

ISSN ONLINE 2782-1919

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



**Том 5  
выпуск**

**3  
2024**

**VOLUME 5  
ISSUE 3**

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

# **УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

Включен в апреле 2023 года в Перечень ВАК РФ

**Том 5  
Выпуск 3**

**Ярославль 2024**

# НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

## МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва),  
М.О. БАКАНОВ (советник РААСН, д.т.н., доц., Иваново), В.В. БЕЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Тверь),  
А.М. БЕЛОСТОЦКИЙ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), Н.И. ВАТИН (советник РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург),  
В.М. ГОТОВЦЕВ (д.т.н., проф., Ярославль), А.В. ЗАХАРОВ (советник РААСН, к. архитектуры, проф., Иваново),  
А.Б. КАПРАНОВА (д.ф.-м.н., проф., Ярославль), В.И. КОЛЧУНОВ (академик РААСН, д.т.н., проф., Москва),  
В.Г. КОТЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Йошкар-Ола), Н.Н. КУДРЯШОВ (к. архитектуры, проф., Ярославль),  
А.Е. ЛЕБЕДЕВ (д.т.н., доц., Ярославль), С.Н. ЛЕОНОВИЧ (иностраннный акад. РААСН, д.т.н., проф., Республика  
Беларусь, Минск), В.Л. МОИДРУС (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. ТАРИШИС (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) 44-68-13  
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru  
Электронный адрес: <http://comincon.ru>

Журнал издается при содействии Российской Академии архитектуры и строительных наук

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

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

PUBLISHED BY YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

# **SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Established in November 2020, published quarterly

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

**Volume 5**

**Issue 3**

**Yaroslavl 2024**

# 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., Ivanovo) 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. SELYAIEV (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) 44-68-13  
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru  
Website: <http://comincon.ru>

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

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ / TABLE OF CONTENTS

### Строительные конструкции, здания и сооружения

*С.В. Цыбакин, А.А. Титунин, Д.Ю. Цветков*

- 8 Моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics напряжений и деформаций в клееной деревянной балке, усиленной композитной арматурой

*S.V. Tsybakin, A.A. Titunin, D.Yu. Tsvetkov*

Modelling of stresses and deformations in glued wooden beam with composite reinforcement in COMSOL Multiphysics software package

### Строительные материалы и изделия

*Т.А. Низина, В.В. Володин, Х.Б. Матякубов*

- 19 Применение экспериментально-статистического моделирования процесса термообработки полиминеральных глин, вводимых в цементные композиты

*T.A. Nizina, V.V. Volodin, Kh.B. Matyakubov*

Application of experimental-statistical modelling for heat treatment of polymineral clays introduced into cement composites

*А.И. Кравцов, А.А. Макаева, И.А. Оденбах*

- 31 Исследование свойств проницаемого бетона

*A.I. Kravtsov, A.A. Makaeva, I.A. Odenbakh*

Study of properties of pervious concrete

### Проектирование и строительство дорог, метрополитенов

*Л.А. Богуславский, Г.В. Проваторова*

- 42 Технологии информационного моделирования в концепции устойчивого строительства автомобильных дорог

*Boguslavsky, L.A., Provatorova, G.V.*

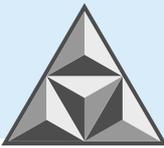
Information modelling technologies in the concept of sustainable road construction

- А.А. Игнатьев*  
Оценка влияния извести при укреплении песка мелкого на время его  
выдерживания при оптимальной влажности  
53 *A.A. Ignatyev*  
Evaluation of the impact for lime stabilization of fine sand on its curing time  
at optimum moisture content

**Архитектура зданий и сооружений.**

**Творческие концепции архитектурной деятельности**

- С.В. Расторгуев*  
Трехмерное моделирование городов: исторические реконструкции  
и альтернативная реальность  
65 *S.V. Rastorguev*  
Three-dimensional modelling of cities: historical reconstructions  
and alternative reality
- 80 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.011.1:004

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-8-18

# Моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics напряжений и деформаций в клееной деревянной балке, усиленной композитной арматурой

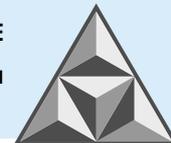
**С.В. Цыбакин, А.А. Титунин, Д.Ю. Цветков**

**Сергей Валерьевич Цыбакин<sup>1</sup>, Андрей Александрович Титунин<sup>1,2,\*</sup>, Данил Юрьевич Цветков<sup>1</sup>**

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

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

*sv44kostroma@yandex.ru, a\_titunin@ksu.edu.ru\*, takensuch@mail.ru*



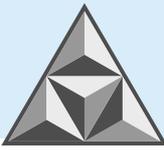
*Представлены результаты исследования модели клееной деревянной балки, усиленной композитной арматурой. Для моделирования и изучения напряженно-деформированного состояния пространственных многослойных конструкций из древесины с армированием применяется программный комплекс, использующий метод конечных элементов COMSOL Multiphysics. Основное внимание уделяется анализу напряжений и деформационных характеристик балки под различными нагрузками. Рассмотрены преимущества работы композитной арматуры и ее влияние на повышение прочности и долговечности деревянных конструкций. Отдельно изучается вопрос интеграции экспериментально полученных характеристик древесины и композитных материалов в численную модель, что позволяет повысить точность результатов моделирования. Упрощенная модель древесины как трансверсально-изотропного тела позволяет учесть неопределенности в ориентации к тангенциальному и радиальному направлению в балке. Полученные результаты подтверждают повышение несущей способности и уменьшение деформаций в балке за счет использования композитной арматуры по сравнению с традиционными деревянными конструкциями. Применение 3D-модели клееной балки с композитной арматурой также обеспечивает снижение затрат на проведение исследований при сопоставлении с натурными экспериментами.*

**Ключевые слова:** деревянные клееные балки, армирование деревянных конструкций, композитная арматура, моделирование

**Для цитирования:**

Цыбакин С.В., Титунин А.А., Цветков Д.Ю. Моделирование в программном комплексе COMSOL Multiphysics напряжений и деформаций в клееной деревянной балке, усиленной композитной арматурой // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 3. С. 8-18.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-8-18



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-8-18

# Modelling of stresses and deformations in glued wooden beam with composite reinforcement in COMSOL Multiphysics software package

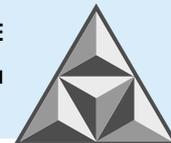
**S.V. Tsybakin, A.A. Titunin, D.Yu. Tsvetkov**

**Sergey V. Tsybakin<sup>1</sup>, Andrey A. Titunin<sup>1,2,\*</sup>, Danil Yu. Tsvetkov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Kostroma State Agricultural Academy, Kostroma, Russia

<sup>2</sup>Kostroma State University, Kostroma, Russia

*sv44kostroma@yandex.ru, a\_titunin@ksu.edu.ru\*, takensuch@mail.ru*



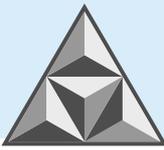
*The paper presents the results of the study on a model of a glued wooden beam with composite reinforcement. The authors use a software package using the finite element method COMSOL Multiphysics to model and study the stress-strain state of spatial multilayer wooden structures with reinforcement. The main focus is on analyzing the stress and strain characteristics of the beam under various loads. The paper considers the advantages of composite reinforcement efficiency and its influence on increasing the strength and durability of wooden structures. The authors pay special attention to the integration of experimentally obtained characteristics of wood and composite materials into the numerical model. It increases the accuracy of the modelling results. When constructing the 3D model, we have used a simplified wooden model as a transversal-isotropic body. It allows taking into account uncertainties on orientation to the tangential and radial directions in the beam. The results obtained confirm the increased load carrying capacity and reduced deformations in the beam due to the use of composite reinforcement compared to traditional wooden structures. The use of a 3D model of a glued beam with composite reinforcement also provides reduced research costs compared to in-situ experiments.*

**Keywords:** wooden glued beams, reinforcement of wooden structures, composite reinforcement, modelling

**For citation:**

Tsybakin S.V., Titunin A.A., Tsvetkov D.Yu. Modelling of stresses and deformations in glued wooden beam with composite reinforcement in COMSOL Multiphysics software package // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 3. P. 8-18. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-8-18



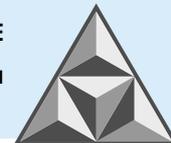
## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применение клееных деревянных конструкций в строительстве заметно возросло благодаря их экологичности и эстетическим качествам. Однако для обеспечения долговечности и надежности таких конструкций требуется также повышение механических характеристик, что достигается за счет эффективного армирования. Исследования по вопросам армирования деревянных клееных конструкций ведутся в России и за рубежом с 50-х годов XX столетия. Значимые результаты в области расчета элементов конструкций достигнуты отечественными учеными – В.Ф. Бондиным, Б.В. Лабудиным, В.И. Линьковым, А.А. Погорельцевым, В.И. Римшиным, С.И. Рощиной, В.И. Травушем, С.Б. Турковским, Е.Н. Серовым, А.Г. Черных, О.В. Тюриной и др. [1-3]. При этом в последние годы все чаще используется композитная арматура. Однако многие исследователи отмечают, что перед использованием армированных деревянных конструкций в строительстве необходимо провести натурные испытания и подтвердить их высокую надежность. Такие испытания всегда сопряжены со значительными затратами, которые можно снизить путем моделирования конструкций в программных комплексах с применением метода конечных элементов [4].

Теоретический анализ принципов работы композитной арматуры в клееных деревянных балках создает базу для понимания ключевых моментов исследования и подходов к моделированию. Композитная арматура, изготовленная из стекло- и углепластика, а также на основе базальтового волокна, значительно улучшает прочностные характеристики деревянных конструкций. Эти материалы обладают высокой прочностью на растяжение, устойчивостью к коррозии и низкой теплопроводностью, что идеально подходит для использования в строительстве. Композитная арматура увеличивает несущую способность и жесткость балок, снижает их массу и материалоемкость. Как внешнее, так и внутреннее армирование, при котором композитные материалы клеятся в деревянные элементы, позволяет резко повысить прочностные характеристики и продлить срок службы конструкций [5].

Армирование композитными стержнями снижает концентрацию напряжений и предотвращает трещины, что особенно важно в условиях длительных и циклических нагрузок. Армированные композитами балки демонстрируют значительное увеличение несущей способности и снижение деформативности по сравнению с обычными балками из дерева. Эти результаты подтверждают целесообразность использования композитной арматуры для повышения долговечности и надежности деревянных конструкций. Применение численных методов моделирования, конкретная альтернатива многочисленным материалоемким экспериментам, позволяет выявить оптимальные схемы армирования и параметры конструкции, обеспечить равномерное распределение напряжений и минимальные деформации при сохранении прочностных характеристик [5-9].

В расчетах деревянных клееных конструкций чаще всего применяется упрощенная модель древесины как трансверсально-изотропного тела. Такая модель позволяет учесть случаи неопределенности в ориентации к тангенциальному и радиальному направлению, что связывается с местным искривлением годичных слоев в древесине. Вместе с тем, согласно



многочисленным экспериментальным исследованиям, приложение нагрузок к древесине вызывает не только упругие, но и пластические остаточные деформации. Таким образом, при построении моделей следует учитывать реологические свойства древесины [10-11]. Для моделирования и изучения напряженно-деформированного состояния пространственных многослойных конструкций из древесины с армированием положительно зарекомендовало себя применение программных комплексов, использующих метод конечных элементов. Одним из таких продуктов является COMSOL Multiphysics, имеющий ряд преимуществ [12].

Во-первых, COMSOL позволяет точно учитывать сложные физические взаимодействия между компонентами конструкции, такие как распределение напряжений и деформаций. Во-вторых, программное обеспечение обеспечивает высокую точность расчетов, что дает возможность детально анализировать поведение материалов при различных внешних условиях, в том числе – под различными нагрузками. Кроме того, возможность проведения параметрических исследований и оптимизации конструкции в COMSOL значительно ускоряет процесс разработки и позволяет находить эффективные решения, способствующие повышению прочности и долговечности деревянных балок. Также стоит отметить удобство интеграции результатов моделирования с экспериментальными данными, что способствует повышению достоверности результатов [12].

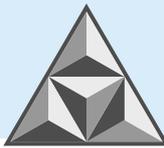
## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для анализа внутренних напряжений и деформаций создана 3D-модель клееной балки (сечение  $0.10 \times 0.12$  м, длина 3.0 м), армированной девятью стержнями из композитного материала.

Для интеграции стержней в численную модель использовали функцию «Line segment». Стержни равномерно распределялись в растянутой зоне балки, что обеспечивало оптимальное распределение нагрузок и улучшение механических характеристик конструкции. В процессе моделирования клееной деревянной балки в программном комплексе COMSOL Multiphysics использовались экспериментальные данные о характеристиках древесины и композитной арматуры, полученные в лаборатории Костромской государственной сельскохозяйственной академии (г. Кострома, Россия).

На рис. 1, 2 представлены отображения этих характеристик в диалоговом окне программного комплекса. Данные касаются различных физико-химических свойств материалов (плотность, модуль упругости, предел прочности при растяжении и сжатии, коэффициент Пуассона и др.) При разработке модели учитывали не только упругие деформации, когда балка возвращалась в исходное состояние после снятия нагрузки, но и пластические деформации, остающиеся после превышения прилагаемой нагрузки определенными значениями.

Таким образом, модель комплексно описывала поведение материалов, что обеспечивало наиболее полное приближение к реальной работе конструкции в различных эксплуатационных условиях.



Material Contents					
Property	Variable	Value	Unit	Property group	
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	650[kg/m...	kg/m <sup>3</sup>	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Young's modulus	E	12.9e9[Pa]	Pa	Young's modulus ai	
<input checked="" type="checkbox"/> Poisson's ratio	nu	0.2	1	Young's modulus ai	
<input checked="" type="checkbox"/> Initial yield stress	sigmags	240e6[Pa]	Pa	Elastoplastic mater	
<input checked="" type="checkbox"/> Isotropic tangent modulus	Et	12e9[Pa]	Pa	Elastoplastic mater	
Relative permeability	mur_is...	1	1	Basic	
Murnaghan third-order elastic mo...	l	-3.0e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan	
Murnaghan third-order elastic mo...	m	-6.2e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan	
Murnaghan third-order elastic mo...	n	-7.2e11[Pa]	N/m <sup>2</sup>	Murnaghan	
Lamé parameter $\lambda$	lambLa...	1.15e11[P...	N/m <sup>2</sup>	Lamé parameters	
Lamé parameter $\mu$	muLame	7.69e10[P...	N/m <sup>2</sup>	Lamé parameters	

Рис. 1. Характеристики древесины сосны в COMSOL Multiphysics

Fig. 1. Characteristics of pine wood on COMSOL Multiphysics

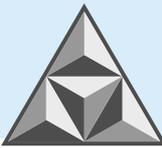
Material Contents					
Property	Variable	Value	Unit	Property group	
<input checked="" type="checkbox"/> Density	rho	2000[kg/...	kg/m <sup>3</sup>	Basic	
<input checked="" type="checkbox"/> Young's modulus	E	50[GPa]	Pa	Young's modulus and Poiss...	
<input checked="" type="checkbox"/> Poisson's ratio	nu	0.3	1	Young's modulus and Poiss...	
Relative permeability	mur_iso...	1	1	Basic	

Рис. 2. Характеристики композитной арматуры в COMSOL Multiphysics

Fig. 2. Characteristics of composite reinforcement on COMSOL Multiphysics

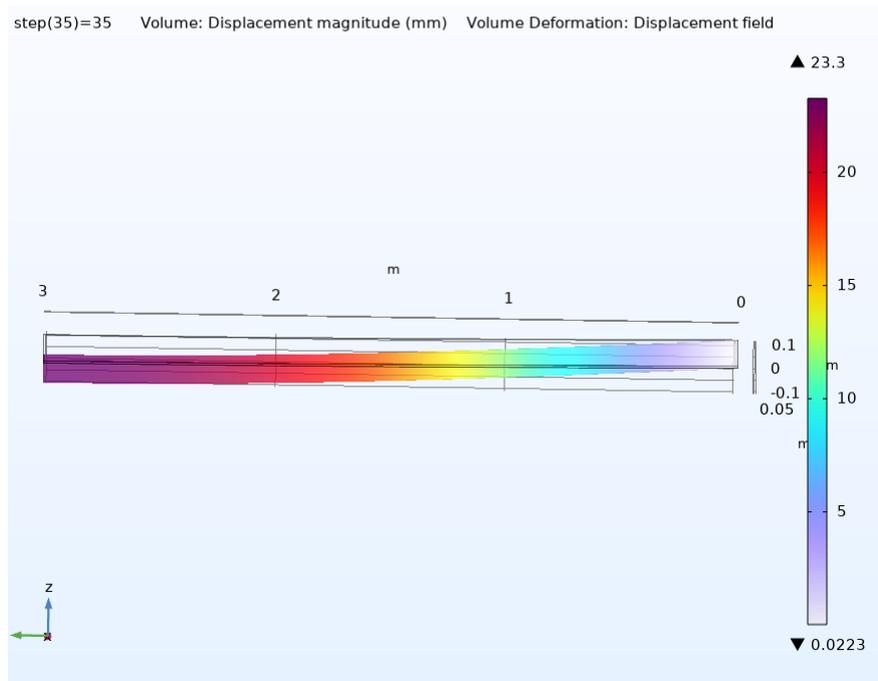
Балка, являющаяся ключевым конструктивным элементом, принимает нагрузки от вышележащих конструкций и полезные нагрузки в соответствии с нормами СП 20.13330.2016. «Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85» [13]. В ходе исследований рассматривали вариант использования клееной армированной балки в межэтажном перекрытии с шагом 6.0 м. При этом полезная нагрузка составляла 2.0 кН·м<sup>-2</sup>, а нагрузка от вышележащих конструктивных элементов покрытия пола равнялась 1.5 кН·м<sup>-2</sup>. Собственный вес балки учитывался в расчетах программного комплекса автоматически. Общая равномерно распределенная нагрузка на балку оценивалась величиной 3.5 кН·м<sup>-2</sup>.

Применение COMSOL Multiphysics позволяет более детально анализировать механические свойства материалов при создании модели балки. При этом моделируется не только поведение отдельно взятых материалов (в данном случае – взаимодействие древесины и композитной арматуры), но и оцениваются их прочностные характеристики и деформации. Это дает возможность более точно прогнозировать надежность и долговечность клееной балки в реальных условиях. Разработанная модель позволяет варьировать распределение и величину нагрузок, что крайне важно для обеспечения безопасности конструкции. Такой подход способствует сокращению затрат на проведение исследований и разработку конструктивных параметров балки для заданных условий эксплуатации.



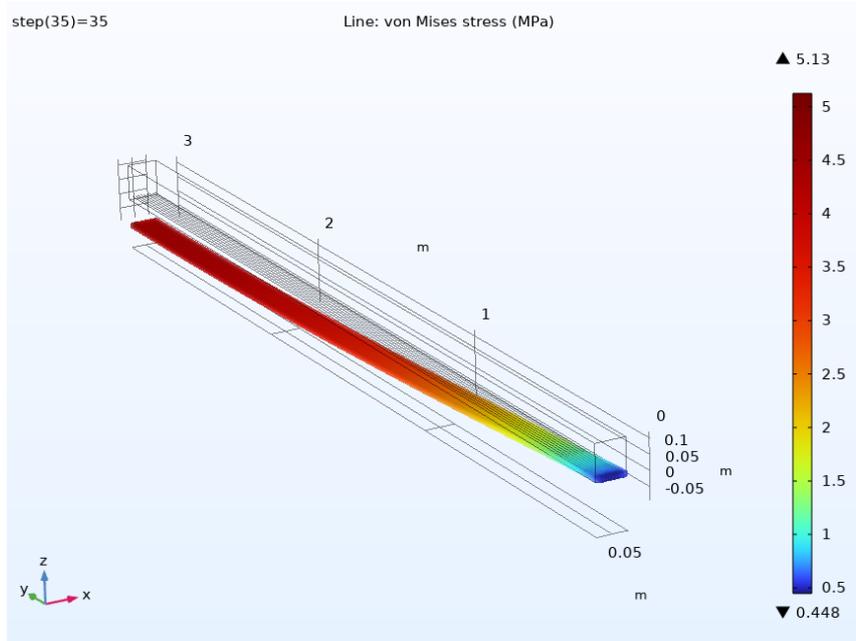
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С использованием разработанной модели клееной деревянной балки с композитной арматурой проведен анализ поведения конструкции при действии различных нагрузок. Получены данные по деформациям балки (рис. 3), напряжениям в стержнях (рис. 4) и балке (рис. 5). Результаты представляют собой ключевые показатели, определяющие прочность и устойчивость балки в условиях эксплуатации.



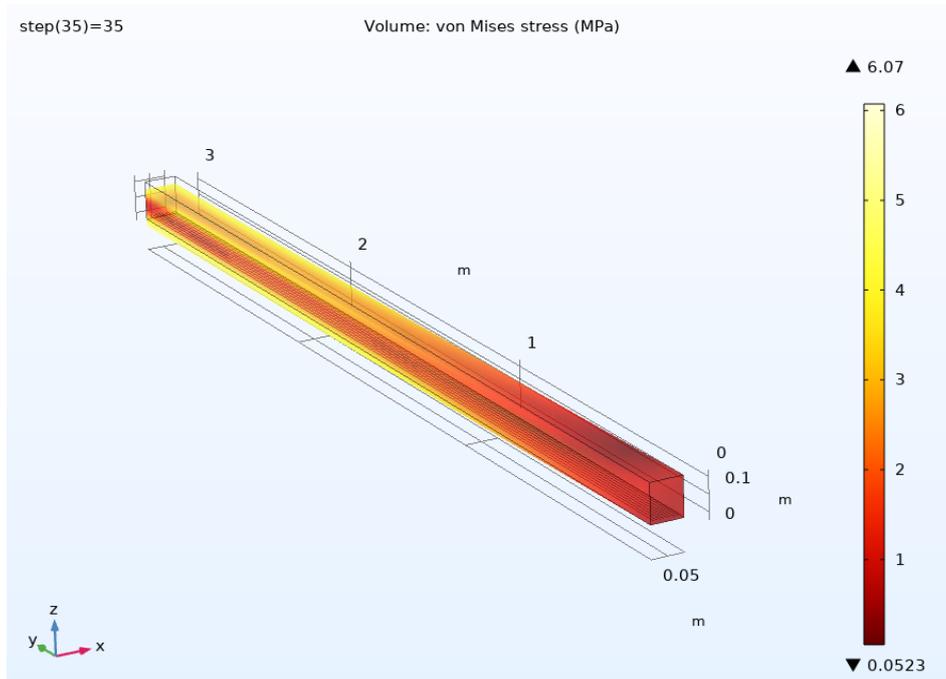
**Рис. 3.** Деформации клееной деревянной балки с армированием композитной арматурой в COMSOL Multiphysics; ед. изм. – мм

**Fig. 3.** Deformations of glued wooden beam with composite reinforcement on COMSOL Multiphysics; mm



**Рис. 4.** Напряжения в стержнях композитной арматуры в COMSOL Multiphysics; ед. изм. – МПа

**Fig. 4.** Stresses in composite reinforcement bars in COMSOL Multiphysics; MPa



**Рис. 5.** Напряжения клееной деревянной балки с армированием композитной арматурой в COMSOL Multiphysics; ед. изм. – МПа

**Fig. 5.** Stresses of glued wooden beam with composite reinforcement on COMSOL Multiphysics; MPa

Согласно результатам моделирования, максимальный прогиб конструкции составляет 23.3 мм, что соответствует требованиям второй группы предельных состояний (не превышает значение в  $1/200$  пролета). В стержнях из композитной арматуры обнаружены растягивающие напряжения на уровне 5.13 МПа, и это подчеркивает достаточную прочность для восприятия нагрузок без превышения критических значений. В деревянной балке нами зафиксированы пиковые растягивающие напряжения 6.07 МПа, указывающие на устойчивость материала к возможным деформациям в условиях эксплуатации. Данные подтверждают высокую надежность и долговечность балки и позволяют прогнозировать поведение конструкции при воздействии разнообразных эксплуатационных нагрузок в течение длительного времени.

