

ISSN ONLINE 2782-1919

**УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



**Том 7
выпуск**

3

2026

**VOLUME 7
ISSUE 3**

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

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

**Том 7
Выпуск 3**

Ярославль 2026

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: И.А. ВОРОНОВ (Ярославль)

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), М.О. БАКАНОВ (советник РААСН, д.т.н., доц., Москва), В.В. БЕЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Тверь), А.М. БЕЛОСТОЦКИЙ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.М. БУРГОНУТДИНОВ (д.т.н., проф., Пермь), Н.И. ВАТИН (советник РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), Г.В. ЕСАУЛОВ (вице-президент РААСН, акад. РААСН, д. архитектуры, проф., Москва) А.В. ЗАХАРОВ (советник РААСН, к. архитектуры, проф., Иваново), А.Б. КАПРАНОВА (д.ф.-м.н., проф., Ярославль), В.И. КОЛЧУНОВ (академик РААСН, д.т.н., проф., Москва), В.Г. КОТЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Йошкар-Ола), Н.Н. КУДРЯШОВ (к. архитектуры, проф., Ярославль), А.Е. ЛЕБЕДЕВ (д.т.н., доц., Ярославль), С.Н. ЛЕОНОВИЧ (иностраннный акад. РААСН, д.т.н., проф., Республика Беларусь, Минск), В.Л. МОНДРУС (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.И. МОХОВ (акад. РАЕН, д.т.н., проф., Москва), Т.А. НИЗИНА (советник РААСН, д.т.н., проф., Саранск), П.И. ПОСПЕЛОВ (д.т.н., проф., Москва), Ю.В. ПУХАРЕНКО (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), С.П. РУДОБАШТА (д.т.н., проф., Москва), В.Е. РУМЯНЦЕВА (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Иваново), В.П. СЕЛЯЕВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Саранск), М.Ю. 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) 44-32-75
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru
Электронный адрес: <http://comincon.ru>

Журнал издается при содействии Российской академии архитектуры и строительных наук

Редактор: В.Б. Доброхотов
Англ. перевод: Л.А. Тюкина
Корректор: Э.М. Сафиуллин
Компьютерная верстка: А.С. Фролов

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

PUBLISHED BY YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Established in November 2020, published quarterly

Included in the List of the Higher Attestation Commission of the Russian Federation and Unified State List of Scientific Publication, Level 3

Volume 7

Issue 3

Yaroslavl 2026

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:	I.A. VORONOV (Yaroslavl)

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

A.A. ABDYKALYKOV (doc.eng.sc., prof., Kyrgyzstan, Bishkek), P.A. AKIMOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), M.O. BAKANOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., doc., Moscow), V.V. BELOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tver), A.M. BELOSTOTSKII (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.M. BURGONUTDINOV (doc.eng.sc., prof., Perm), N.I. VATIN (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saint-Petersburg), G.V. ESAULOV (vice-pres. RAACS, acad. RAACS, doc. arch., prof., Moscow), 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. KUDRIASHOV (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), Iu.V. PUKHARENKO (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saint-Petersburg), S.P. RUDOBASHTA (doc.eng.sc., prof., Moscow), V.E. RUMIANTSEVA (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), V.P. SELIAEV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saransk), M.Yu. TARSHIS (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl), V.I. TRAVUSH (Vice Pres. RAACS, acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.A. TRESHCHEV (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tula), V.N. FEDOSEEV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD eng.sc., prof., Serbia, Belgrade)

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

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

Editor:	V.B. Dobrokhoto
English translator:	L.A. Tiukina
Proofreader:	E.M. Safiullin
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

Федосов С.В., Федосеев В.Н., Разговоров П.Б., Воронов В.А.

- 8 Рациональные ограждающие конструкции деревянных зданий: тепломассоперенос и экологический потенциал
Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Razgovorov P.B., Voronov V.A.
Rational enclosing structures of wooden buildings: heat and mass transfer and environmental potential

Строительные материалы и изделия

Огурцов В.А., Шенберева А.В., Лубягин В.С., Ивченко Д.И., Макаров М.В.

- 19 Синтез теории цепей Маркова и цифровых двойников виброгрохотов для управления фракционным составом сыпучих строительных материалов
Ogurtsov V.A., Shenbereva A.V., Lubiagin V.S., Ivchenko D.I., Makarov M.V.
Synthesis of Markov chain theory and digital twins of vibrating screens for controlling the fractional composition of bulk building materials

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

Богуславский Л.А., Проваторова Г.В.

- 33 Подход к оптимизации трассирования автомобильных дорог на основе технологий информационного моделирования
Boguslavskii L.A., Provatorova, G.V.
An approach to optimizing highway routing based on information modeling technologies

Егорычев П.А., Игнатьев А.А.

- 46 Современные подходы к мониторингу деформаций транспортных тоннелей: технологии, принципы и направления развития
Egorychev P.A., Ignatev A.A.
Modern approaches to monitoring deformations of transport tunnels: technologies, principles and development trends

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

Расторгуев С.В.

- 64 Сверхтонкие небоскребы: российский вклад в новую типологию

Rastorguev S.V.

Ultra-thin skyscrapers: Russian contribution to the new typology

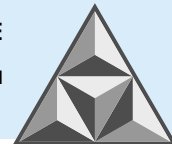
Личак Д.А., Лебедев А.Л., Личак Н.А.

- 79 Трансфер голландских технологий оборонительного зодчества:
Ростовская крепость в России XVII столетия

Lichak D.A., Lebedev A.L., Lichak N.A.

The transfer of Dutch fortification technologies: the Rostov fortress in
17th-century Russia

- 95 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.011.1:504.06.2

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-8-18

Рациональные ограждающие конструкции деревянных зданий: теплопередача и экологический потенциал

С.В. Федосов, В.Н. Федосеев, П.Б. Разговоров, В.А. Воронов

Сергей Викторович Федосов¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Российская Федерация
fedosovsv@mgsu.ru

Вадим Николаевич Федосеев^{2,*}, Владимир Андреевич Воронов²

²Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Российская Федерация
*4932421318@mail.ru**, *amenamiiii@gmail.com*

Павел Борисович Разговоров³

³Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация
razgovorovpb@ystu.ru



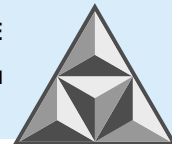
Рассмотрены вопросы разработки и совершенствования рациональных типов ограждающих конструкций деревянных зданий с учетом протекающих в них процессов сопряженного тепломассопереноса и экологической безопасности. Представлен сравнительный анализ типовых конструкций, приведенных к единому нормативному термическому сопротивлению. Выявлено, что деревянные конструкции обладают отрицательным углеродным следом на стадии производства ($-116.2 \text{ кг CO}_2\text{-экв.}\cdot\text{м}^{-2}$) за счет депонирования углерода. Для гарантии долговечности и реализации экологического потенциала обоснована необходимость применения математического моделирования нестационарного тепломассопереноса на основе классической теории академика РААСН С.В. Федосова. Разработанный алгоритм, использующий интегральное преобразование Лапласа и теорию подобия, позволяет получить аналитическое решение в виде быстроходящихся рядов. Это решение служит надежным базисом для разработки численных методов экспериментальных исследований свойств материалов и создания алгоритмов мониторинга технического состояния деревянных конструкций в период эксплуатации.

Ключевые слова: деревянные здания, ограждающие конструкции, тепломассоперенос, экологический потенциал, мониторинг состояния, углеродный след

Для цитирования:

Федосов С.В., Федосеев В.Н., Разговоров П.Б., Воронов В.А. Рациональные ограждающие конструкции деревянных зданий: тепломассоперенос и экологический потенциал // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 3. С. 8-18.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-8-18



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-8-18

Rational enclosing structures of wooden buildings: heat and mass transfer and environmental potential

S.V. Fedosov, V.N. Fedoseev, P.B. Razgovorov, V.A. Voronov

Sergei Viktorovich Fedosov¹

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

fedosovsv@mgsu.ru

Vadim Nikolaevich Fedoseev^{2,*}, Vladimir Andreevich Voronov²

²Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

4932421318@mail.ru, amenamiiii@gmail.com*

Pavel Borisovich Razgovorov³

³Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

razgovorovpb@ystu.ru



The paper discusses the development and improvement of rational types of enclosing structures for wooden buildings, taking into account the coupled heat and mass transfer processes occurring in them and environmental safety. A comparative analysis of typical structures reduced to a unified standard thermal resistance is presented. It has been revealed that timber structures have a negative carbon footprint at the production stage ($-116.2 \text{ kg CO}_2\text{-equiv.}\cdot\text{m}^{-2}$) due to carbon sequestration. To ensure durability and realize their environmental potential, the need for mathematical modeling of unsteady heat and mass transfer based on the classical theory of Academician of the RAACS S.V. Fedosov is substantiated. The developed algorithm, employing the integral Laplace transform and similarity theory, makes it possible to obtain an analytical solution in the form of rapidly convergent series. This solution serves as a reliable basis for the development of numerical methods for experimental studies of the properties of materials and for the creation of algorithms for monitoring the technical condition of timber structures during their service life.

Keywords: wooden buildings, enclosing structures, heat and mass transfer, environmental potential, condition monitoring, carbon footprint

For citation:

Fedosov S.V., Fedoseev V.N., Razgovorov P.B., Voronov V.A. Rational enclosing structures of wooden buildings: heat and mass transfer and environmental potential // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 3. P. 8-18. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-8-18



ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития строительной отрасли неразрывно связан с концепцией устойчивого развития и необходимостью минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду. На строительный сектор приходится около 39% глобальных выбросов CO₂, при этом значительная часть их формируется на стадии производства материалов – бетона, стали, кирпича и дерева [1]. При возведении конструкций, с учетом стратегии России, направленной на достижение углеродной нейтральности к 2060 году, стоит непростая задача глубокой технологической модернизации в части мониторинга и диагностики их технического состояния, четкого обоснования критериев уровня безопасности при переходе к принципам циркулярной экономики.

Важнейшим инструментом такой трансформации становится наличие прозрачной и достоверной информации о негативном воздействии строительного объекта (продукта) на окружающую среду на всех этапах его жизненного цикла. Известно, что материалы на основе древесины, по сравнению с традиционными кирпичом, газосиликатом или бетоном, являются более экологичными и, следовательно, возведение деревянных ограждающих конструкций может обеспечить для людей более комфортные и безопасные условия проживания [2]. Кроме того, конструктивные элементы из древесины отличаются высокие теплоизоляционные показатели [3]. В общем и целом переход к так называемым «зеленым» строительным технологиям и использованию деревянных ограждающих конструкций обеспечивается сегодня не только предлагаемыми инженерными решениями, но и финансово-экономическими механизмами, стимулирующими производителей к снижению углеродного следа.

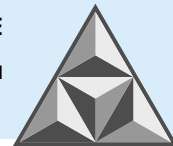
Новую прикладную область в отечественном строительстве 2020-х годов, связанную с поглощением или сокращением объема выбросов парниковых газов, представляет технология климатических проектов, которая опирается на нормативные документы: Постановление Правительства РФ № 1587 от 21.09.2021 «Об утверждении критериев проектов устойчивого (в том числе зеленого) развития в Российской Федерации»; Приказ Минэкономразвития России № 248 от 11.05.2022 «Об утверждении критериев и порядка отнесения проектов к климатическим проектам».

Климатические проекты подлежат регистрации в реестре углеродных единиц Минэкономразвития РФ. По состоянию на 2025 год в этом реестре зарегистрировано 64 проекта, включая первый индустриальный объект в категории «Производственные здания» – завод сухих строительных смесей «ЦЕМЕНТУМ» (Московская обл., г. Воскресенск), в поддержку которого была подана экологическая декларация (рейтинг 46%, «серебряный статус»).

Модернизация объектов, осуществляемая при установке ограждающих строительных конструкций, способствующих снижению парниковых газов, позволяет:

- получить субсидирование процентной ставки проектного финансирования стратегического объекта;
- получить субсидирование проектной ставки ипотечного займа;
- претендовать на налоговые льготы для застройщика или собственника;
- претендовать на доступ к так называемому «зеленому» финансированию под патронажем Банка РФ.

Таким образом, наличие верифицированной экологической декларации становится рабочим инструментом, повышающим инвестиционную привлекательность установки рациональных типов ограждающих конструкций и их совершенствования.



МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Углеродный след на стадии производства на 1 м² ограждающей конструкции строения рассчитывали по формуле:

$$CF_{prod} = \sum_{i=1}^n V_i \cdot K_{эм,i} - D_{dep}, \quad (1)$$

где V_i – объем i -материала в строительной конструкции, м³·м⁻²;

$K_{эм,i}$ – коэффициент эмиссии, кг CO₂-экв.·м⁻³;

D_{dep} – депонирование углерода (для древесины).

Углеродный след на эксплуатационной стадии строительных конструкций за столетний период:

$$CF_{oper} = q \cdot 8760 \cdot 100 \cdot K_{эл}, \quad (2)$$

где q – удельный тепловой поток через 1 м² стены, Вт·м⁻²;

8760 – количество часов в году;

$K_{эл} = 0.48 \text{ CO}_2\text{·кВт}^{-1}\text{·ч}^{-1}$ – углеродоемкость электроэнергии РФ.

Для сопоставимости результатов все ограждающие конструкции строения приводятся к единому нормативному требованию по сопротивлению теплопередаче $R_0^{\text{норм}} = 3.2 \text{ м}^2\text{·К·Вт}^{-1}$ (для климатических условий г. Иваново, согласно СП 50.13330.2012). Рассмотрены шесть типовых решений наружных стен (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение конструктивных решений для ограждающих стен строений

Table 1. Comparison of structural solutions for enclosing walls of buildings

№ п/п	Конструкция, размер (мм)	Толщина, мм	$R_0, \text{м}^2\text{·К·Вт}^{-1}$	Масса 1 м ² , кг	Срок службы, лет
1	Деревянная: брус 150 + минеральная вата 150 + вентиляционный зазор	320	4.58	145	100+
2	Кирпичная: кладка 380 + минеральная вата 150	550	4.29	680	100–150
3	Газобетонная: блоки D400, 400	400	4.00	280	50–100
4	Монолитный бетон: 200 мм + утеплитель 150	370	3.87	520	50–100
5	SIP-панель: ориентированно-стружечная плита (ОСП) 12 + пенополистирол (ПСБ-С) 150	174	4.20	42	50–75
6	Легкая стальная тонкостенная конструкция (ЛСТК): профиль + утеплитель 200 + гипсокартонный лист (ГКЛ)	250	4.10	65	50–100

Результаты расчета углеродного следа на стадии производства (A1-A3) приведены в табл. 2.

**Таблица 2.** Углеродный след конструкций на стадии производства (A1–A3), кг CO₂-экв.·м⁻²**Table 2.** Carbon footprint of building structures at the production stage (A1–A3), kg CO₂-eq.·m⁻²

Тип конструкции	Материалы, размер (мм)	CF _{prod}	Депонирование	CF _{net}
Деревянная	Брус: 15, утеплитель: 3.8	+18.8	-135	-116.2
Кирпичная	Кирпич: 91, утеплитель: 3.8	+94.8	0	+94.8
Газобетонная	Газобетон: 48	+48.0	0	+48.0
Бетонная	Бетон: 62, арматура: 36, утеплитель: 3.8	+101.8	0	+101.8
SIP-панель	ОСП: 10, ПСБ: 12	+22.0	0	+22.0
ЛСТК	Сталь: 32, утеплитель: 5, ГКЛ: 3	+40.0	0	+40.0

Необходимо отметить, что ключевой результат: деревянная конструкция имеет отрицательный углеродный след на стадии производства (-116.2 кг CO₂-экв.·м⁻²) за счет депонирования углерода в древесине. Это единственный материал, работающий как «углеродный банк». Результаты расчета полного углеродного следа с учетом эксплуатационной стадии приведены в табл. 3.

Таблица 3. Полный углеродный след за 100 лет эксплуатации конструкций объекта, кг CO₂-экв.·м⁻²**Table 3.** Total carbon footprint over a 100-year operational period of building structures, kg CO₂-eq.·m⁻²

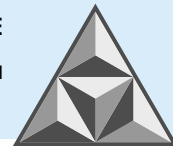
Конструкция	CF _{prod}	CF _{oper}	CF _{demol}	Депонирование	Итого
Деревянная	+18.8	+2150	+5	-135	+2038.8
Кирпичная	+94.8	+2300	+8	0	+2402.8
Газобетонная	+48.0	+2463	+6	0	+2517.0
Бетонная	+101.8	+2550	+10	0	+2661.8
SIP-панель	+22.0	+2350	+15	0	+2387.0
ЛСТК	+40.0	+2400	+12	0	+2452.0

Приведенные данные наглядно демонстрируют, что деревянная конструкция обеспечивает снижение совокупного углеродного следа на 15-25% по сравнению с кирпичными, бетонными и газобетонными аналогами на протяжении столетнего жизненного цикла.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Реализация экологического потенциала конструкции из древесины напрямую зависит от сохранения физико-биологических свойств последней на протяжении всего жизненного цикла (100+ лет). Однако следует учитывать, что вследствие возникновения биопоражений и деградации в режиме эксплуатации экологический эффект может быть нивелирован. В связи с этим разработка новых и совершенствование рациональных типов ограждающих деревянных конструкций с учетом протекающих в них процессов, природно-климатических условий и экологической безопасности становится ключевой задачей [4]. Рассмотренная ранее деревянная каркасная конструкция (брус + минераловатный утеплитель + вентилируемый зазор) представляет собой именно такое рациональное конструктивное решение, минимизирующее риски биопоражений за счет удаления влаги в зазор.

Естественная экологическая и физическая угроза для древесины – превышение критической влажности (более 20%), при которой создаются условия для развития



дереворазрушающих грибов, способных за 5-10 лет уничтожить несущие элементы. Для разработки теоретических основ и методов расчета ограждающих конструкций с учетом природно-климатических и теплофизических условий [5] построим математическую модель реального физико-биологического процесса на основе сопряженного теплопереноса.

Расчетная схема (рис. 1) является физической основой для построения математической модели на базе системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающих сопряженный теплоперенос.

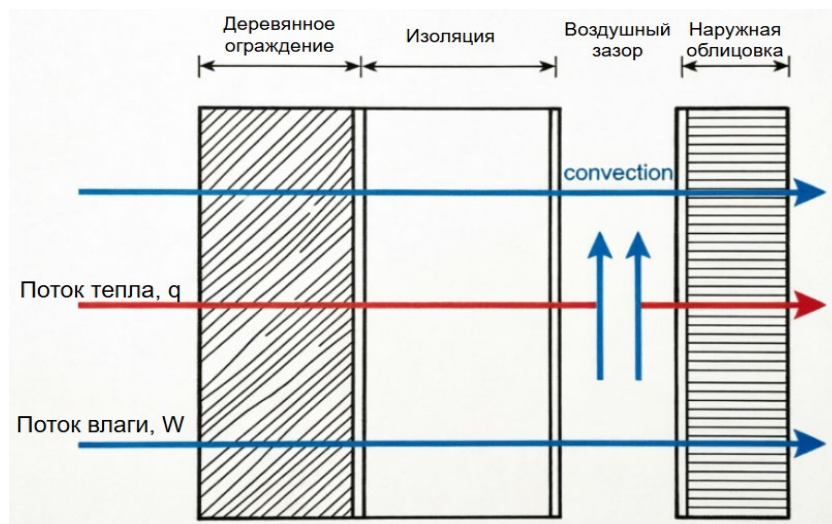


Рис. 1. Расчетная схема сопряженного теплопереноса в деревянной ограждающей конструкции с вентилируемым зазором

Fig. 1. Design scheme of coupled heat and mass transfer in a timber enclosing structure with a ventilated gap

Применение этой схемы позволяет:

- обосновать выбор рациональной конструкции ограждающей стены с точки зрения экологической безопасности и долговечности;
- разработать методы расчета ограждающих конструкций с учётом теплофизических условий и природно-климатических воздействий;
- обеспечить мониторинг технического состояния конструкции через прогноз влажностных полей и предотвращение конденсации.

Математическая модель базируется на системе дифференциальных уравнений в частных производных, описывающей процесс в системе «деревянная конструкция – вентилируемый зазор – наружная облицовка» [6-9]:

Запишем уравнение теплопереноса:

$$c_1 \rho_1 \frac{\partial t_1}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(\lambda_1 \frac{\partial t_1}{\partial x_1} \right) + r \cdot I_v, \quad (3)$$

где I_v – объемная плотность потока фазового перехода (испарение/конденсация), $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$.

