сада и зоопарка в единый культурно-экологический парк с природными и культурными достопримечательностями, представляющий значительную ценность. Первый этап включал восстановление 17 гектаров открытых пространств и садов и строительство нескольких новых объектов [10]. В настоящее время парк имеет разветвленную пешеходную сеть и различные туристические маршруты. На современном этапе в парке обитают львы, жирафы, дикие быки, слоны, аллигаторы, антилопы, газели и гиппопотамы. Организованы локации для фитнеса, бега трусцой, езды на велосипеде и альпинизма различной сложности, а также предусмотрены возможности для ознакомления с растениями, птицами и природой, которые привлекают посетителей. В садовых зонах представлена местная флора в различных вариантах – от открытых газонов до цветников, лесистых зон и лечебного сада [11]. Установленные указатели и стенды с пояснениями, а также экскурсии, проводимые квалифицированными гидами, выявили новые перспективы для туристов.



Отдельно отметим амфитеатр, предназначенный для реализации образовательных программ и театральных постановок. Архитекторами также оформлен центральный вход (рис. 1), молодежно-спортивный центр, ресторан (рис. 3), общественные туалеты и несколько киосков.

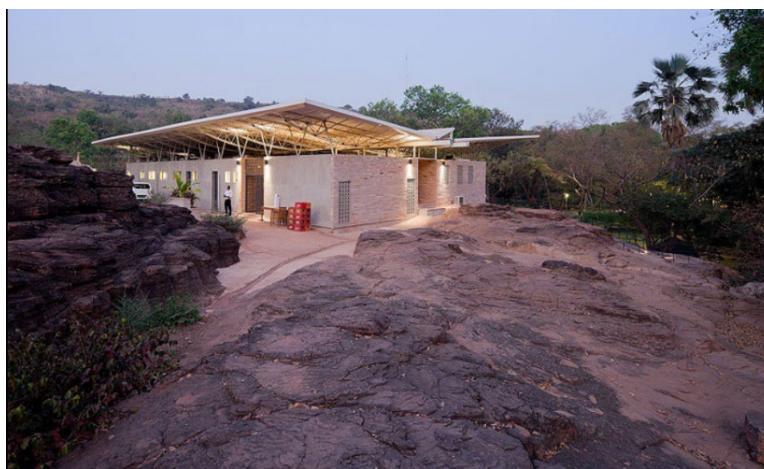


**Рис. 3.** Расположение и архитектура ресторана [9]

**Fig. 3.** Location and architecture of the restaurant stage [9]

Примечательно расположение и архитектура ресторана. Он установлен на вершине скалы, на разных высотных отметках. Здание разделено на четыре куба, которые выполняют различные функции. При проектировании ставили задачу открыть захватывающий вид на парк и близлежащее озеро [12]. Спортивный центр выдержан в том же архитектурном стиле. Он состоит из трех павильонов, расположенных вокруг игровой площадки в форме эллипса. Здания построены таким образом, что они создают для этой игровой площадки естественную тень, как и для внутренних зон отдыха. При этом, внутреннее и внешнее пространства гармонично соединены.

Все здания снаружи облицованы натуральным камнем, использование которого подчеркивает местную самобытность и снижает затраты на строительство. Наружные каменные стены обеспечивают естественную изоляцию и акклиматизацию внутренних пространств (рис. 4).



**Рис. 4.** Архитектурные объекты на территории парка [9]

**Fig. 4.** Location and architecture of the restaurant [9]

Большие нависающие крыши затеняют фасады и создают внутри приятный микроклимат; при планировании парка архитекторы уделили устойчивому развитию особое внимание.



В таких помещениях, как обеденный зал ресторана, предусмотрена система кондиционирования воздуха. Вместе с тем используется и пассивное охлаждение; здания спроектированы таким образом, чтобы использование кондиционеров за счет естественной вентиляции было минимизировано. Часть энергии парк получает от возобновляемых источников (солнечные панели). Дождевая вода собирается и применяется для полива растений через водосборную систему.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Архитектура Национального парка в Мали представляет собой не простое сочетание функциональных построек, а органично вписывается в часть культурного ландшафта. Она будто ведет увлекательный рассказ об истории народа, его связи с землей и уважении к природе. Национальный парк на своем примере демонстрирует, как современная архитектура может сохранять традиции, оставаясь экологичной и эстетически выразительной. Пример творческого подхода к проектированию парка в Бамако является результатом эффективного государственно-частного партнерства, которое позволило создать благоприятную «зеленую зону» для жителей города и туристов. Архитекторы и специалисты строительного профиля творчески подошли к обустройству городского парка и зоопарка в Бамако и создали уникальное место для досуга горожан и получения новых знаний.