## ВЫВОДЫ

Использование композитной арматуры в клееных деревянных балках способствует значительному повышению механических свойств, увеличению несущей способности конструкции при одновременном снижении материалоемкости конструкций. Композитные стержни, снижая концентрацию напряжений, играют ключевую роль в предотвращении трещин и повышении устойчивости конструкций к длительным и циклическим нагрузкам.

Интеграция экспериментально полученных характеристик материалов в программный комплекс COMSOL Multiphysics позволяет повысить точность результатов моделирования и обеспечивает соответствие модели реальному поведению материалов под нагрузкой. Это значительно сокращает затраты при разработке конструктивных параметров клееной балки с композитной арматурой на этапе экспериментальных исследований. Параметрические исследования и оптимизация, проводимые с использованием COMSOL Multiphysics, ускоряют процесс проектирования и обеспечивают поиск наиболее эффективных решений по повышению прочности и долговечности деревянных балок.



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Рощина С.И., Сергеев М.С., Лукина А.В.** Армированные деревянные конструкции // *Изв. высш. учеб. завед. Лесной журнал*. 2013. № 4 (334). С. 80-85.
2. **Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Стоянов В.О.** Исследования составных деревянных балок с наклонно-вкленными связями сдвига из стеклопластиковой арматуры // *Строительство и реконструкция*. 2018. № 2 (76). С. 67-75.
3. **Лабудин Б.В., Тюрина О.Е., Куницкая О.А., Швецова В.В.** Усиление деревянных конструкций композитами // *Ремонт. Восстановление. Модернизация*. 2022. № 1. С. 18-24.
4. **Бай В.Ф., Еренчинов С.А., Гач Е.А.** Исследование работы деревянной балки, армированной стальными пластинами // *Архитектура, строительство, транспорт*. 2023. № 2 (104). С. 46-53. DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-46-53.
5. **Рощина С.И., Лукин М.В., Лабудин Б.В., Мелехов В.И.** Расчет композитных деревоклееных балок на основе применения инженерного метода // *Изв. высш. учеб. завед. Лесной журнал*. 2012. № 3 (327). С. 90-94.
6. **Есипов А.В., Лыкова Я.В.** Инженерный метод расчета повышения несущей способности цельнодеревянных балок установкой стержневой арматуры в растянутой зоне // *Академ. вестник УралНИИпроект РААСН*. 2016. № 4 (31). С. 61-65.
7. **Муселемов Х.М., Устарханов О.М., Калиева М.Х., Манапов Р.М.** Исследования клееных армированных деревянных конструкций // *Наука в цифрах*. 2016. С. 10-13. DOI 10.21661/r-114936.
8. **Юсупов А.К., Муселемов Х.М., Устарханов Т.О., Джалалов Ш.Г.** Исследование металлодеревянной балки // *Вестник машиностроения*. 2019. № 12. С. 16-20.
9. **Кавелин А.С., Тютина А.Д., Нуриев В.Э., Колтакова В.А.** Армирование деревянных конструкций // *Инженерный вестник Дона*. 2019. № 8 (59). С. 44-50.
10. **Labudin B., Tyurina O., Mavrin D., Hasan W.** Method for determining the design resistance of a glued-in twisted elliptical bar for pulling out in elements of wooden structures // *Lect. Not. Civ. Eng.* 2022. Т. 182. С. 181-187.
11. **Арленинов Д.К., Беккер Д.А.** Влияние уровня напряжений на ползучесть древесины при изгибе // *Изв. высш. учеб. завед. Лесной журнал*. 2015. № 6 (348). С. 128-137. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2015.6.128.
12. Введение в COMSOL Multiphysics, 2018. URL: [https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru\\_RU.pdf](https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf) (дата обращения 14.06.2024).
13. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85. М.: Стандартинформ, 2018. 95 с.

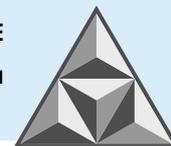
Поступила в редакцию 14.06.2024

Одобрена после рецензирования 11.07.2024

Принята к опубликованию 05.09.2024

## REFERENCES

1. **Roshchina, S.I., Sergeev, M.S. and Lukina, A.V.** (2013), "Reinforced Wooden Structures", *Izv. vyssh. ucheb. zaved. Lesnoj zhurnal [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forestry journal]*, no. 4 (334), pp. 80-85 (in Russian).
2. **Turkovsky, S.B., Pogoreltsev, A.A. and Stoyanov V.O.** (2018), "Study of composite wooden beams with tilt-included relationship bonds from fiberglass fittings", *Stroitel'stvo i rekonstrukciya [Construction and reconstruction]*, no. 2 (76), pp. 67-75 (in Russian).
3. **Labudin, B.V., Tyurina, O.E., Kunitskaya, O.A. and Shvetsova, V.V.** (2022), "Reinforcement of wood structures by composites", *Remont. Vosstanovlenie. Modernizaciya [Repair. Restoration. Modernisation]*, no. 1, pp. 18-24 (in Russian).
4. **Baj, V.F., Erenchinov, S.A. and Gach, E.A.** (2023), "Study of the operation of a wooden beam reinforced with steel plates", *Arkhitektura, stroitel'stvo, transport [Architecture, Construction, Transport]*, no. 2 (104), pp. 46-53 (in Russian). DOI 10.31660/2782-232X-2023-2-46-53.



5. **Roshchina, S.I., Lukin, M.V., Labudin, B.V. and Melekhov, V.I.** (2012), "Design of Composite Laminated Wooden Joists on the Engineering Method Basis", *Izv. vyssh. ucheb. zaved. Lesnoj zhurnal [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forestry journal]*, no. 3 (327), pp. 90-94 (in Russian).
6. **Esipov A.V., Lykova Ya.V.** (2016), "Engineering method of calculation of increase of bearing capacity of solid wood beams by mounting reinforcement bar in the tension zone", *Akadem. vestnik UralNIIProekt RAASN*, no. 4 (31), pp. 61-65 (in Russian).
7. **Muselemov, Kh.M., Ustarkhanov, O.M., Kalieva, M.Kh. and Manapov, R.M.** (2016), "The research of glued frame-mounted wooden constructions", *Nauka v cifrah [Science in figures]*, pp. 10-13. 10.21661/r-114936 (in Russian).
8. **Yusupov, A.K., Muselemov, Kh.M., Ustarkhanov, T.O. and Dzhalalov Sh.G.** (2019), "Research of a metal-wooden beam", *Vestnik mashinostroeniya [Russian Engineering Research]*, no. 12, pp. 16-20 (in Russian).
9. **Kavelin, A.S., Tyutina, A.D., Nuriev, V.E. and Koltakova, V.A.** (2019), "Reinforcement of wooden structures", *Inzhenernyj vestnik Dona [Engineering Journal of the Don]*, no. 8 (59), pp. 44-50 (in Russian).
10. **Labudin, B., Tyurina, O., Mavrin, D. and Hasan, W.** (2022), "Method for determining the design resistance of a glued-in twisted elliptical bar for pulling out in elements of wooden structures", *Lect. Not. Civ. Eng.*, no. 182, pp. 181-187.
11. **Arleninov, D.K. and Bekker, D.A.** (2015), "Effects of Stress Level on Wood Creep under Bending", *Izv. vyssh. ucheb. zaved. Lesnoj zhurnal [Proceedings of Higher Educational Institutions. Forestry journal]*, no. 6 (348), pp. 128-137 (in Russian).
12. Introduction to COMSOL Multiphysics (2018), available at: [https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru\\_RU.pdf](https://cdn.comsol.com/doc/5.4/IntroductionToCOMSOLMultiphysics.ru_RU.pdf) (accessed 14.06.2024). (In Russian).
13. SP 20.13330.2016 (2018), Code of rules. Loads and impacts. Updated edition of SNiP 2.01.07-85. Moscow: Standartinform (in Russian).

Received 14.06.2024

Approved 11.07.2024

Accepted 05.09.2024



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.54

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-19-30

# Применение экспериментально-статистического моделирования процесса термообработки полиминеральных глин, вводимых в цементные композиты

**Т.А. Низина, В.В. Володин, Х.Б. Матякубов**

**Татьяна Анатольевна Низина\***, Владимир Владимирович Володин, Хасан Бахрамович Матякубов  
Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева,  
Саранск, Российская Федерация  
*nizinata@yandex.ru\**, *volodinvv1994@gmail.com*, *abakan\_94h@mail.ru*



*Представлен способ получения активной минеральной добавки путем обжига полиминеральной глины. Показана возможность получения цементных композитов с повышенными прочностными характеристиками как за счет введения глинистой добавки, так и за счет оптимизации режима обжига глины. С использованием методов экспериментально-статистического моделирования определен рациональный режим обжига глины при разработке активной минеральной добавки, вводимой в цементные композиты.*

**Ключевые слова:** полиминеральная глина, активная минеральная добавка, цементные композиты, экспериментально-статистическое моделирование, скаляризация

**Для цитирования:**

Низина Т.А., Володин В.В., Матякубов Х.Б. Применение экспериментально-статистического моделирования процесса термообработки полиминеральных глин, вводимых в цементные композиты // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 3. С. 19-30.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-19-30



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-19-30

# Application of experimental-statistical modelling for heat treatment of polymineral clays introduced into cement composites

**T.A. Nizina, V.V. Volodin, Kh.B. Matyakubov**

**Tatyana A. Nizina\***, Vladimir V. Volodin, Khasan B. Matyakubov

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogaryova, Saransk, Russia

*nizinata@yandex.ru\**, *volodinvv1994@gmail.com*, *abakan\_94h@mail.ru*



*The article presents a method of producing an active mineral additive by firing polymineral clay. The authors show the possibility of obtaining cement composites with increased strength characteristics both due to the introduction of clay additive and due to the optimisation of the clay firing conditions. The authors used experimental and statistical modelling techniques to determine the appropriate clay firing conditions to produce an active mineral additive for cement composites.*

**Keywords:** polymineral clay, active mineral additive, cement composites, experimental-statistical modelling, scalarisation

**For citation:**

Nizina T.A., Volodin V.V., Matyakubov Kh.B. Application of experimental-statistical modelling for heat treatment of polymineral clays introduced into cement composites // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 3. P. 19-30. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-19-30



## ВВЕДЕНИЕ

Объем производства цементных бетонов в мире неуклонно возрастает и уже превысил отметку в 10 млрд. м<sup>3</sup> в год [1], что позволяет называть их главным строительным материалом XXI века. При этом современные методы производства портландцемента как основного компонента современных бетонов являются энергоемкими. Традиционным способом снижения клинкероемкости портландцемента является совместный помол клинкера с замещающими добавками – гидравлическими, пуццолановыми или инертными [1]. Также снижению потребления портландцемента способствует применение минеральных добавок в качестве самостоятельных компонентов, что позволяет улучшить физико-механические и эксплуатационные свойства бетонов при сниженном расходе портландцемента [2-6]. С середины прошлого столетия ученые осуществляют поиск и разработку модифицирующих добавок для бетонов, снижающих расход портландцемента. Установлено, что глинтиты – минеральные добавки, получаемые обжигом и помолом полиминеральных глин, хорошо подходят для решения описанных задач [7-9]. Исследования пуццолановой активности обожженных глин из различных регионов Российской Федерации показали, что эти породы обладают достаточной активностью при замещении до 10-30% цемента [10, 11].

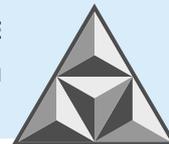
Специфика минерально-сырьевой базы Мордовии (рис. 1) позволила организовать производство портландцемента, попутно обеспечивающее соседние регионы вяжущим для бетонов и растворов. Производство портландцемента характеризуется истощением запасов исходного сырья, в связи с чем на территории республики проводятся геологические исследования с целью расширения сырьевой базы [12].



Рис. 1. Карта полезных ископаемых Республики Мордовия [12]

Fig. 1. Map of mineral resources of the Republic of Mordovia [12]

В Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева ведется разработка минеральных добавок на основе глин, которыми богата территория Республики Мордовия [13-18]. Целью данной работы является оптимизация режимов обжига полиминеральных глин, вводимых в бетоны, с применением методов экспериментально-статистического моделирования.



## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Вязущее состояло из портландцемента ЦЕМ I 42,5Н производства АО «Серебряковцемент» и минеральных добавок – глинистых, полученных обжигом глины при отношении Ж:Т = 0.3. Для получения минеральных добавок использовали глину Старошайговского месторождения Республики Мордовия. Химический и минералогический составы глины представлены в табл. 1, 2.

**Таблица 1.** Химический состав глины

**Table 1.** Chemical composition of clay

Химический состав, масс. %											
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO	MgO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ZrO <sub>2</sub>	MnO	BaO
66.43	13.72	10.90	4.32	0.55	1.68	1.12	0.64	0.26	0.18	0.13	0.07

**Таблица 2.** Минералогический состав глины

**Table 2.** Mineralogical composition of clay

Минералогический состав, %			
Каолинит	Иллит	Полевые шпаты	Кварц
18.0	23.2	11.9	46.9

Эффективные режимы обжига глинистых пород выявляли с применением методов экспериментально-статистического моделирования [19]. Были получены полиномиальные уравнения изменения предела прочности  $R_{сж.28}$  и модуля упругости  $E_{сж.28}$  при сжатии, а также предела прочности на растяжение при изгибе  $R_{изг.28}$ :

$$R_{сж.28} = 66.93 + 0.89 x_1 + 0.31 x_2 - 8.08 x_3 - 0.89 x_1 x_2 - 0.47 x_1 x_3 - 0.29 x_2 x_3 + 0.17 x_1 x_2 x_3 - 8.31 x_1^2 + 0.62 x_2^2 + 0.85 x_3^2 + 0.71 x_1^2 x_2 + 1.31 x_1 x_2^2 + 3.64 x_1^2 x_3 + 0.36 (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2; \quad (1)$$

$$E_{сж.28} = 18968.77 + 1072.41 x_1 + 43.48 x_2 - 1588.27 x_3 - 161.68 x_1 x_2 + 38.92 x_1 x_3 - 36.54 x_2 x_3 + 81.77 x_1 x_2 x_3 + 124.17 x_1^2 - 366.20 x_2^2 + 478.82 x_3^2 + 237.09 x_1^2 x_2 + 174.95 x_1 x_2^2 + 424.80 x_1^2 x_3 - 460.31 (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2; \quad (2)$$

$$R_{изг.28} = 10.54 + 0.58 x_1 - 0.16 x_2 - 0.37 x_3 - 0.06 x_1 x_2 + 0.06 x_1 x_3 - 0.01 x_2 x_3 + 0.07 x_1 x_2 x_3 + 0.11 x_1^2 + 0.41 x_2^2 + 0.06 x_3^2 + 0.29 x_1^2 x_2 - 0.22 x_1 x_2^2 - 0.10 x_1^2 \cdot x_3 - 0.18 (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2, \quad (3)$$

где  $x_1$  – температура обжига, код. вел.;

$x_2$  – время обжига, код. вел.;

$x_3$  – доля добавки, код. вел., принимаемая согласно данным табл. 3.

**Таблица 3.** Исследуемые факторы и уровни их варьирования

**Table 3.** Factors under study and their levels of variation

Варьируемые факторы	Уровни варьирования в кодированных величинах				
	-2	-1	0	+1	+2
Температура обжига, °С	-	400	600	800	-
Длительность обжига, ч	-	2	3	4	-
Содержание добавки, % от массы вяжущего	2	6	10	14	18

Анализ характеристик модифицированного цементного камня, предсказанных с помощью уравнений (1) – (3), проводили на основе расчета 7500 модельных точек с помощью оболочки в программе Microsoft Excel. Оптимальные составы оценивали с применением метода скаляризации [20]. При этом максимум целевой функции определяли с помощью зависимости:



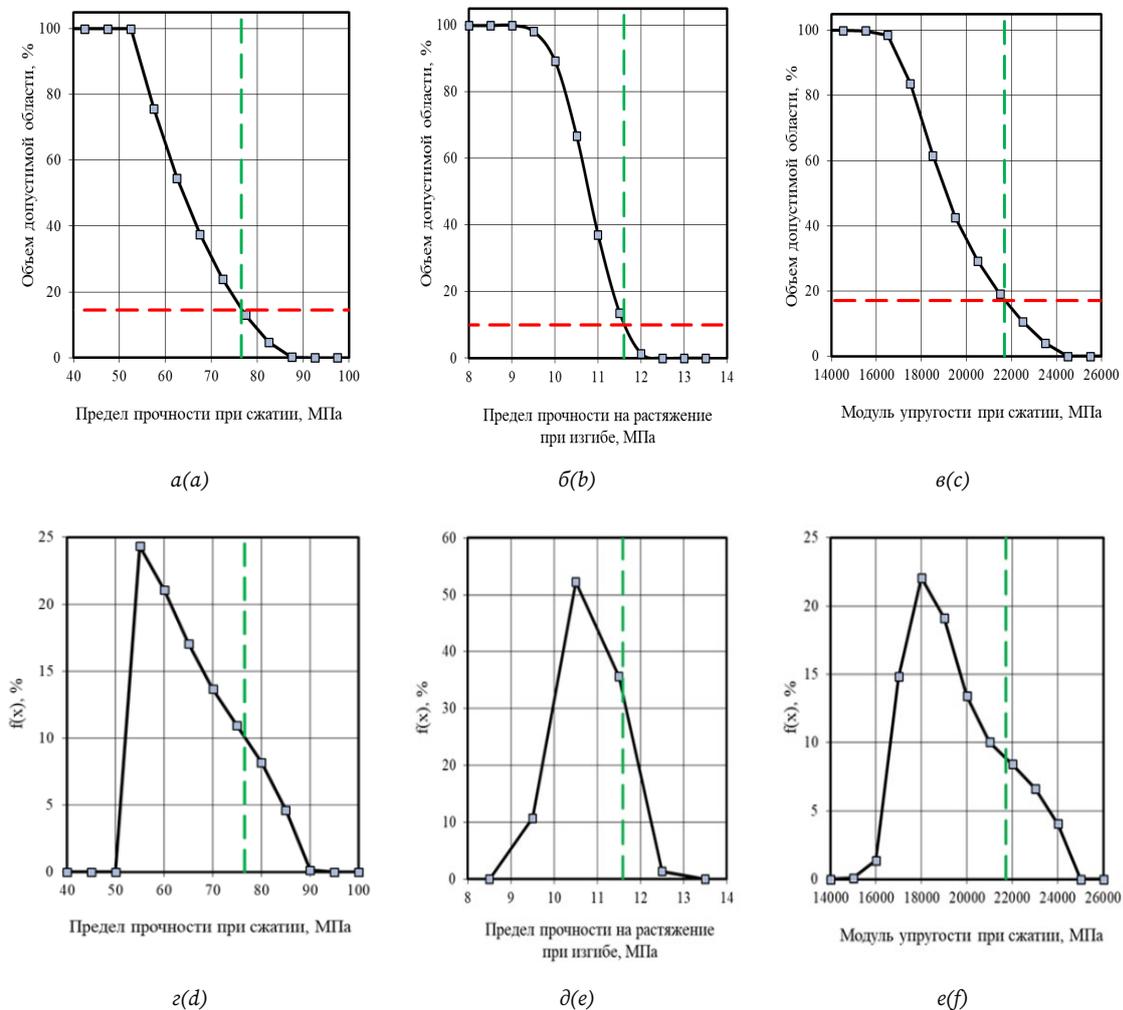
$$q(x_1, x_2, x_3) = \min \left\{ \frac{R_{сж.28}}{R_{сж.треб.28}}, \frac{R_{изг.28}}{R_{изг.треб.28}}, \frac{E_{сж.28}}{E_{сж.треб.28}} \right\}. \quad (4)$$

Основным критерием отбора модельных составов служили упруго-прочностные характеристики немодифицированного цементного камня в возрасте 28 сут.:

$$R_{сж.28} \geq 76,5 \text{ МПа}; R_{изг.28} \geq 11,6 \text{ МПа}; E_{сж.28} \geq 21706 \text{ МПа}. \quad (5)$$

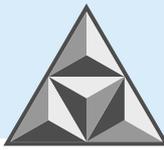
## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам оптимизации нами построены кривые изменения объемов допустимых областей, частоты появления событий (рис. 2) и зоны пересечения областей допустимых значений упруго-прочностных показателей модифицированных цементных композитов (рис. 3), а также карты распределения частоты появления составов, характеристики которых выше по сравнению с контрольным немодифицированным составом (рис. 4).

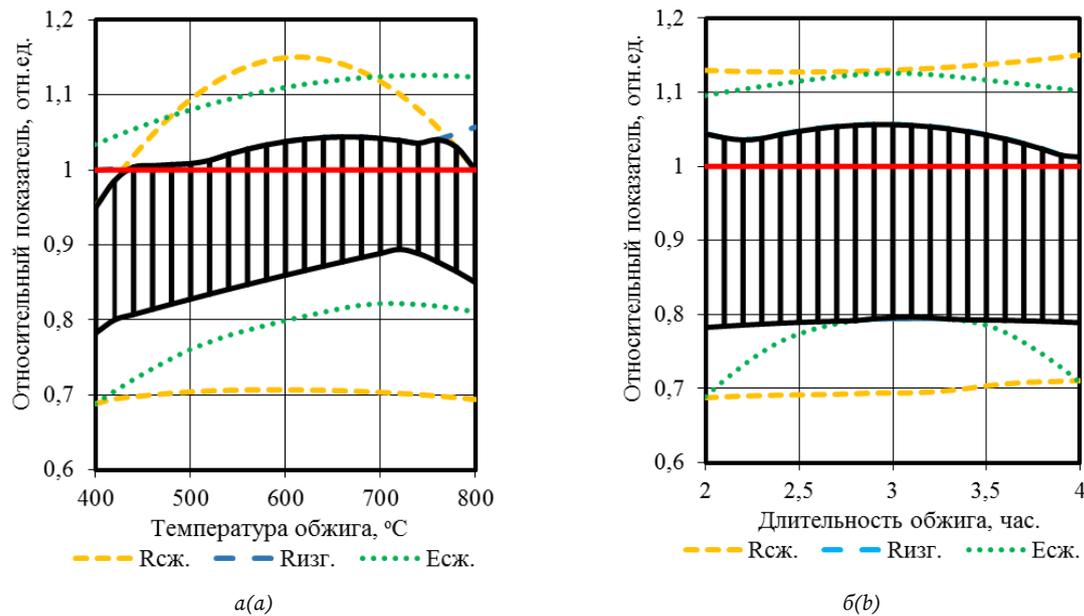


**Рис. 2.** Кривые изменения объемов допустимых областей (а, б, в) и частоты появления события (д, е, е) в зависимости от уровней пределов прочности при сжатии (а, д) и на растяжение при изгибе (б, е), модуля упругости при сжатии (в, е) модифицированных глинистых цементных композитов в возрасте 28 сут.