Уравнение влагопереноса с учетом эффекта Соре:

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} = \frac{\partial}{\partial x_1} \left(a_m \frac{\partial W}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_1} \left(a_m \delta \frac{\partial t_1}{\partial x_1} \right). \quad (4)$$

Применение интегрального преобразования Лапласа и аппарата теории подобия (критерии Фурье, Био, Лыкова, Поздюхина-Лыкова, Коссовича, Нуссельта, Грасгофа, Прандтля, Шервуда, Шмидта, Кирпичева) [10, 11] позволяет получить аналитическое решение в виде быстросходящихся рядов [12]:



$$\theta(X, Fo) = \theta_{уст}(X) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{F(s_n, X)}{D'(s_n)} \cdot \exp(s_n \cdot Fo), \quad (5)$$

где s_n – корни характеристического уравнения, определяющие спектр собственных значений задачи.

Полученное аналитическое решение служит надежным базисом для разработки физических и численных методов экспериментальных исследований ограждающих конструкций и конструктивных свойств материалов. Оно позволяет верифицировать натурные эксперименты, точно прогнозировать влажностные и температурные поля в теле конструкции при любых природно-климатических воздействиях и оценивать эффективность различных конструктивных решений.

Кроме того, экологичность здания в фазе эксплуатации определяется объемом потребляемой энергии. Деревянные дома, обладая низкой теплопроводностью, идеально работают в паре с низкопотенциальными теплонасосными системами [13-15], использующими рассеянную энергию окружающего воздуха. Эффект описан еще в 1862 году британским физиком Уильямом Томсоном (лордом Кельвином) в работе «О времени излучения Солнца и концентрации рассеянной энергии» [16].

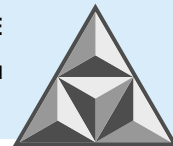
Интеграция разработанного математического аппарата в программный комплекс «цифровой двойник» открывает новые возможности для разработки и развития методов мониторинга, оценки качества и диагностики технического состояния строительных конструкций в период их эксплуатации [17]. Цифровой двойник ограждающей конструкции позволяет в режиме, приближенном к реальному времени, оценивать ее техническое состояние, прогнозировать зоны возможной конденсации влаги и предотвращать биопоражения, сохранять заложенный экологический потенциал (отрицательный углеродный след) на всех этапах эксплуатации.

Подводя итоги исследования, отметим, что экологическая декларация для строительных конструкций, материалов и изделий становится результативным инструментом прозрачной оценки их воздействия на окружающую среду на всех этапах жизненного цикла. В России сформирована нормативная база (ГОСТ Р 71392-2024, ГОСТ Р 71466-2024, ГОСТ Р 72599-2026), которая интегрирует экологические аспекты в финансово-экономические механизмы отрасли.

ВЫВОДЫ

Сравнительный анализ типовых ограждающих конструкций зданий и сооружений, приведенных к единому нормативному термическому сопротивлению, позволяет осуществить научно обоснованный выбор рационального типа конструкции с учетом протекающих процессов и экологической безопасности. Выявлено, что деревянная конструкция на стадии производства за счет депонирования углерода обладает отрицательным углеродным следом ($-116.2 \text{ кг CO}_2\text{-экв.}\cdot\text{м}^2$) и в течение столетнего жизненного цикла обеспечивает его снижение на 15-20% по сравнению с минеральными аналогами.

Моделирование нестационарного тепломассопереноса на основе классической теории академика РААСН С.В. Федосова обеспечивает решение актуальной задачи расчета ограждающих конструкций с учетом теплофизических условий. Разработанный алгоритм, использующий преобразование Лапласа и теорию подобия, служит базисом и важным инструментом диагностики свойств строительных конструкций деревянных зданий, гарантирует отсутствие их биопоражений. Совершенствование рациональных типов



ограждающих конструкций в сочетании с цифровым мониторингом их состояния формирует новую инженерную реальность, где наличие верифицированных экологических и технических данных открывает доступ к пониманию механизмов «зеленого» финансирования и реализации климатических проектов мирового уровня.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Грановский В.Л.** Энергоэффективность и углеродный след здания. Нормирование целевых показателей // *Энергосбережение*. 2022. № 8. С. 22-28.
2. **Бубнов А.Е., Сапунова А.А., Титуний А.А., Дубровина Ю.Ю.** Эффективность использования цифровых моделей для прогнозирования теплопроводности древесно-минерального композита // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6. Вып. 3. С. 8-18. DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18.
3. **Долматов С.Н.** Анализ потенциальной емкости рынка и объемов потребления стеновых строительных материалов, ориентированных на индивидуальных застройщиков, применительно к технологии древесно-минеральных композитов // *Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии*. 2025. № 1 (33). С. 29-46. <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29>.
4. **Ерофеев В.Т., Аль С.Д.С., Федорцов А.П., Федорцов В.А.** Биологическая коррозия бетонов // *Строительные материалы*. 2020. № 11. С. 13-23. DOI 10.31659/0585-430X-2020-786-11-13-23.
5. **Пастушков П.П., Гагарин В.Г.** Воздухопроницаемость минераловатных изделий современного производства // *Строительные материалы*. 2021. № 6. С. 15-20. DOI 10.31659/0585-430X-2021-792-6-15-20.
6. **Лыков А.В.** Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967. 599 с.
7. **Лыков А.В., Михайлов Ю.А.** Теория тепло- и массопереноса. М.: ГЭИ, 1963. 536 с.
8. **Федосов С.В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии. Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. 363 с.
9. **Богомолов А.Н., Федосов С.В.** Математическое моделирование процессов тепломассопереноса в строительной физике. Иваново: ИВГПУ, 2004. 256 с.
10. **Геххарт Б., Джалурия Й., Махаджан Р., Саммакия Б.** Свободноконвективные течения, тепло- и массообмен. М.: Мир, 1991. 678 с.
11. **Abiev R.S.** Hydrodynamics and Heat Transfer of Circulating Two-Phase Taylor Flow in Microchannel Heat Pipe: Experimental Study and Mathematical Model // *Industrial and Engineering Chemistry Research*. 2020. Vol. 59. No. 9. P. 3687-3701. DOI 10.1021/acs.iecr.9b04834.
12. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А.** Численно-аналитический метод сведения задач нестационарной теплопроводности с граничными условиями III рода к задачам с условиями I рода // *Строительные материалы*. 2022. № 12. С. 59-62. DOI 10.31659/0585-430X-2022-809-12-59-62.
13. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Воронов В.А., Емелин В.А.** Практика технических инженерных решений в строительных объектах с интегрированной теплообменно-теплонасосной системой // *Жилищное строительство*. 2026. № 5. С. 3-9. DOI 10.31659/0044-4472-2026-5-3-9.
14. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцева И.А., Воронов В.А.** Организация технологии комфортного жизнеобеспечения в строениях с высоким классом энергоэффективности // *Строительное производство*. 2023. № 4. С. 77-82. DOI 10.54950/26585340_2023_4_77.
15. **Емелин В.А., Федосов С.В., Федосеев В.Н.** Программный комплекс для расчёта энергоэффективности теплонасосных систем с учётом климатических условий, режимов эксплуатации и многотарифного учета электроэнергии. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2026611184; опублик. 19.01.2026.
16. **Kelvin W.T.** Popular lectures and addresses: in 3 vol. 2nd ed. London: Macmillan, 1891.
17. **Колчунов В.И., Кореньков П.А., Федорова Н.В.** Программа экспериментальных исследований сложно напряженных узлов железобетонных конструкций // *Вестник МГСУ*. 2025. Т. 20. № 8. С. 1165-1177. DOI 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177.

Поступила в редакцию 28.06.2026

Одобрена после рецензирования 14.07.2026

Принята к опубликованию 25.08.2026



REFERENCES

1. **Granovskii, V.I.** (2022), Energy efficiency and carbon footprint of a building. Target performance standardization, *Energy Saving*, no. 8, pp. 22-28 (in Russian).
2. **Bubnov, A.E., Sapunova, A.A., Titunin, A.A. and Dubrovina, Yu.Yu.** (2025), The efficiency of using digital models for predicting the thermal conductivity of wood-mineral composites, *Smart Composite in Construction*, vol. 6, iss. 3, pp. 8-18 (in Russian) DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-8-18.
3. **Dolmatov, S.N.** (2025), Analysis of the potential market capacity and consumption volumes of wall building wood-mineral composite materials meant for individual developers, *Vestnik of Volga State University of Technology. Ser.: Materials. Constructions. Technologies*, no. 1 (33), pp. 29-46 (in Russian). <https://doi.org/10.25686/2542-114X.2025.1.29>.
4. **Erofeev, V.T., Al, S.D.S., Fedortsov, A.P. and Fedortsov, V.A.** (2020), Biological corrosion of concrete, *Construction Materials*, no. 11, pp. 13-23 (in Russian). DOI 10.31659/0585-430X-2020-786-11-13-23.
5. **Pastushkov, P.P. and Gagarin, V.G.** (2021), Air permeability of modern mineral wool products, *Construction Materials*, no. 6, pp. 15-20 (in Russian). DOI 10.31659/0585-430X-2021-792-6-15-20.
6. **Lykov, A.V.** (1967), Theory of Heat Conduction, Vysshaya Shkola, Moscow, 599 p. (in Russian).
7. **Lykov, A.V. and Mikhailov, Iu.A.** (1963), Theory of Heat and Mass Transfer, Gosenergoizdat, Moscow, 536 p. (in Russian).
8. **Fedosov, S.V.** (2010), Heat and Mass Transfer in Technological Processes of the Construction Industry, PresSto, Ivanovo, 363 p. (in Russian).
9. **Bogomolov, A.N. and Fedosov, S.V.** (2004), Mathematical Modeling of Heat and Mass Transfer Processes in Building Physics, ISPU, Ivanovo, 256 p. (in Russian).
10. **Gebhart, B., Jaluria, Y., Mahajan, R. and Sammakia, B.** (1991), Buoyancy-Induced Flows and Transport, Mir, Moscow, 678 p. (in Russian).
11. **Abiev, R.S.** (2020), Hydrodynamics and heat transfer of circulating two-phase Taylor flow in microchannel heat pipe: experimental study and mathematical model, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 59, no. 9, pp. 3687-3701. DOI 10.1021/acs.iecr.9b04834.
12. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N. and Voronov, V.A.** (2022), Numerical-analytical method for reducing unsteady heat conduction problems with boundary conditions of the III kind to problems with conditions of the I kind, *Construction Materials*, no. 12, pp. 59-62 (in Russian). DOI 10.31659/0585-430X-2022-809-12-59-62
13. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N., Voronov, V.A. and Emelin, V.A.** (2026), Practice of technical engineering solutions in construction facilities with an integrated heat exchange and heat pump system, *Housing Construction*, no. 5, pp. 3-9 (in Russian). DOI 10.31659/0044-4472-2026-5-3-9.
14. **Fedosov, S.V., Fedoseev, V.N., Zaitseva, I.A. and Voronov, V.A.** (2023), Organization of comfortable life support technology in buildings with high energy efficiency class, *Construction Production*, no. 4, pp. 77-82 (in Russian). DOI 10.54950/26585340_2023_4_77.
15. **Emelin, V.A., Fedosov, S.V. and Fedoseev, V.N.** (2026), Software package for calculating the energy efficiency of heat pump systems taking into account climatic conditions, operating modes and multi-tariff electricity metering, Certificate of Registration of Computer Program RU 2026611184, January 19, 2026 (in Russian).
16. **Kelvin, W.T.** (1891), Popular Lectures and Addresses, Macmillan, London; New York, 3 vol., 2nd ed.
17. **Kolchunov, V.I., Korenkov, P.A. and Fedorova, N.V.** (2025), Program of experimental studies of highly stressed joints of reinforced concrete structures, *Bulletin of MGSU*, vol. 20, no. 8, pp. 1165-1177 (in Russian). DOI 10.22227/1997-0935.2025.8.1165-1177.

Received 28.06.2025

Approved 14.07.2026

Accepted 25.08.2026



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.928.235

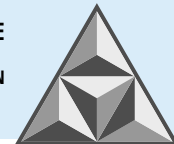
DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-19-32

Синтез теории цепей Маркова и цифровых двойников виброгрохотов для управления фракционным составом сыпучих строительных материалов

**В.А. Огурцов, А.В. Шенберева, В.С. Лубягин,
Д.И. Ивченко, М.В. Макаров**

**Валерий Альбертович Огурцов, Александра Вячеславовна Шенберева, Вадим Сергеевич Лубягин,
Дмитрий Иванович Ивченко, Михаил Владимирович Макаров***

Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Российская Федерация
*ogurtzovvawork@mail.ru, shenbereva@gmail.com, kraska_37@mail.ru, dima200885@mail.ru, mi66ma@mail.ru**



Разработка эффективных методов управления фракционным составом сыпучих строительных материалов является актуальной задачей, от решения которой зависят прочность и долговечность бетонных и других строительных композитов. Предложена гибридная методология, объединяющая два подхода: цифровое моделирование транспортировки материала по виброситу на основе метода дискретных элементов (первый цифровой двойник) и стохастическое описание процесса сепарации с использованием цепей Маркова (второй цифровой двойник). Первый двойник определяет макропараметры – скорость движения материала по ситу, время пребывания, высоту слоя. Второй двойник, построенный на вероятностном подходе, описывает распределение частиц по высоте виброоживленного слоя, диффузию, сегрегацию и кинетику просеивания. Совместное использование двойников позволяет компенсировать недостатки каждого из подходов в отдельности: DEM-моделирование дает физически точную картину транспортирования сыпучего материала по ситу грохота, а цепи Маркова обеспечивают быстрый прогноз, но требуют калибровки. В результате синтеза создается инструмент, пригодный для использования в системах управления технологическими процессами. Показано, что предложенная гибридная модель позволяет прогнозировать гранулометрический состав продуктов грохочения с высокой точностью, заменяя дорогостоящие и трудоемкие натурные эксперименты на промышленном и лабораторном оборудовании. Принятые в работе допущения (сферическая форма частиц и двухфракционный состав смеси) не снижают ценности методического подхода, поскольку для реальных материалов предусмотрена процедура перекалибровки модели, а расширение на полидисперсные системы не изменяет структуры цепей Маркова.

Ключевые слова: сыпучие строительные материалы, виброгрохот, фракционирование, цифровой двойник, цепи Маркова, метод дискретных элементов, сепарация

Для цитирования:

Огурцов В.А., Шенберева А.В., Лубягин В.С., Ивченко Д.И., Макаров М.В. Синтез теории цепей Маркова и цифровых двойников виброгрохотов для управления фракционным составом сыпучих строительных материалов // Умные композиты в строительстве. 2026. Т. 7, вып. 3. С. 19-32. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-19-32



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-19-32

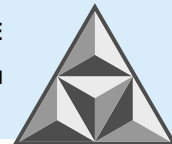
Synthesis of Markov chain theory and digital twins of vibrating screens for controlling the fractional composition of bulk building materials

**V.A. Ogurtsov, A.V. Shenbereva, V.S. Lubiagin,
D.I. Ivchenko, M.V. Makarov**

**Valerii Albertovich Ogurtsov, Aleksandra Viacheslavovna Shenbereva, Vadim Sergeevich Lubiagin,
Dmitry Ivanovich Ivchenko, Mikhail Vladimirovich Makarov***

Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

*ogurtzovvawork@mail.ru, shenbereva@gmail.com, kraska_37@mail.ru, dima200885@mail.ru, mi66ma@mail.ru**



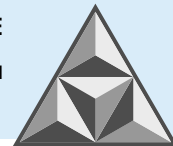
The development of effective methods for controlling the fractional composition of bulk building materials is a critical challenge, upon which the strength and durability of concrete and other building composites depend. This paper proposes a hybrid methodology combining two approaches: digital simulation of material transport across the vibrating screen based on the discrete element method (first digital twin) and stochastic description of the separation process using Markov chains (second digital twin). The first twin determines macroparameters: the velocity of material movement across the screen, residence time, and layer height. The second twin, built on a probabilistic approach, describes the particle distribution across the height of the vibro-fluidized layer, diffusion, segregation, and screening kinetics. The combined use of the twins makes it possible to compensate for the shortcomings of each approach individually: DEM modeling provides a physically accurate picture of bulk material transport across the screen; Markov chains provide a fast prediction but require calibration. As a result of the synthesis, a tool suitable for use in process control systems is created. It is shown that the proposed hybrid model makes it possible to predict the particle size distribution of screening products with high accuracy, replacing expensive and labor-intensive full-scale experiments on industrial and laboratory equipment. The assumptions adopted in this work (spherical particle shape and a two-fraction mixture composition) do not reduce the value of the methodological approach, since a recalibration procedure is provided for real materials, and the extension to polydisperse systems does not change the structure of the Markov chains.

Keywords: bulk building materials, vibrating screen, fractionation, digital twin, Markov chains, discrete element method, separation

For citation:

Ogurtsov V.A., Shenbereva A.V., Lubiagin V.S., Ivchenko D.I., Makarov M.V. Synthesis of Markov chain theory and digital twins of vibrating screens for controlling the fractional composition of bulk building materials // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 3. P. 19-32. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-19-32



ВВЕДЕНИЕ

Чтобы быстрее и качественнее строить здания, нужны новые высокотехнологичные способы фракционирования песка, щебня и других сыпучих материалов. Процесс разделения на фракции может быть реализован с использованием вибрационных сит (грохотов). Результат работы такого оборудования определяет гранулометрический состав сыпучих строительных материалов и отсевов дробления, прочность, плотность и удобоукладываемость бетонных смесей, а также расход вяжущего. Отклонение от требуемого распределения фракций приводит к снижению марочной прочности готовых изделий, перерасходу цемента и выбраковке строительных конструкций [1-3]. Старые подходы уже не могут ограничиваться созданием высокоэффективных вибрационных грохотов, гарантирующим высокое качество сыпучих строительных материалов; будущее «задается» «умным» проектированием с использованием специальных компьютерных программ. Главной целью настоящей работы является валидация гибридной методологии управления фракционным составом сыпучих строительных материалов [4-7], основанной на синтезе цепей Маркова и цифровых двойников виброгрохотов, что обеспечивает повышенную точность сепарации в условиях стохастической неопределенности [8-12].

Теоретической основой настоящего исследования служили фундаментальные работы ведущих отечественных специалистов в области вибрационных технологий (И.И. Блехман, В.Л. Вайзберг, И.М. Абрамович, В.А. Олевский, В.А. Бауман, В.А. Перов и др.). Значительный вклад в анализ и решение проблемы также внесли П.С. Ермолаев, И.В. Пономарев, И.Ф. Гончаревич, Е.А. Непомнящий. Для формирования комплексного подхода был критически осмыслен и зарубежный опыт, в частности, исследования признанных авторитетов в указанной области (Ф. Прокат, Э. Рамлер, О. Молерус, А. Майнелль, Х. Шуберт, Ж. Феррера и У. Прети) [4-6].

При компьютерном моделировании процесса грохочения наиболее перспективными сегодня считаются подходы, основанные на дискретном представлении материала (метод молекулярной динамики и метод дискретных элементов) [13, 14]. Данные технологии уже нашли практическое применение; соответствующие программные комплексы используются в России как на промышленных предприятиях («Механобртехника» [5, 7], Канашский машиностроительный завод), так и в ведущих научно-образовательных центрах (Санкт-Петербургский горный университет, Институт проблем машиноведения РАН). Исследования в этой сфере носят глобальный характер. К ним подключены ученые и компании Северной Америки, Европы и Азии. Крупные игроки отрасли, такие как *Derrick* (США) и *Metso* (США/Финляндия), напрямую финансируют подобные разработки. Так, *Metso* фокусируется на моделировании мокрого грохочения, а немецкая компания *JOEST* создала инновационные грохоты *OSCILLA* с попеременным натяжением сит для борьбы с забиванием. Основные мировые тренды сосредоточены в области динамического анализа вибрационных систем (вышеупомянутая *JOEST*, *Chen & Peng*). Сюда относится разработка энергоэффективных резонансных систем для повышения производительности грохочения. Однако ключевой проблемой является отсутствие как в российской, так и зарубежной научной литературе фундаментальных исследований по теории поведения ансамбля частиц строительного материала в виброожиженном слое на сите грохота. Без этих знаний невозможно определить основные показатели процесса – эффективность фракционирования и производительность вибрационного грохота.