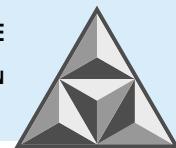
## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Забытая история Африки // Знание - сила. 2019. № 12. С. 72.
2. *Revisit: National Park of Mali by Kéré Architecture*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.architectural-review.com/buildings/revisit-national-park-of-mali-by-kere-architecture> (дата обращения 04.05.2025).
3. **Стыцюк Р.Ю.** Мировые тренды создания рекреационных парковых территорий // Экономика. Бизнес. Банки. 2019. № 5 (31). С. 69-77.
4. *Aegyptiaca Rossica* (Вып. 4): сб. ст. / под ред. М.А. Чегодаева, Н.В. Лаврентьевой. М.: Русский фонд содействия образованию и науке, 2016. 470 с.
5. **Токбаул Д.Д., Алиева Ж.Н.** Социально-экономическая значимость городских парков // Экономика и бизнес: теория и практика. 2024. № 3-2 (109). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-ekonomicheskaya-znachimost-gorodskih-parkov> (дата обращения: 27.04.2025).
6. **Личак Д.А., Личак Н.А.** Концепция «города-сада»: утопия, воплощенная в строительстве социалистического Ярославля // Умные композиты в строительстве. 2022. Т. 3. Вып. 1. С. 73-81. DOI: [https://doi.org/10.52957/27821919\\_2022\\_1\\_73](https://doi.org/10.52957/27821919_2022_1_73) (дата обращения: 02.04.2025).
7. **Большакова Д.** Магия Африки // Мир музея. 2023. № 6. С. 2-5.
8. **Лаврентьева Н.** Под горячим солнцем Африки // Мир музея. 2018. № 4. С. 50-52.
9. *National Park of Mali*. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kerarchitecture.com/work/building/national-park-of-mali> (дата обращения 04.05.2025).
10. **Ванюкова Д.В.** Тропические королевства // Мир музея. 2023. № 6. С. 32-34.
11. Город и искусство: субъекты социокультурного диалога / Составитель: Степугина Т.В. М.: Наука, 1996. 286 с.
12. **Новиков С.С., Урсы Д.П.** История Мали в новое и новейшее время. М.: Наука, 1994. 288 с.

Поступила в редакцию 06.06.2025

Одобрена после рецензирования 02.07.2025

Принята к опубликованию 04.08.2025



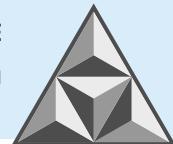
## REFERENCES

1. Zabytaya istoriya Afriki [The Forgotten History of Africa] (2019), *Znanie – Sila [Knowledge is Power]*, no. 12, p. 72 (in Russian).
2. Revisit: National Park of Mali by Kéré Architecture, [online] Available at: <https://www.architectural-review.com/buildings/revisit-national-park-of-mali-by-kere-architecture> [Accessed 4 May 2025].
3. **Stitsyuk, R.Yu.** (2019), "Global trends in the creation of recreational park areas", *Ekonomika. Biznes. Banki [Economics. Business. Banks]*, vol. 5, no. 31, pp. 69-77 (in Russian).
4. **Chegodaev, M.A. and Lavrentieva, N.V.** (2016), *Aegyptiaca Rossica* (Vyp. 4): sb. st. [Aegyptiaca Rossica (Iss. 4): collection of articles]. Moscow: Russkiy fond sodeistviya obrazovaniyu i nauke [Russian Foundation for the Promotion of Education and Science] (in Russian).
5. **Tokbaul, D.D. and Alieva, Zh.N.** (2024), "Socio-economic significance of urban parks", *Ekonomika i biznes: teoriya i praktika [Economics and Business: Theory and Practice]*, vol. 3, no. 2(109). [online] Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/sotsialno-ekonomiceskaya-znachimost-gorodskikh-parkov> [Accessed 27 April 2025] (in Russian).
6. **Lichak, D.A. and Lichak, N.A.** (2022), "The concept of the "garden city": the utopia realized in the construction of socialist", *Smart Composite in Construction*, vol. 3, no. 1, pp. 73-81 [online]. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5041/view> (in Russian).
7. **Bolshakova, D.** (2023), "The Magic of Africa", *Mir muzeya [World of Museum]*, no. 6, pp. 2-5 (in Russian).
8. **Lavreneva, N.** (2018), "Under the Hot Sun of Africa", *Mir muzeya [World of Museum]*, no. 4, pp. 50-52 (in Russian).
9. Kéré Architecture, n.d. National Park of Mali [online]. Available at: <https://www.kerearchitecture.com/work/building/national-park-of-mali> [Accessed 4 May 2025].
10. **Vaniukova, D.V.** (2023), "Tropical Kingdoms", *Mir muzeya [World of Museum]*, no. 6, pp. 32-34 (in Russian).
11. **Stepugina, T.V.** (1996), "City and Art: Subjects of Sociocultural Dialogue", Moscow: Nauka (in Russian).
12. **Novikov, S.S. and Ursu, D.P.** (1994), History of Mali in the Modern and Contemporary Period, Moscow: Nauka (in Russian).

*Received 06.06.2025*

*Approved after reviewing 02.07.2025*

*Accepted 04.08.2025*



## 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 оригиналную публикацию в данном журнале.

### **Приватность**

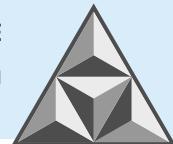
Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте данного журнала, используются исключительно для достижения целей, совпадающих с миссией журнала; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

### **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.

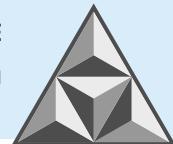
Статьи должны представлять сжатое, конкретное изложение результатов, без повторения одних и тех же данных в тексте, рисунках и таблицах.

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*, *b* (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.

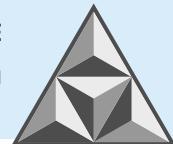
Основной текст научной статьи рекомендуется излагать согласно структуре IMRAD, содержащей следующие заголовки: Введение, Экспериментальная часть, Результаты и их обсуждение, Выводы, Список источников. Каждый заголовок приводится прописными буквами высотой 12 пт и выделяется одной пустой строкой перед 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 B28C 5/00 (2006.01), B28C 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 3, 2025 | VOL. 6, ISS. 3, 2025