**Fig. 2.** Curves of volume variation of permissible areas (a, b, c) and frequency of event occurrence (d, e, e) depending on the levels of compressive (a, d) and flexural tensile strengths (b, e), compressive modulus of elasticity (c, f) of modified clayite cement composites at the period of 28 days



Анализ рис. 2 показал, что максимальная частота появления событий для предела прочности при сжатии, модуля упругости при сжатии и предела прочности на растяжение при изгибе зафиксирована на уровне 55, 18000 и 10.5 МПа соответственно. При этом объем допустимых областей исследуемых характеристик находится в диапазоне 10.0-17.1%. Максимум целевой функции (4), рассчитанный для трех условий (5), составляет 5.5%. Отметим: чем ниже объем допустимой области, тем сложнее на практике подобрать эффективное технологическое решение [19].



**Рис. 3.** Зоны пересечения областей допустимых значений изменения относительных пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, модуля упругости при сжатии цементных композитов в зависимости от варьируемых факторов: *a* – температура обжига; *b* – длительность обжига

**Fig. 3.** Zones of intersection of permissible values of changes in relative compressive and tensile strengths in bending, modulus of elasticity in compression

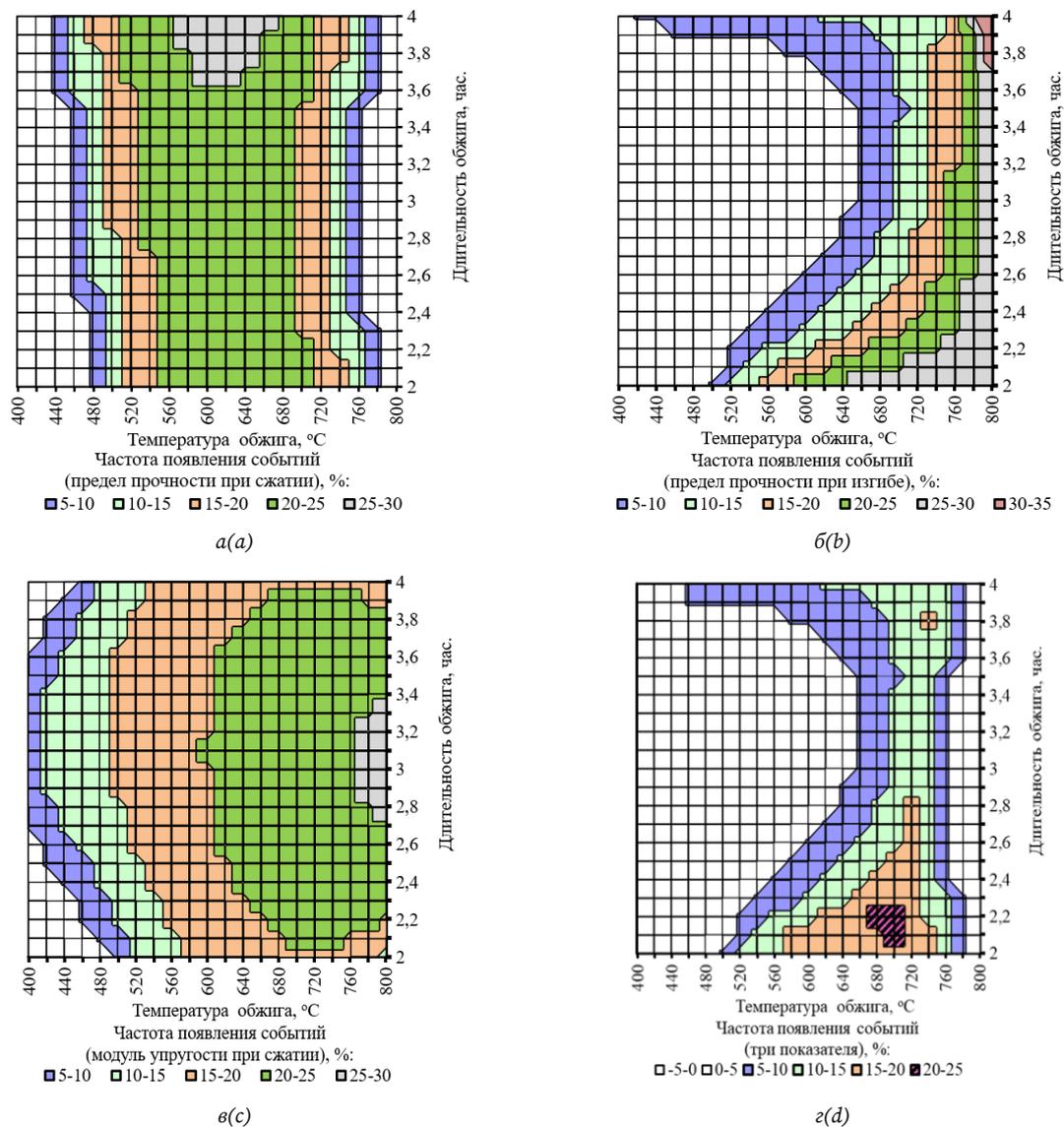
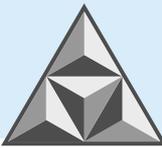
of cement composites depending on varying factors: *a* – firing temperature; *b* – firing duration

В рамках реализуемой задачи проведена оптимизация варьируемых факторов по уровню достигаемых показателей. В частности, для оценки оптимального режима приготовления минеральных добавок построены области допустимых значений исследуемых характеристик модифицированного цементного камня (рис. 3). Установлено, что введение в состав вяжущего глинистых, полученных обжигом глины при температуре 520-780°C, позволяет достичь упруго-прочностных показателей (см. табл. 4), превышающих таковые для контрольного бездобавочного композита.

**Таблица 4.** Объем допустимых областей исследуемых характеристик модельных составов

**Table 4.** Volume of permissible areas of examined characteristics for model compositions

Исследуемые характеристики	Объем допустимой области, %	
	отдельно по критериям	обобщенный
Предел прочности при сжатии, МПа	14.5	5.5
Модуль упругости при сжатии, МПа	17.1	
Предел прочности на растяжение при изгибе, МПа	10.0	

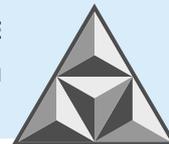


**Рис. 4.** Распределение частоты появления составов, упруго-прочностные характеристики композитов на основе которых превышают контрольный немодифицированный состав при анализе отдельных показателей (а – предел прочности при сжатии, б – предел прочности на растяжение при изгибе, в – модуль упругости при сжатии) и проведении многокритериальной оптимизации (г) в зависимости от температуры и длительности обжига

**Fig. 4.** Distribution of frequency of compositions occurrence, whose elastic-strength characteristics exceed the control unmodified composition both in the analysis of individual parameters (а – compressive strength, б – tensile strength in bending, в – modulus of elasticity in compression) and multicriteria optimisation (г) depending on temperature and firing duration

На рис. 4 представлены карты распределения частоты появления событий, соответствующих исследуемым показателям цементного камня. Карты распределения построены как для отдельных показателей модельных составов (рис. 4, а – в), так и при многокритериальной их оптимизации (рис. 4, г). Расчеты производили в процентах относительно числа значений модельных составов, соответствующих указанной температуре и времени обжига. При этом на графиках отброшены области, для которых частота появления событий составила < 5% (белый фон).

Вероятность появления модельных составов с показателями предела прочности при сжатии, превышающими таковые для контрольного состава, достигает 25-30%; при этом обжиг глины должен проводиться в течение 3.7-4.0 ч при температуре 570-650°C. Максимальные



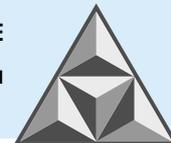
значения предела прочности на растяжение при изгибе и модуля упругости при сжатии достигаются обжигом при температуре выше 765°C в течение 2.0-4.0 и 2.8-3.3 ч соответственно. При этом оптимальный режим обжига для удовлетворения трех исследуемых условий (5) функции (4) соответствует температуре 670-715°C при длительности обжига от 2.05 до 2.25 ч.

## ВЫВОДЫ

С применением методов экспериментально-статистического моделирования определена оптимальная температура обжига глины для получения смешанных цементных вяжущих с комплексом улучшенных свойств, не уступающих свойствам контрольного бездобавочного состава. Выявлены условия обжига глины Старошайговского месторождения для получения активной минеральной добавки – 2 ч при температуре 700°C. Использование разработанной добавки позволяет расширить минерально-сырьевую базу производства модифицированных бетонов с пониженным расходом цемента, не уступающих по физико-механическим характеристикам бездобавочным материалам.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Хозин В.Г., Хохряков О.В., Сибгатуллин И.Р.** «Карбонатные» цементы низкой водопотребности. М.: Изд. АСВ. 2021. 366 с.
2. **Баженов Ю.М., Чернышов Е.М., Коротких Д.Н.** Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // *Строительные материалы*. 2014. № 3. С. 6-14.
3. **Каприелов С.С., Батраков В.Г., Шейнфельд А.В.** Модифицированные бетоны нового поколения: реальность и перспектива // *Бетон и железобетон*. 1999. №6. С. 6-10.
4. **Давидюк А.Н.** Бетон в строительстве – Новые вызовы и перспективы // *Вестник НИЦ. Строительство*. 2017. №12. С. 5-13.
5. **Kalashnikov V.I., Tarakanov O.V., Kusnetsov Y.S, Volodin V.M., Belyakova E.A.** Next generation concrete on the basis of fine-grained dry powder mixes // *Magaz. Civ. Eng.* 2012. № 8(34). pp. 47-53.
6. **Низина Т.А., Балыков А.С., Коровкин Д.И., Володин С.В., Володин В.В.** Влияние комплексных модификаторов на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и минеральных добавок различного состава на технологические и физико-механические свойства цементных систем // *Регион. архитектура и строительство*. 2022. № 1 (50). С. 28-36.
7. **Schulze S.E., Pierkes R., Rickert J.** Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials // *Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement*. Beijing, China. 2015. 693 p.
8. **Castello L.R., Hernandez H.J.F., Scrivener K.L., Antonic M.** Evolution of calcined clays soils as supplementary cementitious materials // *Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement*. Instituto de Ciencias de la Construction «Eduardo torroja». Madrid. 2011. P. 117.
9. **Fernandez R., Martizena F., Scrivener K.L.** The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison be-tween kaolinite, illite and montmorillonite // *Cement and Concrete Research*. 2011. № 41. P. 113-122.
10. **Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р., Гайфуллин А.Р.** Влияние добавок в портландцемент прокаленной и молотой глины с содержанием 40% каолинита на прочность цементного камня // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 2. С. 131-133.
11. **Гайфуллин А.Р., Рахимов Р.З., Рахимова Н.Р.** Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня // *Инж.-строительный журнал*. 2015. № 7 (59). С. 66-73.
12. **Селяев В.П., Ямашкин А.А., Куприяшкина Л.И.** Минерально-сырьевая база строительной отрасли Мордовии: практ. пособие. Ч. 1: Глины и суглинки. 2013. Саранск: Изд. Мордовского ун-та. 152 с.
13. **Balykov A.S., Nizina T.A., Volodin V.V., Kyashkin V.M.** Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems // *Mat. Sci. Forum*. 2021. Vol. 1017. P. 61-70.



14. **Низина Т.А., Володин В.В., Бальков А.С.** Влияние добавок на основе обожженной глины на прочность модифицированного цементного камня // *Регион. архитектура и строительство*. 2019. № 3 (40). С. 58-67.
15. **Низина Т.А., Володин В.В., Бальков А.С., Коровкин Д.И.** Оценка кинетики твердения цементного камня, модифицированного добавками термоактивированной глины и карбонатных пород // *Регион. архитектура и строительство*. 2021. № 1 (46). С. 86-94.
16. **Низина Т.А., Бальков А.С., Володин В.В.** Влияние термоактивированных глин и карбонатных пород на фазовый состав и свойства модифицированного цементного камня // *Изв. высш. учеб. заведений. Строительство*. 2019. № 8 (728). С. 45-55.
17. **Низина Т.А., Володин В.В., Макридин Н.И., Тараканов О.В.** Вязкость разрушения мелкозернистых бетонов, модифицированных минеральными добавками на основе термоактивированных глинистых и карбонатных пород // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, № 2. С. 43-54.
18. **Володин В.В., Низина Т.А.** Анализ минерально-сырьевой базы Республики Мордовия, пригодной для производства активных минеральных добавок // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 1 (20). С. 59-62.
19. **Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А.** Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Изд. Астропринт. 2017. 168 с.
20. **Гарькина И.А., Данилов А.М., Прошин А.П.** Математические методы в строительном материаловедении. Саратов: Изд. Саратов. ун-та. 2001. 188 с.

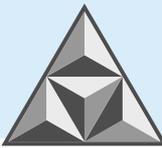
Поступила в редакцию 12.07.2024

Одобрена после рецензирования 28.08.2024

Принята к опубликованию 05.09.2024

## REFERENCES

1. **Khazin, V.G., Khokhryakov, O.V. and Sibgatullin, I.R.** (2021), «Karbonatnye» cementy nizkoj vodopotrebnosti [‘Carbonate’ cements of low water consumption]. Izd. ASV., Moscow, Russia.
2. **Bazhenov, J.M., Chernyshov, E.M. and Korotkikh, D.N.** (2014), "Designing of modern concrete structures: determining principles and technological platforms", *Stroitel'nye materialy [Construction materials]*, no. 3, pp. 6-14 (in Russian).
3. **Kaprielov, S.S., Batrakov, V.G. and Sheinfeld A.V.** (1999), "Modified concretes of new generation: reality and prospect", *Beton i zhelezobeton [Concrete and Reinforced Concrete]*, no. 6, pp. 6-10 (in Russian).
4. **Davidyuk, A.N.** (2017), Concrete construction - New challenges and prospects, *Vestnik NIC. Stroitel'stvo [Bulletin of SIC. Construction]*, no. 12, pp. 5-13 (in Russian).
5. **Kalashnikov, V.I., Tarakanov, O.V., Kusnetsov, Y.S, Volodin, V.M. and Belyakova E.A.** (2012), "Next generation concrete on the basis of fine-grained dry powder mixes", *Magaz. Civ. Eng.*, no. 8 (34), pp. 47-53.
6. **Nizina, T.A., Balykov, A.S., Korovkin, D.I., Volodin, S.V. and Volodin, V.V.** (2022), The effect of complex modifiers on the basis of polycarboxylate superplasticizer and mineral additives of different compositions on technological and physical-mechanical properties of cement systems, *Region. arkhitektura i stroitel'stvo [Regional architecture and engineering]*, no. 1 (50), pp. 28-36 (in Russian).
7. **Schulze, S.E., Pierkes, R. and Rickert, J.** (2015), "Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementitious materials", Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement. Beijing, China. 693 p.
8. **Castello, L.R., Hernandes, H.J.F., Scrivener, K.L. and Antonic, M.** (2011), "Evolution of calcined clays soils as supplementary cementitious materials", Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement. Instituto de Ciencias de la Construction «Eduardo torroja». Madrid, p. 117.
9. **Fernandez, R., Martizena, F. and Scrivener, K.L.** (2011), "The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite", *Cement and Concrete Research*, no. 41, pp. 113-122.
10. **Rahimov, R.Z., Rahimova, N.R. and Gaifullin, A.R.** (2015), "The Influence of Addition of Calcined and Grinded Clay Containing 40% Kaolinite into Portland Cement on the Solidity of the Cement Stone". *Academia. Arkhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, no. 2, pp. 131-133 (in Russian).



11. **Gaifulin A.R., Rakhimov R.Z., Rakhimova N.R.** (2015), "The influence of clay additives in Portland cement on the compressive strength of the cement stone", *Inzh.-stroitel'niy zhurnal [Magazine of Civil Engineering]*, no. 7 (59), pp. 66-73 (in Russian).
12. **Selyaev V.P., Yamashkin A.A., Kupriyashkina L.I.** (2013), *Mineral'no-syr'evaya baza stroitel'noj otrasli Mordovii: prakt. posobie. Ch. 1: Gliny i suglinki. [Mineral and raw material base of the construction industry of Mordovia: practical manual. Part 1: Clays and loams]*, Izd. of Mordovian University, Saransk (in Russian).
13. **Balykov, A.S., Nizina, T.A., Volodin, V.V. and Kyashkin, V.M.** (2021), "Effects of calcination temperature and time on the physical-chemical efficiency of thermally activated clays in cement systems", *Mat. Sci. Forum*, Vol. 1017, pp. 61-70.
14. **Nizina, T.A., Volodin, V.V. and Balykov, A.S.** (2019), "Effect of additives based on burnt clay on the strength of modified cement stone", *Region. arhitektura i stroitel'stvo [Region. architecture and construction]*, no. 3(40), pp. 58-67 (in Russian).
15. **Nizina, T.A., Volodin, V.V., Balykov, A.S. and Korovkin, D.I.** (2021), "Evaluation of kinetics of hardening of cement stone modified with additives of thermally activated clay and carbonate rocks", *Region. arhitektura i stroitel'stvo [Region. architecture and construction]*, no. 1 (46), pp. 86-94 (in Russian).
16. **Nizina, T.A., Balykov, A.S. and Volodin, V.V.** (2019), "Influence of thermoactivated clays and carbonate rocks on the phase composition and properties of modified cement stone", *Izv. vyssh. ucheb. zavedenij. Stroitel'stvo [Proceedings of higher educational institutions. Construction]*, no. 8 (728), pp. 45-55 (in Russian).
17. **Nizina, T.A., Volodin, V.V., Makridin, N.I. and Tarakanov, O.V.** (2023), "Fracture toughness of fine-grained concretes modified with mineral additives based on thermally activated clay and carbonate rocks", *Smart Composite in Construction*, no. 4 (2), pp. 43-54 [online]. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n2\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n2_2023) (accessed 12.05.2024) (in Russian).
18. **Volodin, V.V. and Nizina, T.A.** (2023), "Analysis of the mineral raw material base of the Republic of Mordovia suitable for the production of active mineral additives", *Ekspert: teoriya i praktika [Expert: theory and practice]*, no. 1 (20), pp. 59-62 (in Russian).
19. **Lyashenko, T.V. and Voznesensky, V.A.** (2017), *Metodologiya recepturno-tekhnologicheskikh polej v komp'yuternom stroitel'nom materialovedenii [Methodology of formulation-technological fields in computer construction materials science]*. Izd. Astroprint, Odessa.
20. **Garkina, I.A., Danilov, A.M. and Proshin, A.P.** (2001), *Matematicheskie metody v stroitel'nom materialovedenii [Mathematical methods in building materials science]*, Izd. Saratov. un-ta, Saratov (in Russian).

Received 12.07.2024

Approved 28.08.2024

Accepted 05.09.2024



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 666.973.3

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-31-41

# Исследование свойств проницаемого бетона

**А.И. Кравцов, А.А. Макаева, И.А. Оденбах**

**Алексей Иванович Кравцов\***, **Альмира Абдулхаевна Макаева**, **Ирина Александровна Оденбах**  
Оренбургский государственный университет, Оренбург, Российская Федерация  
*alivkr@mail.ru\**, *alla\_ish@mail.ru*, *79128486201@yandex.com*



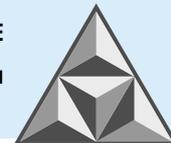
*Проницаемый бетон обладает способностью пропускать воду через свою структуру, что эффективно используется при создании дренажных систем и водопроницаемых покрытий. Основное внимание уделяется анализу зависимости физико-механических свойств проницаемого бетона от рецептурных факторов, таких как расход цемента, водоцементное отношение и добавка полипропиленовой фибры. Выполнен полный двухфакторный эксперимент и регрессионный анализ, позволяющие определить влияние каждого из вышеуказанных факторов на плотность, пористость и прочностные характеристики материала. Установлено, что плотность и пористость образцов бетона, прочность на изгиб и сжатие зависят в основном от расхода цемента. Изменение расхода полипропиленовой фибры в бетонной смеси оказывает малое влияние на прочность, но имеет значение для улучшения других эксплуатационных свойств, в частности, морозостойкости. Выявлено, что оптимизация состава проницаемого бетона с учетом расхода цемента и добавления полипропиленовой фибры позволяет получить строительный материал с требуемыми показателями прочности и пористости.*

**Ключевые слова:** проницаемый бетон, полипропиленовая фибра, физико-механические свойства, расход цемента, пористость, прочность на сжатие и изгиб

**Для цитирования:**

Кравцов А.И., Макаева А.А., Оденбах И.А. Исследование свойств проницаемого бетона // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 3. С. 31-41.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-31-41



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-31-41

# Study of properties of pervious concrete

**A.I. Kravtsov, A.A. Makaeva, I.A. Odenbakh**

**Aleksei I. Kravtsov\***, Almira A. Makaeva, Irina A. Odenbakh

Orenburg State University, Orenburg, Russia

*alivkr@mail.ru\**, *alla\_ish@mail.ru*, *79128486201@yandex.com*



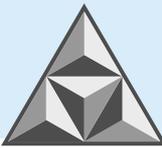
*Pervious concrete has the ability to permeate water through its structure, which makes it effective in creating drainage systems and culverts. The authors focus on analyzing the dependence of physical and mechanical properties of pervious concrete on formulation factors such as cement consumption, water-cement ratio and polypropylene fibre addition. The authors performed a complete two-factor experiment and regression analysis. It allows to determine the effect of each of the mentioned factors on the density, porosity and strength characteristics of the material. The results of the study show that the density and porosity of concrete samples, flexural and compressive strengths vary mainly with cement consumption. Changing the consumption of polypropylene fibre in the concrete mix has a negligible effect on strength but is important for improving other performance properties such as frost resistance. The study revealed that optimising the composition of pervious concrete, taking into account cement consumption and the addition of polypropylene fibre, allows the production of a construction material with the required strength and porosity values.*

**Keywords:** pervious concrete, polypropylene fibre, physical and mechanical properties, cement consumption, porosity, compressive and flexural strength

**For citation:**

Kravtsov A.I., Makaeva A.A., Odenbakh I.A. Study of properties of pervious concrete // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 3. P. 31-41. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-31-41



## ВВЕДЕНИЕ

Проницаемый бетон, известный также как «крупнопористый» («дренирующий», «фильтрующий»), представляет собой уникальный и инновационный материал, который позволяет воде проникать в его структуру. Это свойство идеально подходит для использования в системах устойчивого управления сточными водами, таких как дренажные системы и водопрпускные покрытия.

Во многих работах приводятся сведения о появлении этого материала [1-4]. В Советском Союзе еще в 30-х годах XX столетия упоминалось о крупнопористом бетоне и его свойствах [5-8]. Особенностью его состава являлось практически полное отсутствие мелкого заполнителя и высокая открытая пористость. Такой бетон применялся в качестве стенового материала, для дренажа и фильтрации [9-11]. В качестве заполнителя чаще использовались пористые породы или искусственно созданные материалы типа керамзита. С введением в 1995 г. жестких требований к теплотехническим характеристикам ограждающих конструкций зданий применение крупнопористого бетона как стенового материала в индустриальном строительстве практически прекратилось.

За рубежом, особенно в странах с мягким и влажным климатом, интерес к крупнопористому бетону возрастал, годовая активность по данной тематике к 2020 году превысила отметку 100 публикаций [12]. В своем обзоре В.Р. Фаликман отмечает, что причиной такого интереса стало возрастающее влияние экологических требований к строительным материалам и изделиям, а основной областью применения проницаемых бетонов явились несущие и дренажные слои покрытия, а также способствующие снижению уровня шума [12].

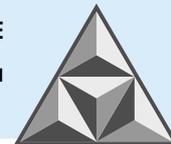
Проницаемый бетон имеет неплохие перспективы для применения в теплицах, на парковочных площадках, пешеходных дорожках и автодорогах с низким трафиком, что связано с его высокой проницаемостью и неплохими механическими характеристиками [13-18].