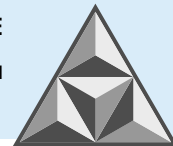


ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Разработка математических моделей вибрационного фракционирования традиционно опирается на экспериментальные данные. Однако организация натурных экспериментов сопряжена с принципиальными ограничениями, которые возрастают по мере перехода от лабораторных установок к промышленному оборудованию.

Экспериментальное исследование на промышленном виброгрохоте сталкивается с рядом проблем. Во-первых, остановка технологической линии для изменения режимов работы влечет за собой простой производства в целом. Работнику доступны лишь интегральные показатели (производительность, гранулометрия продуктов на входе грохота и выходе с него), тогда как локальные характеристики (распределение частиц по высоте слоя, траектории движения отдельных частиц, концентрация частиц различных фракций у сита) принципиально не могут быть получены путем прямого измерения. Во-вторых, получение статистически значимых результатов требует проводить десятки экспериментов, каждый из которых занимает часы или полную рабочую смену. Таким образом, промышленный грохот является объектом для конечной валидации моделей, но не для систематического исследования механизмов процесса. Лабораторные установки непрерывного действия (уменьшенные копии промышленных грохотов) позволяют варьировать режимы в широких пределах и использовать модельные материалы с контролируемыми свойствами. Однако и здесь сохраняются вопросы. Результаты, полученные в лабораторном масштабе, не всегда прямо переносятся на промышленный аппарат из-за изменения высоты слоя, времени пребывания частиц на сите и структуры виброожижения. Для поддержания стационарного режима необходима равномерная дозированная подача в течение эксперимента (от десятков минут до нескольких часов), что при малых объемах материала бывает проблематично обеспечить. Как и в промышленных условиях, распределение частиц внутри виброожиженного слоя недоступно для прямого контроля. Наиболее простой в реализации и поэтому наиболее распространенной является установка периодического (порционного) действия – классический виброрассев, в котором навеска строительного материала одновременно загружается на сито, подвергается вибрации в течение заданного интервала времени, после чего анализируется распределение частиц в надрешетном и подрешетном продуктах. Кажущаяся простота этого метода порождает иллюзию доступности получения достоверных данных по кинетике процесса. В действительности периодический эксперимент сталкивается с проблемами, существенно ограничивающими его информативность. Для построения кинетической кривой степени извлечения частиц во времени требуется проводить серию опытов с различной продолжительностью отсева (получение каждой точки на кривой – отдельный эксперимент). При исследовании влияния нескольких параметров (частота, амплитуда) трудоемкость эксперимента становится чрезмерной. Даже если использовать метод отбора проб в кюветы из-под сита без остановки вибрации, точность такого измерения будет невысокой. Отбор проб в динамике сопряжен с риском потерь материала. Сам виброожиженный слой остается «черным ящиком»: недоступны локальные распределения частиц по высоте, траектории отдельных частиц, эволюция концентрации частиц у сита. Это не позволяет точно идентифицировать механизмы диффузии и сегрегации.

Именно эти ограничения делают цифровые двойники грохочения инструментом, который «выдает» полную кинетику процесса за один расчет, предоставляет недоступные локальные данные и обеспечивает высокую точность, заменяя при этом десятки трудоемких опытов. В данном исследовании разрабатывается синтез двух специализированных цифровых двойников,



каждый из которых функционирует в своем временном и пространственном масштабе, а их взаимодействие обеспечивает синергетический эффект прогнозирования [14, 15].

Первый цифровой двойник реализует макроуровень процесса и имитирует транспортировку сыпучего материала по виброситу. Его основная функция – воспроизведение кинематики виброожиженного слоя, то есть определение средней скорости движения ансамбля частиц по ситам грохота, а также времени пребывания материала в зоне фракционирования. Данный двойник базируется на методе дискретных элементов (DEM) и решает детерминированную задачу транспортировки, позволяя оценить, каким образом изменение угла наклона, амплитуды и частоты вибрации влияет на скорость движения частиц по вибрирующей просеивающей поверхности. На рис. 1 показан виртуальный процесс движения ансамбля частиц сыпучего строительного материала по ситам грохота.

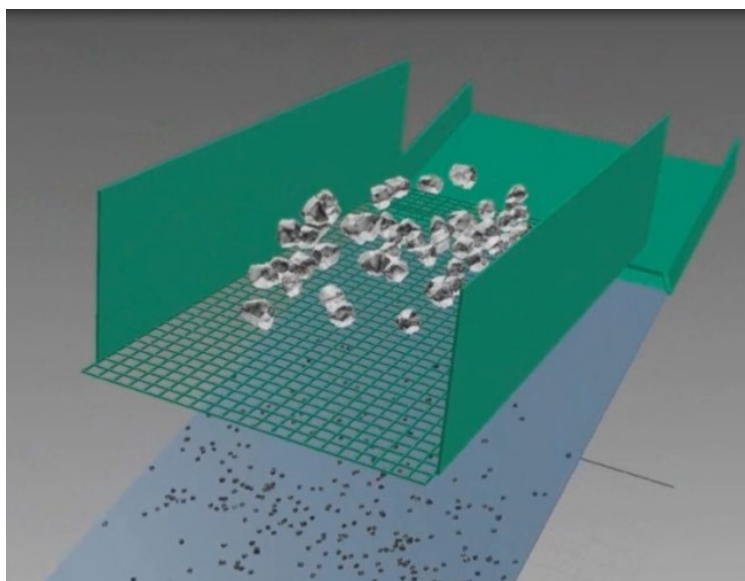


Рис. 1. Кадр имитационного моделирования транспортирования ансамбля частиц сыпучего строительного материала по вибрирующему ситам

Fig. 1. Simulation frame of the transport of an ensemble of bulk building material particles across a vibrating screen

В процессе виртуального эксперимента визуализировалось движение ансамбля частиц по вибрирующему ситам: материал транспортировался по просеивающей поверхности, мелкие фракции проваливались в подситовый поддон, а крупные частицы удалялись через разгрузочный конец сита. Программа позволяла фиксировать траекторию каждой частицы с определением ее абсолютных и относительных кинематических характеристик. Модель частицы обладала шестью степенями свободы – тремя линейными координатами в неподвижной системе отсчета и тремя углами поворота в подвижной системе, жестко связанной с частицей и имеющей начало в центре масс (рис. 2). На нижней панели инструментов приведены временные зависимости кинематических характеристик конкретной частицы. По оси абсцисс указаны номера кадров видеосъемки (25 кадров соответствуют 1 с), а по оси ординат – координаты и углы поворота.

Обработка полученных данных позволила установить численные значения координат положения частицы за все время ее пребывания на просеивающей поверхности виртуального вибрационного грохота. Для оценки скорости транспортирования сыпучего материала по ситам грохота определялось распределение времени пребывания частиц на просеивающей поверхности.

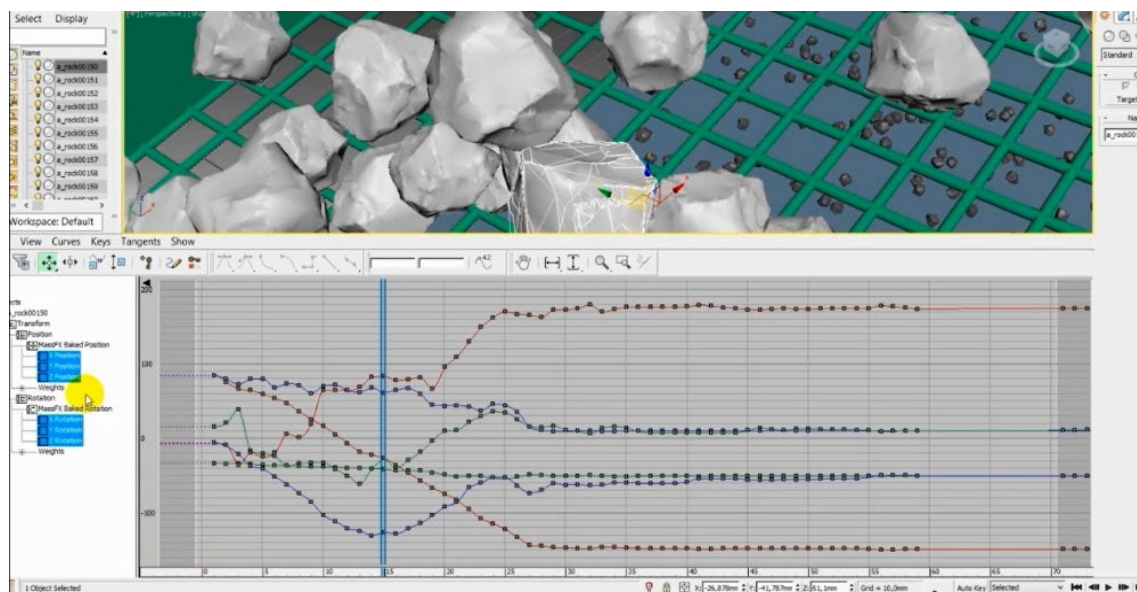


Рис. 2. Интерфейс программного обеспечения для сбора данных кинематики движения конкретной частицы сыпучего строительного материала

Fig. 2. Software interface for collecting kinematic data of the motion of an individual particle of bulk building material

По результатам обработки массивов данных, полученных в ходе вычислительных экспериментов, определяли среднюю скорость продольного перемещения ансамбля частиц по просеивающей поверхности виртуального виброгрохота при различных режимах его колебаний. В табл. 1 представлен пример результатов численного моделирования скорости транспортирования частиц сыпучего строительного материала в зависимости от амплитуды колебаний и угла наклона сита при фиксированной частоте вибрации 12.5 Гц.

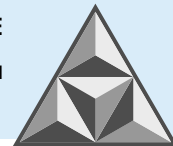
Таблица 1. Влияние амплитуды и угла наклона на скорость транспортирования сыпучего строительного материала ($f = 12.5$ Гц)

Table 1. Effect of amplitude and inclination angle on the transport velocity of bulk building material ($f = 12.5$ Hz)

Амплитуда A , мм	Скорость V , м·с ⁻¹ , при угле наклона $\alpha = 10^\circ$	Скорость V , м·с ⁻¹ , при угле наклона $\alpha = 16^\circ$	Скорость V , м·с ⁻¹ , при угле наклона $\alpha = 22^\circ$	Скорость V , м·с ⁻¹ , при угле наклона $\alpha = 28^\circ$
2	0.14	0.18	0.22	0.29
4	0.13	0.17	0.24	0.28
6	0.14	0.15	0.23	0.29
8	0.15	0.26	0.22	0.30
10	0.16	0.28	0.24	0.31

Принципиальным достоинством разработанного имитационного двойника является отсутствие ограничений на диапазон варьирования технологических параметров, свойственных натурным экспериментам. В отличие от лабораторных и промышленных установок, где изменение частоты, амплитуды или угла наклона сита сопряжено с механическими ограничениями, временными затратами и риском выхода оборудования из строя, компьютерная модель позволяет исследовать процесс в сколь угодно широких диапазонах.

Второй цифровой двойник представляет собой дискретную вероятностную модель процесса вибрационного фракционирования сыпучих материалов в периодическом режиме, которая базируется на математическом аппарате цепей Маркова.



Для периодического режима грохочения модель одномерной цепи Маркова заключается в следующем. Слой материала на сите разделен на $m-1$ ячеек и одну ячейку m для подситового пространства. Вектор вероятностей нахождения мелкой частицы в ячейках:

$$S = [S_1, \dots, S_m]^T, \quad (1)$$

где T – индекс транспонирования вектора.

Процесс рассматривается дискретно с временным шагом Δt . Переходы возможны только между соседними ячейками. Эволюция состояния цепи задается рекуррентно:

$$S^{k+1} = PS^k, \quad (2)$$

где P – матрица переходных вероятностей. Для шести ячеек она имеет вид:

$$P = \begin{bmatrix} p_{s1} & d & 0 & 0 & 0 & 0 \\ v+d & p_{s2} & d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & d+v & p_{s3} & d & 0 & 0 \\ 0 & 0 & d+v & p_{s4} & d & 0 \\ 0 & 0 & 0 & d+v & p_{s5} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & v_f & 1 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Здесь d – вероятность перехода частиц вверх, $(v+d)$ – вниз, p_s – вероятность частиц остаться в ячейке. Связь безразмерных коэффициентов с физическими параметрами процесса устанавливается через шаг дискретизации модели. Если высота ячейки равна Δx , а шаг по времени – Δt , то безразмерная скорость сегрегации v связана с физической скоростью сегрегации V как $v = V \Delta t / \Delta x$, а безразмерный коэффициент диффузии d связан с физическим коэффициентом макродиффузии D как $d = D \Delta t / \Delta x^2$.

Безразмерная скорость просеивания v_f представляет собой вероятность перехода частицы из приграничной ячейки в подситовое пространство за время Δt .

Выход мелких частиц в подситовое пространство в момент времени k :

$$q^k = S_{m-1}^k v_f, \quad (4)$$

а кинетика накопления извлеченных под сито частиц:

$$\varepsilon^k = \sum_{k=1}^k q^k. \quad (5)$$

Второй цифровой двойник предназначен для идентификации стохастических коэффициентов сепарации (диффузии, сегрегации, скорости просеивания), прогнозирования кинетики извлечения мелких фракций в подрешетное пространство. Он основан на методе дискретных элементов. Это значит, что в компьютере создается точная копия лабораторного грохота (сито с ячейками, частицы различных размеров) и задаются физические свойства (плотность, упругость, трение) (см. рис. 3).



Рис. 3. Виртуальная реконструкция внутренней динамики виброожиженного слоя при периодическом грохочении строительного материала

Fig. 3. Virtual reconstruction of the internal dynamics of a vibro-fluidized bed during periodic screening of building material



Затем включается режим вибрации, после чего программа начинает отслеживать движение каждой частицы. Виртуальный стенд обеспечивает то, что невозможно реализовать в реальной лаборатории: он показывает внутреннюю картину процесса. Благодаря такому подходу модель может предсказать кинетику процесса (понять, как возрастает во времени доля отсеянных мелких частиц).

Цифровой двойник № 2 – инструмент, который позволяет настраивать процесс под конкретный строительный материал и конкретное оборудование, без проведения сотни лабораторных опытов. Он проверяет различные гипотезы, например, каким образом изменение частоты вибрации влияет на сегрегацию или как форма частиц сыпучего строительного материала изменяет кинетику грохочения. В паре с первым двойником (транспортным) он становится основой для гибридной модели промышленного грохота, которая может работать в реальном времени и помогать управлению качеством фракционирования сыпучих строительных материалов.

В модели непрерывного процесса, соответствующего промышленному грохочению, строительный сыпучий материал на сите представлен двумерной цепью ячеек идеального смешения (рис. 4).

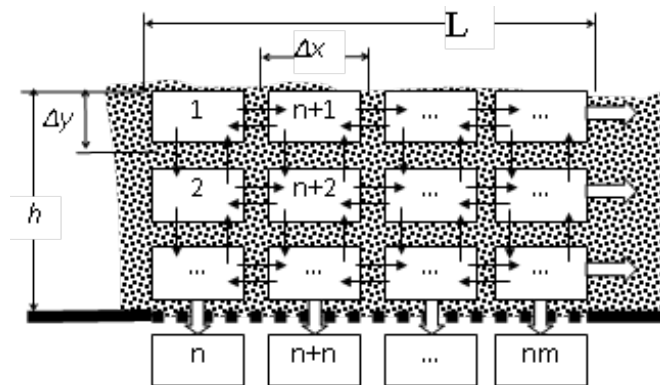


Рис. 4. Модель непрерывного грохочения сыпучего строительного материала

Fig. 4. Model of continuous screening of bulk building material

Сетка ячеек имеет размер $n \times m$: первые $(n - 1)$ строк – материал над ситом; последняя n -строка – коллектор подрешетного продукта.

Состояние системы в момент времени k описывается вектором состояния (размер $nm \times 1$), полученным последовательной записью столбцов матрицы распределения:

$$S^k = [S_1^k, S_2^k, \dots, S_{nm}^k]^T. \quad (6)$$

Процесс во времени описывается рекуррентным соотношением:

$$S^{k+1} = PS^k + S_t, \quad (7)$$

где P – матрица переходных вероятностей (размер $nm \times nm$); S_t – вектор подачи материала (ненулевые элементы в первых $(n - 1)$ - ячейках).

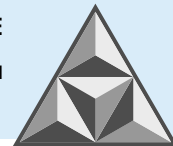
Вероятности перехода между соседними ячейками определяются через безразмерные параметры:

$$v_x = \frac{V_x \Delta t}{\Delta x}, \quad d_x = \frac{D \Delta t}{\Delta x^2}, \quad v_y = \frac{V_y}{\Delta y}, \quad d_y = \frac{D \Delta t}{\Delta y^2}, \quad (8)$$

где V_x – скорость перемещения сыпучего материала вдоль сита;

V_y – скорость сегрегации мелких частиц вниз;

D – коэффициент макродиффузии.



Из них формируются вероятности переходов: вниз $p_d = v_y + d_y$, вверх $p_u = d_u$, вперед (по потоку) $p_f = v_x + d_x$, назад $p_b = d_x$.

Запишем выход мелких частиц в подрешетный продукт, выраженный через вероятность просеивания v_f :

$$Q_{out}^k = \sum_{j=1}^m S_{n-1,j}^k \cdot v_f. \quad (9)$$

Общая эффективность грохочения E , то есть доля проходовой фракции, которая перешла в подрешетный продукт от общего количества проходовой фракции в исходном питании, запишется:

$$E = \frac{Q_{out}^k}{Q}, \quad (10)$$

где Q – массовый поток частиц проходовой фракции в сыпучем строительном материале, поступающем на грохот.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

При интерпретации полученных результатов следует учитывать ряд допущений, принятых в данной работе. На начальном этапе исследования для упрощения идентификации стохастических коэффициентов все частицы считались сферическими. В реальных условиях частицы строительных сыпучих материалов отличается разнообразная форма (осколочная, игольчатая, пластинчатая), при этом каждая из них при просеивании будет вести себя по-своему. Это означает, что для каждого типа строительного сырья параметры модели придется определять заново. Кроме того, в текущей версии модели рассматриваются лишь две фракции – мелкие и крупные частицы строительного материала. Для сложных смесей, характеризующихся размерами зерен материала в широком диапазоне, потребуется расширение модели на многокомпонентную цепь Маркова.

Следует также подчеркнуть, что настоящая работа носит во многом методический характер. В качестве «экспериментальных данных» здесь подразумевается не реальный физический эксперимент, а верифицированная компьютерная модель. Сопоставление результатов расчета с данными, полученными на реальном вибрационном грохоте, выступает основной задачей последующих этапов исследования.

Для демонстрации работоспособности предложенной гибридной методологии рассмотрим процесс рассеивания двухкомпонентной смеси на вибрационном грохоте. Исходные данные соответствуют виртуальному эксперименту, полученному с помощью второго цифрового двойника: концентрация мелких частиц сыпучего материала в смеси – 50%; материал – поликарбонат (плотность $1080 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$); сито – металлическая тканая сетка с квадратной ячейкой 12.0 мм. Длина сита грохота составляет 4.6 м ($L \cdot \Delta x = 50 \cdot 0.092$), а ширина – 1.0 м (учет единицы ширины в двумерной модели). Сито совершает круговые колебания с амплитудой 5.0 мм и частотой 8.4 Гц; угол его наклона к горизонту – 10° .

Для указанных параметров колебаний и угла наклона скорость транспортирования материала по ситам, определенная с помощью первого цифрового двойника, составила $0.22 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1}$. Высота слоя сыпучего материала на сите $h = H \cdot \Delta z = 5 \cdot 0.023 = 0.115 \text{ м}$.

Тогда производительность грохота определяется:

– объемная (с учетом мелких и крупных фракций) $Q = V_{\text{тр}} \cdot B \cdot h = 0.22 \cdot 1 \cdot 0.115 = 0.0253 \text{ м}^3 \cdot \text{с}^{-1} = 91.08 \text{ м}^3 \cdot \text{ч}^{-1}$;

– массовая $Q = 91.08 \cdot 1.08 = 98.4 \text{ т} \cdot \text{ч}^{-1}$.