Структура данного материала может быть модифицирована с целью улучшения его механической прочности и увеличения срока службы, что способствует расширению области его применения в городской инфраструктуре [14].

Использование проницаемого бетона в условиях сельской местности (в частности, на тротуарах) обеспечивает устойчивый уровень грунтовых вод и благоприятствует созданию экономически выгодных систем управления стоками [19, 20].

Для проницаемого бетона, как и для обычных бетонов, главными свойствами являются прочность на сжатие и изгиб, долговечность, истираемость, плотность и пористость. Значимость этих свойств может несколько отличаться от требований к обычным бетонам. На первом месте, по нашему мнению, находится проницаемость, так как именно она является маркером для проницаемого бетона. Другое важное свойство – прочность при изгибе, поскольку проницаемый бетон довольно часто выступает в качестве элемента дорожного покрытия. Разумеется, не менее важны и другие характеристики, которые неразрывно связаны друг с другом.

При обсуждении свойств большинство авторов ссылаются на опубликованный Американским институтом бетона отчет о строительном материале ACI 522-R-10 [21], в котором изложена техническая информация о применении проницаемого бетона, методах проектирования, материалах, свойствах, пропорциях смеси, методах строительства, испытаниях и проверках.



Плотность проницаемого бетона определяется характеристиками и соотношением компонентов в смеси, а также методиками уплотнения, применяемыми во время его укладки. В большинстве случаев плотность варьируется между 1600 и 2000 кг·м<sup>-3</sup>, что позволяет отнести его к категории легких бетонов.

Проницаемость бетона для воды зависит от открытой пористости, физико-химических свойств используемых материалов и технологии укладки. Обычно водопроницаемость бетона составляет 0.2-1.2 см·с<sup>-1</sup>, а пористость колеблется в диапазоне от 15 до 35%.

Что касается механических свойств, то водопроницаемые бетонные смеси могут достигать прочности на сжатие от 3.5 МПа до 28.0 МПа. Прочность на изгиб для таких бетонов обычно находится в пределах 1.0-3.8 МПа. На этот показатель оказывает влияние множество факторов, в частности, качество уплотнения, уровень пористости и соотношение между цементом и заполнителем.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В качестве исходных материалов для изготовления образцов использовали:

- цемент АККЕРМАНН 400 производства ООО «АККЕРМАНН ЦЕМЕНТ» (г. Новотроицк);
- щебень фракции 5...10 мм производства АО «Орское карьероуправление»;
- фибру полипропиленовую ТУ 2499-007-90557835-2014 (ООО «Цеммикс»).

Измерение плотности и объема пустот проводили в соответствии со стандартом ASTM C1754 [21]. Для этого бетонные образцы сначала сушили при повышенной температуре (105°C), регистрировали их массу, затем погружали в воду на 30 мин для удаления воздушных пузырьков из пустот. После этой процедуры для каждого образца измеряли массу в погруженном состоянии, что позволяет определить плотность материала и его пористость.

По стандарту ГОСТ 310.4-81 [22], прочность на сжатие определяется как максимальное одноосное сжимающее напряжение, при котором происходит разрушение материала. При испытании использовали металлические прокладки, обеспечивающие площадь нагружения 25 см<sup>2</sup>. В документе ACI 522R [23] указано, что минимальная прочность на сжатие должна быть  $\geq 3.0$  МПа.

Прочностные испытания на изгиб в соответствии с ГОСТ 310.4-81[22] включают приложение нагрузки к бетонному образцу в форме балочки с сечением 4×4×16 см, при этом нагрузка прилагается в центре образца. Согласно рекомендациям ACI 522R [23], прочность материала на изгиб должна превышать 1.0 МПа.

Для определения влияния рецептурных факторов на свойства проницаемого бетона реализовали полный двухфакторный эксперимент; параметры представлены в табл. 1.

**Таблица 1.** Параметры плана эксперимента

**Table 1.** Experimental design parameters

Наименование фактора	Код	Нижний уровень (-1)	Основной уровень (0)	Верхний уровень (+1)	Интервал варьирования
Цемент, кг·м <sup>-3</sup>	x1:	280	325	370	45
Фибра, кг·м <sup>-3</sup>	x2:	0.93	1.85	2.77	0.92

В соответствии с принятой методикой эксперимента изготавливали образцы-балочки размером 4×4×16 см (рис. 1). Водоцементное отношение составляло 0.4, уплотнение смеси осуществлялось трамбованием.

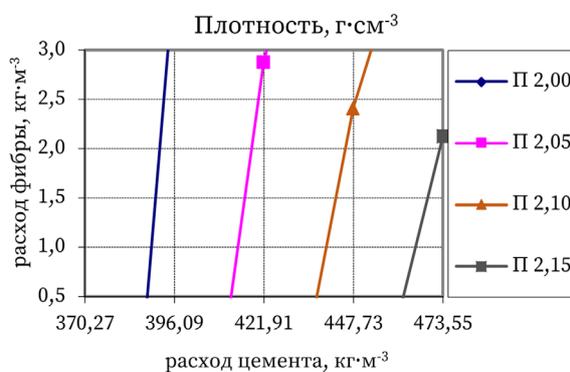


**Рис. 1.** Экспериментальные образцы для испытаний  
**Fig. 1.** Experimental samples for testing

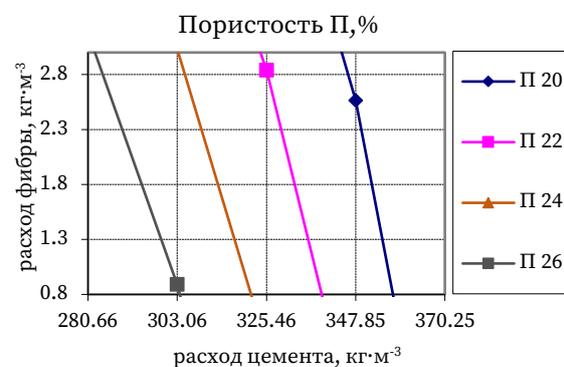
Образцы выдерживали в течение 1 сут. в нормальных условиях, затем осуществляли тепловую обработку при 80°C еще 3 ч, а после – неконтролируемое остывание. После твердения определяли плотность и пористость образцов, прочность на изгиб и сжатие.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе эксперимента получены уравнения регрессии, отражающие зависимость исследуемых свойств от варьируемых факторов. По уравнениям регрессии построены изолинии исследуемых свойств – плотности (рис. 2), пористости (рис. 3), прочности на изгиб (рис. 4) и сжатие (рис. 5).



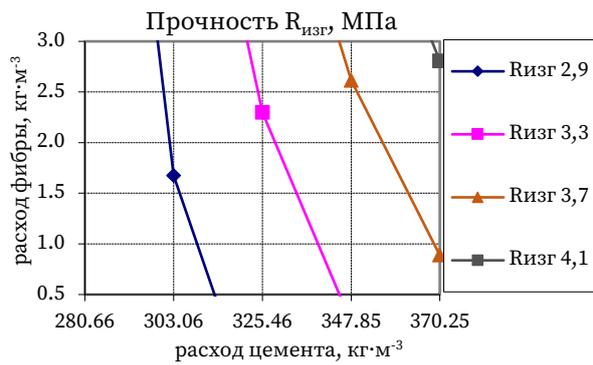
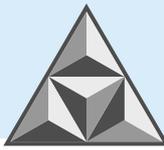
**Рис. 2.** Изолинии плотности бетонных образцов; г·см<sup>-3</sup>  
**Fig. 2.** Concrete sample density isolines; g·cm<sup>-3</sup>



**Рис. 3.** Изолинии пористости бетонных образцов; %  
**Fig. 3.** Concrete sample porosity isolines; %

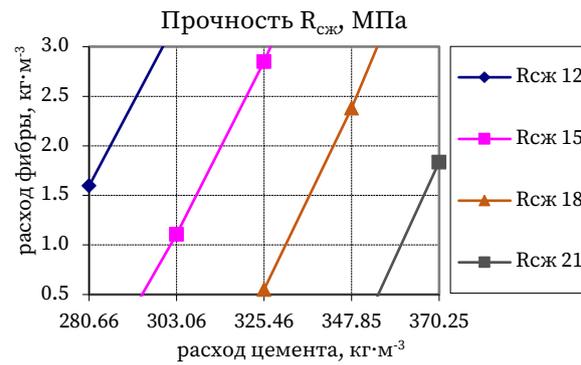
На исследуемом факторном пространстве плотность образцов бетона находится в интервале 1.9...2.2 г·см<sup>-3</sup>, пористость колеблется от 18 до 28%. По результатам анализа уравнений регрессии, параметры плотности и пористости бетона зависят только от расхода цемента: с ростом последнего плотность материала увеличивается, а пористость, напротив, снижается (см. рис. 2, 3).

На прочностные характеристики материала – прочность на изгиб (рис. 4.) и сжатие (рис. 5) – также в наибольшей степени влияет расход цемента: с увеличением его расхода прочность на изгиб и на сжатие закономерно возрастают.



**Рис. 4.** Изолинии прочности бетонных образцов на изгиб, МПа

**Fig. 4.** Isolines of flexural strength of concrete samples; МПа



**Рис. 5.** Изолинии прочности бетонных образцов на сжатие, МПа

**Fig. 5.** Isolines of compressive strength of concrete samples; МПа

Оптимизация физико-механических свойств проницаемого бетона является важной задачей, которая часто рассматривается как приоритетная. Исследуется взаимосвязь прочностных характеристик бетона между собой [24] и их зависимость от пористости [25] и рецептурных факторов [26]. В [27], в частности, обобщены особенности влияния расхода цемента и водоцементного отношения, песчаной фракции и специальных добавок на свойства проницаемого бетона. Также распространено модифицирование структуры бетона с помощью дисперсного армирования и введения микродобавок [27-30], благодаря чему удается достичь требуемых прочностных характеристик строительного материала.

Ранее [31] при исследовании влияния на прочностные свойства проницаемого бетона добавок дисперсных полимерных волокон было выявлено значительное увеличение прочности. Однако в отдельных источниках [27] отмечается, что содержание волокна в составе бетона на прочностные характеристики влияет незначительно, но оказывается важным для повышения морозостойкости материала. Также представляется, что фиксированное увеличение прочности бетона при введении полипропиленового волокна может наблюдаться только для материала с изначально невысокими характеристиками [29, 31]. Для более прочного проницаемого бетона этот эффект нивелируется, а определяющим фактором в данном случае является расход вяжущего.

## ВЫВОДЫ

Полученные экспериментальные данные позволяют установить взаимосвязь прочностных характеристик проницаемого бетона и его рецептурных факторов. Изменение содержания в проницаемом бетоне полипропиленового волокна слабо влияет на его прочность при изгибе и сжатии; значимым фактором является расход цемента.

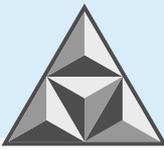
На исследуемом факторном пространстве получены проницаемые бетоны с пористостью 18-28%, прочностью на изгиб 2.5-4.0 МПа и на сжатие 10.0-22.0 МПа.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Obla, K.H.** (2010) 'Pervious concrete – An overview' // *Ind. Concrete J.* Vol. 84, no. 8. P. 9.
2. **Bakshi P., Malik A., Parihar A.S., Ahamad A.** (2016). Pervious Concrete // *Int. J. Sci. Res.* Vol. 5, no. 4. P. 98-103.
3. **Dash S., Kar B.** Environment friendly pervious concrete for sustainable construction // *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.* IOP Publ., 2018. Vol. 410, no. 1. P. 012005.



4. **Tennis P.D., Leming M.L., Akers D.J.** Pervious concrete pavements. 2004. Vol. 8. Skokie, IL: Portland Cement Association.
5. **Скрамтаев Б.Г.** Новый вид теплого бетона. В кн.: Александрин И.П., Скрамтаев Б.Г. Теплый бетон. Л.: Изд. ин-та бетонов. 1931. С. 26-35.
6. **Скрамтаев Б.Г.** Бетоны различных видов. М.: Стройиздат. 1933.
7. **Попов Н.А.** Крупнопористые бетоны. В кн.: Строительная индустрия: Справ. руководство. Т. IV. М., 1934. С. 373-374.
8. **Коноров А.Б.** Опыт работы с крупнопористым бетоном // *Строитель*. 1935. № 3. С.5-14.
9. **Щербина И.Н.** Сборные дренажи из пористых блоков. // *Информ. сб. Гидропроекта*. № 2. М., 1953.
10. **Минас А.И., Печикин О.Я.** Дренажные трубы из крупнопористого бетона для использования в агрессивных средах // *Гидротехника и мелиорация*. 1973. № 10. С. 83-86.
11. **Диковский И.А.** Стены промышленных зданий из крупнопористого бетона // *Промышл. строительство*. 1960. № 4. С. 54-56.
12. **Фаликман В.Р., Сиротин П.Н.** Проницаемый бетон: новые вызовы в эпоху устойчивого развития // *Промышл. и гражд. строительство*. 2020. № 5. С.28-35.
13. **Nguyen D., Sebaibi N., Boutouil M., Leleyter L., Baraud F.** A modified method for the design of pervious concrete mix // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 73. P. 271-282. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.09.088>.
14. **Zhong R., Wille K.,** Material design and characterization of high performance pervious concrete // *Construction and Building Materials*. 2015. Vol. 98. P. 51-60. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.027>.
15. **Sabnis G.** Pervious Concrete for Sustainable Development. 2007. P. 167-190. <https://doi.org/10.1201/B11376-12>.
16. **Guntakal S., Selvan, S.,** 2017. Application of pervious concrete for pavements: A rev. <https://doi.org/10.7324/RJC.2017.1011533>.
17. **Padate S., Rakshe P., Waghmare A., Pachore S., Mudawat V.** Feasibility of Pervious Concrete in Pavement // *Imper. J. Iinterdiscipl. Res.* 2017. Vol. 3.
18. **Kováč M., Sičáková A.,** 2017. Pervious concrete as a sustainable solution for pavements in urban areas. <https://doi.org/10.3846/ENVIRO.2017.031>.
19. **Kuskiwala A.** A Study on Pervious Concrete: A Rev. // *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Techn.* 2018. Vol. 6. P. 3415-3417. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.1476>.
20. **Ab Latif A., Putrajaya R., Ing D.S.** (2023). A Review of Porous Concrete Pavement: Compressive Strength and Clogging Investigation // *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Tech.* Vol. 29, no. 3. P. 128-138. DOI: <https://doi.org/10.37934/araset.29.3.128138>.
21. American society for testing and materials. ASTM C1754 / C1754M-12, Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
22. ГОСТ 310.4-81. Цементы. Методы определения пределов прочности при изгибе и сжатии. М.: ИПК Изд-во стандартов. 2006.
23. American Concrete Institute. ACI 522R-10: Report on pervious concrete // Farmington Hills, MI. 2010.
24. **Ahmed F.B., Mitu S.M., Biswas R.K., Ahsan K.A., Mim S.M., Ahmed S.** Forecast flexural strength of pervious concrete by SVR. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 45. P. 5277-5284.
25. **Joung Y.** Evaluation and optimization of pervious concrete with respect to permeability and clogging. 2010. Doctoral dissertation, Texas A & M University.
26. **Hamoodi A.Z., Kadim J.A., Chkheiwier A.H.** Properties of pervious concrete made from graded and single size crushed coarse aggregate // *Period. Eng. Nat. Sci.* 2021. Vol. 9, no. 1. P. 361-376.
27. **Seeni B.S., Madasamy M.** A review of factors influencing performance of pervious. *Građevinar*. 2021. Vol. 73, no. 10. P. 1017-1030.
28. **Paganggi W.R., Makmur A., Rachmansyah R.** Pengaruh Penambahan Serat Polypropylene terhadap Kuat Tekan dan Nilai Permeabilitas pada Beton Berpori // *Media Komunikasi Teknik Sipil*. 2021. Vol. 27, no. 1. P. 3135-142. doi: mkts.v27i1.31536
29. **Baskar I., Thiruvannamalai M., Theenathayalan R.** Experimental study on mechanical properties of polypropylene fiber reinforced pervious concrete // *Int. J. Civ. Eng. Tech.* 2019. Vol. 10, no. 2. P. 977-987.



30. **Patidar R., Yadav S.** Experimental study of pervious concrete with polypropylene fiber // *Int. Res. J. Eng. Technol.* 2017. Vol. 4, no. 12. P. 22-27.
31. **Маршинская О.А.** К вопросу о повышении прочности крупнопористого бетона // *Шаг в науку.* 2023. №. 4. С. 64-69.

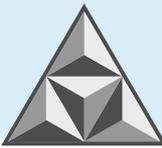
Поступила в редакцию 10.05.2024

Одобрена после рецензирования 19.08.2024

Принята к опубликованию 05.09.2024

## REFERENCES

1. **Obla, K.H.** (2010), "Pervious concrete – An overview", *Ind. Concrete J.*, Vol. 84, no. 8, p. 9.
2. **Bakshi, P., Malik, A., Parihar, A.S. and Ahamad, A.** (2016), "Pervious Concrete", *Int. J. Sci. Res.*, Vol. 5, no. 4, pp. 98-103.
3. **Dash, S. and Kar, B.** (2018), "Environment friendly pervious concrete for sustainable construction", *IOP Conf. Ser.: Mat. Sci. Eng.* IOP Publ., Vol. 410, no. 1, pp. 012005.
4. **Tennis, P.D., Leming, M.L. and Akers, D.J.** (2004), "Pervious concrete pavements", Vol. 8. Skokie, IL: Portland Cement Association.
5. **Skramtaev, B.G.** (1931), A new type of warm concrete. In: Alexandrii, I.P., Skramtaev, B.G. Warm Concrete. Leningrad: Publishing Institute of Concrete, pp. 26-35 (in Russian).
6. **Skramtaev, B.G.** (1933), *Concretes of Various Types*, Stroyizdat, Moscow (in Russian).
7. **Popov, N.A.** (1934), *Porous Concretes, Construction Industry: Reference Guide*, 4, Moscow, pp. 373-374 (in Russian).
8. **Konorov, A.B.** (1935), Experience with porous concrete, *'Stroitel' [Constructor]*, no. 3, pp. 5-14 (in Russian).
9. **Shcherbina, I.N.** (1953), "Prefabricated Drains from Porous Blocks", *Inform. Bull. of Gidroproekt [Hydroproject's information book]*, no. 2, Moscow (in Russian).
10. **Minas, A.I. and Pechikin, O.Ya.** (1973), "Drainage pipes from porous concrete for use in aggressive environments", *Gidrotekhnika i melioratsiya [Hydraulic engineering and melioration]*, no. 10, pp. 83-86 (in Russian).
11. **Dikovskiy, I.A.** (1960), "Walls of industrial buildings from porous concrete", *Promyshlennoe stroitel'stvo [Industrial construction]*, no. 4, pp. 54-56 (in Russian).
12. **Falikman, V.R. and Sirotin, P.N.** (2020), "Pervious concrete: new challenges in the era of sustainable development", *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo [Industrial and civil engineering]*, no. 5, pp. 28-35 (in Russian).
13. **Nguyen, D., Sebaibi, N., Boutouil, M., Leleyter, L. and Baraud, F.** (2014), "A modified method for the design of pervious concrete mix", *Construction and Building Materials.*, Vol. 73, pp. 271-282. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2014.09.088> (accessed 28.04.2024).
14. **Zhong, R. and Wille, K.** (2015), "Material design and characterization of high performance pervious concrete", *Construction and Building Materials.*, Vol. 98, pp. 51-60. Available at: <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2015.08.027>. (accessed 10.04.2024).
15. **Sabnis, G.** (2007), "Pervious Concrete for Sustainable Development", pp. 167-190. Available at: <https://doi.org/10.1201/B11376-12> (accessed 10.04.2024).
16. **Guntakal, S. and Selvan, S.** (2017), "Application of pervious concrete for pavements: A rev." Available at: <https://doi.org/10.7324/RJC.2017.1011533> (accessed 10.04.2024).
17. **Padate, S., Rakshe, P., Waghmare, A., Pachore, S. and Mudawat, V.** (2017), "Feasibility of Pervious Concrete in Pavement", *Imper. J. Interdiscipl. Res.* Vol. 3.
18. **Kováč, M. and Sičáková, A.** (2017), "Pervious concrete as a sustainable solution for pavements in urban areas", Available at: <https://doi.org/10.3846/ENVIRO.2017.031> (accessed 02.05.2024).
19. **Kuskiwala, A.** (2018), "A Study on Pervious Concrete: A Rev.", *Int. J. Res. Appl. Sci. Eng. Techn.*, Vol. 6, pp. 3415-3417. Available at: <https://doi.org/10.22214/ijraset.2018.1476> (accessed 10.04.2024).
20. **Ab Latif, A., Putrajaya, R. and Ing, D.S.** (2023), "A Review of Porous Concrete Pavement: Compressive Strength and Clogging Investigation", *J. Adv. Res. Appl. Sci. Eng. Tech.*, Vol. 29, no. 3, pp. 128-138. Available at: DOI: <https://doi.org/10.37934/araset.29.3.128138> (accessed 09.04.2024).

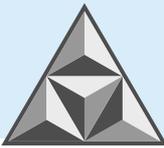


21. American society for testing and materials. ASTM C1754 / C1754M-12, Standard Test Method for Density and Void Content of Hardened Pervious Concrete (2012), ASTM International, West Conshohocken, PA.
22. GOST 310.4-81. Cements. Methods for determining the limits of strength in bending and compression. (2006), Introduced 1983-07-01. Moscow: IPK Publishing Standards (in Russian).
23. American Concrete Institute. ACI 522R-10: Report on pervious concrete (2010), Farmington Hills, MI.
24. **Ahmed, F.B., Mitu, S.M., Biswas, R.K., Ahsan, K.A., Mim, S.M. and Ahmed, S.** (2021), "Forecast flexural strength of pervious concrete by SVR", *Materials Today: Proceedings*, Vol. 45, pp. 5277-5284.
25. **Joung, Y.** (2010), Evaluation and optimization of pervious concrete with respect to permeability and clogging. Doctoral dissertation, Texas A & M University.
26. **Hamoodi, A.Z., Kadim, J.A. and Chkheiw, A.H.** (2021), "Properties of pervious concrete made from graded and single size crushed coarse aggregate", *Period. Eng. Nat. Sci.*, Vol. 9, no. 1. pp. 361-376.
27. **Seeni, B.S. and Madasamy, M.** (2021), "A review of factors influencing performance of pervious", *Gradevinar*, Vol. 73, no. 10, pp. 1017-1030.
28. **Paganggi, W.R., Makmur, A. and Rachmansyah, R.** (2021), "Pengaruh Penambahan Serat Polypropylene terhadap Kuat Tekan dan Nilai Permeabilitas pada Beton Berpori", *Media komunikasi Teknik Sipil*, no. 27(1), pp. 135-142. doi: mkts.v27i1.31536.
29. **Baskar, I., Thiruvannamalai, M. and Theenathayalan, R.** (2019), "Experimental study on mechanical properties of polypropylene fiber reinforced pervious concrete", *Int. J. Civ. Eng. Tech*, Vol. 10, no. 2, pp. 977-987.
30. **Patidar, R. and Yadav, S.** (2017), "Experimental study of pervious concrete with polypropylene fiber", *Int. Res. J. Eng. Technol.*, Vol. 4, no. 12, pp. 22-27.
31. **Marshinskaya, O.A.** (2023), "On the issue of increasing the strength of porous concrete", *Shag v nauku [Step into science]*, no. 4, pp. 64-69 (in Russian).