Для данной смеси и режима колебаний по результатам моделирования периодического грохочения на втором цифровом двойнике определены стохастические коэффициенты марковской модели: $d = 2.33 \cdot 10^{-3}$ (диффузия); $\nu = 7.67 \cdot 10^{-3}$ (сегрегация), $\nu_f = 2.2 \cdot 10^{-3}$ (скорость просеивания); $p_f = 0.05$ (горизонтальный перенос).

На основе этих коэффициентов рассчитана эффективность грохочения для заданной длины сита: $E = 0.81$. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2. Технологические параметры процесса грохочения сыпучего строительного материала

Table 2. Technological parameters of the screening process for bulk building material

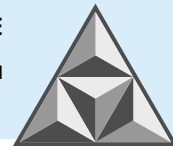
Параметры сита					Параметры колебаний	
Параметр	Значение	Параметр	Значение	Примечание	Параметр	Значение
Тип смеси	Двухкомпонентная	Размер ячейки	12.0 мм	Квадратная ячейка	Тип колебаний	Круговые
Концентрация мелких частиц	50%	Материал сита	Металлическая проволока		Амплитуда	5.0 мм
Материал частиц	Поликарбонат	Длина сита	4.6 м	$L \cdot \Delta x = 50 \cdot 0,092$	Частота	8.4 Гц
Плотность частиц	$1080 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$	Ширина сита	1.0 м	Учет единицы ширины в 2D-модели		
		Угол наклона к горизонту	10°			

Важно отметить, что при углах наклона сита до $15\text{--}20^\circ$ коэффициенты диффузии и сегрегации практически не зависят от угла, поскольку изменение нормальной составляющей силы тяжести не превышает 3.5% (в пределах погрешности идентификации). Это позволяет использовать полученные коэффициенты для широкого диапазона углов наклона без повторной калибровки. При углах $\theta \geq 20^\circ$ вводится поправка: $\nu = \nu_0 \cdot \cos\theta$; $\nu_f = \nu_{f0} \cdot \cos\theta$.

Представленный пример демонстрирует, что предложенная гибридная модель (первый двойник – DEM-транспортировка, второй – марковская сепарация) позволяет рассчитать ключевые технологические параметры промышленного грохота (производительность и эффективность) без проведения дорогостоящих натурных экспериментов с сыпучим строительным материалом.

ВЫВОДЫ

Разработанная гибридная методология, объединяющая DEM-моделирование транспортировки и марковские цепи для описания сепарации создает инструмент для точного прогнозирования фракционирования сыпучих строительных материалов. Цифровые двойники дают возможность получать не доступные в реальных экспериментах локальные данные (распределение частиц материала по высоте слоя, траектории, концентрации у сита), что заменяет десятки трудоемких лабораторных и промышленных опытов. Предложенная модель позволяет успешно определить ключевые технологические параметры виброгрохота (производительность и эффективность сепарации) для сыпучего строительного материала. Установлено, что при углах наклона сита до $15\text{--}20^\circ$ коэффициенты диффузии и сегрегации остаются практически постоянными, что дает возможность применять модель для широкого диапазона режимов работы с материалом без повторной калибровки. Данный методический



подход является универсальным: модель предусматривает перекалибровку для реальных строительных материалов, при этом действие модели распространяется на полидисперсные системы.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Федосов С.В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: монография / Иваново: ИПК «ПресСто», 2010. 364 с.
2. **Федосов С.В., Мизонов В.Е.** Теоретические основы математического моделирования механических и тепловых процессов в производстве строительных материалов: монография / Palmarium Academic Publishing, 2020. 256 с.
3. **Мизонов В.Е.** Оборудование для классификации сыпучих материалов / *Машиностроение. Энциклопедия. Машины и аппараты химических и нефтехимических производств. Т. IV-12; под общ. ред. М.Б. Генералова.* М.: Машиностроение, 2004. С. 160-179.
4. **Meinel A.** History of screening technology: screen sizing and separation from the 20th Century BC to the early 20th Century AD // *Aufbereitungs Technik/Mineral Processing.* 2008. № 3. P. 6-27.
5. **Вайсберг Л.А., Картавый А.Н., Коровников А.Н.** Просеивающие поверхности грохотов. Конструкции, материалы, опыт применения; *под ред. Л.А. Вайсберга.* СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005. 252 с.
6. **Ferrara G.** Modelling of screening operations // *International Journal of Mineral Processing.* 1988. Vol. 22. № 1. P. 193-222.
7. **Блехман И.И., Блехман Л.И., Вайсберг Л.А.** О явлении вибрационной диффузионной сегрегации в сыпучих средах // Доклады Академии наук. 2016. Т. 466. № 1. С. 30-32.
8. **Опарина Л.А., Огурцов В.А.** Учет энергоемкости строительных материалов в течение жизненного цикла объектов капитального строительства // *Умные композиты в строительстве.* 2023. Т. 4. Вып. 4. С. 50-60. URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023.
9. **Митрофанов А.В., Сизова О.В., Шпейнова Н.С., Жемчугов А.А., Михайлова С.М.** Исследование устойчивости разностной схемы метода счетных цепей Маркова для моделирования псевдооживления // *Вестник Иван. гос. энергет. ун-та.* 2021. № 4. С. 65-74. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.4.065-074.
10. **Mitrofanov A., Mizonov V., Camelo A., Tannous K.** Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed // *Particulate Science and Technology.* 2019. Vol. 37. № 8. P. 1028-1033. DOI: 10.17654/HM01802026.
11. **Митрофанов А.В., Мизонов В.Е., Беляков А.Н., Шпейнова Н.С.** Разработка вероятностно-статистической модели расширения и аксиальной структуры псевдооживленного слоя частиц антрацита // *Вестник Иван. гос. энергет. ун-та.* 2020. № 6. С. 68-76. DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.068-076.
12. **Zhu C., Long H., Peng Z. et al.** Research on the optimization efficiency of secondary vibrating screening based on EDEM simulation // *Scientific Reports.* 2026. Vol. 16. Art. 6746. DOI: 10.1038/s41598-026-37230-6.
13. **Караваев А.С., Копысов С.П., Сармакеева А.С.** Моделирование динамики произвольных тел методом дискретных элементов // *Вестник Удмурт. ун-та. Математика. Механика. Компьютерные науки.* 2015. Т. 25. № 4. С. 473-482.
14. **Огурцов В.А., Шенберева А.В., Хохова Ю.В.** Цифровое моделирование процесса периодического фракционирования сыпучих строительных материалов в виброоживленном слое // *Вестник Поволжского гос. технол. ун-та. Сер.: Материалы. Конструкции. Технологии.* 2026. № 1 (37). С. 72-82. DOI: 10.25686/2542-114X.2026.1.72. EDN: NSBNXC.
15. **Огурцов В.А., Опарина Л.А., Огурцов А.В., Таничев М.В., Пирогов Д.А.** Цифровое моделирование движения сыпучего материала при его рассеивании на вибрирующей тканой металлической сетке // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности.* 2025. № 3. С. 256-261. DOI: 10.47367/0021-3497_2025_3_256.

Поступила в редакцию 23.06.2026

Одобрена после рецензирования 10.07.2026

Принята к опубликованию 25.08.2026



REFERENCES

1. **Fedosov, S.V.** (2010), Heat and Mass Transfer in Technological Processes of the Construction Industry: monograph. IPK "PresSto", Ivanovo, 364 p. (in Russian).
2. **Fedosov, S.V. and Mizonov, V.E.** (2004), Theoretical Foundations of Mathematical Modeling of Mechanical and Thermal Processes in the Production of Building Materials: monograph. Palmarium Academic Publishing, 256 p. (in Russian).
3. **Mizonov, V.E.** (2004), Equipment for Classification of Bulk Materials, *Mechanical Engineering. Encyclopedia. Machines and Apparatus for Chemical and Petrochemical Industries*, vol. IV-12; ed. by M.B. Generalov. Moscow, Mashinostroyeniye, pp. 160-179 (in Russian).
4. **Meinel, A.** (2008), History of screening technology: screen sizing and separation from the 20th Century BC to the early 20th Century AD, *AufbereitungsTechnik/Mineral Processing*, no. 3, pp. 6-27.
5. **Vaisberg, L.A., Kartavy, A.N. and Korovnikov, A.N.** (2005), Screening Surfaces of Vibrating Screens. Designs, Materials, Application Experience; ed. by L.A. Vaisberg. St. Petersburg: VSEGEI Publishing House, 252 p. (in Russian).
6. **Ferrara, G.** (1988), Modelling of screening operations, *International Journal of Mineral Processing*, vol. 22, no. 1, pp. 193-222.
7. **Blekhman, I.I., Blekhman, L.I. and Vaisberg, L.A.** (2016), On the Phenomenon of Vibrational Diffusion Segregation in Granular Media, *Doklady Akademii Nauk / Reports of the Academy of Sciences*, vol. 466, no. 1, pp. 30-32 (in Russian).
8. **Oparina, L.A. and Ogurtsov, V.A.** (2023), Accounting for the Energy Intensity of Building Materials during the Life Cycle of Capital Construction Projects, *Smart Composite in Construction*, vol. 4, iss. 4, pp. 50-60 (in Russian). URL: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/v4n4_2023 (accessed: 29.06.2026).
9. **Mitrofanov, A.V., Sizova, O.V., Shpeynova, N.S., Zhemchugov, A.A. and Mikhailova, S.M.** (2021), Stability Study of the Difference Scheme of the Markov Chain Method for Modeling Fluidization, *Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University*, no. 4, pp. 65-74 (in Russian). DOI: 10.17588/2072-2672.2021.4.065-074.
10. **Mitrofanov, A., Mizonov, V., Camelo, A. and Tannous, K.** (2019), Application of the theory of Markov chains to theoretical study of processes in a circulating fluidized bed, *Particulate Science and Technology*, vol. 37, no. 8, pp. 1028-1033. DOI: 10.17654/HM01802026.
11. **Mitrofanov, A.V., Mizonov, V.E., Beliaikov, A.N. and Shpeynova, N.S.** (2020), Development of a Probabilistic-Statistical Model of Expansion and Axial Structure of a Fluidized Bed of Anthracite Particles, *Bulletin of Ivanovo State Power Engineering University*, no. 6, pp. 68-76 (in Russian). DOI: 10.17588/2072-2672.2020.6.068-076.
12. **Zhu, C., Long, H. and Peng, Z. et al.** (2026), Research on the optimization efficiency of secondary vibrating screening based on EDEM simulation, *Scientific Reports*, vol. 16, Art. 6746. DOI: 10.1038/s41598-026-37230-6.
13. **Karavaev, A.S., Kopysov, S.P. and Sarmakeeva, A.S.** (2015), Modeling of Dynamics of Arbitrary Bodies by the Discrete Element Method, *Bulletin of Udmurt University. Mathematics. Mechanics. Computer Science*, vol. 25, no. 4, pp. 473-482 (in Russian).
14. **Ogurtsov, V.A., Shenberева, A.V. and Khokhova, Iu.V.** (2026), Digital Modeling of the Periodic Fractionation Process of Bulk Construction Materials in a Vibrated Fluidized Bed, *Bulletin of Volga State Technological University. Ser.: Materials. Structures. Technologies*, no. 1 (37), pp. 72-82 (in Russian). DOI: 10.25686/2542-114X.2026.1.72.
15. **Ogurtsov, V.A., Oparina, L.A., Ogurtsov, A.V., Tanichev, M.V. and Pirogov, D.A.** (2025), Digital Modeling of Bulk Material Motion during Screening on a Vibrating Woven Metal Mesh, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Tech. Textil. Prom.*, no. 3, pp. 256-261 (in Russian). DOI: 10.47367/0021-3497_2025_3_256.

Received 23.06.2026

Approved 10.07.2026

Accepted 25.08.2026



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.72

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-33-45

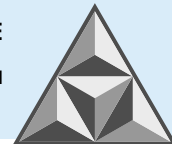
Подход к оптимизации трассирования автомобильных дорог на основе технологий информационного моделирования

Л.А. Богуславский, Г.В. Проваторова

Леонид Анатольевич Богуславский*, Галина Владимировна Проваторова

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых,
Владимир, Российская Федерация

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



Планирование и организация строительства автомобильных дорог в настоящее время продолжают испытывать ограничения, обусловленные низким уровнем интероперабельности информационных моделей, а также трудностями интеграции временных и стоимостных параметров в структуру проектных элементов при внедрении линейных объектов. Задачи оптимизации проектных решений в области трассирования приобретают ключевое значение в контексте формирования устойчивой и надежной транспортной системы. Существующие подходы к выбору трассы, как правило, характеризуются фрагментарным учетом исходных факторов, что снижает обоснованность принимаемых решений и может приводить к увеличению совокупных издержек и снижению эффективной реализации проектов. В связи с этим разработана схема оптимизации трассирования, основанная на применении технологий информационного моделирования и интеграции разнородных данных с аналитическими инструментами. Предлагаемый подход обеспечивает последовательное выполнение ключевых этапов проектирования автомобильных дорог, включая цифровое представление рельефа, формирование геометрических параметров трассы, моделирование транспортных потоков, экономическую оценку проектных решений, а также анализ экологических последствий. Рассматриваемая модель адаптивна и может быть масштабирована, что позволяет использовать ее как универсальный инструмент для реализации инфраструктурных проектов.

Ключевые слова: проектирование автомобильных дорог, дорожное строительство, трассирование, технологии информационного моделирования, оптимизация затрат

Для цитирования:

Богуславский Л.А., Проваторова Г.В. Подход к оптимизации трассирования автомобильных дорог на основе технологий информационного моделирования // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 3. С. 33-45. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-33-45



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-33-45

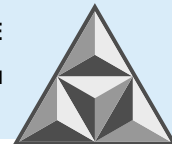
An approach to optimizing highway routing based on information modeling technologies

L.A. Boguslavskii, G.V. Provatorova

Leonid Anatolevich Boguslavskii*, Galina Vladimirovna Provatorova

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

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



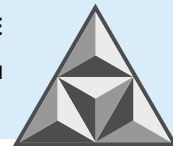
The planning and organization of highway construction currently continues to experience limitations due to the low level of interoperability of information models, as well as difficulties in integrating time and cost parameters into the structure of design elements at the implementing linear facilities. The tasks of optimizing design solutions in the field of routing are becoming of key importance in the context of forming a sustainable and reliable transport system. Existing approaches to route selection are typically characterized by a fragmented consideration of initial factors, which reduces the validity of decisions made and may lead to an increase in total costs and a decrease in the effective implementation of projects. In this regard, a tracing optimization scheme has been developed based on the use of information modeling technologies and the integration of heterogeneous data with analytical tools. The proposed approach ensures the sequential execution of key stages of highway design, including digital terrain representation, generation of route geometric parameters, traffic flow modeling, economic evaluation of design solutions, as well as analysis of environmental consequences. The model under consideration is adaptive and scalable, which allows it to be used as a universal tool for the implementation of infrastructure projects.

Keywords: highway design, road construction, tracing, information modeling technologies, cost optimization

For citation:

Boguslavskii L.A., Provatorova, G.V. An approach to optimizing highway routing based on information modeling technologies // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 3. P. 33-45.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-33-45



ВВЕДЕНИЕ

Транспортная инфраструктура играет ключевую роль в экономике и территориальной связанности. Автомобильные дороги формируют основу мобильности населения и товарооборота, однако рост урбанизации и интенсивности движения приводит к увеличению трафика и негативным экологическим последствиям, снижая эффективность транспортной сети [1].

Современные инфраструктурные проекты характеризуются масштабностью и сложностью при одновременном ужесточении требований к срокам и стоимости дорожного строительства. Ошибки на стадии проектирования, связанные с неточностью исходных данных, особенно критичны для протяженных объектов и могут существенно увеличивать затраты, в частности, при реализации сложных инженерных сооружений.

Технологии информационного моделирования (ТИМ) рассматриваются как эффективный инструмент повышения качества проектирования за счет интеграции данных, снижения ошибок, оптимизации сроков и затрат. Однако существующие подходы к трассированию дорог часто не обеспечивают комплексного учета технических, экономических и экологических факторов, что приводит к неоптимальным решениям [2].

Несмотря на преимущества, внедрение ТИМ в дорожном строительстве вызывает трудности из-за ресурсных и кадровых ограничений, а также недостаточной интеграции с моделированием транспортных потоков. В связи с этим предлагается комплексный ТИМ-ориентированный подход, обеспечивающий объединение ключевых параметров проекта в единой цифровой среде и повышение эффективности принятия проектных решений [3].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ И МЕТОДИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

В рамках исследования ТИМ применяются для формирования методики оптимизации трассирования автомобильных дорог на основе исходных проектных данных. Разработанный подход включает пять последовательно реализуемых этапов: сбор и подготовка исходной информации; построение базовой цифровой модели; сравнительная оценка альтернативных вариантов трассы; моделирование с последующей визуализацией; итоговая оптимизация и обоснованный выбор проектного решения.

Методическая основа подхода опирается на положения стандарта ISO 19650-1:2018 [4], что обеспечивает согласованное объединение разнородных данных, интеграцию процессов моделирования и применение современных инструментов визуального анализа. Предложенная формализованная структура (рис. 1) способствует соблюдению нормативных требований, а также повышает экономическую эффективность и устойчивость принимаемых решений в сфере дорожного строительства.

Предлагаемая структурная схема направлена на развитие и совершенствование методов трассирования автомобильных дорог с использованием ТИМ. В основе методологии лежит интеграция междисциплинарной информации с инструментами инженерного анализа, что позволяет решать комплексные задачи проектирования линейных транспортных объектов

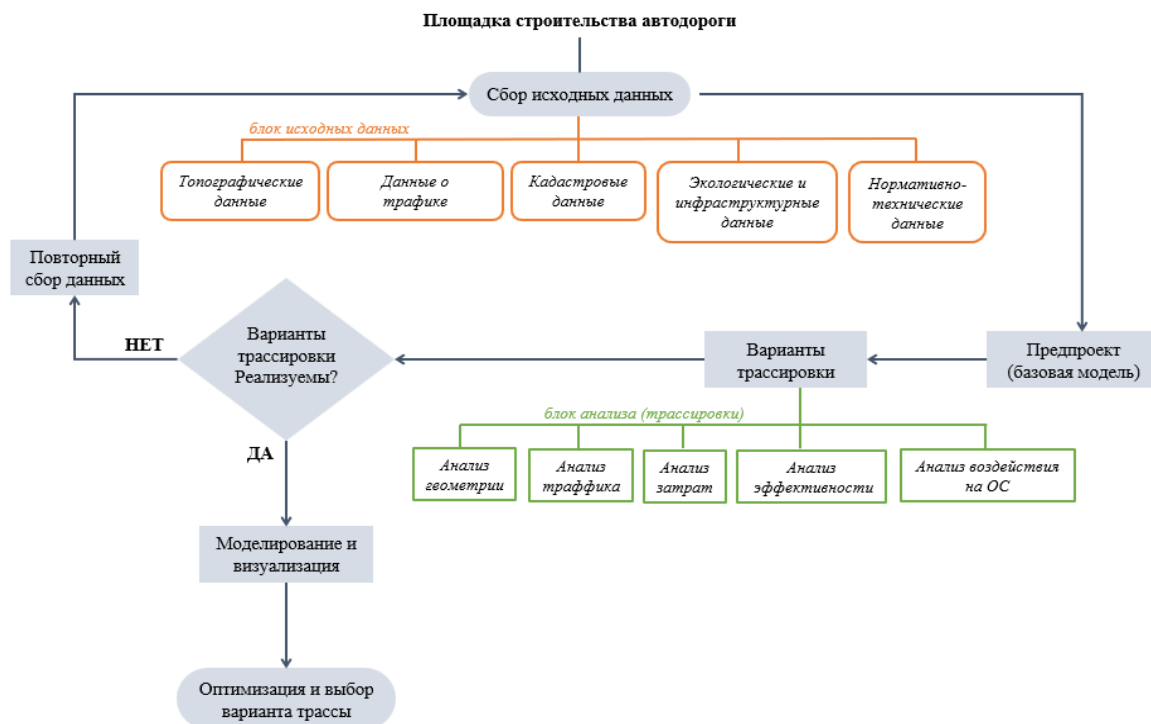


Рис.1. Блок-схема предлагаемого подхода к решению задачи

Fig.1. Block diagram of the proposed approach to solving the issue

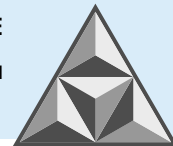
В отличие от традиционных подходов, ориентированных преимущественно на стоимостные показатели или формальное соблюдение геометрических требований, разработанное решение реализует многокритериальную модель, объединяющую в едином ТИМ-процессе пять взаимосвязанных факторов, а именно: капитальные затраты, эффективность транспортных потоков, экологические ограничения, особенности землепользования и соответствие нормативным требованиям [5, 6].

Сбор исходных данных

Начальный этап связан с формированием достоверной исходной базы данных, необходимой для последующего моделирования. Сбор информации осуществляется с учетом междисциплинарного характера задачи и сопровождается проверкой на соответствие нормативным источникам и результатам полевых обследований. Организация и управление данными реализуются в соответствии с требованиями стандарта ISO 19650-1:2018, что обеспечивает их согласованность и прослеживаемость.

Ключевые категории исходных данных:

- топографическая информация, включающая отметки высот, горизонтالي и характеристики рельефа, используется для построения цифровой модели местности и адекватного отражения пространственной структуры территории;
- транспортные данные, полученные в ходе обследований; содержат сведения об интенсивности движения, составе потоков, временных параметрах загрузки и корреспонденциях, что позволяет выполнять моделирование транспортной работы сети и оценивать влияние проектных решений на ее пропускную способность;
- экологический блок данных; охватывает сведения о природных и антропогенных ограничениях, включая водные объекты, охраняемые территории и зоны хозяйственного использования, что необходимо для снижения негативного воздействия проектируемых



решений; кадастровая и инфраструктурная информация отражает особенности землепользования, существующую застройку и расположение инженерных коммуникаций; она формируется на основе данных дистанционного зондирования, государственных реестров и натурных обследований, с учетом социально-экономических последствий изъятия земель;

- нормативно-технические параметры; определяют допустимые геометрические характеристики трассы и включают требования к плану и профилю дороги, расчетным скоростям и условиям видимости, обеспечивая соответствие проектных решений действующим стандартам.

Формирование базовой информационной модели

На основе сформированного массива исходной информации выполняется построение интегрированной базовой модели территории. В качестве инструментальной платформы применяется специализированный программный комплекс, обеспечивающий формирование геопривязанной трехмерной модели.

Процесс моделирования включает импорт цифровых моделей рельефа, интеграцию существующей транспортной инфраструктуры и размещение проектируемых элементов. Дополнительно подключаются слои геоинформационных систем, отражающие природные ограничения, инженерные коммуникации и застроенные территории. Сформированная модель служит основой для комплексного анализа альтернативных вариантов трассирования [7, 8].

Оценка качества модели осуществляется в рамках многоступенчатой процедуры верификации, направленной на подтверждение точности как пространственных, так и атрибутивных характеристик. Для этого проводят сопоставление результатов моделирования с данными аэрофотосъемки, спутникового мониторинга и наземных геодезических измерений. Приоритетное внимание уделяется корректности воспроизведения рельефа, локализации инженерных сетей и параметрам застроенной среды. При использовании данного подхода повышается достоверность модели как основы для анализа и обоснования проектных решений.

Формирование вариантов трассы

На основе цифровой модели выполняется формирование набора альтернативных вариантов трассирования с применением инструментов проектирования. Данный процесс носит вариативный характер и предполагает генерацию предварительных решений с их последующей корректировкой. Оптимизация достигается за счет изменения геометрических параметров трассы с учетом нормативных требований и особенностей рельефа. Каждый вариант оценивается по показателям технологичности, экологичности и эффективности эксплуатации.

Возможности ТИМ позволяют реализовать имитационное моделирование транспортных потоков с анализом ключевых характеристик функционирования сети, включая пропускную способность, уровень задержек и показатели обслуживания. Интеграция расчетных модулей с цифровой моделью обеспечивает оперативное обновление результатов при изменении проектных параметров. Визуализация полученных данных способствует выявлению потенциальных конфликтов, связанных с негативным воздействием на окружающую среду и существующую застройку, а также предусматривает разработку корректирующих мероприятий [9, 10].



Оценка реализуемости модели

Завершающий этап направлен на выбор наиболее обоснованного варианта трассы на основе многокритериального анализа. Для этого формируется система ключевых показателей эффективности, охватывающая экономические, эксплуатационные, экологические и социальные аспекты. В результате определяется сбалансированное проектное решение, соответствующее техническим требованиям и обеспечивающее рациональное использование ресурсов при минимизации негативных воздействий на окружающую среду.

Предложенный ТИМ-ориентированный подход демонстрирует высокий потенциал в части интеграции и обработки больших массивов разнородных данных, что позволяет существенно упростить анализ условий проектирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассматриваемая в работе прикладная задача используется в качестве средства апробации нового подхода. Выбор данной задачи обусловлен необходимостью одновременного учета различных факторов, влияющих на формирование трассы автомобильной дороги, включая инженерные, экономические и экологические аспекты. Применение методики в сочетании с инструментами информационного моделирования позволяет повысить обоснованность проектных решений, а также сократить трудоемкость.

В рамках исследования реализована последовательность взаимосвязанных этапов, включающая:

- формирование и интеграцию исходных данных в среду проектирования;
- разработку и анализ различных вариантов трассировки, моделирование и визуализацию транспортных потоков;
- вариативную оптимизацию, направленную на достижение баланса эффективности, стоимости и экологичности.

Ключевым условием достоверности результатов является полнота и согласованность исходной информации. Для построения модели использовались топографические, транспортные, экологические и кадастровые данные. Топографическая основа обеспечила формирование цифровой модели местности с учетом рельефа и существующей инфраструктуры, включая инженерные коммуникации. Транспортный анализ базировался на данных об интенсивности движения, структуре потоков и прогнозах их изменения, что позволило оценить перспективную загрузку сети. Экологическая информация включала сведения о природных и урбанизированных территориях, сформированные на основе государственных источников и уточненные по результатам полевых обследований [11].

Собранные данные интегрированы нами в единую трехмерную модель, выполняющую функцию базовой платформы для анализа. Модель обеспечила комплексное представление пространственных ограничений и послужила основой для разработки альтернативных вариантов трассирования. В ходе исследования были сформированы три варианта, отличающиеся конфигурацией, протяженностью и условиями реализации (рис. 2).

Первый вариант ориентируется на использование существующей транспортной сети, что потенциально снижает затраты на развитие инфраструктуры, однако сопровождается увеличением капитальных вложений, сложными условиями строительства и характеризуется значительным воздействием на окружающую и социальную среду.

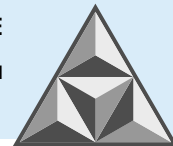


Рис. 2. Предлагаемые варианты трассировки автомобильных дорог

Fig. 2. Proposed options for road alignment

Второй вариант представляет собой оптимизированную конфигурацию с уменьшенной протяженностью и частичным снижением объемов работ, но требует переустройства инженерных коммуникаций, что увеличивает стоимость проекта.

Третий вариант отличается большей протяженностью, но благоприятными геометрическими параметрами, отсутствием пересечений с инженерными сетями и минимальным воздействием на окружающую среду, что делает его более сбалансированным. Сравнительная оценка вариантов выполнялась с учетом геометрических характеристик, условий движения, стоимости строительства и экологических ограничений.

Для оценки эффективности трасс проанализированы основные факторы, влияющие на трассировку (табл. 1) как результат принятых проектных решений.

Таблица 1. Результаты влияния на движение геометрического анализа конструкции

Table 1. Results of the impact of geometric analysis of the structure on traffic

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Длина, км	0.50	0.46	0.53
Минимальный радиус, м	40	70	110
Продольный профиль	Резкие спуски и подъемы	Умеренные спуски	Умеренные спуски, умеренные уклоны
Видимость	Ограниченная видимость	Достаточная видимость	Достаточная видимость
Безопасность	Устройство ограждений в местах насыпи, ограничение максимальной скорости движения	Устройство ограждений в местах насыпи, ограничение максимальной скорости движения	Потребность в дополнительных средствах безопасности отсутствует

С целью оценки рассматриваемых вариантов трассирования при эксплуатации в условиях существующих и перспективных транспортных нагрузок нами выполнен анализ эффективности дорожного движения (табл. 2).

Таблица 2. Результаты анализа эффективности дорожного движения

Table 2. The results of the traffic efficiency analysis

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Снижение заторов, %	10	15	25
Прогнозируемый рост интенсивности на 5 лет, %	16	12	9
Прогнозируемый рост интенсивности на 10 лет, %	21	18	15
Время в пути, мин	5	4	3



Анализ полученных результатов показал, что третий вариант трассирования, с точки зрения организации движения автомобилей, демонстрирует лучшие показатели. В частности, его реализация позволяет снизить уровень заторов и сократить среднее время в пути. Эти результаты обусловлены рациональными геометрическими параметрами трассы. Визуализация сценариев моделирования, иллюстрирующая особенности распределения транспортных потоков, представлена на рис. 3.

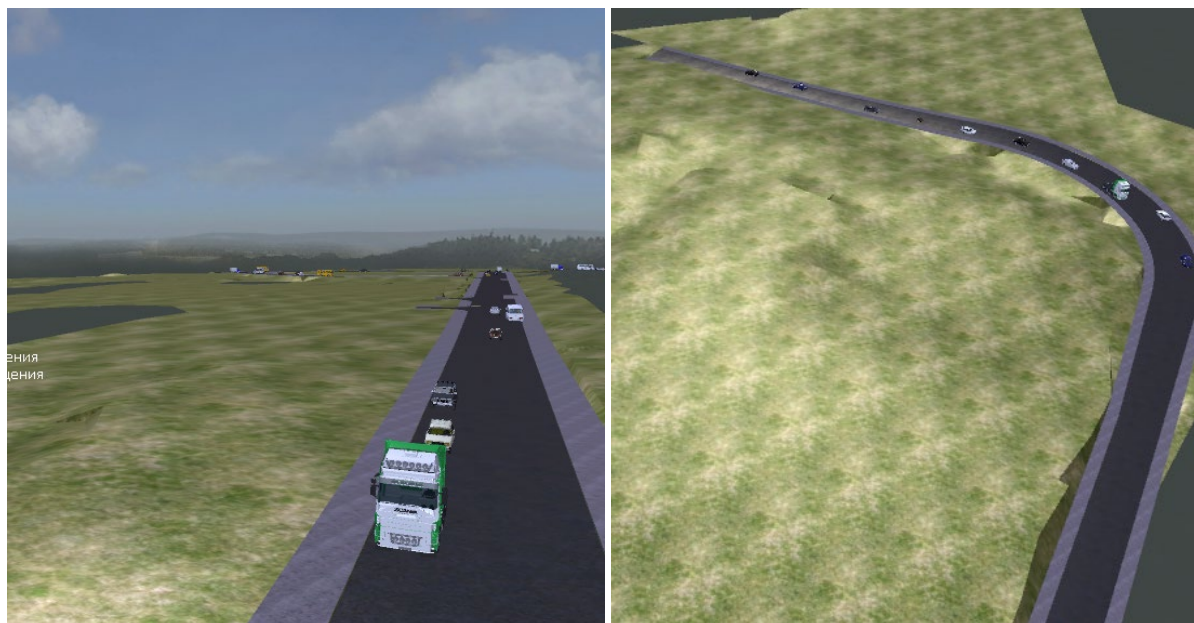


Рис. 3. Сценарии моделирования распределения транспортных потоков

Fig. 3. Scenarios for modeling the distribution of traffic flows

Стоимость строительства по каждому варианту трассы определялась исходя из объемов земляных работ, необходимости переноса инженерных сетей и применения дополнительных конструкций. Задача анализа затрат состояла в снижении строительных расходов без ухудшения геометрических параметров и транспортной доступности трасс (табл. 3).

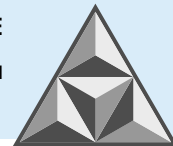
Таблица 3. Результаты анализа затрат на реализацию предлагаемой модели трассирования

Table 3. Results of cost analysis for implementing the proposed tracing model

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Земляные работы: насыпь, м ³	2746	3625	2035
Земляные работы: выемка, м ³	7720	4840	5665
Наличие выносимых коммуникаций	+	+	–
Дополнительные технические средства организации дорожного движения (барьерное ограждение, сигнальные столбики и т.д.)	+	+	–
Площадь арендуемой / приобретаемой земли, га	0.60	0.55	0.64

Экономическая оценка продемонстрировала преимущество третьего варианта за счет сокращения объемов земляных работ, отсутствия необходимости переноса инженерных коммуникаций и снижения потребности в дополнительных технических решениях.

Для каждого варианта трассы оценка воздействия на окружающую среду выполнялась по возможным нарушениям, наблюдаемым в экологически чувствительных зонах. Экологическую устойчивость оценивали по степени влияния трассировки, оказанного на природные объекты (см. табл. 4).

**Таблица 4.** Воздействие предлагаемых вариантов трассирования на окружающую среду**Table 4.** Impact of the proposed routing options on the environment

Параметр	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Вырубка насаждений, м ²	1032	568	123
Прохождение в охраняемой зоне	–	–	–
Демонтаж строений	+	+	–

Анализ подтвердил перспективность варианта 3 за счет минимального вмешательства в природную среду при осуществлении трассирования и отсутствия демонтажа существующих объектов (см. табл. 4).

Важное значение имеют также расходы по землепользованию, которые зависят от территориальных особенностей и действующих ограничений, что нередко делает предпочтительными варианты, действующие в существующих транспортных коридорах [12, 13]. В общем и целом при прохождении трасс через экологически чувствительные территории приоритет отдается тем решениям, которые минимизируют негативное воздействие на природную среду, даже при меньшей их экономической привлекательности [14].

Таким образом, нами подчеркивается целесообразность внедрения ТИМ для повышения эффективности планирования и проектирования в сфере дорожного строительства. Вместе с тем остается ряд ограничений в части практической их реализации, включая дефицит доступных исходных данных, рост затрат на их сбор и обработку, трудности интеграции разнородных информационных источников, недостаточную готовность участников отрасли к переходу на цифровые методы, а также несовместимость используемых программных платформ [15].

ВЫВОДЫ

Излагаемые методические аспекты могут быть эффективно использованы в сфере транспортной инфраструктуры. Выбор оптимального варианта трассирования предлагается осуществлять с учетом различных факторов согласно условиям конкретного проекта. Одним из таких факторов является, в частности, прогноз трафика, который возрастает при повышении интенсивности движения. Это определяет потребность в формировании трасс с большей пропускной способностью и возможностью реконструкции. В условиях меньших нагрузок, напротив, приоритет имеют решения, ориентированные на снижение капитальных затрат.

В отличие от классических решений, характеризующихся статичностью и ограниченным учетом изменяющихся факторов, рассмотренные ТИМ-ориентированные методы обеспечивают возможность проведения многовариантного анализа и поэтапной корректировки проектных решений с учетом взаимодействия всех участников процесса, способствуя таким образом повышению качества и устойчивости конечных результатов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Bazán Á.M., Alberti M.G., Álvarez, A.A., Trigueros, J.A.** New Perspectives for BIM Usage in Transportation Infrastructure Projects // *Appl. Sci.* 2020. Vol. 10. No. 20. P. 7072. DOI: 10.3390/app10207072.
2. **Богуславский Л.А., Проваторова Г.В.** Использование искусственного интеллекта в контексте проектирования автомобильных дорог // *Умные композиты в строительстве.* 2025. Т. 6. Вып. 4. С. 67-79. DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-67-79.



3. **Chong H.Y., Lopez R., Wang J., Wang X., Zhao Z.** Comparative Analysis on the Adoption and Use of BIM in Road Infrastructure Projects // *J. Manag. Eng.* 2016. Vol. 32. No. 6. P. 05016021. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000460.
4. ISO 19650-1-2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modeling. Part 1: Concepts and principles.
5. **Cepa J.J., Pavón R.M., Alberti M.G., Caramés P.** Towards Bim-Gis Integration for Road Intelligent Management System // *J. Civ. Eng. Manag.* 2023. Vol. 29. No. 7. P. 621-638. DOI: 10.3846/cem.2023.19514.
6. **Zhao L., Liu Z., Mbachu J.** Highway Alignment Optimization: An Integrated BIM and GIS Approach // *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019. Vol. 8. No. 4. P. 172. DOI: 10.3390/ijgi8040172.
7. **Vilutienė T., Šarkienė E., Šarka V., Kiaulakis A.** BIM Application in Infrastructure Projects // *Balt. J. Road Bridge Eng.* 2020. Vol. 15. No. 3. P. 74-92. DOI: 10.7250/bjrbe.2020-15.485.
8. **Sabato E., D'Amico F., Tripodi A., Tiberi P.** BIM & Road safety – Applications of digital models from in-built safety evaluations to asset management // *Transp. Res. Proc.* 2023. Vol. 69. P. 815-822. DOI: 10.1016/trpro.2023.02.240.
9. **Riaz M.S., Aziz Kh., Mufeez Z.A., Ghafoor F. e., Saker L., Aziz K., Azab M.** Strategic Utilization of Microsimulation for Sustainable Traffic Analysis and Intersection Improvement // *Open Transp. J.* 2023. Vol. 17; e26671212281061. DOI: 10.2174/0126671212281061231123113624.
10. **Inzerillo L., Acuto F., Pisciotta A., Dunn I., Mantalovas K., Uddin M.Z., Di Mino G.** Isim - Infrastructures & Structures Information Modeling: A New Concept of BIM for Infrastructures // *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.* 2023. Vol. XLVIII. No. 5-W2. P. 49-56. DOI: 10.5194/isrps-archives-XLVIII-5-W2-2023-49-2023.
11. **Wan Abdul Basir, W.N.F.A., Ujang U., Majid Z.B., Azri S., Choon T.L.** The integration of bim and gis in construction project-A data consistency review // *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.-ISPRS Arch.* 2020. Vol. XLIV. No. 4-W3. P. 107-116. DOI: 10.5194/isrps-archives-XLIV-4-W3-2020-107-2020.
12. **Cepa J.J., Pavón R.M., Alberti M.G., Ciccone A., Asprone D.A.** A Review on the Implementation of the BIM Methodology in the Operation Maintenance and Transport Infrastructure // *Appl. Sci.* 2023. Vol. 13. No. 5. P. 3176. DOI: 10.3390/app13053176.
13. **Roumyeh M., Badenko V.** Integration between BIM and GIS for Decision-Making // *V Inter. Conf. – BIM Modeling for Construction and Architecture.* At Saint Petersburg, Russia. 2022. DOI: 10.23968/BIMAC.2022.003.
14. **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. DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-42-52.
15. **Yu X.** Application of BIM Technology in Construction Engineering Management. In book: *Frontier Computing*; Hung, J.C., Yen, N.Y. and Chang, J.W., Eds.; Lecture Notes in Electrical Engineering; Springer: Singapore, 2023; Vol. 1031 LNEE (Upre). P. 1398-1402. DOI: 10.1007/978-981-99-1428-9_181.

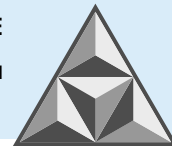
Поступила в редакцию 27.04.2026

Одобрена после рецензирования 29.05.2026

Принята к опубликованию 30.06.2026

REFERENCES

1. **Bazán, Á.M., Alberti, M.G., Álvarez, A.A. and Trigueros, J.A.** (2020), New perspectives for BIM usage in transportation infrastructure projects, *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 20, p. 7072. DOI: 10.3390/app10207072
2. **Boguslavskii, L.A. and Provatorova, G.V.** (2025), The use of artificial intelligence within the design of automobile roads, *Smart Composite in Construction*, vol. 6, iss. 4, pp. 67-79 (in Russian). DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-67-79.
3. **Chong, H.Y., Lopez, R., Wang, J., Wang, X. and Zhao, Z.** (2016), Comparative analysis on the adoption and use of BIM in road infrastructure projects, *J. Manag. Eng.*, vol. 32, no. 6, p. 05016021. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000460.