*Received 10.05.2024*

*Approved 19.08.2024*

*Accepted 05.09.2024*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.72

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-42-52

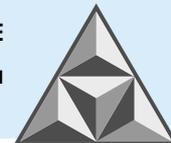
# Технологии информационного моделирования в концепции устойчивого строительства автомобильных дорог

**Л.А. Богуславский, Г.В. Проваторова**

**Леонид Анатольевич Богуславский\*, Галина Владимировна Проваторова**

Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых, Владимир, Российская Федерация

*leon1dbogi@gmail.com\**, *asf.inst@yandex.ru*



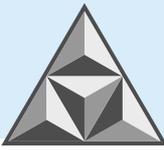
*На основе проведенного анализа открытых статистических данных сделан вывод о быстром росте в России объема промышленных и бытовых отходов, большая часть которых не утилизируется. Растущее влияние строительной отрасли на окружающую среду приводит к необходимости разработки на государственном уровне «зеленых» стандартов проектирования и строительства автомобильных дорог. Рассмотрены особенности строительного сектора в контексте устойчивого развития дорог, одним из инструментов которого является применение информационных моделей, обеспечивающих энергоэффективность и экологичность проектов. Охарактеризованы эколого-ориентированные направления развития проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог. В качестве примера представлено программное обеспечение One Click LCA, позволяющее производить оценку воздействия возводимого объекта – автомобильной дороги на окружающую среду на протяжении всего жизненного цикла.*

**Ключевые слова:** автомобильные дороги, устойчивое проектирование, устойчивое строительство, технологии информационного моделирования, экология

**Для цитирования:**

Богуславский Л.А., Проваторова Г.В. Технологии информационного моделирования в концепции устойчивого строительства автомобильных дорог // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 3. С. 42-52. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-42-52



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-42-52

# Information modelling technologies in the concept of sustainable road construction

**L.A. Boguslavsky, G.V. Provatorova**

**Leonid A. Boguslavsky\*, Galina V. Provatorova**

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

*leon1dbogi@gmail.com\**, *asf.inst@yandex.ru*



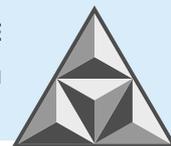
*Based on the analysis of open statistical data, the authors conclude that the volume of industrial and household waste is growing rapidly, most of which is not recycled. The growing environmental impact of the construction industry is leading to the development of green standards for highway design and construction at the state level. The paper considers the peculiarities of the construction sector in the context of sustainable road development. One of the tools for such development is the application of information models that ensure energy efficiency and environmental friendliness of the project. The paper characterises the ecologically-oriented directions of development of design, construction and operation of automobile roads. The authors present One Click LCA software as an example. It allows to assess the environmental impact of the constructed object - a road - throughout the entire life cycle.*

**Keywords:** automobile roads, sustainable design, sustainable construction, information modelling technologies, ecology

**For citation:**

Boguslavsky L.A., Provatorova G.V. Information modelling technologies in the concept of sustainable road construction // Smart Composite in Construction. 2024. Vol. 5, Iss. 3. P. 42-52.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-42-52



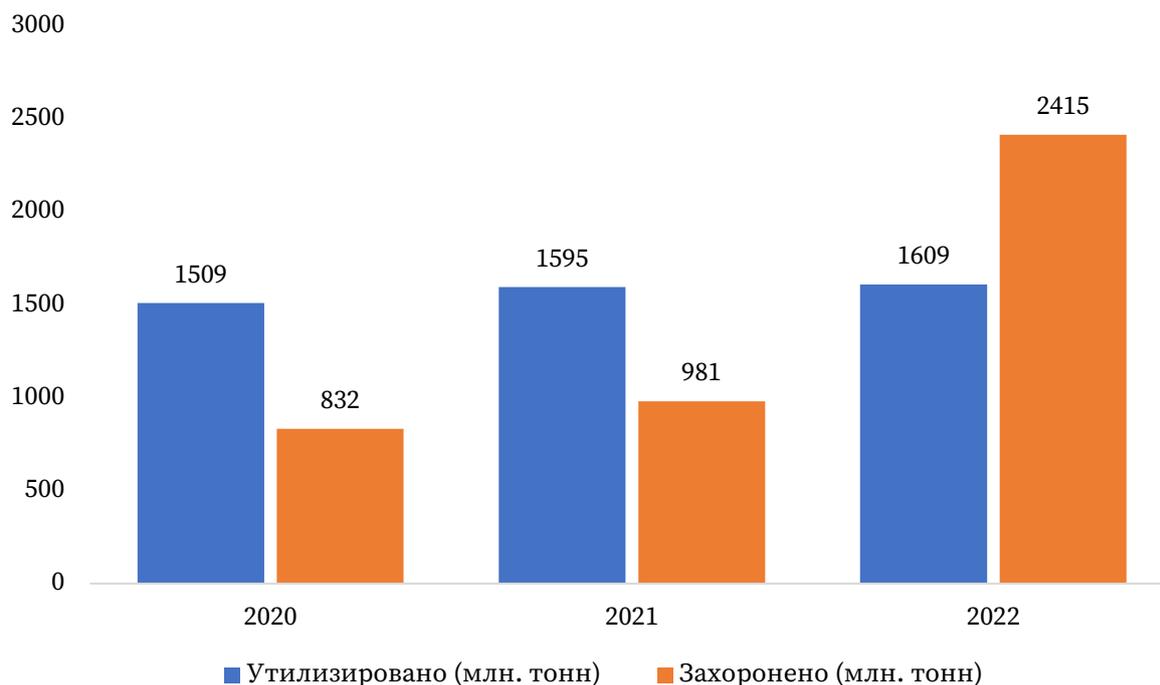
## ВВЕДЕНИЕ

Согласно проведенному анализу открытых данных Федеральной службы государственной статистики и Росприроднадзора, в последние годы наблюдается рост отходов производства всех классов опасности, а также их захоронений [1]. Так, в 2022 г. увеличение массы отходов составило более 29% по сравнению с 2020 г., а объем не утилизированных отходов за рассматриваемый период [2] вырос практически в 3 раза (табл. 1, рис. 1).

**Таблица 1.** Образование, утилизация и обезвреживание отходов производства и потребления

**Table 1.** Formation, utilization and neutralization of production and consumption waste

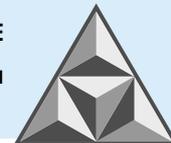
	Образование отходов производства и потребления, тыс. тонн			Утилизация и обезвреживание отходов производства и потребления тыс. тонн		
	2020	2021	2022	2020	2021	2022
I класс опасности	12	14	6	13	10	4.7
II класс опасности	182	209	229	276	312	309
III класс опасности	20272	25076	25129	14702	21272	26052
IV класс опасности	77630	92565	79366	155962	81357	72079
V класс опасности	6857620	8330778	8912534	3258061	3834289	4026761



**Рис. 1.** Объем утилизации для повторного применения и захоронения отходов производства и потребления

**Fig. 1.** Utilization volume for reuse and buried production and consumption waste

Глобальная озабоченность экологическими проблемами требует осуществления новых подходов в строительстве, ввиду значительного воздействия на окружающую среду и высокого использования природных ресурсов. Эффективным решением может служить, в частности, разработка «зеленых» стандартов. В Российской Федерации эта сфера стала активно развиваться сравнительно недавно, однако необходимость введения национального экологического стандарта в части проектирования и строительства автомобильных дорог



с каждым годом становится все более явной. Сложности во многом связаны с отсутствием единой системы оценки качества проектировочных работ в указанной сфере [3].

1 ноября 2022 г. вступил в силу «зеленый» стандарт строительства, разработанный на основе международных систем LEED, BREEAM, DGNB. Строения, получающие сертификат соответствия ГОСТ, становятся проектами устойчивого развития согласно постановлению Правительства РФ № 1587 от 21.09.2021 [4]. Стандарт включает 81 критерий в 10 категориях. Достижение 16 критериев в каждой из 10 категорий оценки является обязательным для признания здания «зеленым». Однако ни один объект не может нормально функционировать при отсутствии необходимой инфраструктуры, в том числе – без организованного удобного подъезда к нему.

Единственным нормативным документом, регламентирующим на данный момент «зеленое» строительство автомобильных дорог, является Стандарт Государственной компании «Автодор» СТО АВТОДОР 7.1-2013. Он определяет принципы, категории, оценочные критерии, индикаторы, рекомендуемые показатели и минимальные экологические требования к реализации. Дополнительно предоставляется паспорт энергоэффективности объекта, регламентируется нормативный уровень шума, предусматривается использование местных строительных материалов с низким уровнем эмиссии вредных веществ и т.д. Например, одним из требований документа является устройство на автодороге экопереходов.

Согласно данным Федеральной службы государственной статистики (Росстат), за 2023 г. численность погибших в дорожно-транспортных происшествиях (ДТП) превысила 14 тыс. чел. [5]. При этом, по оценкам экспертов, наезды на животных составляют примерно 2% от общего количества ДТП. В таких авариях гибнут от 2 до 3 чел. на каждые 100 столкновений с животными [6]. С целью предотвращения подобных происшествий компания «Автодор» построила экодуки на трассе М-3 в Калужской области и трассе М-12 в Судогодском районе Владимирской области.

Практика показывает, что строительство экодуков помогает сохранить популяцию диких животных и предотвратить аварии на дорогах [7]. Отметим, что документ компании «Автодор» является стандартом конкретной организации и не входит в список нормативных документов, обязательных к применению.

Строительная отрасль пытается адаптироваться к новым требованиям. Методы устойчивого строительства автомобильных дорог сосредоточены на использовании современных материалов для уменьшения количества отходов, экономии энергии и воды, а также рассчитаны на обеспечение минимизации загрязнений. При этом практика показывает, что применяемые современные меры оказываются недостаточными.

Благодаря использованию инструментов обеспечения устойчивости строительства целесообразно применять «экологическое» проектирование на различных этапах. Экологическое строительство дорог также является ключом к сокращению углеродного следа. Новые строительные проекты должны планироваться с учетом устойчивости в качестве основного приоритета [8]. Аналитические и интегрированные модели, создаваемые с использованием информационных технологий, также могут способствовать решению проблемы. Характерно, что технологии информационного моделирования и устойчивое строительство дорог – инициативы, отличные друг от друга, но в последние годы обеим уделяется достаточно много внимания.



## ЭКОЛОГО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

Понятие «жизненный цикл объекта капитального строительства» возникло благодаря внедрению технологий информационного моделирования и принятию свода правил (СП) 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на разных стадиях жизненного цикла».

Использование информационных моделей на каждом этапе строительства дорог позволяет достичь целей устойчивого развития. Особенно эффективно применение информационных моделей на этапах предпроектирования, проектирования и строительства.

На этапе подготовки к строительству дорог можно визуализировать объекты задолго до того, как строители выйдут на строительную площадку. Точные и подробные модели предоставляют заинтересованным участникам проектирования соответствующую информацию, необходимую для принятия решений.

Важным аспектом процесса проектирования дорог является выбор строительных материалов. Информационные модели способствуют выбору экологически чистых материалов со снижением негативного воздействия на окружающую среду, а за счет высокой точности расчетов дополнительно обеспечивается уменьшение расходов.

Учет факторов подбора материалов, числа машин и механизмов, сроков строительства дорог и изменения параметров можно осуществлять в любой момент подготовки проекта. Более того, изменения в проект могут быть внесены мгновенно, что экономит время и позволяет быстро продвигаться вперед [9].

Этап строительства оказывает наибольшее воздействие на окружающую среду. Нередко на объекте образуется простой техники; каждый дополнительный час, добавленный к строительству, увеличивает размер углеродного следа.

Около 30% всех материалов, используемых в строительстве дорог, расходуется нецелесообразно. Миллионы тонн строительных материалов ежегодно попадают на свалки. Это делает отрасль одним из крупнейших источников отходов.

Наиболее популярным инструментом, используемым для оценки производственных процессов, является One Click LCA [10]. Он позволяет оценить воздействие объекта проектирования на окружающую среду, начиная с добычи материалов, используемых в строительстве автомобильных дорог и эксплуатации объекта, и заканчивая утилизацией. С помощью One Click LCA можно провести расчеты по следующим показателям:

- углеродный след;
- расчет выбросов углекислого газа в атмосферу;
- энергоэффективность;
- расчет использования воды;
- расчет количества образуемых отходов.

Результатами расчетов программных комплексов LCA являются следующие данные (рис. 2, 3):

- категория Embodied Carbon Benchmark;
- диаграмма распределения выбросов углерода по стадиям жизненного цикла (A1–A3 Materials, A4 Transportations, B4–B5 Replacement, C1–C4 End of life);
- сравнительные диаграммы, если производился расчет нескольких вариантов проекта.

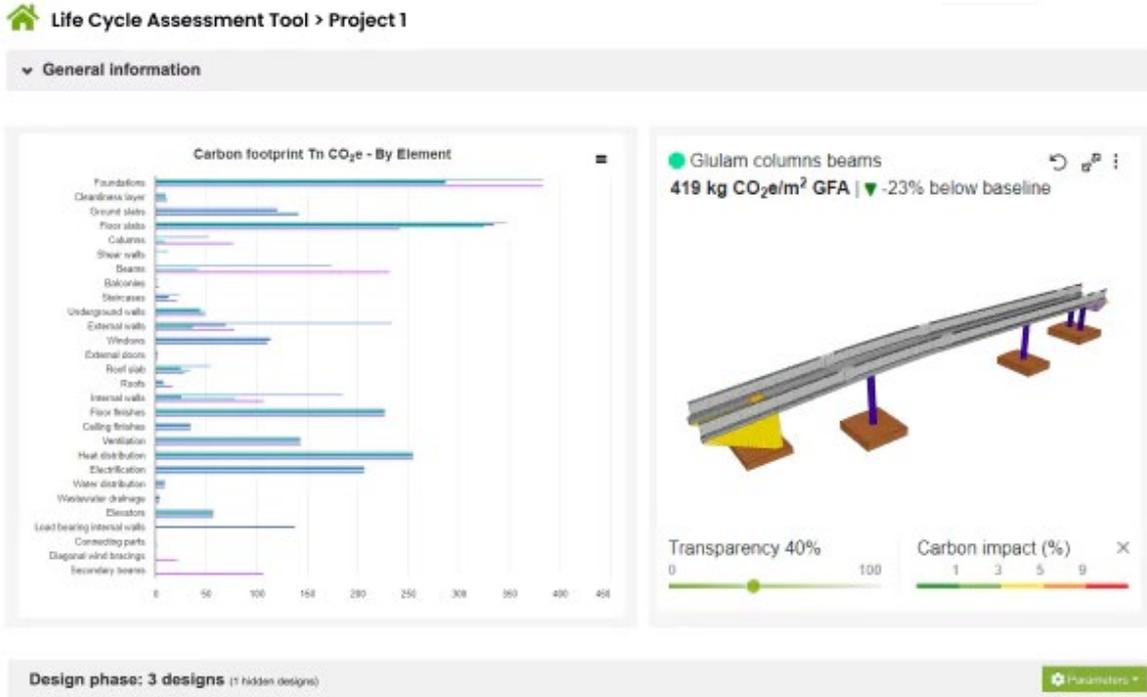


Рис. 2. Эмуляция сооружения в One Click LCA  
 Fig. 2. Construction emulation in One Click LCA

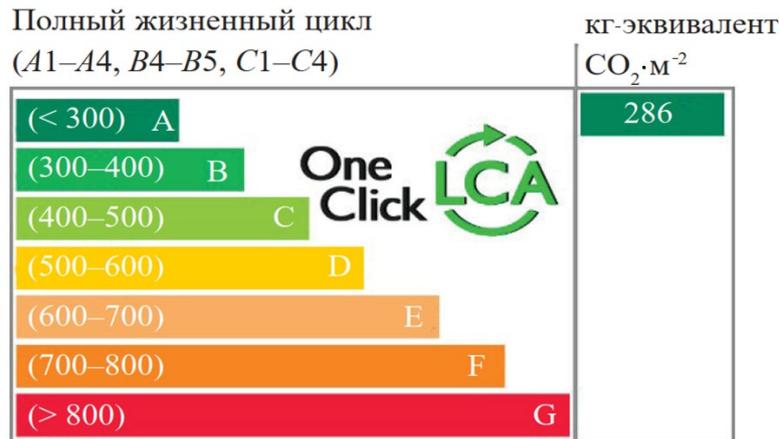


Рис. 3. Категория сооружения Embodied Carbon Benchmark в One Click LCA  
 Fig. 3. Embodied Carbon Benchmark construction category in One Click LCA

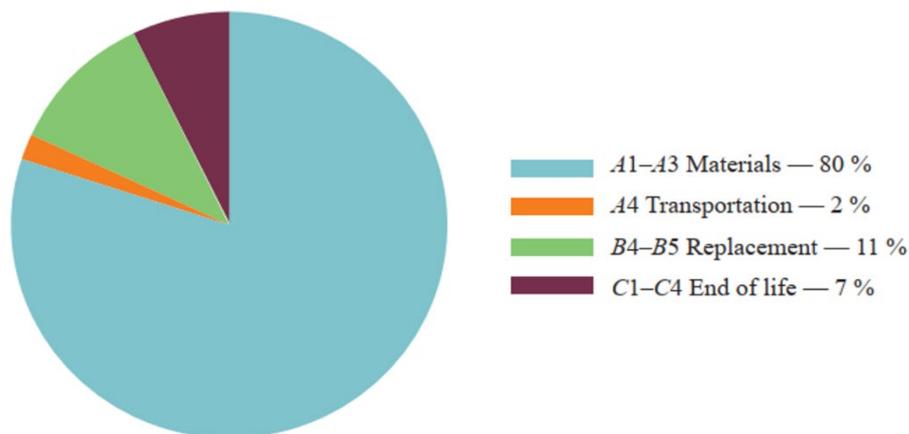
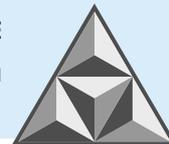


Рис. 4. Диаграмма углеродного следа по стадиям жизненного цикла в One Click LCA  
 Fig. 4. Carbon Impact Diagram by Life Cycle Stage in One Click LCA



Расчеты показывают, какие элементы сооружения при строительстве дорог требуют особого внимания в отношении снижения углеродного следа. В соответствии с диаграммой, представленной на рис. 4, основным источником выбросов углерода являются материалы (80%). Это подчеркивает важность использования особо точных характеристик материалов от производителей для получения наиболее достоверных результатов. Следовательно, эффективным способом влияния на достигаемые показатели будет анализ информации о материалах и выбор наиболее экологичных из них [11].

Информационные модели позволят планировать осуществление дорожных ремонтных работ заблаговременно, свести к минимуму затраты и негативное воздействие на окружающую среду. При этом, по оценке Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства России, вероятность ошибок в проектировании снизится на 40%, время проектирования – до 50%, в 6 раз сократится продолжительность проверки документов, а сроки координации и согласования проектов – до 90% [12].

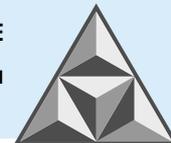
## ВЫВОДЫ

Информационное моделирование при проектировании и строительстве автомобильных дорог позволяет точно рассчитать необходимое количество материалов, а также контролировать сроки их поставки, предотвращая простои и количество отходов. Ожидается также, что внедрение информационных моделей и технологий в рабочий процесс обеспечит сокращение общих сроков введения дорожного объекта за счет интенсификации сотрудничества проектных и строительных групп внутри системы. При этом ниже окажется влияние на окружающую среду с точки зрения энергопотребления, углеродного следа и шума. Данные проекта хранятся централизованно, что позволяет внести необходимые изменения практически мгновенно. Заинтересованные стороны могут получить доступ к данным и обсудить требуемые улучшения без необходимости организации длительных совещаний и ожидания разрешения.

После завершения строительства дороги информационные модели остаются критически важными для текущего обслуживания. Их использование поможет качественно осуществлять мониторинг и регистрацию характеристик, принимать более взвешенные и эффективные решения при эксплуатации дорожного объекта и продлить его жизненный цикл.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Федеральная служба государственной статистики. Основные показатели охраны окружающей среды. Статистический бюллетень. Москва. 2023.
2. Доклад о деятельности Федеральной службы по надзору в сфере природопользования в 2023 году. Москва. 2024.
3. Жуковская А.Ю., Гераськин Ю.М. Применение зеленых стандартов в России: проблемы и перспективы // *Вестник Евразийской науки*. 2019. № 2.
4. Постановление Правительства РФ от 21 сентября 2021 г. № 1587 "Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации и требований к системе верификации инструментов финансирования устойчивого развития в Российской Федерации" (с изменениями и дополнениями).
5. Федеральная служба государственной статистики. Численность погибших в происшествиях с транспортными средствами по Российской Федерации [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Postrad\\_2023.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Postrad_2023.xlsx) (дата обращения: 16.03.2024).



6. Аварийность на дорогах общего пользования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://iz.ru/1046914/2020-08-11/v-gosdume-otcenili-reshenie-problemy-s-dtp-s-uchastiem-dikikh-zhivotnykh> (дата обращения: 16.03.2024).
7. Новости компании Автодор [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://russianhighways.ru/press/news/57967> (дата обращения: 16.03.2024).
8. **Богуславский Л.А.** Взаимодействие участников bim-проектирования в среде общих данных // *Мат. V Межд. науч.-практ. конф. «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации»*. 2023.
9. **Богуславский Л.А.** Перспективы применения bim-технологий в процессе проектирования объектов дорожного строительства // *Мат. IV Межд. науч.-техн. конф. "International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering" (MPCPE-2023)*. 2023.
10. Building Life Cycle Assessment software – One Click LCA [Электронный ресурс]. Режим доступа: [www.oneclicklca.com](http://www.oneclicklca.com) (дата обращения: 16.03.2024).
11. **Калинина А.В., Петроченко М.В.** Комплексный подход к оценке жизненного цикла строительства на стадии проектирования с применением программных комплексов // *Строительство: наука и образование*. 2022. Т. 12. Вып. 1. С. 7.
12. Предварительный национальный стандарт по технологиям информационного моделирования [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/utverzhdenn-predvaritelnyy-natsionalnyy-standart-po-tekhnologiyam-informatsionnogo-modelirovaniya> (дата обращения: 16.03.2024).

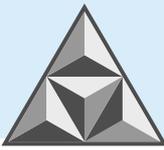
Поступила в редакцию 03.06.2024

Одобрена после рецензирования 06.09.2024

Принята к опубликованию 13.09.2024

## REFERENCES

1. Federal State Statistics Service. Main indicators of environmental protection. Statistical bulletin. (2023), Moscow, Russia (in Russian).
2. Report on the activities of the Federal Service for Supervision of Natural Resources Management in 2023. (2024), Moscow, Russia (in Russian).
3. **Zhukovskaya, A.Yu. and Geraskin, Yu.M.** (2019), "Application of green standards in Russia: problems and prospects", *Vestnik Evrazijskoj nauki [The Eurasian Scientific Journal]*, no. 2 (11). Available at: <https://esj.today/PDF/37SAVN219.pdf> (in Russian)
4. The resolution of the Government of the Russian Federation dated 21 September 2021 no. 1587 'On Approval of the criteria for sustainable (including green) development projects in the Russian Federation and requirements for the verification system of sustainable development financing instruments in the Russian Federation' (as amended and supplemented) (in Russian).
5. Federal State Statistics Service. The number of people died in accidents with vehicles in the Russian Federation. Available at: [https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Postrad\\_2023.xlsx](https://rosstat.gov.ru/storage/mediabank/Postrad_2023.xlsx) (accessed 16.03.2024) (in Russian).
6. Accident rate on public roads. Available at: <https://iz.ru/1046914/2020-08-11/v-gosdume-otcenili-reshenie-problemy-s-dtp-s-uchastiem-dikikh-zhivotnykh> (accessed 16.03.2024) (in Russian).
7. Avtodor Company News. Available at: <https://russianhighways.ru/press/news/57967> (accessed 16.03.2024) (in Russian).
8. **Boguslavsky, L.A.** (2023), "Interaction of BIM-projecting participants in the field of common data", *Мат. V Межд. науч.-практ. конф. «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации» [Proc. of V Interdisciplinary Conference 'Architectural and Construction Complex: Problems, Prospects and Innovations']* (in Russian).
9. **Boguslavsky, L.A.** (2023), "Prospects of BIM technologies application in the process of designing road construction objects", Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conf. "International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering" (MPCPE-2023) (in Russian).