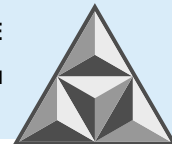


4. ISO 19650-1-2018 Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM) - Information management using building information modeling. Part 1: Concepts and principles (in Russian).
5. **Cepa, J.J., Pavón, R.M., Alberti, M.G. and Caramés, P.** (2023), Towards Bim-Gis integration for road intelligent management system, *J. Civ. Eng. Manag*, vol, 29, no. 7, pp. 621-638. DOI: 10.3846/cem.2023.19514.
6. **Zhao, L., Liu, Z. and Mbachu, J.** (2019), Highway alignment optimization: An integrated BIM and GIS approach. *ISPRS Int. J. Geo-Inf.* 2019, vol, 8, no. 4, p. 172. DOI: 10.3390/ijgi8040172.
7. **Vilutienė, T., Šarkienė, E., Šarka, V. and Kiaulakis, A.** (2020), BIM application in infrastructure projects, *Balt. J. Road Bridge Eng.*, 2020, vol, 15, no. 3, pp. 74-92. DOI: 10.7250/bjrbe.2020-15.485.
8. **Sabato, E., D'Amico, F., Tripodi, A. and Tiberi, P.** (2023), BIM & road safety – applications of digitals models from in-built safety evaluations to asset management, *Transp. Res. Proc.*, vol. 69, pp. 815-822. DOI: 10.1016/trpro.2023.02.240.
9. **Riaz, M.S., Aziz, Kh., Mufeez, Z.A., Ghafoor, F. e., Saker, L., Aziz, K. and Azab, M.** (2023), Strategic utilization of microsimulation for sustainable traffic analysis and intersection improvement, *The Open Transp. J.*, vol. 17, e26671212281061. DOI: 10.2174/0126671212281061231123113624.
10. **Inzerillo, L., Acuto, F., Pisciotta, A., Dunn, I., Mantalovas, K., Uddin, M.Z. and Di Mino, G.** (2023), Isim - Infrastructures & Structures Information Modeling: A new concept of BIM for infrastructures, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. – ISPRS Arch.*, vol. XLVIII, no. 5-W2, pp. 49-56. DOI: 10.5194/isrps-arhives-XLVIII-5-W2-2023-49-2023.
11. **Wan Abdul Basir, W.N.F.A., Ujang, U., Majid, Z.B., Azri, S. and Choon, T.L.** (2020), The integration of bim and gis in construction project-A data consistency review, *Int. Arch. Photogram. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. – ISPRS Arch.*, vol. XLIV, no. 4-W3, pp. 107-116. DOI: 10.5194/isrps-arhives-XLIV-4-W3-2020-107-2020.
12. **Cepa, J.J., Pavón, R.M., Alberti, M.G., Ciccone, A. and Asprone, D.A.** (2023), A review on the implementation of the BIM methodology in the operation maintenance and transport infrastructure, *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 5, p. 3176. DOI: 10.3390/app13053176.
13. **Roumyeh, M. and Badenko, V.** (2022), Integration between BIM and GIS for Decision-Making, *V Inter. Conf. – BIM Modeling for Construction and Architecture*, Saint Petersburg, Russia. DOI: 10.23968/BIMAC.2022.003.
14. **Boguslavskii, L.A. and Provatorova, G.V.** (2024), Information modeling technologies in the concept of sustainable road construction, *Smart Composite in Construction*, vol. 5, iss. 3, pp. 42-52 (in Russian). DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-3-42-52.
15. **Yu, X.** (2023), Application of BIM technology in construction engineering management. *In book: Frontier Computing*; Hung, J.C., Yen, N.Y. and Chang, J.W., Eds.; Lecture Notes in Electrical Engineering; Springer: Singapore, vol. 1031 LNEE (Upre), pp. 1398-1402. DOI: 10.1007/978-981-99-1428-9_181.

Received 27.04.2026

Approved 29.05.2026

Accepted 30.06.2026



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.19:69.058.2

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-46-63

Современные подходы к мониторингу деформаций транспортных тоннелей: технологии, принципы и направления развития

П.А. Егорычев, А.А. Игнатьев

Петр Алексеевич Егорычев, Алексей Александрович Игнатьев*

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет,

Москва, Российская Федерация

*petrbsk07@gmail.com, Alexassis@yandex.ru**



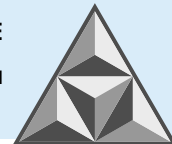
Статья посвящена изучению эволюции мониторинга транспортных тоннелей – от эпизодических геодезических наблюдений до современных цифровых систем. Актуальность исследования обусловлена старением значительной части тоннельного фонда, усложнением геотехнических условий и ростом требований к безопасности. На основе анализа передовой европейской школы выделены ключевые принципы мониторинга, включающие непрерывность, многоканальность, интеграцию с расчетными моделями и эксплуатацией. Рассмотрены стационарные комплексы мониторинга технического состояния конструкций, мобильные системы на основе наземного и мобильного лазерного сканирования, а также распределенные волоконно-оптические измерительные комплексы. Проведен сравнительный анализ методов мониторинга по показателям точности, пространственного охвата и режима работы. Показаны ключевые тенденции в отрасли: движение к режиму измерений в реальном времени, интеграция с цифровыми двойниками, внедрение машинного обучения. Представлены ограничения существующих решений: преобладание «фиксационного» мониторинга и формализация задач раннего обнаружения деформационных процессов. Обоснована необходимость перехода от мониторинга как «съемки состояния» к предиктивной безопасности и ориентированному управлению жизненным циклом тоннелей, в том числе в свете цифровой трансформации отрасли.

Ключевые слова: мониторинг тоннелей, европейская школа, раннее предупреждение деформаций, лазерное сканирование, волоконно-оптические датчики, цифровой двойник

Для цитирования:

Егорычев П.А., Игнатьев А.А. Современные подходы к мониторингу деформаций транспортных тоннелей: технологии, принципы и направления развития // Умные композиты в строительстве. 2026. Т. 7, вып. 3. С. 46-63.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-46-63



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-46-63

Modern approaches to monitoring deformations of transport tunnels: technologies, principles and development trends

P.A. Egorychev, A.A. Ignatev

Petr Alekseevich Egorychev, Aleksei Aleksandrovich Ignatev*

Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

*petrbsk07@gmail.com, Alexassis@yandex.ru**



The article examines the evolution of transport tunnel monitoring – from episodic geodetic observations to modern digital systems. The relevance of the study is due to the aging of a significant part of the tunnel stock, the increasing complexity of geotechnical conditions, and the growing safety requirements for infrastructure. Based on an analysis of the advanced European school, key monitoring principles have been identified, including continuity, multi-channel data acquisition, integration with computational models, and operational feedback. Stationary structural health monitoring (SHM) systems, mobile systems based on terrestrial and mobile laser scanning, as well as distributed fiber-optic sensing systems are examined. A comparative analysis of monitoring methods is conducted in terms of accuracy, spatial coverage, and operating mode. Key trends in the industry are shown: the move toward real-time measurements, integration with digital twins, and the implementation of machine learning. The limitations of existing solutions are presented: the predominance of “fixation” monitoring and the formalization of tasks related to the early detection of deformation processes. The necessity of transitioning from monitoring as a “state survey” to predictive safety and lifecycle-oriented management of tunnels, including in the context of the digital transformation of the industry, is substantiated.

Keywords: tunnel monitoring, European school, early deformation warning, laser scanning, fiber-optic sensors, digital twin

For citation:

Egorychev P.A., Ignatev A.A. Modern approaches to monitoring deformations of transport tunnels: technologies, principles and development trends // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 3. P. 46-63. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-46-63



ВВЕДЕНИЕ

Проблема обеспечения конструктивной и эксплуатационной безопасности перегонных тоннелей является одной из ключевых задач развития транспортной инфраструктуры. Старение значительной части тоннельного фонда нашей страны, усложнение геотехнических условий и рост интенсивности движения приводят к увеличению частоты повреждений [1, 2]. В отечественной практике мониторинг тоннелей исторически развивался как инструмент периодической фиксации фактического состояния в виде разовых геодезических измерений с визуальным обследованием в виде осмотров, что не всегда позволяет заблаговременно обнаружить зарождение деформационных процессов [1, 3].

Современный мониторинг уже не ограничивается отдельными геодезическими измерениями, а включает наземное лазерное сканирование (*TLS – Terrestrial Laser Scanning*), мобильное лазерное сканирование (*MLS – Mobile Laser Scanning*), распределенные волоконно-оптические системы, а также платформенные цифровые решения, ориентированные на непрерывное наблюдение за поведением тоннелей и окружающего массива. Аналогичная тенденция фиксируется и на мировом уровне: по мере истечения нормативного срока службы тоннельных сооружений вероятность возникновения структурных дефектов и отказов значительно возрастает, что определяет необходимость перехода от периодических осмотров к системному научно обоснованному мониторингу [4, 5].

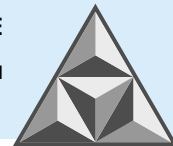
При этом, обращаясь к опыту европейской школы, стоит отметить, что она демонстрирует переход к более технологичному уровню наблюдений: наземное и мобильное лазерное сканирование (*TLS/MLS*), распределенные волоконно-оптические датчики (*DFOS*), а также интеграция с цифровыми моделями инфраструктуры [4-9] обеспечивают возможность точной фиксации отклонений и деформаций. Опыт протяженных европейских тоннелей свидетельствует о том, что распределенные волоконно-оптические системы способны охватывать десятки километров обделки с миллиметровым пространственным разрешением [6, 7], тогда как мобильные сканирующие платформы обеспечивают получение сплошных 3D-моделей поперечного сечения без остановки движения [5]. Все активнее обсуждается роль методов искусственного интеллекта и цифровых двойников как инструмента перехода к превентивному управлению состоянием тоннелей [4, 5].

В этой связи целью настоящего исследования является обзор подходов к мониторингу деформаций транспортных тоннелей, сопоставление основных технологических решений и выявление направлений перехода от дискретного контроля к непрерывному многоканальному наблюдению. Особое внимание уделяется сопоставлению работы европейской и китайской исследовательских школ, поскольку именно на их материале отчетливо проявляются как инженерно-прикладные, так и прорывные направления развития данной области.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА

Эволюция мониторинга транспортных тоннелей

Первые транспортные тоннели XIX и начала XX века контролировались редкими геодезическими ходами по реперам, расположенным по контуру обделки, при этом диагностика сводилась к визуальной оценке трещин и протечек. Цель была достаточно прагматичной и заключалась в подтверждении того, что тоннель продолжает эффективно работать по истечении определенного количества лет после завершения строительства или какого-либо крупного происшествия [1, 4].



С ростом протяженности тоннелей и скоростей движения во второй половине XX столетия стали появляться станции мониторинга, конвергенционные цепочки (измерения сближения стен), встраиваемые тензодатчики. Мониторинг стал инструментом количественной проверки, где реальные деформации сверялись с проектными допусками [1, 4].

Качественный перелом произошел с внедрением наземного лазерного сканирования (TLS), позволившего получать полное облако точек поперечного сечения тоннеля за одну установку прибора. Впоследствии появились мобильные сканирующие системы (MLS), устанавливаемые на платформах, спецпоездах, дорожной технике. Эти технологии устранили необходимость в многократной ручной разбивке, повысили производительность в десятки раз и обеспечили геометрическую модель всего ствола [10-12].

Параллельно развивалась система мониторинга технического состояния конструкций, когда в обделку и грунт стали закладывать датчики: инклинометры, струнные тензодатчики, а затем – распределенные волоконно-оптические кабели (DFOS). Последние обеспечивают непрерывный профиль деформации и температуры вдоль кабельного пути без необходимости дискретных точечных измерений [13].

Мониторинг транспортных тоннелей можно представить как последовательную смену парадигм: от точечных/ручных измерений (через пространственно-дискретные автоматизированные системы) – к непрерывным многомодальным платформам, интегрированным с цифровыми моделями и аналитическими инструментами принятия решений [3, 9, 11, 14]. На рис. 1 представлены фотографии перегонного тоннеля метрополитена и вид облака точек.



Рис. 1. Перегонный тоннель метрополитена (а) и вид облака точек (б) [12]

Fig. 1. Running tunnel of a subway (a) and point cloud view (b) [12]

При более детальном рассмотрении эволюция мониторинга транспортных тоннелей связывается со сменой нескольких технологических поколений. На первом этапе контроль носил в основном эпизодический характер и опирался на ручные геодезические наблюдения, визуальные осмотры трещин и локальные конвергенционные измерения.

На втором этапе получили распространение автоматизированные тахеометрические наблюдения, стационарные деформационные датчики, инклинометрические и тензометрические комплексы, что обеспечило рост частоты измерений и переход к регулярному контролю.



Третье поколение связано с внедрением наземного и мобильного лазерного сканирования, распределенных волоконно-оптических систем и многоканальных комплексов мониторинга технического состояния, когда тоннель стал рассматриваться уже не как совокупность отдельных контрольных точек, а как пространственная деформационная система. Современный этап можно охарактеризовать переходом к цифровым платформам, объединяющим данные различных сенсоров, расчетные модели, *BIM*- и *GIS*-среду, а также средства автоматизированной интерпретации, что открывает возможность движения от фиксации состояния к прогностическому анализу его изменения.

Мобильные системы обычно представляют широкую, но дискретную картину, тогда как стационарные — картину непрерывную, но локальную. В совокупности обе парадигмы образуют взаимодополняющую архитектуру, где каждый тип сенсорной системы компенсирует ограничения другого [3, 9, 11, 14].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ: МЕТОДЫ МОНИТОРИНГА

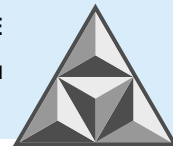
На основе проведенного анализа изучены сравнительные характеристики основных методов мониторинга (табл. 1). Наблюдается принципиальное различие между дискретными (линейно-угловые измерения, нивелирование, наземное лазерное сканирование) и непрерывными методами исследования (волоконно-оптические системы, тензометры, инклинометры), а также между осуществляемыми стационарными и мобильными решениями.

Таблица 1. Сравнительная характеристика методов мониторинга тоннелей

Table 1. Comparative characteristics of tunnel monitoring methods

Метод	Принцип измерения	Точность, мм	Пространственное покрытие	Режим	Ключевые ограничения
Полигонометрия (автомат.)	Линейно-угловые измерения по маркам	0.5-2.0	Отдельные точки (десятки – сотни)	Дискретный	Прямая видимость; ограниченное число точек
Наземное лазерное сканирование (TLS)	Сканирование со штатива	1.0-10.0	Полный контур сечения (длина зависит от технол. окна)	Дискретный	Остановка движения; трудоемкая обработка
Мобильное лазерное сканирование (MLS)	Сканирование с движущейся платформы	5.0-15.0	Вся длина тоннеля за один проход	Дискретный, высокая производительность	Точность ниже TLS; зависимость от навигации
Волоконно-оптические датчики (DFOS)	Преломление света в оптоволокне	2.0-20.0	Непрерывно вдоль волокна (десятки – сотни метров)	Непрерывный	Сложный монтаж; чувствительность к температуре
Контактные датчики (тензометры, инклинометры)	Электрическое / вибрационно-струнное преобразование	1.0-10.0	Локальные места (точки)	Непрерывный	Локальность; кабельная инфраструктура подключения

Мобильные комплексы особенно востребованы на протяженных перегонах панелей, где за один проход они формируют полную геометрическую модель, служащую для определения фактических отклонений контролируемых параметров от проектных и нормативных значений и оценки изменения состояния конструкции [13].



Современные системы мониторинга в настоящее время решают широкий круг задач:

- контроль соответствия параметров проектным и нормативным значениям;
- формирование хронологии деформационного поведения тоннеля;
- информирование о превышении пороговых показателей в тоннеле;
- выявление скрытых трендов и ранних признаков неблагоприятного развития процесса;
- интеграция данных сенсоров в единую цифровую среду;
- обновление цифровой модели сооружения;
- обоснование продления срока службы и назначение очередности ремонтных мероприятий [8, 14-16].

Таблица 2. Методы интеграции и анализа данных мониторинга

Table 2. Methods of integration and analysis of monitoring data

Метод интеграции / анализа	Принцип работы	Аналитические возможности	Ключевые ограничения
Мультисенсорные платформы мониторинга	Интеграция геодезических, лазерно-сканирующих, волоконно-оптических и эксплуатационных данных в единый контур	Высокие	Сложность интеграции и требования к инфраструктуре данных
Цифровой двойник тоннеля	Связь мониторинга с геометрической и расчетной моделью сооружения, сценарный анализ	Очень высокие	Ресурсоемкость и необходимость постоянного обновления
Методы интеллектуальной обработки данных мониторинга	Выявление скрытых закономерностей, прогноз и раннее предупреждение на основе временных рядов	Очень высокие	Чувствительность к качеству обучающей выборки и ограниченная нормативная формализация

В табл. 2 представлены методы анализа и принципы работы с данными мониторинга, включая текущие ограничения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принципы европейской школы мониторинга

Европейская школа мониторинга тоннелей использует несколько принципов работы, представленных в табл. 3, где выделяются ключевые принципы, а также примеры их практической реализации и нормативные источники. Комплексность и многоканальность наблюдений предполагают совместное применение нескольких методов – как правило, *TLS/MLS*, *DFOS* и расчетных моделей [3, 4, 8, 15].

При этом непрерывность и системность означает, что мониторинг является неотъемлемой частью жизненного цикла тоннеля. Крупнейшие европейские тоннели *Готард*, *Лечберг*, *Бренер* были оснащены стационарными системами еще на стадии строительства и работают в круглосуточном автоматическом режиме [8, 9]. Причинно-следственная логика предполагает, что каждое измерение должно быть объяснено через физическую модель конструкции [11, 17].

**Таблица 3.** Принципы европейской школы мониторинга тоннелей [4, 8, 18]**Table 3.** Principles of the European school of tunnel monitoring [4, 8, 18]

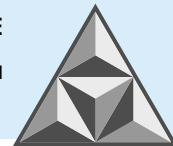
Принцип	Содержание	Примеры реализации / Источник
Непрерывность и системность	Мониторинг – неотъемлемая часть тоннеля; ведется с момента строительства до вывода его из эксплуатации	<i>Готард, Лечберг, Brenner</i> [8, 9]
Многоканальность	Параллельное использование <i>TLS/MLS, DFOS, InSAR, FEM</i> и <i>SHM</i> для компенсации ограничений каждого метода	<i>DZSF</i> [9], <i>ASTRA 84012</i> [15]
Интеграция с расчетными моделями	Данные мониторинга верифицируются через МКЭ-модели; отклонения объясняются физически	<i>SCADA, CRM, BIM</i> [11, 17]
Нормативное закрепление	Мониторинг регламентирован на уровне отраслевых стандартов и технических требований	<i>ASTRA 84012</i> [15], <i>ITA</i>
Риск-ориентированность	Пороговые значения увязаны с уровнями риска для пользователей и инфраструктуры	<i>Buchmayer & Bergmeister</i> [8]

Наиболее последовательно эта логика реализована в альпийской практике мониторинга, сформировавшейся на крупных тоннельных объектах Швейцарии, Австрии и Германии. Для данной школы характерно сочетание автоматизированных тахеометров, конвергенционных систем, инклинометров, пьезометров, распределенных волоконно-оптических линий и данных лазерного сканирования в составе единого измерительного контура. Важной особенностью является и то, что мониторинг рассматривается не как автономная измерительная подсистема, а как часть общего цикла управления тоннельным объектом, которая находится в корреляции с расчетной моделью, эксплуатационными регламентами и инженерной интерпретацией поведения конструкции [8, 9].

Для протяженных тоннелей именно такая многоканальная схема особенно важна, поскольку локально точные, но пространственно разрозненные измерения уже не обеспечивают всей полноты картины. В этой связи в европейской практике большое значение приобретают методы, позволяющие получать сплошную или квазисплошную информацию о геометрии сооружения и распределении деформаций вдоль обделки (прежде всего, наземное и мобильное лазерное сканирование, а также распределенные волоконно-оптические системы) [14].

Практика требует, чтобы результаты были понятны эксплуатирующему персоналу [14]. Накопление данных и формализация опыта превращает результаты, полученные в рамках реализации каждой программы мониторинга, в источник новых знаний.

Эти знания систематизируются в отраслевых документах, например, в стандарте *ASTRA 84012* и рекомендациях Международной тоннельной ассоциации (*ITA*) [15]. Однако даже в рамках этих принципов мониторинг остается, в первую очередь, инструментом высококачественной фиксации деформаций, а не формализованным механизмом раннего предупреждения.