10. Building Life Cycle Assessment software – One Click LCA. Available at: [www.oneclicklca.com](http://www.oneclicklca.com) (accessed 16.03.2024).
11. **Kalinina, A.V. and Petrochenko, M.V.** (2022), "An integrated approach to the assessment of construction life cycles using software packages at the design stage", *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie [Construction: Science and Education]*, no. 12 (1), p. 7 (in Russian).
12. Provisional National Standard on Information Modelling Technologies. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/press/utverzhdn-predvaritelnyy-natsionalnyy-standart-po-tekhnologiyam-informatsionnogo-modelirovaniya> (accessed 16.03.2024) (in Russian).

*Received 03.06.2024*

*Approved 06.09.2024*

*Accepted 13.09.2024*



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.138

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-53-64

# Оценка влияния извести при укреплении песка мелкого на время его выдерживания при оптимальной влажности

**А.А. Игнатъев**<sup>1,2</sup>

**Алексей Александрович Игнатъев**

<sup>1</sup>Федеральное автономное учреждение «Российский дорожный научно-исследовательский институт»,  
Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Российская Федерация  
[ignatievaa@rosdornii.ru](mailto:ignatievaa@rosdornii.ru)



*В процессе эксплуатации автомобильных дорог не всегда удается добиться требуемых характеристик грунтов, которые обеспечивают необходимую долговечность и прочность. В этой связи широкую практику получила технология укрепления грунтов известью, позволяющая значительно улучшить их характеристики. Представлены результаты экспериментальных исследований, направленные на изучение особенностей влияния извести на характеристики песка и время выдерживания грунта при оптимальной влажности в герметичных пакетах. Показано, что введение 5% извести способствует увеличению оптимальной влажности песка на 1% и обеспечивает увеличение плотности скелета грунтоизвестковой смеси на 5% по сравнению с неукрепленным грунтом. Оптимальное время выдерживания песка мелкого, укрепленного известью, достигает 2 ч. Результаты открывают широкие возможности для дальнейших исследований по укреплению грунтов в ходе дорожного строительства.*

**Ключевые слова:** автомобильные дороги, песок мелкий, известь, оптимальная влажность, плотность скелета грунта

**Для цитирования:**

Игнатъев А.А. Оценка влияния извести при укреплении песка мелкого на время его выдерживания при оптимальной влажности // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 3. С. 53-64. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-53-64



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-53-64

# Evaluation of the impact for lime stabilization of fine sand on its curing time at optimum moisture content

**A.A. Ignatyev<sup>1,2</sup>**

**Aleksey A. Ignatyev**

<sup>1</sup>Federal Autonomous Institution "Russian Road Research Institute", Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>National Research University "Higher School of Economics", Moscow, Russian Federation

*ignatievaa@rosdormii.ru*



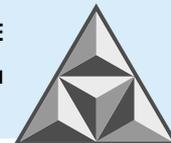
*It is not always possible to achieve the required characteristics of soils that would provide the necessary durability and strength during the operation of automobile roads. In this regard, the technology of soil reinforcement with lime, which allows to improve significantly the characteristics of the soil, is widely practiced. The paper presents the results of experimental studies. They are aimed at studying the peculiarities of lime impact on sand characteristics and time of soil holding at optimum humidity in sealed packages. The paper shows that the introduction of 5% lime helps to increase the optimum moisture content of sand by 1% and provides a 5% increase in the skeletal density of the soil-lime mixture compared to unstrengthened soil. The optimum curing time for fine sand strengthened with lime is 2 h. The results obtained open a wide range of possibilities for further research on soil strengthening for road construction.*

**Keywords:** automobile roads, fine sand, lime, optimum moisture content, soil skeleton density

**For citation:**

Ignatyev A.A. Evaluation of the impact for lime stabilization of fine sand on its curing time at optimum moisture content // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 3. P. 53-64.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-53-64



## ВВЕДЕНИЕ

Технология стабилизации и укрепления грунтов автомобильных дорог и аэродромов с использованием извести зарекомендовала себя с положительной стороны и имеет достаточно широкую практику применения в Российской Федерации. Известь используют для высушивания грунтов и придания им новых характеристик, в основном, для получения требуемых эксплуатационных свойств временных дорог и на площадках строительных объектов. При этом достигаемые свойства грунтов становятся стабильными и позволяют снизить затраты на последующую эксплуатацию.

Большинство лабораторных и полевых испытаний с использованием извести подтверждает, что ее введение в грунты оправдано при соответствующем технико-экономическом обосновании и достигнутый результат значительно превосходит ожидания. В первую очередь, повышается возможность воспринимать значительные транспортные нагрузки и высокую интенсивность движения.

Известь представляет собой вяжущий материал в виде оксида кальция, с включением в небольшом количестве примесей оксидов магния, железа, кремния и гидроксида кальция (гидратная известь).

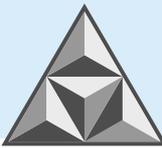
Популярность извести для строительной отрасли [1] невозможно переоценить. Она находит широкое применение в дорожном и аэродромном строительстве, ее широко применяют в качестве основного стабилизатора грунтовых оснований для покрытий.

Оптимальный состав грунто-известковой смеси подбирается в лаборатории в зависимости от требуемых параметров. По классификации, известь условно относится к I группе (неорганические/минеральные строительные материалы); ее целесообразно использовать для укрепления глинистых грунтов взамен цемента. Это связано с тем, что известь в процессе гидратации взаимодействует с частицами глины и заметно снижает ее пластичность. По этой причине ее следует использовать для глин с индексом пластичности  $> 10$  и влажности  $\leq 55\%$  по массе.

Традиционно в зарубежной практике количество извести для укрепления грунтов зависит от вида грунта. В соответствии с [2-8], для укрепления связных грунтов (суглинки и глины) рекомендовано добавлять от 5 до 10%, а для несвязных грунтов, в зависимости от влажности – от 2 до 8% извести. При этом стоит отметить, что методика подбора укрепленного состава грунта в разных странах отличается, как и ключевые измеряемые показатели.

В Российской Федерации отсутствуют четко закрепленные требования по применению извести [9]. Ранее в Советском Союзе действовала подробная «Инструкция по применению грунтов, укрепленных вяжущими материалами для устройства оснований и покрытий автомобильных дорог и аэродромов СН 25-74», в соответствии с которой для укрепления суглинков тяжелых рекомендовалось вводить 7-8% извести (для глин 8-10%), что согласуется с зарубежными нормами расхода.

В настоящее время, в соответствии с ГОСТ Р 70456 - 2022 «Дороги автомобильные общего пользования. Грунты. Определение оптимальной влажности и максимальной плотности методом Проктора», одним из важнейших технологических критериев уплотняемости грунта является оптимальная влажность. Она определяется путем постепенного увеличения влаги от минимума к максимуму, когда грунт уже не уплотняется под действием ударной нагрузки. Следует отметить, что при таком способе определения влажности неизбежно защемление воздуха в виде воздушных пор и среднее значение может достигать от 4 до 6%, что в процессе



эксплуатации земляного полотна или нижних слоев дорожной одежды может приводить к разуплотнению грунтов. Целесообразно стремиться к содержанию пор  $\leq 1\%$ .

В соответствии с исследованиями [10-13], установлено, что в процессе добавления воды в грунты происходит перераспределение влаги и за счет возможности выдерживать грунт во времени можно добиться эффекта регулирования межфазного взаимодействия частиц, при котором повышается их уплотняемость и снижается трение. Эффект ограничен во времени и для различных видов грунтов проявляются неодинаково. Даже пески одной крупности могут значительно отличаться по параметрам оптимальной влажности. Именно поэтому для каждого конкретного вида грунта необходимо проводить дополнительные исследования по определению требуемого времени выдерживания при оптимальной влажности.

Когда речь идет об укреплении грунтов минеральными вяжущими, картина в части оценки оптимальной влажности изменяется кардинальным образом. Специалисты отрабатывают и вяжущие свойства вводимой добавки, и гранулометрический состав последней, и особенности ее взаимодействия с влагой.

Ниже представлены авторские результаты по установлению эффективной продолжительности выдерживания песчаного грунта, укрепленного известью с целью получения повышенных транспортно-эксплуатационных показателей.

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

В ходе исследований использовали методику ГОСТ 22733-2016 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности», в ходе которой осуществляли:

- определение гранулометрического состава грунта;
- определение значений оптимальной влажности исходного грунта;
- определение значений оптимальной влажности для грунта, укрепленного известью;
- выдерживание исходных образцов грунта при оптимальной влажности во времени и грунта, укрепленного известью;
- обработку и анализ полученных результатов.

*Нормативная документация:*

- ГОСТ 32727-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный и дробленый. Определение гранулометрического (зернового) состава и модуля крупности;
- ГОСТ 32725-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный и дробленый. Определение содержания пылевидных и глинистых частиц;
- ГОСТ 32728-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный и дробленый. Отбор проб;
- ГОСТ 25100-2011. Грунты. Классификация.

*Приборы и материалы:*

- весы электронные с достигаемым пределом взвешивания не менее 6000 г и ценой деления не более 1 г;
- набор сит с ячейками размером 0.125; 0.25; 0.5; 1.0; 2.0; 4.0; 8.0 мм;
- поддоны и крышки для сит;
- сушильный шкаф, обеспечивающий циркуляцию воздуха и поддержание температуры в интервале  $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ ;
- сито с размером ячейки 0.063 мм;
- противни металлические.



*Порядок проведения испытаний:*

определение гранулометрического состава грунта;

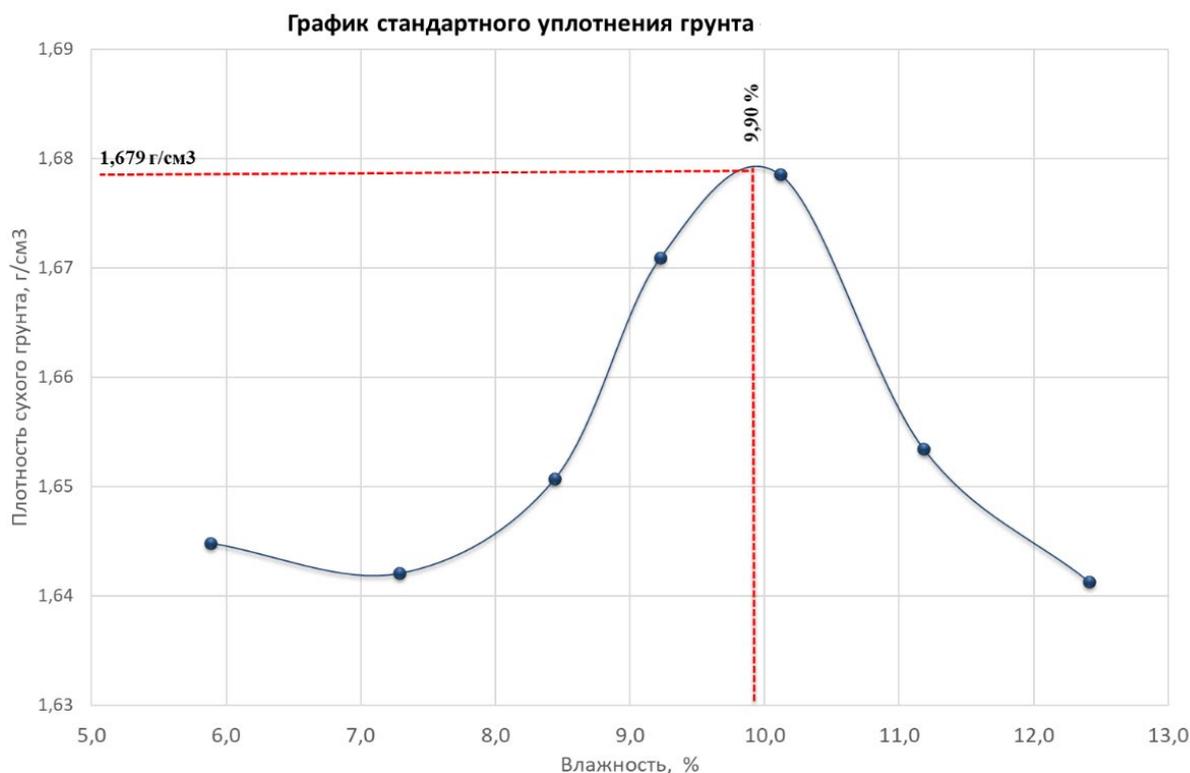
определение оптимальной влажности неукрепленного грунта.

Метод заключается в установлении зависимости плотности грунта от его влажности – от изначальной до оптимальной. При испытании используют не менее 5 образцов. По итогам осуществляют построение графиков зависимости плотности грунта от влажности, на основе которого определяют оптимальное значение последней.

В качестве оборудования применяют установку стандартного уплотнения СоюздорНИИ. Методика проведения испытаний аналогична методике Проктора; основное различие – в размерах формы, высоты падения груза и массы груза. В качестве грунта выбран Песок мелкий. Строительная Известь-пушонка по ГОСТ 9179-77.

*Определение оптимальной влажности мелкого песка*

В соответствии с утвержденной методикой оптимальная влажность песка мелкого составила 9.90%, а плотность –  $1.70 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . Результаты определения оптимальной влажности песка мелкого приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** График стандартного уплотнения для образца песка мелкого

**Fig. 1.** Diagram of standard compaction for a fine sand sample

Далее определяли оптимальную влажность для песка мелкого, укрепленного известью в соответствии с описанной методикой.

В итоге оптимальная влажность песка мелкого, укрепленного известью строительной в количестве 5% от массы песка, составила 10.8%. Плотность такого песка равняется  $1.70 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ . Результаты определения оптимальной влажности песка мелкого, укрепленного известью строительной в количестве 5% от массы песка, приведены на рис. 2.

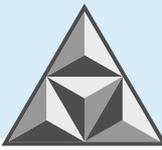


График стандартного уплотнения песка мелкого, укрепленного известью

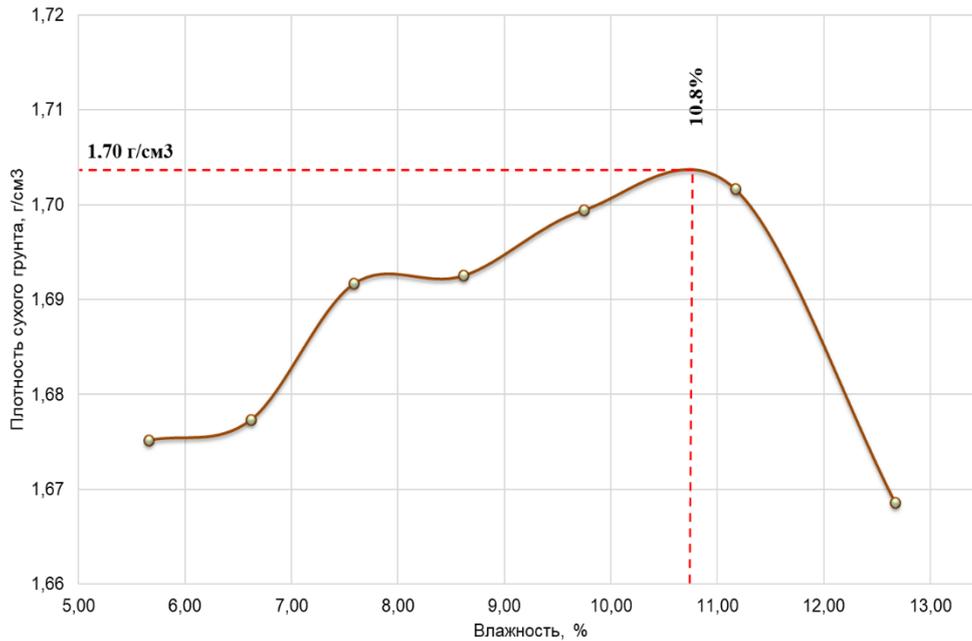


Рис. 2. Песок мелкий, укрепленный строительной известью в количестве 5% от массы песка  
 Fig. 2. Fine sand strengthened with building lime in the amount of 5% of the sand weight

В соответствии с описанной методикой на следующем этапе определяли плотность песка мелкого в процессе замачивания и выдерживания во времени в герметичном пакете с отбором и испытанием через 1 ч от начала испытаний, а затем – через каждые 2 ч. На рис. 3 представлены результаты исследований.

График замачивания 9,9%

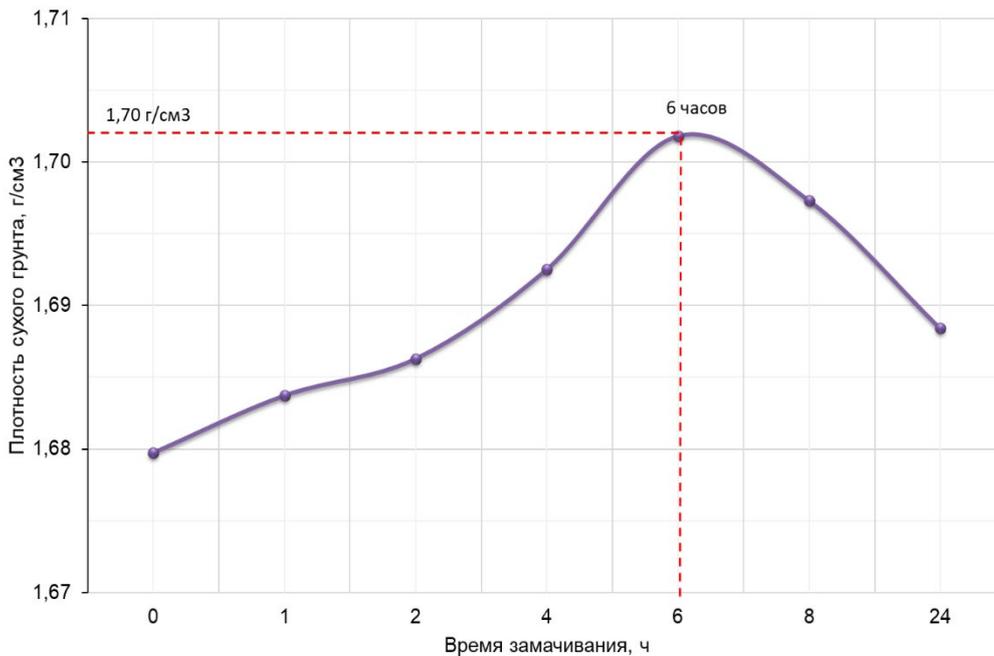
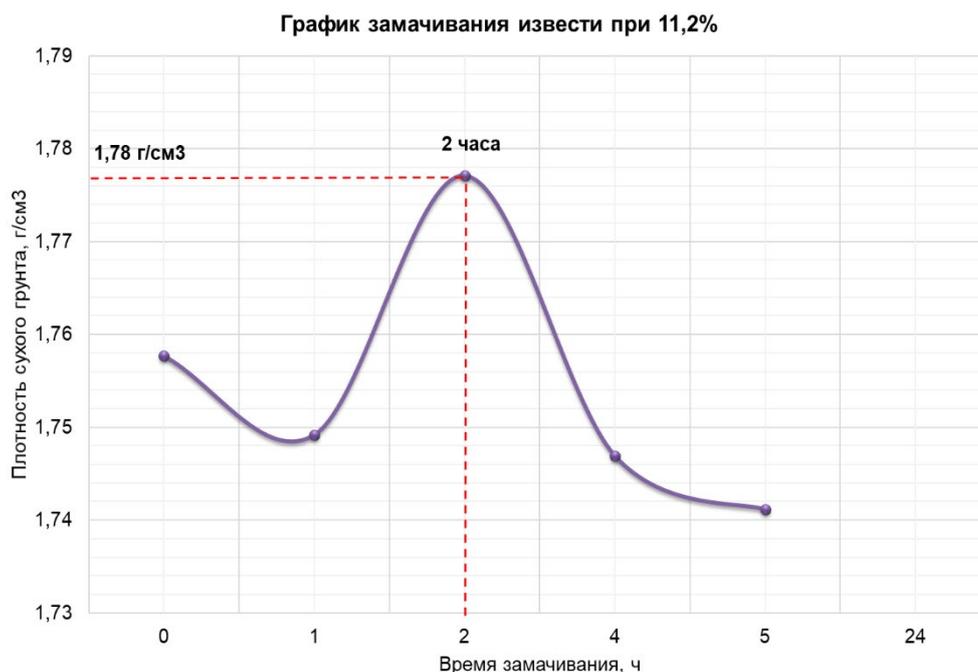
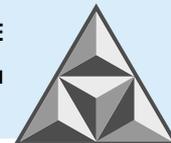


Рис. 3. График выдерживания песка мелкого в герметичном пакете при влажности 9.90%  
 Fig. 3. Diagram of keeping fine sand in a sealed bag at a humidity of 9.90%

Максимальная плотность для мелкого песка ( $1.70 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ ) установлена при времени выдерживания 6 ч.



**Рис. 4.** Выдерживание песка мелкого, укрепленного 5% извести, при оптимальной влажности

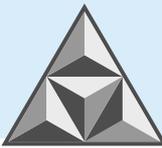
**Fig. 4.** Curing fine sand strengthened with 5% lime at optimum moisture content

Далее определяли оптимальное время выдерживания для песка мелкого, укрепленного 5% строительной извести (рис. 4).

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При анализе представленных графиков выявлены следующие закономерности. Введение в песок мелкий строительной извести в количестве 5% приводит к росту оптимальной влажности смеси почти на 1%. При этом важно понимать, что процент введенной извести незначителен. Если говорить о технологии выдерживания грунта при оптимальной влажности, для песка мелкого требуется почти 6 ч, чтобы добиться более существенных результатов при определении плотности скелета грунта. Разница между испытаниями по традиционной методике определения плотности и выдерживанием грунта в герметичном пакете при оптимальной влажности дает прирост плотности скелета грунта  $\approx 2\%$ . Объяснить столь значительное время на выдерживание можно тем, что в грунте происходит перераспределение влажности, которое для песка мелкого обеспечивает доувлажнение пылеватых фракций, способствующих развитию коллоидов. Очевидно, именно этот факт способствует эффективному уплотнению грунта.

Если проанализировать результаты испытаний песка мелкого, укрепленного строительной известью, они изменяются более динамично. Отмечается, что при добавлении извести в песок мелкий плотность увеличивается быстрее по сравнению с грунтом без добавки. Вероятно, это связано с дисперсностью извести, которая в процессе перемешивания заполняет поры в песке мелком, формируя оптимальную кривую гранулометрического состава полученной смеси, что дает впоследствии более прочную структуру. Данный факт интересен с точки зрения укрепления грунта и последующего производства работ по устройству земляного полотна или оснований дорожных одежд автомобильных дорог. Традиционно известь при введении в грунт выполняет две ключевые функции, а именно: осушение и компенсация избыточной влаги; увеличение плотности грунта.