Современные системы мониторинга и их возможности

По мере развития цифровых платформ все более важным становится не только наличие отдельных датчиков, но и архитектура системы в целом. Современный комплекс мониторинга тоннеля, как правило, включает первичные сенсоры, каналы передачи данных, регистрирующие вычислительные модули и среду хранения, аналитический блок и интерфейс поддержки эксплуатационных решений. В базовом варианте такая система функционирует как средство фиксации и отображения измерений, однако в более зрелых вариантах она дополняется *VIM*-моделью, цифровым двойником, сценариями оповещений, а также алгоритмами автоматизированной диагностики и раннего выделения аномальных состояний [3, 8, 10, 18].

В этой связи весьма показательным является движение от разрозненных подсистем к платформенному подходу, при котором мобильные и стационарные средства мониторинга работают не параллельно, а в едином информационном контуре. Стационарные датчики обеспечивают непрерывное наблюдение за локальными зонами, а мобильные сканирующие комплексы представляют периодически обновляемую пространственную картину по всей длине тоннеля. Совместное использование этих подсистем позволяет одновременно отслеживать как локальные изменения, так и общий деформационный рисунок сооружений [3, 11, 19].

На рис. 2 показано, как выглядит архитектура современной комплексной системы мониторинга железнодорожного тоннеля – от размещения *FBG*-датчиков деформации и видеодальномеров по поперечному сечению до сбора, передачи и обработки данных на облачном сервере с формированием предупреждений.

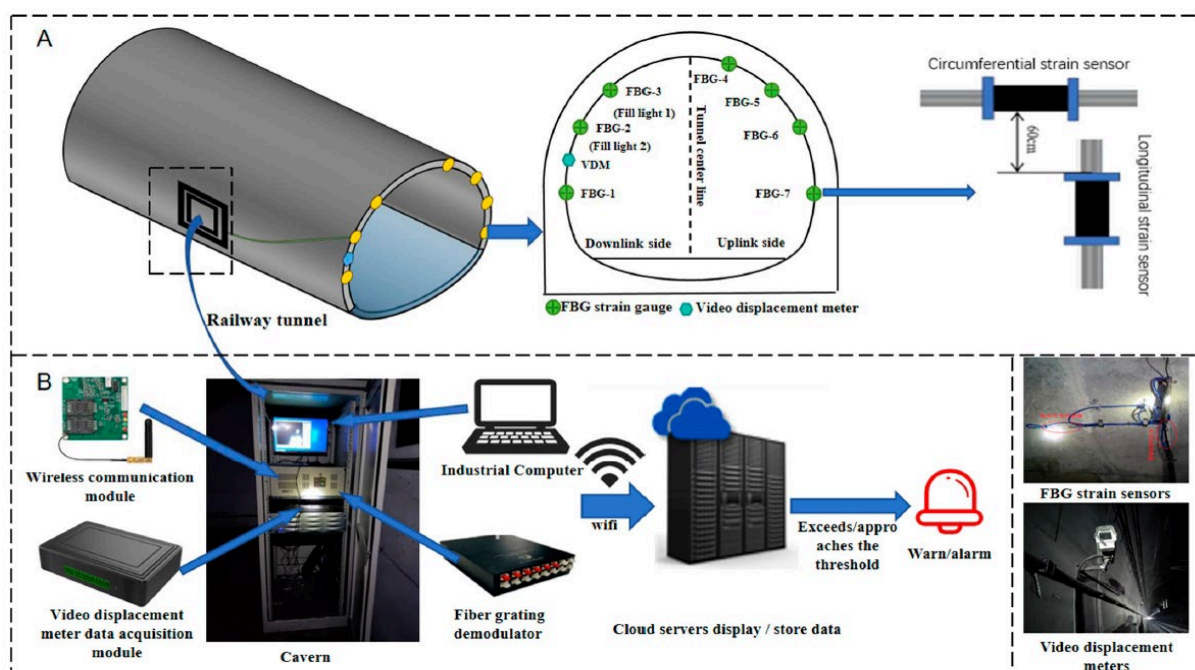


Рис. 2. Архитектура комплексной системы мониторинга тоннеля: размещение *FBG*-датчиков деформации и видеодальномеров (*VDM*) по сечению и система сбора, передачи и обработки данных (от сенсорного уровня до облачного сервера и системы предупреждений) [20]

Fig. 2. Architecture of an integrated tunnel monitoring system: layout of *FBG* strain sensors and video displacement meters (*VDM*) across the cross-section and the data acquisition, transmission and processing chain (from sensor level to cloud server and warning system) [20]

Системы рассматривают тоннельную обделку не как набор отдельных точек, а как протяженный объект с контролем по множеству сечений.



На рис. 3 представлена схема размещения *FBG*-датчиков деформации и температуры по сечениям тоннеля и пример их полевой установки на поверхности вторичной обделки.

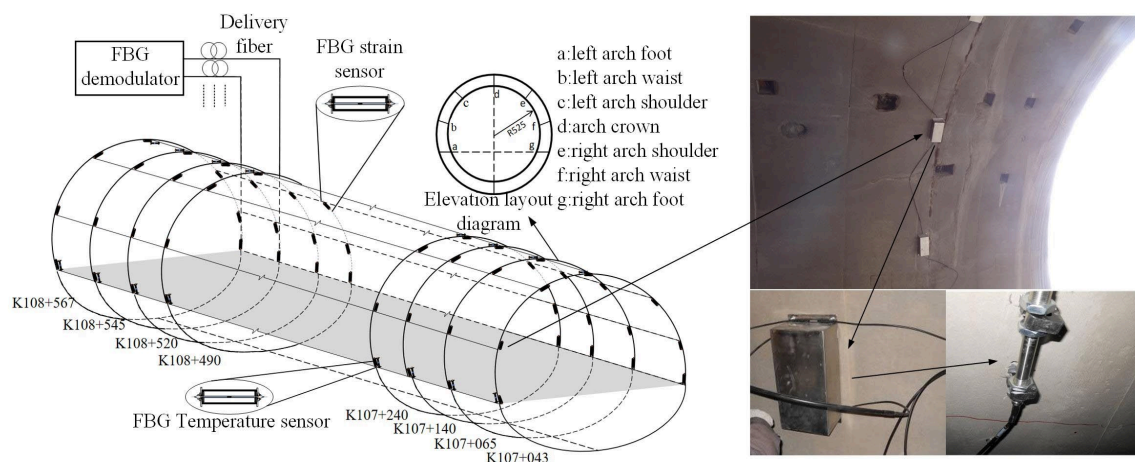


Рис. 3. Схема размещения *FBG*-датчиков деформации и температуры по сечениям тоннеля и пример их полевой установки на поверхности вторичной обделки [20]

Fig. 3. Layout of *FBG* strain and temperature sensors across tunnel cross-sections and an example of their field installation on the surface of the secondary lining [20]

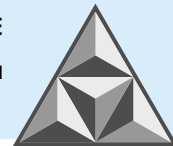
Передовые тоннели Европы оснащаются комплексами, по объему данных сопоставимыми с системами в авиации. Это автоматизированные тахеометры, лазерные сканеры, контактные датчики, распределенная оптика, вибросенсоры. Стационарные компоненты фиксируют поведение конструкции, а мобильные компоненты обеспечивают регулярный «скрининг» (см. рис. 4) по всей длине тоннеля [3, 5, 7].



Рис. 4. 3D-модель узла разветвления тоннелей по данным лазерного сканирования (вид сверху) [23]

Fig. 4. 3D model of a tunnel junction node based on laser scanning data (top view) [23]

Сбор данных осуществляется регистрирующими модулями по проводным или беспроводным каналам связи на облачные платформы мониторинга технического состояния сооружений [3, 8]. На платформах данные накапливаются, автоматически обрабатываются, отображаются на *BIM*-модели тоннеля (и прилегающей застройки) и используются для интеллектуальной диагностики и прогноза его состояния.



На рис. 4 приведен характерный пример – 3D-модель узла разветвления тоннелей по данным лазерного сканирования.

Тенденции развития и риски при реализации направления

Анализ проведенных ранее исследований выявил устойчивые тенденции [9, 11, 21]:

- стремление к режиму реального времени – от недель к часам и минутам между измерениями;
- интеграция результатов мониторинга в цифровые двойники, где деформации связываются с геометрией, материалами, нагрузками;
- применение машинного обучения и сценарного моделирования для интерпретации данных [22];
- поворот к подходу, увязывающему мониторинг с оценкой риска для пользователей и экономики [8, 15].

Вместе с тем обнаружены и существенные ограничения. «Раннее предупреждение» остается неформализованным, когда сигнал подается при превышении порога, но неясно, с каким интервалом до наступления опасного состояния он должен формироваться и какое минимальное «время на реакцию» нужно обеспечивать. Пороговые значения задаются статично и не адаптируются к индивидуальному поведению тоннеля. В результате связь между мониторингом и эксплуатационными решениями строится преимущественно на опыте конкретных специалистов, а не на формализованной системе сценариев реагирования [23]. На рис. 5 показан пример облака точек тоннеля большого сечения с монолитной обделкой, полученного по данным лазерного сканирования.



Рис. 5. Облако точек тоннеля большого сечения с монолитной обделкой (по данным лазерного сканирования) [12]

Fig. 5. Point cloud of a large-section tunnel with monolithic lining (based on laser scanning data) [12]

В отсутствие формализованных методов раннего предупреждения мониторинг нередко фиксирует уже развившиеся дефекты обделки (рис. 6), а не предшествующие им деформации.



Рис. 6. Фрагмент обделки транспортного тоннеля с развившимися трещинами и локальным разрушением бетона после длительной эксплуатации [24]

Fig. 6. Section of a transport tunnel lining with developed cracks and local concrete spalling after long-term operation [24]

Необходима методологическая база, позволяющая интерпретировать данные мониторинга в терминах технического риска и остаточного ресурса конструкции [3, 11, 19].

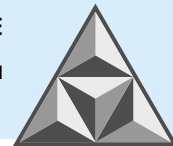
Китайская школа и их инновационные подходы

Наряду с европейской школой, в последние годы быстро развивается и китайское направление исследований, для которого характерно смещение акцента от преимущественно измерительной функции мониторинга к обработке больших массивов данных и прогностической аналитике. Если европейская школа исторически формировалась как система высокоточного инженерного контроля и интеграции с расчетами, то в китайских работах более заметную роль играют мультисенсорные платформы, цифровые двойники тоннелей и методы интеллектуальной обработки временных рядов деформаций [22].

В этой группе работ особое место занимают модели глубокого обучения, ориентированные на анализ деформационных рядов: *LSTM* (*Long Short-Term Memory* – сети долгой краткосрочной памяти), *Bi-LSTM-AM* (*Bidirectional Long Short-Term Memory with Attention Mechanism* – двунаправленные сети долгой краткосрочной памяти с механизмом внимания), *GRU* (*Gated Recurrent Unit* – рекуррентные сети с управляющими затворами) и *TCN* (*Temporal Convolutional Network* – временные сверточные сети). Модели используются для выявления нелинейных закономерностей в рядах конвергенции и иных контролируемых параметров, а также прогноза их дальнейшего развития [25-28].

Характерно, что в ряде современных исследований такие решения рассматриваются уже не как вспомогательный аналитический инструмент, а как ключевой компонент системы раннего предупреждения – *data-driven* ядро, принимающее решение об уровне тревоги на основании не пороговых значений, а прогнозируемого тренда. Это знаменует концептуальный сдвиг в инженерной практике мониторинга [25-28].

При всей технологической привлекательности указанного направления необходимо учитывать и его ограничения. Алгоритмы машинного обучения предъявляют высокие требования к полноте и качеству исторических данных, чувствительны к составу обучающей выборки и пока недостаточно стандартизированы в нормативной базе. Тем не менее именно



это направление представляет собой одно из наиболее заметных отличий современной китайской школы мониторинга и задает переход к новому этапу цифрового наблюдения за техническим состоянием тоннелей.

Российский опыт мониторинга состояния тоннелей

Российский тоннельный фонд включает как новые сооружения, так и тоннели, характеризующиеся расчетным сроком службы [1, 2]. Для ряда линий метро и железнодорожных тоннелей вопрос продления ресурса и безопасной эксплуатации на горизонте 10-20 лет становится не абстрактной задачей, а фактором реальной угрозы возникновения недопустимых рисков для пассажиров и инфраструктуры. Классические методики мониторинга, ориентированные на эпизодическую фиксацию и реактивные ремонты, уже не обеспечивают требуемого качества управления рисками [8, 9].

На уровне государственной политики эту повестку усиливает Распоряжение Правительства РФ № 3883-р, в котором напрямую берется курс на внедрение информационного моделирования, работу с большими массивами данных, пространственный анализ и цифровые системы поддержки решений. На этом фоне появляются проекты крупных цифровых платформ мониторинга транспортной инфраструктуры, которые становятся полигонами для отработки новых подходов [10, 17, 29, 30].

При этом мониторинг перестает быть вспомогательной функцией и является значимым инструментом управления жизненным циклом тоннеля, охватывая этапы от проектирования и строительства до контролируемого вывода из эксплуатации. Переход от разрозненных визуальных осмотров к непрерывной работе цифрового двойника означает смену логики управления, когда инфраструктура уже не просто фиксирует факт старения постфактум, а позволяет прогнозировать траекторию деформаций, заблаговременно выявлять зоны повышенного риска и планировать предупредительные мероприятия до вхождения в критическое состояние.

ВЫВОДЫ

Обзор исследований показывает, что мониторинг транспортных тоннелей находится на пороге качественного перехода. Европейская школа создала мощный технологический фундамент, где системы, сочетающие стационарные комплексы оценки состояния, мобильные сканирующие платформы и распределенную волоконно-оптическую инфраструктуру, способны с высокой точностью и в режиме, близком к реальному времени, фиксировать деформации конструкций. На этом фоне российские проекты цифровых платформ мониторинга транспортной инфраструктуры находятся пока на стадии формирования.

Формализация задач раннего обнаружения аномалий и их увязка с эксплуатационными решениями остаются нереализованным направлением развития мониторинга тоннелей. Действующие системы ограничиваются сигналами о превышении заданных статичных порогов и не адаптируют критерии к индивидуальному деформационному поведению конкретного тоннеля, не задают горизонт заблаговременного предупреждения относительно опасных состояний и не опираются на формализованные сценарии реагирования.

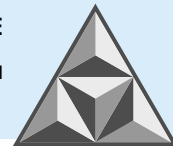
Для российского тоннельного фонда, значительная часть которого приближается к расчетному сроку службы, такой разрыв особенно критичен, так как возможности длительных остановок на ремонт объективно ограничены. В этих условиях возникает запрос на переход от



реактивного управления безопасностью к предиктивному, где мониторинг рассматривается как инструмент риск-ориентированного управления жизненным циклом тоннеля, а не как вспомогательная сервисная функция. Разработка методов прогнозирования и обнаружения критических состояний на основе первичных деформационных импульсов и их интерпретации в эксплуатационном аспекте представляется необходимым условием для преодоления указанного разрыва и внедрения воспроизводимых процедур управления рисками на уровне сети тоннелей.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Волохов Е.М., Новоженин С.Ю., Бак Нгуен Суан.** Современные системы контроля сдвижений и деформаций при строительстве подземных сооружений // *Записки Горного института*. 2012. Т. 199. С. 253-259. URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5854> (дата обращения: 06.05.2026).
2. **Лебедев М.О., Безродный К.П., Шляев С.А.** Долгосрочный геотехнический мониторинг в тоннелях как инструмент прогнозирования // *Underground Expert*. 2023. URL: <https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/dolgosrochnyj-geotekhnicheskim-monitoring> (дата обращения: 06.05.2026).
3. **Емельянов М.В.** Особенности разработки перспективных систем мониторинга несущих конструкций зданий и сооружений // *Строительная наука и образование*. 2024. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrabotki-perspektivnyh-sistem-monitoringa-nesuschiikh-konstruktsiy-zdaniy-i-sooruzheniy> (дата обращения: 06.05.2026).
4. **Jiang Y. Zhutian Pan, Xuepeng Zhang.** Tunnel infrastructure health management: A state-of-the-art review on defect development mechanism and robot-aided inspection system // *Smart Underground Engineering*. 2025. Vol. 1. Iss. 1. P. 26-39. DOI: 10.1016/j.sue.2025.05.003.
5. **Apoji D., Soga K., Sheil B.B.** Shaping the future of tunneling with data and emerging technologies // *Data-Centric Engineering*. 2023. Vol. 4. P. e29. DOI: 10.1017/dce.2023.24.
6. **Zhang X., Zhu H., Jiang X., Broere W.** Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review // *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2024. Vol. 16. No. 9. P. 3841-3863. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.01.008.
7. **Monsberger C.M., Bauer P., Buchmayer F., Lienhart W.** Large-scale distributed fiber optic sensing network for short and long-term integrity monitoring of tunnel linings // *Journal of Civil Structural Health Monitoring*. 2022. Vol. 12. No. 6. P. 1317-1327. DOI: 10.1007/s13349-022-00560-w.
8. **Buchmayer F., Bergmeister K.** Überwachung und Monitoring als lebenszyklus-begleitende Instrumente bei Infrastrukturtunneln // *Beton- und Stahlbetonbau*. 2021. Bd. 116. H. S2. S. 58-67. DOI: 10.1002/best.202100055.
9. **Cheng G., Wang Z., Li G., Shi B., Wu J., Cao D., Nie Y.** Advanced research and engineering application of tunnel structural health monitoring leveraging spatiotemporally continuous fiber optic sensing information // *Photonics*. 2025. Vol. 12 (9). P. 855. DOI: 10.3390/photonics12090855.
10. **Пастушков В.Г., Вайтович А.Н., Костюкович О.В., Янковский Л.В.** Практика применения автоматизированной системы мониторинга технического состояния транспортных объектов // *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2021. № 4. С. 77-90. DOI: 10.15593/24111678/2021.04.09.
11. **Chen W., Tan X.-Y., Yang J.** Review of state-of-the-art in structural health monitoring of tunnel engineering // *Smart Underground Engineering*. 2025. No. 1 (1). P. 40-50. DOI: 10.1016/j.sue.2025.05.004.
12. **Liu Y., Li J.** Full-section deformation monitoring of high altitude fault tunnels using 3D laser scanner // *Advances in Civil Engineering*. 2022. Art. 4967037. DOI: 10.1155/2022/4967037.
13. **DZSF.** Forschungsbericht 64/2024: Sensorbasierte Technologien im Bahnsystem: Markt- und Technologieanalyse. Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung, 2024. URL: <https://www.dzsf.bund.de> (дата обращения: 06.05.2026).
14. **Колотовичев Ю.А., Шахрамьян А.М.** Автоматизированный мониторинг деформации несущих конструкций «Екатеринбург Арены» // *Вестник МГСУ*. 2022. DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330.
15. **ASTRA 84012.** Überwachung des baulichen Zustands von Kunstbauten – Tunnel. Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern, 2023–2025. URL: <https://www.astra.admin.ch> (дата обращения: 06.05.2026).