Согласно представленным результатам, для полученной смеси песка мелкого и извести в процессе ее выдерживания при оптимальной влажности в герметичном пакете время выдержки не должно превышать 2 ч.

После этого происходит заметное снижение плотности полученной смеси. Так, по истечении 6 ч она падает более чем на 5%, что негативно сказывается на результатах уплотнения укрепленного грунта. При сравнении рис. 2 и 4 можно увидеть, что разница во времени между выдерживанием чистого песка мелкого и песка мелкого, укрепленного строительной известью в количестве 5%, составляет почти 4 ч.

Вероятно, это связано с тем, что известь по истечении 2 ч начинает активно проявлять вяжущие свойства. Важным результатом сравнения плотностей скелета песка мелкого, не укрепленного и укрепленного известью, является рост плотности почти на 5%, что дает возможность получить более плотную и прочную структуру. Эта особенность обеспечивает широкую популярность извести при использовании ее в качестве добавки, вводимой в различные виды грунтов.

## ВЫВОДЫ

1. Исследования доказали, что введение различного количества воды в грунт оказывает существенное влияние на его уплотняемость. Лучшие результаты могут быть достигнуты в том случае, если грунт уплотнять не сразу после его увлажнения, а спустя некоторое время. Это время целесообразно определять отдельно для каждого вида грунта, что объясняется различным смазывающим эффектом, который образуется за счет набухания аутогенных пленок вокруг частиц.

2. В ходе исследований для песка мелкого установлено рациональное время его выдерживания при оптимальной влажности (6 ч). Для песка мелкого, укрепленного строительной известью, продолжительность выдерживания при оптимальной влажности составляет 2 ч, что связывается с проявлением вяжущих свойств извести.

3. Введение извести в количестве 5% от массы песка мелкого обеспечивает смещение кривой оптимальной влажности в сторону увеличения почти на 1%. Этот факт оказывает существенное влияние на уплотняемость получаемой грунтоизвестковой смеси. При наличии на объекте дорожного строительства переувлажненных грунтов возможна компенсация путем введения извести, что позволит более эффективно осуществлять работы по их уплотнению. Подобные исследования целесообразно продолжить также на образцах других видов грунтов.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Подольский В.П.** О возможности расширения ресурсной базы дорожного строительства за счет стабилизации и укрепления грунтов / В.П. Подольский, Нгуен Ван Лонг, Нгуен Дык Ши // *Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура*. 2014. № 1 (33). С. 102-111.
2. Design Procedures for Soil Modification or Stabilization / Production Division. Office of Geotechnical Engineering. 120 South Shortridge Road Indianapolis, Indiana 46219. January 2008. 13 p.
3. Методы стабилизации грунтов различными материалами [Электронный ресурс]. URL: <https://theconstructor.org/geotechnical/soil-stabilization-methods-and-materials/9439> / (дата обращения: 09.07.2024).
4. Field Manual. No. 5-410 / Headquarters Department of the Army Washington, DC, 23 December 1992. Change 1, 4 June 1997. 344 p.
5. **Halsted G.E.** Guide to Cement-Modified Soil (CMS) / G.E. Halsted, W.S. Adaska, W.T. McConnell / EB242 Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA. 2008. 20 p.



6. Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification / Published by National Lime Association. The Versatile Chimikal. January 2004. Bul. 326. 41 p.
7. **Makusa G.P.** State of the Art Review Soil Stabilization Methods and Materials in Engineering Practice. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering / Division of Mining and Geotechnical Engineering. Luleå University of Technology. Luleå, Sweden. 2012. 35 p.
8. ASTM (2000b) Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lb/ft). Designation D698 / Annual Book of ASTM Standards. ASTM American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, US.
9. **Слабодчикова Н.А., Плюта К.В.** Необходимость совершенствования нормативной базы по подбору составов грунтов, укрепленных неорганическим вяжущим. ИРГТУ.
10. Патент № 2098553 РФ. Способ стабилизации песчаного грунтового основания: 1997 / Придатко Ю.М., Шабров В.Л., Лебедев А.Б., Сальникова К.С., Доброхотов В.Б.
11. **Игнатьев А.А.** Повышение эффективности уплотнения несвязных грунтов за счет регулирования межфазного взаимодействия частиц / А.А. Игнатьев, Г.В. Пренглаев // *Дороги и мосты*. 2018. № 1 (39). С. 10. EDN POWGIJ.
12. **Игнатьев А.А., Готовцев В.М., Разговоров П.Б.** Градиентная модель адгезии жидкости на поверхности строительного материала // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4. № 4. С. 30-49. DOI: <https://doi.org/10.52957/2782-1919-2024-4-4-30-49> (дата обращения: 09.07.2024).
13. **Игнатьев А.А., Готовцев В.М.** Transformation of a disturbed sitting drop // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1. № 1. С. 39-44. DOI: [https://doi.org/10.52957/27821919\\_2020\\_1\\_39](https://doi.org/10.52957/27821919_2020_1_39) (дата обращения: 09.07.2024).

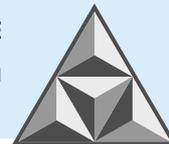
*Поступила в редакцию 10.07.2024*

*Одобрена после рецензирования 16.08.2024*

*Принята к опубликованию 13.09.2024*

## REFERENCES

1. **Podolsky, V.P., Nguyen, Van Long and Nguyen, Dyk Shi** (2014), "On the possibility of the expansion of a road construction resource by the soil stabilization and consolidation", *Nauchnyj vestnik Voronezhskogo GASU. Stroitel'stvo i arhitektura [Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture]*, no. 1 (33), pp. 102-111 (in Russian).
2. Design Procedures for Soil Modification or Stabilization / Production Division. (2008), Office of Geotechnical Engineering, 120 South Shortridge Road Indianapolis, Indiana 46219.
3. Methods of soil stabilisation with different materials. Available at: <https://theconstructor.org/geotechnical/soil-stabilization-methods-and-materials/9439/> (accessed 09.07.2024) (in Russian).
4. Field Manual. No. 5-410 / Headquarters Department of the Army Washington, DC, 23 December 1992. Change 1, 4 June 1997. 344 p.
5. **Halsted, G.E., Adaska, W.S. and McConnell, W.T.** (2008), Guide to Cement-Modified Soil (CMS) / G.E. Halsted, EB242 Portland Cement Association. Skokie, Illinois, USA.
6. Lime-treated soil construction manual lime stabilization & lime modification (2004), Published by National Lime Association. The Versatile Chimikal, Bul. 326, 41 p.
7. **Makusa, G.P.** (2012), "State of the Art Review Soil Stabilization", Methods and Materials in Engineering Practice. Department of Civil, Environmental and Natural Resources Engineering / Division of Mining and Geotechnical Engineering. Luleå University of Technology. Luleå, Sweden. 35 p.
8. ASTM (2000b) Test Method for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12,400 ft-lb/ft). Designation D698 / Annual Book of ASTM Standards. ASTM American Society for Testing and Materials. West Conshohocken, PA, US.



9. **Slabodchikova, N.A. and Pluta, K.V.** (2018), "Necessity of improvement of normative base on selection of soil compositions strengthened by inorganic binder", *Dorogi i mosty [Roads and Bridges]*, no. 1 (39), p. 26 (in Russian).
10. **Pridatko, Yu.M., Shabrov, V.L., Lebedev, A.B., Salnikova, K.S. and Dobrokhotoy, V.B.** (1997). Method of stabilization of sandy soil foundation, Patent RF 2,098,553.
11. **Ignatyev, A.A. and Prenglaev, G.V.** (2018), "Increasing the efficiency of compaction of unbound soils by regulating the interfacial interaction of particles", *Dorogi i mosty [Roads and Bridges]*, no. 1 (39), P. 10 (in Russian).
12. **Ignatiev, A.A., Gotovtsev, V.M. and Razgovorov, P.B.** (2023), "Gradient model of liquid adhesion on the building material surface", *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, no. 4 (4), pp. 30-49. Available at: [http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4\\_2023](http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023) (accessed 09.07.2024) (In Russian).
13. **Ignatyev, A.A. and Gotovtsev, V.M.** (2020), "Transformation of a disturbed sitting drop", *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, no. 1 (1), pp. 39-44. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5036/view> (accessed 09.07.2024).

Received 10.07.2024

Approved 16.08.2024

Accepted 13.09.2024



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.03

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-65-79

# Трёхмерное моделирование городов: исторические реконструкции и альтернативная реальность

**С.В. Расторгуев**

**Семен Васильевич Расторгуев**

Ярославский государственный технический университет, Институт архитектуры и дизайна,  
Ярославль, ул. Володарского, 103, 150040, Российская Федерация

*rastorguevsv@ystu.ru*



*Рассматривается технология создания 3D-моделей городов, фотограмметрический и другие способы их построения. Приводятся проекты, созданные на основе технологии 3D-модели городов Ярославля, Москвы и Санкт-Петербурга. Также описывается суть и результаты исследований на базе построенных градостроительных трехмерных моделей. Представлены проекты исторического воссоздания городов в различные периоды времени – Ярославля начала XX века и Москвы XIX начала XX века. Приводится перечень памятников, утраченных в реальности, но воссозданных в виртуальной трехмерной среде и вписанных в 3D-модель города. Представлен проект, предполагающий моделирование нереализованных проектов архитекторов-авангардистов, а также проектов 1930-1970-х годов на базе 3D-модели Москвы. Сделаны выводы о росте популярности подобных цифровых моделей и проникновении технологий дополненной и виртуальной реальности в повседневную жизнь граждан России.*

**Ключевые слова:** 3D-моделирование, 3D-город, история архитектуры, альтернативная история, фотограмметрия, авангард, виртуальная и дополненная реальность

**Для цитирования:**

Расторгуев С.В. Трехмерное моделирование городов: исторические реконструкции и альтернативная реальность // *Умные композиты в строительстве*. 2024. Т. 5, вып. 3. С. 65-79.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-65-79



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-65-79

# Three-dimensional modeling of cities: historical reconstructions and alternative reality

**S.V. Rastorguev**

**Semyon V. Rastorguev**

Yaroslavl State Technical University, Institute of Architecture and Design, Yaroslavl, 103, Volodarskogo St.,  
150040, Russia

*rastorguevsv@ystu.ru*



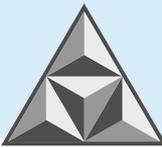
*The paper considers the technology of creating 3D models of cities, photogrammetric and other ways of their construction. The author shows projects created on the basis of this technology - 3D models of Yaroslavl, Moscow and St. Petersburg. The paper also describes the essence and results of the research performed on the basis of the constructed three-dimensional urban planning models. The paper presents historical recreation projects of cities for different time periods: Yaroslavl at the beginning of the XX century and Moscow at the XIX-beginning of the XX century. The author presents a list of monuments lost in reality, but recreated in a virtual three-dimensional environment and inscribed in the 3D model of the city. The paper presents a project involving the modelling of unrealised projects of avant-garde architects, as well as projects of the 1930s-1970s on the basis of a Moscow 3D model. The author concludes about the growing popularity of such digital models and the penetration of augmented and virtual reality technologies into our daily life.*

**Keywords:** 3D modeling, 3D city, architectural history, alternative history, photogrammetry, avant-garde, virtual and augmented reality

**For citation:**

Rastorguev S.V. Three-dimensional modeling of cities: historical reconstructions and alternative reality // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 5, Iss. 3. P. 65-79.  
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5358/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-65-79



## ВВЕДЕНИЕ

Технологии виртуальной и дополненной реальности постепенно входят в нашу жизнь. Средства отображения виртуальной среды становятся все более совершенными, а реалистичность – все выше [1]. 3D-художники и дизайнеры проектируют виртуальные объемные интерфейсы, создают визуально привлекательные модели предметов, продуктов и товаров, способствуя росту их продаж. Сложные механизмы и агрегаты в виртуальном пространстве легко разобрать и изучить. Включая разнообразные информационные слои и подсказки в виртуальных средах, проще найти ошибки в проектах конструкций или технологических процессов. При этом для пользователя важен контент – все, что находится в виртуальном мире с целью демонстрации привлекательных свойств, фиксации каких-либо особенностей. Контент характеризуется определенным уровнем сложности; если посмотреть с точки зрения архитектора на виртуальное пространство, им будут трехмерные здания, интерьер, фасады, а затем – уличное пространство. Поднявшись выше, мы выйдем на уровень 3D-модели города. Город является одной из наиболее сложных разновидностей контента, помещенного в виртуальное пространство.

Рассмотрим относительно новый способ документирования и исследования городов – трехмерное моделирование [2]. Выделяем три перспективных направления:

- моделирование городов в современном состоянии, которое является фиксацией, слепком и одновременно создает базу для исследований города;
- историческая 3D реконструкция городов в различные периоды времени;
- моделирование альтернативных путей развития городов – способ оценить несбывшиеся планы и устремления архитекторов и общества тех или иных исторических эпох.

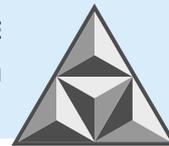
Описанные эксперименты проводились над цифровыми копиями городов Ярославля, Москвы и Санкт-Петербурга, созданными автором настоящей работы с привлечением усилий Лаборатории расширенной реальности Института архитектуры и дизайна Ярославского государственного технического университета.

Результаты в виде визуализаций и видеопрезентаций экспонировались на Ярославском градостроительном форуме в 2018 и 2022 годах [3]. Им была посвящена передача на телеканале День.тв [4]; материалы исследований презентовались на выставке «Зарядье. Архивы возможного» (Москва, парк Зарядье, 2023 г.) [5], а доклад о разработке был представлен на архитектурной секции форума с международным участием SmartBuild «Стройка Политеха – 2023», что свидетельствует об актуальности описываемого проекта.

## ГРАДОСТРОИТЕЛЬНОЕ 3D МОДЕЛИРОВАНИЕ

Процесс создания 3D-моделей городов значительно отличается от трехмерного моделирования отдельных объектов. Главным фактором при 3D моделировании города является оптимизация модели, поскольку она включает сотни и тысячи отдельных зданий. В связи с этим требовательность к ресурсам модели и работы по ее созданию, а затем – визуализации быстро достигает верхних планок доступных вычислительных мощностей.

Реалистичные 3D-модели городов стали появляться сравнительно недавно. Чаще всего они создаются фотограмметрическим способом – путем обработки спутниковых или аэроснимков города или территории с различных ракурсов, создания облака точек в трехмерном пространстве, а затем – обобщения полученных данных [6, 7]. Этот метод может быть дополнен прямым сканированием объектов, которое, однако, является затратным.



Для фотограмметрического моделирования на основе таких снимков требуются значительные вычислительные и временные ресурсы. Однако в данном случае практически отсутствуют перспективные искажения объектов, что положительно сказывается на качестве моделирования.

Существует также способ объектной разработки 3D-модели города, когда на городском плане создаются отдельные здания и используются фотографии их фасадов и сверху, что доступно для большинства городов. Этот способ оказывается менее затратным: не возникает потребностей в обработке массивов данных. Кроме того, нет необходимости сталкиваться со сложностями аэросъемки.

Возможны и различные гибриды указанных выше способов.

Так, в частности, с использованием известных приемов была создана 3D-модель современного Ярославля (рис. 1), а гибридным способом получены 3D-модели современной Москвы и Санкт-Петербурга [8]. Выбор конкретного способа диктуется требованиями к детальности, точности и размеру модели, а также необходимыми ресурсами на разработку.



**Рис. 1.** Визуализация 3D-модели современного Ярославля. Демидовский сад

**Fig. 1.** Visualization of 3D model of modern Yaroslavl. Demidovsky Garden

Модели городов можно использовать довольно широко: создавать визуализации и видеоролики; оценить, как новый архитектурный проект впишется в городскую среду; создавать навигаторы и видеоигры. Ниже представлена творческая разработка и описание уникальных способов применения градостроительного трехмерного моделирования с целью исторического воссоздания городов и реконструкции альтернативных вариантов их развития.

## ИСТОРИЧЕСКАЯ 3D РЕКОНСТРУКЦИЯ ГОРОДОВ

Исторические воссоздания в 3D-модели реализованы, в частности, для Ярославля и Москвы [9]. Разработана специальная ретроспективная аналитическая методика, благодаря которой при использовании модели современного Ярославля и огромного количества архивных материалов удалось достаточно точно воссоздать город начала XX века.

Материалы работы обобщены в онлайн-сборнике «25 исчезнувших достопримечательностей Ярославля» (рис. 2) [10].

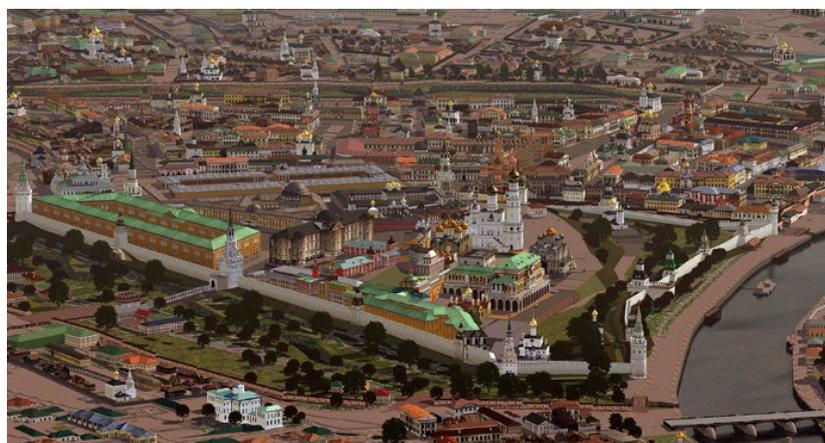


**Рис. 2.** Визуализация 3D-модели Ярославля нач. XX в. Набережная Волги, церковь Петра и Павла и церковь Николая Чудотворца

**Fig. 2.** Visualization of a 3D model of early 20th century Yaroslavl. Volga embankment, Peter and Paul Church and Nicholas the Wonderworker Church

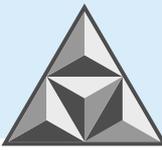
Особое внимание уделено значимым объектам в городе, которые не сохранились или в настоящее время сохранились частично. Модели этих зданий проработаны максимально подробно. В их число входят: церковь Петра и Павла и церковь Николая Чудотворца (1691-1937 гг.) (рис. 2), церковь Троицы Живоначальной Пятницкого прихода (1730-1937 гг.), Крестовоздвиженская церковь (1675-1930 гг., частично разрушена), комплекс Благовещенских храмов (1688-1929 гг., разрушена колокольня), церковь Сошествия Святого Духа (1688-1938 гг.), церковь Введения Пресвятой Богородицы во Храм (1738-1933 гг.), ресторан Бутлера (1902-1930 гг.), церковь Варвары и Екатерины Великомученицы (1668-1931 гг.), церковь Жен Мироносиц Всехсвятского прихода (1683-1937 гг.), церковь Рождества Иоанна Предтечи (1670-1932 гг.), Мытный рынок (1820-1981 гг.), Святые ворота с колокольней Казанского монастыря (1821-1923 гг.), гостиница Кокуева (1864-1980 гг.), Гостиный двор, южный корпус (1813-1920 гг.), церковь Рождества Богородицы (1720-1930 гг.), Спасо-Преображенский монастырь (1516-1923 гг., частично перестроен), Американский мост (1873-1960 гг.), церковь Иоанна Богослова (1679-1934 гг.), Успенский кафедральный собор (1670-1937 гг.), Демидовский юридический лицей (1826-1929 гг.), церковь Иоанна Златоуста в Рубленном городе (1690-1931 гг.).

Что касается Москвы, она была воссоздана в моделях на начало XX и XIX в. [11]. Более целостно город был восстановлен на начало XIX в., (рис. 3), а работы по 3D-реконструкции Москвы (до революции 1917 г.) еще продолжаются.



**Рис. 3.** Визуализация 3D-модели Москвы нач. XIX в. Река Неглинная, Кремль, Китай-город, Зарядье

**Fig. 3.** Visualization of 3D model of Moscow at the beginning of the XIX c. Neglinnaya River, Kremlin, Kitay-gorod, Zaryadye



Остановимся подробнее на реконструкции города на период до Отечественной войны 1812 г. В основу работы положены различные исторические источники; особенно полезным оказалось издание 1809 г. «Собрание фасадов Его Императорским Величеством высочайше апробированных», которое позволило заполнить информационные пустоты и творчески воссоздать здания, обозначенные лишь на плане. Как выяснилось после завершения основной работы над моделью, именно это издание использовалось для создания декораций городских пространств фильма Сергея Бондарчука «Война и Мир» в 1967 г.

В отношении значимых объектов Москвы того времени недостатка архивных данных не наблюдалось. Это позволило проработать известные объекты и их окружение более подробно. В числе таких объектов оказался белокаменный Кремль, включающий в себя Зимний дворец Растрелли и реконструированный в 1798 г. по проекту Н.А. Львова, Собор Спаса Преображения на Бору (1330-1918 гг.), Старую Оружейную палату (1806 г.), Чудов монастырь (1365 г.), Вознесенский монастырь (1386 г.), Церковь Константина и Елены (1692-1928 гг.) и др. Объекты за пределами Кремля: Земский приказ (1699 г.), Торговые ряды Кваренги (1780 г.), Алевизов ров (1508 г.), Китайгородская стена (с 1535 г.), Свайный Москворецкий мост (1789 г.), Гостиный двор в процессе строительства (1790-1830 гг.), Воспитательный дом (1764 г.), Петровский театр (Театр Медокса) (1780-1805 гг.), Сухарева башня (1695-1934 гг.).

При воссоздании города на период 100 лет назад получение исходных материалов было упрощено, так как в то время уже была распространена фотография. Существуют и онлайн-агрегаторы исторических фотографий, где снимки ассоциированы не только с датой создания, но и имеют привязку к карте, а на карте указано направление, в котором сделан снимок [12].

Таким образом, создан новый инструмент исследования, визуализации и популяризации истории.

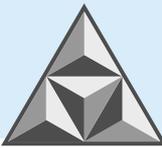
Если начало пошло от исторических книг, научных трудов, архивных чертежей, планов и фасадов, то в начале XX в. к исследованию и реконструкции исторических мест и событий активно подключился кинематограф. Поэтому в XXI столетии становится возможным реконструировать отдельные исторические здания, утраченные или видоизмененные в 3D-моделях. Однако примеры воссоздания городов с помощью подобного моделирования до последнего времени исчислялись лишь в единицах.

Это объясняется некоторыми сложностями при создании таких моделей – как технического, так и организационного и даже творческого характера, к числу которых следует отнести:

1. Требовательность к компьютерным мощностям создания и сбора в единую сцену модели города, содержащего тысячи зданий, каждое из которых – довольно сложная трехмерная модель.

2. Трудоемкость моделирования неповторяющихся зданий по архивным материалам, не поддающегося процессу автоматизации.

3. Сложности в работе по реконструкции города на определенный момент времени (например, 200 лет назад). Чаще всего удается найти достаточно подробный план города, но информация о фасадах и внешнем виде зданий более скупа. Фасады доступны лишь для 10-15% зданий, отмеченных в плане. Обычно это ракурсные изображения – картины того времени либо фотографии более позднего периода, на которых утраченные ныне объекты еще сохранились, само здание изображено под определенным углом к наблюдателю и загорожено другими. В связи с этим требуется сначала творчески восстановить плоские изображения фасадов здания, а затем – собрать в правильную конфигурацию согласно плану.



4. Отсутствие информации о внешнем виде части зданий; при этом оставлять пустоты на их месте невозможно, поскольку они отмечены в плане города. На практике была разработана и применялась методика с условным названием «реконструкция фона».

Оптимизация модели или «зависимость от наблюдателя» – метод, применяемый при создании визуализаций на основе 3D-реконструкции, основанный на том, чтобы моделировать только то, что видно с определенной точки или траектории. Данный метод позволяет не только экономить машинное время на просчет кадров ролика, но и сделать визуализацию определенных ракурсов технически возможной при имеющихся мощностях. В целом 3D-модель города, ориентированная на визуализацию, связана с созданием видеоролика полета над городом, когда камера направлена в определенном направлении или работает панорамно (обзор 360°). Детализация проработки частей модели тем выше, чем ближе они к траектории движения камеры. Как уже отмечалось выше, принцип «зависимости от наблюдателя» позволяет не только сэкономить ресурсы на построение модели, но и запараллелить процессы моделирования города и рендера (визуализации кадров ролика). Соответственно, разработка может осуществляться вдвое быстрее.

Если сопоставить уровни детализации компонентов модели с расстоянием от камеры, при масштабе 1:1 можно выделить следующие градации:

- расстояние более 1 км: создание объемов зданий методом «выращивания из плана», когда к контурам в плане добавляется третья координата высоты и образуются кубы или параллелепипеды зданий; условное текстурирование полученных объемов;
- расстояние от 500 м: объемам зданий придаются индивидуальные текстуры, создаваемые на основе доступных исторических данных с необходимой доработкой;
- расстояние 100-500 м: к текстурированным объемам зданий добавляются детали – печные трубы, колоннады, балконы, карнизы и др.;
- расстояние менее 100 м: включается городской антураж – фонари, люди, повозки, вывески, тумбы с афишами и т.д.

Саму методику трехмерного воссоздания городов на определенный исторический период можно назвать «Антиархеологией». Археология является исторической дисциплиной, изучающей прошлое человечества по вещественным источникам [13], а данная методика, напротив, основана на генерации 3D-моделей, где базой служат цифровые исходные данные. Если археологические реконструкции часто содержат пустоты между достоверно воссозданными фрагментами здания или города, предлагаемая методика во многом ориентирована на заполнение таких пустот. Если археологию считают наукой, схожей по методологической природе с криминалистикой, то «антиархеология» ориентирована на социальный аспект и популяризацию истории архитектуры способами, схожими с созданием декораций в кинематографе. Здесь важной задачей является передача «духа места» (Genius loci) [14], и достижение цели помогает охватывать большие территории для создания исторических реконструкций.

Создание таких 3D-моделей реконструированных городов, в первую очередь, представляет интерес для исследователей, занимающихся средовой архитектурой. Не секрет, что при средовом проектировании архитектору часто приходится довольствоваться разрозненными архивными данными о зданиях, которые находились на участке проектирования или рядом с ним. Время на создание проекта ограничено, архитектору не удастся хотя бы мысленно или в набросках и эскизах воссоздать ту среду, генетику которой должно нести будущее здание. Оперирование обрывочными архивными сведениями приводит к тому, что представление об исторической среде искажается. Это оказывает влияние на облик проектируемого здания,



в частности, снижает его визуально-эстетические характеристики. Нередко возникают так называемые «клиповые» фасады, несущие поверхностное представление о городе или улице определенного исторического периода, облик которой архитектор пытался отразить в новом объекте. В этой связи трехмерная реконструкция города, пусть не всегда передающая в мелких деталях городскую территорию, способна транслировать облик и оказать архитектору помощь в средовом проектировании.

## ТРЕХМЕРНАЯ РЕКОНСТРУКЦИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ПУТЕЙ РАЗВИТИЯ ГОРОДОВ

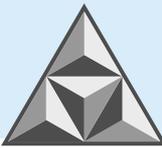
При 3D-моделировании городов возможны не только исторические реконструкции. Технические ограничения в этой деятельности малы, а творческие границы в виртуальном пространстве выражены еще меньше. Так, появляются возможности реализовать не построенные на практике здания. Особенно это касается эпохи Русского авангарда 1920-1930-х гг. [15], когда различных идей, концепций и архитектурных проектов было великое множество, но в связи с тяжелой экономической ситуацией в Советской России реализовывалось мизерное их количество. Однако, даже оставшись на бумаге, многие проекты авангардистов стали широко известны. Например, можно представить ситуацию, когда золотой метеорит из романа Жюль Верна «В погоне за метеором» падает где-то на территории РСФСР, а у советского правительства появляются средства на реализацию этих авангардных проектов. Благодаря виртуальной реальности мы попадаем в альтернативную ветку реальности настоящей. Отметим, что понятие альтернативной реальности не лишено научного смысла.

Поскольку большинство авангардных архитектурных проектов планировалось в Москве и столицу в 30-х годах XX века предполагалось почти полностью перестроить, из значимых городских объектов оставив фактически только Кремль, 3D-модель Москвы является весьма удобной площадкой для визуализации большинства этих идей. Так был создан виртуальный проект «Москва, которой не было» (рис. 4) [16].



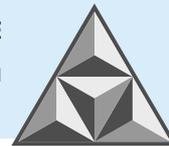
**Рис. 4.** Визуализация 3D-модели Москвы с нереализованными проектами авангардистов. Народный Комиссариат Тяжелой Промышленности СССР на Красной площади (1934 г.). Архитектор Иван Леонидов

**Fig. 4.** Visualization of 3D model of Moscow with not implemented projects of avant-garde artists. People's Commissariat of Heavy Industry of the USSR on Red Square. 1934. Architect Ivan Leonidov



В данном цифровом проекте воссозданы на реальных участках проектирования (в тех случаях, когда их удалось определить) нереализованные архитектурные проекты 1920-1970-х годов, в том числе: Коммунальный дом и Храм общения народа, (1919 г., арх. Николай Ладовский), Ленинская трибуна (1920 г., арх. Эль Лисицкий), Архитектоны Альфа и Гота (1920-е гг., арх. Казимир Малевич), Дворец Труда (1923 г., арх. братья Веснины), Небоскреб ВСНХ (1923 г., арх. Владимир Кринский), Ленинградская Правда (1924 г., арх. братья Веснины), АО Аркос (1924 г., арх. Владимир Кринский), Горизонтальный небоскреб (1925, арх. Эль Лисицкий), Центральный телеграф (1925 г., арх. братья Веснины), Типография газеты Известия (1926 г., архитектор Иван Леонидов), Международный Красный стадион (1926 г., арх. Михаил Коржев), Центральный оптово-розничный рынок (1926 г., арх. М. Барщ и М. Синявский), Электробанк (1926 г., арх. Илья Голосов), Типография «Новый мир» (1926 г., арх. А.В. Куровский), Институт Библиоковедения им. Ленина (1927 г., арх. Иван Леонидов), Башня в городе будущего (1927 г., арх. Лев Руднев), Дом съездов (1928 г., арх. Рашель Смоленская), Летающий город (1928 г., арх. Георгий Крутиков), Центральная библиотека им. Ленина (1929 г., арх. Братья Веснины), Памятник Христофору Колумбу (1929 г., арх. Николай Ладовский), Эллинг для дирижаблей (1931 г., архитекторы Розенфельды), Дворец Народов СССР (1932 г., арх. Константин Мельников), Архитектурная выдумка-иллюзия №17 и Композиции №18 и №24 (1933 г., арх. Яков Чернихов), Дворец техники (1933 г., арх. А. Самойлов и Б. Ефимович), Дворец Советов (1934 г., арх. Б. Иофан, В. Гельфрейх и В. Щуко), Здания Народного Комиссариата Тяжелой Промышленности СССР на Красной пл. (1934 г., арх. И.И. Леонидов, А.В. Щусев и Д.Ф. Фридман) (рис. 4), Центральный дом Аэрофлота (1934 г., арх. Дмитрий Чечулин), Наркомат обороны (1934 г., арх. Лев Руднев), Академия наук СССР (1934 г., арх. Алексей Щусев), Дом Радио на Миусской площади (1934 г., арх. А. Н. Душкин, А.Г. Мордвинов), Театр Мейерхольда (1934 г., арх. А.В. Щусев), Проспект Дворца Советов и Проспект Конституции (1935 г., Институт Генплана Москвы), Дом МежРабПомФильм (1935 г., Институт Генплана Москвы), Здание ТАСС на Тверском бульваре (1936 г., арх. Илья Голосов), Большой Академический Кинотеатр на площади Свердлова (1936 г., арх. А.В. Великанов, И.В. Ткаченко и Ю.В. Щуко), ВИЭМ им. А.М. Горького (1936 г., арх. Н.Е. Лансере, В.И. Гридин и Э.Б. Кольби), Полиграфический комбинат «Известия» (1940 г., арх. Б.М. Иофан, А.Ф. Хряков), Монумент героическим защитникам Москвы (1942 г., арх. Леонид Павлов), Административное здание в Зарядье (1948 г., арх. Д.Н. Чечулин), Проект перепланировки центра Москвы (частично, 1966-1967 гг., арх. Л. Павлов), Издательский комплекс «Известия» на Пушкинской (1967 г., арх. Л. Павлов), Центральный музей им. Ленина (1970 г., арх. Л. Павлов), Здание Министерства внешней торговли (1970-е гг., арх. Михаил Посохин).

Есть определенная особенность: многие известные, но нереализованные проекты архитекторов начала XX века делались на конкурсной основе. Так, в 1920-1930-х гг. проводились всесоюзные и международные конкурсы на проекты: Дворец труда в Москве (1922-1923 гг.), Московское представительство газеты «Ленинградская Правда» (1924 г.), Центральный телеграф (1925 г.), Библиотека им. В. И. Ленина, здания АО «Аркос», Дома Текстилей (1920-е гг.), здания Дворца Советов (1931-1933 гг.) и НаркомТяжПром на Красной площади и в Зарядье (1934-1936 гг.). Следовательно, на одном и том же участке проектирования возникало множество вариантов определенного здания. Показ их в среде города практически невозможен – ни в реальных физических макетах, ни в оригинальной авторской графике, так как графическая традиция архитектурных подач в 20-е годы XX в. была довольно аскетичной. В 1930-е годы часть новых проектов стали графически изображать в среде, но с одного ракурса.



В 3D-модели города есть возможность создать все объекты, скрыв их в структуре сцены и последовательно открывая в видеовизуализации. Таким образом, можно осмотреть с разных позиций объекты, планировавшиеся к реализации на одной территории.

Трехмерная модель для проекта «Москва, которой не было» является своеобразным визуальным архитектурным путеводителем по Русскому авангарду. При этом становится удобно оценить эстетические составляющие нереализованных объектов и ответить для себя на вопрос: «Хорошо или плохо, что данные здания не были построены?»

Создается возможность увидеть первоисточник движения архитектурного авангарда 1920-1930-х годов, возникшего у нас в стране, но не успевшего достаточно развиться, поскольку в середине 30-х годов резко сменилась государственная политика, в том числе – на культурном уровне. В результате авангард был заменен на сталинский ампи́р. Идеи возродились только в 1960-х годах, тогда как в западном мире этот 30-летний период был посвящен активной архитектурной практике, основывающейся, в частности, на авангардистских идеях того же ВХУТЕМАСа времен СССР. В итоге с 1960-х годов советские архитекторы заимствовали уже переработанный западный авангард – международный модернизм, который на тот момент был технологичнее и современнее, но яркость первоначальных идей в нем уже значительно угасла [17].

Многие из проектов 1920-х годов так или иначе нашли воплощение и были процитированы позднее в современных зданиях и сооружениях; здесь же становится понятно, насколько корректным было такое цитирование. В этой связи полученную 3D-модель можно рассматривать как своеобразный цифровой музей, слепок идей эпохи, отображающий оригинальные архитектурные идеи того времени.

Также в 3D-модели была реконструирована центральная часть генплана Москвы (1935 г., рис. 5) и запечатлена эпоха, пришедшая на смену архитектуре авангарда.



**Рис. 5.** Визуализация 3D-модели Москвы с генеральным планом 1935 г.

Проспект Дворца Советов. Архитекторы: Институт Генплана Москвы

**Fig. 5.** Visualization of a 3D model of Moscow with the 1935 general plan of the Palace of Soviets Avenue. Architects: Institute of General Plan of Moscow

Генплан предполагал почти полную перестройку центра Москвы [18]. Проект Генплана был проработан очень подробно, от центральных осей – проспектов, площадей и улиц – до отдельных зданий, исчисляемых в сотнях. Центром композиции, к которому сходились оси,



был Дворец Советов – здание высотой 415 м, которое должно было в то время стать самым высоким в мире; его венчала 100-метровая статуя Ленина. Однако при 3D-воссоздании Генплана выяснилась интересная особенность, а возможно, и недостаток проекта: эта статуя, лицом к Кремлю, оказывалась расположенной спиной к Проспекту Дворца Советов – главному планировавшемуся проспекту столицы, а также – всей западной части Москвы. В доступных материалах Генплана при этом нет ни одного ракурсного изображения, где бы Дворец Советов был четко прорисован с этой стороны.

Работа над проектом к настоящему времени не завершена, так как обнаруживаются новые исторические данные о нереализованных проектах начала и середины XX столетия, что требует внесения соответствующих уточнений и дополнений. Если же задаться вопросом о технологическом его развитии, реалистичным выглядит использование полученных градостроительных 3D-моделей для создания навигатора по местности в исторической среде или альтернативной ветке истории. Пользователь, перемещаясь по реальному городу, наблюдает в уменьшенном градостроительном масштабе как минимум историческую/альтернативную версию на определенный год, а как максимум – может от первого лица сравнить современное состояние улиц с историческим, используя очки виртуальной или дополненной реальности. Соответственно, для создания минимальной версии с описываемыми характеристиками требуется оптимизация модели, чтобы она отвечала требованиям современных гаджетов. Создание реалистичного погружения в городскую среду на определенном временном этапе предполагает детализацию пространств 3D-модели на уровне человека, а также создание упрощенных вариантов-слоев для визуализации на средних и дальних планах, требующихся для оптимизации производительности на устройствах-гаджетах.

## ВЫВОДЫ

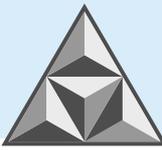
Трехмерные модели городов и исторические реконструкции, учитывающие альтернативный ход развития истории, обладают большим потенциалом для деятельности архитекторов, поскольку история родного города интересует как широкие слои населения, так и практически каждого жителя.

Использование технологий дополненной и виртуальной реальности должно способствовать популяризации подобных проектов в будущем, сделать их доступными и наглядными для заинтересованных пользователей.

С технической и технологической точек зрения, развитие систем с искусственным интеллектом будет способствовать точному фотограмметрическому построению 3D-моделей в архитектуре и автоматизирует процессы их получения, не исключая творческую составляющую архитектурной и дизайнерской деятельности.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Куртова К.Г., Казакова Н.Ю.** К вопросу о развитии VR и AR технологий в дизайне // Актуальные направления фундаментальных и прикладных исследований: Мат. XXIII межд. науч.-практ. конф., North Charleston, USA, 22-23 июня 2020 года. North Charleston, USA: LuluPress, Inc., 2020. С. 7-15.
2. **Веденеева О.В.** Обзор исследований: цифровое 3D-моделирование города на основе фотограмметрии // Перспективы развития строительного комплекса: Мат. XIV Межд. науч.-практ. конф. профессорско-преподавательского состава, молодых ученых и студентов, Астрахань, 22-23 октября 2020 года. Т. 14. Астрахань: Астрахан. гос. арх.-строит. ун-т, 2020. С. 35-38.
3. Ярградфорум и 3D Ярославль // *Новости Vimania*: [сайт]. URL: <https://vimania.ru/w/blog/2022/08/25/>



4. Виртуальные миры Москвы прошлого и будущего // Телеканал «День», Дзен.ру: [сайт]. URL: <https://dzen.ru/video/watch/631c4a24d62cce7af9addc5e>
5. В Белокаменном подклете Старого Английского двора откроется выставка «Зарядье. Архивы возможного» // Сайт мэра Москвы: [сайт]. URL: <https://www.mos.ru/news/item/129328073/>
6. **Смолин А.А., Малышев К.В., Шевченко Д.В.** Использование методов фотограмметрии для создания фотореалистичной модели [электронный текст] // *Культура и технологии*. 2019. Т. 4. Вып. 1. С. 6-15. URL: <http://cat.itmo.ru/ru/2019/v4-i1/217>
7. **Колесникова, Ю.О.** Создание векторных моделей объектов по результатам фотограмметрии и лазерного сканирования // *Молодой ученый*. 2021. № 51 (393). С. 38-40. URL: <https://moluch.ru/archive/393/87152/>
8. 3D-модели городов // *Cih.ru блог*: [сайт]. URL: <https://cih.ru/wp/bld/2023/06/10/3d>
9. 3D-города — историческая реконструкция // *Cih.ru блог*: [сайт]. URL: <https://cih.ru/wp/bld/2023/07/17/3d>
10. Ярославль до революции – 3D-модель города // *Журнал ЦИХ*: [сайт]. URL: <https://cih.ru/j3/726.html>
11. 3D-модель Москвы 1812-1912 гг. // Портал «Архитектура и энтропия»: [сайт]. URL: <https://cih.ru/lb/index.html>
12. PastVu - ретроспектива среды обитания человечества: [сайт]. URL: <https://pastvu.com>
13. **Молев Е.А.** Археология: учебно-метод. пособие / Е.А. Молев. Ниж. Новгород: изд-во ННГУ, 2019. 42 с.
14. **Антонова Н.Е.** «Дух места» как предмет охраны // *Academia. Архитектура и строительство*. 2015. № 1. С. 30-38.
15. **Хан-Магомедов С.О.** Архитектура советского авангарда: В 2 кн.: Кн. 1: Проблемы формообразования. Мастера и течения. М.: Стройиздат, 1996. С. 5-20.
16. Москва, которой не было, 1920 – 1970 // Портал «Архитектура и энтропия»: [сайт]. URL: <https://cih.ru/lb/m2.html>
17. **Якушенко О.** Советская архитектура и запад: открытие и ассимиляция западного опыта в советской архитектуре конца 1950-х - 1960-х годов // *Laboratorium: журнал социальных исследований*. 2016. № 2. С. 76-102.
18. **Харин, М.С.** Реконструкция Москвы в 1930-е гг.: специальность 07.00.02 «Отечественная история»: автореф. дисс... канд. ист. наук / Харин Максим Сергеевич. Москва, 2008. 28 с.

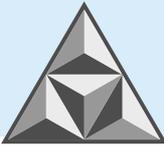
Поступила в редакцию 15.02.2024

Одобрена после рецензирования 26.08.2024

Принята к опубликованию 13.09.2024

## REFERENCES

1. **Kurtova, K.G. and Kazakova, N.Yu.** (2020), "On the development of VR and AR technologies in design", Actual directions of fundamental and applied research: Proceedings of the XXIII International Scientific and Practical Conference, North Charleston, USA, 22-23 June 2020. North Charleston, USA: LuluPress, Inc., pp. 7-15.
2. **Vedeneeva, O.V.** (2020), "Research review: digital 3D-modelling of the city based on photogrammetry", Prospects of development of the construction complex: Proceedings of the XIV Interdisciplinary Scientific and Practical Conference of the teaching staff, young scientists and students, Astrakhan, Russia, pp. 35-38 (in Russian).
3. Yargradforum and 3D Yaroslavl // *Vimania News*: Available at: <https://vimania.ru/w/blog/2022/08/25/> (accessed 22.09.2023).
4. Virtual worlds of Moscow of the past and the future // *Den TV channel, Dzen.ru*. Available at: <https://dzen.ru/video/watch/631c4a24d62cce7af9addc5e> (accessed 22.09.2023).
5. The exhibition "Zaryadye. Archives of the possible". *Moscow Mayor's website*. Available at: <https://www.mos.ru/news/item/129328073/> (accessed 22.09.2023).
6. **Smolin, A.A., Malyshev, K.V. and Shevchenko, D.V.** (2019), "Using photogrammetry methods to create a photorealistic model", *Kul'tura i tekhnologii [Culture and Technology]*, no. 4 (1), pp. 6-15. Available at: <http://cat.itmo.ru/ru/2019/v4-i1/217> (accessed 22.09.2023) (in Russian).



7. **Kolesnikova, Yu.O.** (2021), "Creation of vector models of objects based on the results of photogrammetry and laser scanning", *Molodoy uchenyj [Young Scientist]*, no. 51 (393), pp. 38-40. Available at: <https://moluch.ru/archive/393/87152/> (accessed 22.09.2023) (in Russian).
8. 3D city models // *Cih.ru blog*: Available at: <https://cih.ru/wp/bld/2023/06/10/3d> (accessed 22.09.2023) (in Russian).
9. 3D cities - historical reconstruction // *Cih.ru blog*: Available at: <https://cih.ru/wp/bld/2023/07/17/3d> (accessed 22.09.2023) (in Russian).
10. Yaroslavl before the revolution - 3D model of the city // *Zhurnal CIH*: Available at: <https://cih.ru/j3/726.html> (accessed 22.09.2023) (in Russian).
11. 3D-model of Moscow 1812-1912 // *Portal 'Architecture and entropy'*. Available at: <https://cih.ru/lb/index.html> (accessed 22.09.2023) (in Russian).
12. PastVu - A retrospective of humanity's habitat. Available at: <https://pastvu.com/> (accessed 22.09.2023) (in Russian).
13. **Molev, E.A.** (2019), *Archaeology: educational and methodical textbook*. NNGU Publishing House, Nizhny Novgorod, Russian Federation (In Russian).
14. **Antonova, N.E.** (2015), "Spirit of Place' as a Subject of Heritage Protection", *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and Construction]*, no. 1, pp. 30-38 (in Russian).
15. **Khan-Magomedov, S.O.** (1996), *Architecture of the Soviet Avant-Garde: In 2 books: Book 1: Problems of Formation. Masters and Currents*. Stroyizdat, Moscow, Russian Federation.
16. Moscow, which was not, 1920 - 1970 // *Portal 'Architecture and entropy'*. Available at: <https://cih.ru/lb/m2.html> (accessed 22.09.2023) (in Russian).
17. **Yakushenko, O.** (2016), "Soviet Architecture and the West: The Discovery and Assimilation of Western Narratives and Practices in Soviet Architecture in the late 1950s-1960s", *Laboratorium: zhurnal social'nyh issledovaniy [Labouratorium: a journal of social research]*, no. 2, pp. 76-102 (in Russian).
18. **Kharin, M.S.** (2008), *Reconstruction of Moscow in the 1930s: Abstract of Ph.D. dissertation*. Domestic History, Moscow, Russian Federation.

*Received 15.02.2024*

*Approved 26.08.2024*

*Accepted 13.09.2024*



## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция строго придерживается норм и правил международной публикационной этики.

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

Представление статьи в журнал подразумевает следующее:

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

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

### **Авторские права**

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

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

### **Приватность**

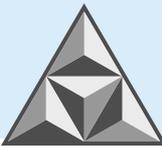
Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте данного журнала, используются исключительно для достижения целей, совпадающих с миссией журнала; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

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

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

### **Рубрики журнала**

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



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

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

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

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

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

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

**Структура статьи**

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



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

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

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

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

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

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

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

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



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

### Формат

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

### Оформление литературных ссылок

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

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

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

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

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

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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

*Поступила в редакцию*

*Одобрена после рецензирования*

*Принята к опубликованию*



## REFERENCES

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

*Received*

*Approved after reviewing*

*Accepted*

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



**ТОМ 5, ВЫПУСК 3, 2024** | VOL. 5, ISS. 3, 2024