16. **Huang H., Zhang D., Wang C., Tang A.** A review of defects in urban metro tunnels // *Underground Space*. 2021. No. 6 (3). P. 243-264. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.01.004.
17. **Перминов Н.А.** Моделирование и мониторинг конструктивной безопасности уникальных подземных объектов крупного города в сложных грунтовых условиях // *Construction and Geotechnics*. 2021. DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.03.
18. **Sun Z., Jayasinghe S., Sidiq A., Shahrivar F., Mahmoodian M.** Approach towards the development of digital twin for structural health monitoring of civil infrastructure: A comprehensive review // *Sensors*. 2024. Vol. 25. No. 1. P. 59. DOI: 10.3390/s25010059.
19. **Afrazi M., Armaghani D.J., Afrazi H., Fattahi H., Samui P.** Real-time monitoring of tunnel structures using digital twin and artificial intelligence: A short overview // *Deep Underground Science and Engineering*. 2025. Vol. 5 (2). P. 315-330. DOI: 10.1002/dug2.70029.
20. **Li J., Liu C., Zhang Y., Gu X.** Structural health monitoring of subway tunnel based on fiber Bragg grating sensors and video displacement meters // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2024. Vol. 38. No. 5. DOI: 10.1061/JCCEE5.CPENG-7644.
21. **Machado L.B., Santos R., Vega Ruiz D., Bittencourt T.** Advancements of digital twin technology for bridges and tunnels: A systematic literature review // *Journal of Infrastructure Systems*. 2025. No. 31 (4). DOI: 10.1061/JITSE4.ISENG-2745.
22. **Sheil B.B., Suryasentana S.K., Mooney M.A., Zhu H.** Machine learning to inform tunneling operations: recent advances and future trends // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*. 2022. No. 175 (5). P. 412-428. DOI: 10.1680/jgeen.20.00011.
23. **Que H., Gao H., Shan W., Yang X., Zhao R.** Deformation measurement of tunnel cross-section by mobile laser scanning system // *Sensors*. 2024. Vol. 24. No. 22. P. 7297. DOI: 10.3390/s24227297.
24. **Kuang G., Li B., Mo S., Hu X., Li L.** Review on machine learning-based defect detection on shield tunnel lining // *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2022. Vol. 66. No. 3. P. 943-957. DOI: 10.3311/PPci.19859.
25. **Ma L., Lin F., Du Y., Ren S., Long N.** Tunnel surrounding rock deformation prediction via WOA-LSTM model // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14. Art. 29170. DOI: 10.1038/s41598-024-79059-x.
26. **Zhang X., Minghao W., Feng Dan, Jingchun W.** Risk classification and early warning of large deformation of soft rock in tunnels based on CNN-LSTM model // *Scientific Reports*. 2024. Vol. 14 (1). Art. 29944. DOI: 10.1038/s41598-024-81816-x.
27. **Zhou S., Peng H., Zheng H., He X.** A deep learning method fusing multiscale temporal features for metro tunnel deformation advanced prediction // *Journal of Computing in Civil Engineering*. 2026. Vol. 40. No. 5. DOI: 10.1061/JCCEE5.CPENG-7244.
28. **Yang Z., Cheng Z., Wu D.** Deep learning driven prediction and comparative study of surrounding rock deformation in high speed railway tunnels // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 24104. DOI: 10.1038/s41598-025-09791-5.
29. **Кочетков А.В., Семенова Н.С., Иванов А.Ф., Чижииков И.А.** Применение беспилотных летательных аппаратов для исследования объектов транспортной инфраструктуры // *Умные композиты в строительстве*. 2022. Т. 3. Вып. 4. С. 28-38. DOI 10.52957/27821919_2022_4_28.
30. **Богуславский Л.А., Проваторова Г.В.** Применение искусственного интеллекта в проектировании автомобильных дорог // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6. Вып. 4. С. 67-79. DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-67-79.

Поступила в редакцию 05.06.2026

Одобрена после рецензирования 03.07.2026

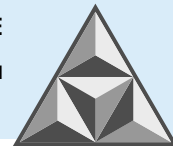
Принята к опубликованию 25.08.2026

REFERENCES

1. **Volokhov, E.M., Novozhenin, S.Iu. and Bac, Nguen Suan** (2012), Modern displacement and deformation control systems in underground construction, *Journal of Mining Institute*, vol. 199, pp. 253-259. Available at: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view/5854> (accessed 06.05.2026) (in Russian).



2. **Lebedev, M.O., Bezrodnii, K.P. and Shliaev, S.A.** (2023), Long-term geotechnical monitoring in tunnels as a forecasting tool, *Underground Expert*. Available at: <https://undergroundexpert.info/issledovaniya-i-tehnologii/dolgosrochnyj-geotekhnicheskim-monitoring> (accessed 06.05.2026) (in Russian).
3. **Emelianov, M.V.** (2024), Features of developing advanced monitoring systems for load-bearing structures of buildings and structures, *Construction Science and Education*. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-razrabotki-perspektivnyh-sistem-monitoringa-nesuschih-konstruktsiy-zdaniy-i-sooruzheniy> (accessed 06.05.2026) (in Russian).
4. **Jiang, Y., Zhutian, Pan and Xuepeng, Zhang** (2025), Tunnel infrastructure health management: A state-of-the-art review on defect development mechanism and robot-aided inspection system, *Smart Underground Engineering*, vol. 1, iss. 1, pp. 26-39. DOI: 10.1016/j.sue.2025.05.003.
5. **Apoji, D., Soga, K. and Sheil, B.B.** (2023), Shaping the future of tunneling with data and emerging technologies, *Data-Centric Engineering*, vol. 4, p. e29. DOI: 10.1017/dce.2023.24.
6. **Zhang, X., Zhu, H., Jiang, X. and Broere, W.** (2024), Distributed fiber optic sensors for tunnel monitoring: A state-of-the-art review, *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, vol. 16, no. 9, pp. 3841-3863. DOI: 10.1016/j.jrmge.2024.01.008.
7. **Monsberger, C.M., Bauer, P., Buchmayer, F. and Lienhart, W.** (2022), Large-scale distributed fiber optic sensing network for short and long-term integrity monitoring of tunnel linings, *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, vol. 12, no. 6, pp. 1317-1327. DOI: 10.1007/s13349-022-00560-w.
8. **Buchmayer, F. and Bergmeister, K.** (2021), Überwachung und Monitoring als lebenszyklus-begleitende Instrumente bei Infrastrukturtunneln, *Beton- und Stahlbetonbau*, vol. 116 (S2), pp. 58-67. DOI: 10.1002/best.202100055.
9. **Cheng, G., Wang, Z., Li, G., Shi, B., Wu, J., Cao, D. and Nie, Y.** (2025), Advanced research and engineering application of tunnel structural health monitoring leveraging spatiotemporally continuous fiber optic sensing information, *Photonics*, vol. 12 (9), p. 855. DOI: 10.3390/photonics12090855.
10. **Pastushkov, V.G., Vaitovich, A.N., Kostiukovich, O.V. and Iankovskii, L.V.** (2021), Application practice of automated structural monitoring system for transport facilities, *Transport. Transport Structures. Ecology*, no. 4, pp. 77-90 (in Russian). DOI: 10.15593/24111678/2021.04.09.
11. **Chen, W., Tan, X.-Y. and Yang, J.** (2025), Review of state-of-the-art in structural health monitoring of tunnel engineering, *Smart Underground Engineering*, no.1 (1), pp. 40-50. DOI: 10.1016/j.sue.2025.05.004.
12. **Liu, Y. and Li, J.** (2022), Full-section deformation monitoring of high altitude fault tunnels using 3D laser scanner, *Advances in Civil Engineering*, Art. 4967037. DOI: 10.1155/2022/4967037.
13. DZSF. (2024) Forschungsbericht 64/2024: Sensorbasierte Technologien im Bahnsystem: Markt- und Technologieanalyse. Deutsches Zentrum für Schienenverkehrsforschung. Available at: <https://www.dzsf.bund.de> (accessed 06.05.2026).
14. **Kolotovichev, Iu.A. and Shakhramanian, A.M.** (2022), Automated deformation monitoring of load-bearing structures of the Ekaterinburg Arena, *Vestnik MGSU* (in Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2022.3.314-330.
15. ASTRA 84012. (2023–2025) Überwachung des baulichen Zustands von Kunstbauten — Tunnel. Bundesamt für Strassen (ASTRA), Bern. Available at: <https://www.astra.admin.ch> (accessed 06.05.2026).
16. **Huang, H., Zhang, D., Wang, C. and Tang, A.** (2021), A review of defects in urban metro tunnels, *Underground Space*, no. 6 (3), pp. 243-264. DOI: 10.1016/j.undsp.2020.01.004.
17. **Perminov, N.A.** (2021), Modeling and monitoring of structural safety of unique underground facilities of large city drainage systems in complex soil conditions, *Construction and Geotechnics*. (in Russian). DOI: 10.15593/2224-9826/2021.1.03
18. **Sun, Z., Jayasinghe, S., Sidiq, A., Shahrivar, F. and Mahmoodian, M.** (2024), Approach towards the development of digital twin for structural health monitoring of civil infrastructure: A comprehensive review, *Sensors*, vol. 25, no. 1, p. 59. DOI: 10.3390/s25010059.
19. **Afrazi, M., Armaghani, D.J., Afrazi, H., Fattahi, H. and Samui, P.** (2025), Real-time monitoring of tunnel structures using digital twin and artificial intelligence: A short overview, *Deep Underground Science and Engineering*, vol. 5 (2), pp. 315-330. DOI: 10.1002/dug2.70029.

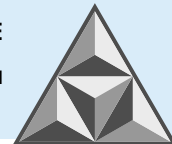


20. **Li, J., Liu, C., Zhang, Y. and Gu, X.** (2024), Structural health monitoring of subway tunnel based on fiber Bragg grating sensors and video displacement meters, *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 38, no. 5. DOI: 10.1061/JCCEE5.CPENG-7644.
21. **Machado, L.B., Santos, R., Vega Ruiz, D. and Bittencourt, T.** (2025), Advancements of digital twin technology for bridges and tunnels: A systematic literature review, *Journal of Infrastructure Systems*, no. 31 (4). DOI: 10.1061/JITSE4.ISENG-2745.
22. **Sheil, B.B., Suryasentana, S.K., Mooney, M.A. and Zhu, H.** (2022), Machine learning to inform tunnelling operations: recent advances and future trends, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Geotechnical Engineering*, no. 175 (5), pp. 412-428. DOI: 10.1680/jgeen.20.00011.
23. **Que, H., Gao, H., Shan, W., Yang, X. and Zhao, R.** (2024), Deformation measurement of tunnel cross-section by mobile laser scanning system, *Sensors*, vol. 24, no. 22, p. 7297. DOI: 10.3390/s24227297.
24. **Kuang, G., Li, B., Mo, S., Hu, X. and Li, L.** (2022), Review on machine learning-based defect detection on shield tunnel lining, *Periodica Polytechnica Civil Engineering*, vol. 66, no. 3, pp. 943-957. DOI: 10.3311/PPci.19859.
25. **Ma, L., Lin, F., Du, Y., Ren, S. and Long, N.** (2024), Tunnel surrounding rock deformation prediction via WOA-LSTM model, *Scientific Reports*, vol. 14, Art. 29170. DOI: 10.1038/s41598-024-79059-x.
26. **Zhang, X., Minghao, W., Feng, Dan and Jingchun, W.** (2024), Risk classification and early warning of large deformation of soft rock in tunnels based on CNN-LSTM model, *Scientific Reports*, vol. 14 (1), Art. 29944. DOI: 10.1038/s41598-024-81816-x.
27. **Zhou, S., Peng, H., Zheng, H. and He, X.** (2026), A deep learning method fusing multiscale temporal features for metro tunnel deformation advanced prediction, *Journal of Computing in Civil Engineering*, vol. 40, no. 5. DOI: 10.1061/JCCEE5.CPENG-7244.
28. **Yang, Z., Cheng, Z. and Wu, D.** (2025), Deep learning driven prediction and comparative study of surrounding rock deformation in high speed railway tunnels, *Scientific Reports*, 15, Art. 24104. DOI: 10.1038/s41598-025-09791-5.
29. **Kochetkov, A.V., Semenova, N.S., Ivanov, A.F. and Chizhikov, I.A.** (2022), Unmanned Aerial Vehicles Use for the Inspection of Transport Infrastructure Facilities, *Smart Composite in Construction*, vol. 3, iss. 4, pp. 28-38. Available at: http://comincon.ru/index.php/tor/issue/view/V3N4_2022 (in Russian). DOI: 10.52957/27821919_2022_4_28.
30. **Boguslavskii, L.A. and Provatorova, G.V.** (2025), The use of artificial intelligence within the design of automobile roads, *Smart Composite in Construction*, vol. 6, iss. 4, pp. 67-79 (in Russian). DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-67-79.

Received 05.06.2026

Approved 03.07.2026

Accepted 25.08.2026



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 721.012

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-64-78

Сверхтонкие небоскребы: российский вклад в новую типологию

С.В. Расторгуев

Семен Васильевич Расторгуев

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

rastorguevsv@ystu.ru



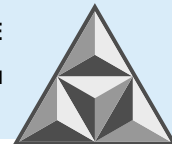
Прогнозы развития архитектуры будущего практически оставили без внимания одну из типологий жилой архитектуры, которая появилась в 2010-х годах и имеет к настоящему времени небольшое представительство. Рассматриваются сверхтонкие жилые небоскребы и реализованные проекты, олицетворяющие его принципы. Такие проекты немногочисленны, но уже стали медийным явлением в архитектурной прессе. Интерес к ним вызван тем, что подобные здания создаются на пределе строительных возможностей. Примечательно, что российским архитекторам удалось внести свой вклад в это новое, хотя и достаточно узкое архитектурное направление, и способствовать его развитию. Изучается проект здания 262 на 5 авеню в Нью-Йорке, получивший неофициальное название «Первый русский небоскреб» на Манхэттене, реализация которого завершается в этом году. Заявленная типология значительно усовершенствовалась за небольшой период своего существования и быстро развивается. Ожидается, что современные строительные технологии, в частности 3D-печать, будут способствовать удешевлению возведения таких зданий и расширению их формообразования.

Ключевые слова: сверхтонкие жилые небоскребы, парадигма в архитектуре, конструктивное ядро, стальной «экзоскелет», жидкостной демпфер, 3D-печать

Для цитирования:

Расторгуев С.В. Сверхтонкие небоскребы: российский вклад в новую типологию // Умные композиты в строительстве. 2026. Т. 7, вып. 3. С. 64-78.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-64-78



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-64-78

Ultra-thin skyscrapers: Russian contribution to the new typology

S.V. Rastorguev

Semen Vasilevich Rastorguev

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

rastorguevsv@ystu.ru



The forecasts for the development of future architecture have practically ignored one of the typologies of residential architecture that emerged in the 2010s and currently has a small number of representatives. In this regard, ultra-slender residential skyscrapers and the main completed projects embodying their principles are examined. Such projects are few in number, but have already become a media phenomenon in the architectural press. The interest in them is largely due to the fact that such buildings are created at the limit of construction capabilities. It is noteworthy that Russian architects have managed to contribute to this new, albeit rather narrow, architectural direction and to promote its development. The project of the building at 262 Fifth Avenue in New York, which has received the unofficial name “the first Russian skyscraper” on Manhattan, and whose completion is due this year, is studied. The declared typology has significantly improved over the short period of its existence and is developing rapidly. It is expected that modern construction technologies, in particular 3D printing, will contribute to reducing the cost of construction of such buildings and expanding their shaping possibilities.

Keywords: ultra-thin residential skyscrapers, paradigm in architecture, structural core, steel exoskeleton, liquid damper, 3D printing

For citation:

Rastorguev S.V. Ultra-thin skyscrapers: Russian contribution to the new typology // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 3. P. 64-78. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-64-78



ВВЕДЕНИЕ

Для профессиональной среды большой интерес представляет будущее архитектуры в обозримой перспективе как в технологическом, так и типологическом аспектах. При этом число известных и влиятельных научных исследований по данной тематике к настоящему времени является ограниченным.

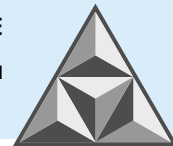
Приведем в пример статью Чарльза Дженкса «Новая парадигма в архитектуре» [1]. В этом критическом исследовании с высокой точностью предсказаны почти все архитектурные тенденции 20-30 лет, последующих за публикацией. Воплощение описанных направлений удобно исследовать с современных позиций, поскольку описанный автором период близок к завершению. Среди направлений, обозначенных в указанной работе, указаны в том числе *органитек* и *вовлечение фрактальной геометрии в архитектурное формообразование* [2]. Как достаточно локальные, но существующие в практике направления выделены *ланд-формизм* – переосмысление форм земного ландшафта в архитектуре и *привлечение геометрии «странного аттрактора»*, где иные природные и погодные явления выступают генераторами форм [3].

Создание киберпространств, проектирование на основе больших массивов данных и разработка гибридных воплощений с обратной связью так или иначе воплотились в направлении иммерсивной архитектуры [4]. С позиции эстетики обозначено появление зданий-достопримечательностей и привлечение «загадочного означающего» при генерации образа – применение активной, но неявной символики в проектировании [5]. Почти все предсказания сбылись, хотя отдельные направления так и выглядят «узкими ручейками» среди актуальных архитектурных тенденций.

За этот период в архитектуре возникло, вероятно, немало технологических новинок, однако не все они заметны и требуют глубокой идентификации. Тем не менее, типологические и формотворческие инновации видны сразу, достаточно только взглянуть на проекты или реализации построек. При анализе становится очевидно, что не заявленных в статье Дженкса инноваций совсем немного; это связано с тем, что архитектура стала более активно развиваться по вертикали.

Если рассматривать классическую Витрувианскую формулу архитектуры: «Полезность, прочность, красота» [6], отметим, что она активно работала с момента возникновения до середины XX столетия (целых 1966 лет), когда *Ле Корбюзье* выявил еще и фактор климата применительно к модернистской архитектуре (при проектировании Чандигарха) [7]. Вероятно, этот фактор архитекторы замечали и ранее, просто именно *Корбюзье* заявил о нем на методологическом уровне. Ближе к концу XX столетия было введено также понятие «плотность». В частности, этому были посвящены научные исследования [8], а также визуальные эксперименты *Майкла Вольфа* [9], который большую часть своей карьеры посвятил изучению данного понятия. С рациональной точки зрения, строить деревянную избу посреди делового центра мегаполиса столь же неуместно, что и 60-этажный небоскреб, например, в Суздале, где на 15 км² размещены 35 храмов и 5 монастырей.

Ретроспективно также можно вспомнить примеры средневековых жилых башен итальянских городов Болоньи, Павии и Милана [10], которые в тот период являлись переуплотненными населенными пунктами, если проводить сравнение с застройкой тех времен.



Обратим внимание на одну из самых заметных типологий, которая возникла под воздействием переуплотнения и, как следствие, вертикализации градостроительной среды в наше время. Рассмотрим сверхтонкие жилые небоскребы, с учетом того факта, что разработки, выполненные в России, совсем недавно были применены при реализации одного из таких объектов.

Явление модернистских жилых небоскребов стартовало в Чикаго в 1950 г. со зданий 860-880 *Лэйк Шор Драйв* архитектора Людвиг Миса ван дер Роэ [11]. Однако они были почти неотличимы от офисных зданий и за это неоднократно критиковались. Тем не менее, жилых зданий – последователей данного направления с тех пор появилось немало.

Новая итерация направления уже в сверхтонких жилых небоскребах, как видится, технологически и формообразовательно приводит к большей индивидуальности облика и индивидуализации образа жизни их обитателей, делая ее в некоторой степени похожей на жизнь в частном доме.

Сегодня трудно предположить, станут ли сверхтонкие жилые небоскребы распространенным явлением или это тактический ход, который можно рассматривать как новшество в архитектуре, отклоняющееся от предсказаний «новой парадигмы». Сейчас это локальное модернистское явление, проявившееся при сочетании редких факторов – чрезвычайно высокой плотности застройки и «давления капиталов на архитектуру» и практикующееся в основном на Манхэттене. Практически единственный реализованный на данный момент аналог за пределами Нью-Йорка – небоскреб *Хайклифф* [12] находится в Гонконге, городе со схожими условиями жизни.

Также ответвлением подобного явления можно считать современные вставки между зданиями исторической застройки, именуемые иногда зданиями-паразитами, например, *Дом Этгара Керета* в Варшаве [13] или дом *Lucky Drops* в Токио.

Сверхтонкие небоскребы Нью-Йорка, также называемые *Pencil towers*, *Skinny skyscrapers* или *Super-slender towers* – одна из самых характерных и спорных черт городского силуэта Манхэттена последних 10-15 лет. Большинство из них концентрируется вдоль так называемой «Улицы миллиардеров» (*Billionaires' Row*) – дороги вдоль южной стороны Центрального парка, включающей 57-59-ю улицы.

Эти здания отличаются экстремальным соотношением ширины к высоте, варьируемой в диапазоне от 1:10 до 1:24, с преимущественно жилой функцией. Их целевая аудитория – сверхбогатые покупатели. Это обстоятельство влияет на архитектуру, задача которой уместить квартиры повышенной площади, занимающие от одного до трех этажей на крайне скудных и предельно дорогих участках земли, где тем или иным образом допускается осуществить строительство. Главной ценностью данного типа недвижимости, помимо ее площади, являются виды на клены и вязы Центрального парка с одной стороны и «городские джунгли» Манхэттена со стороны противоположной. Чтобы максимально использовать разрешенный объем застройки (*FAR*) [14], девелоперы вытягивают башни ввысь, делая их при этом невероятно узкими.

ПРИМЕРЫ ТИПОЛОГИИ

Рассмотрим некоторые примеры сверхтонких небоскребов (см. рис. 1), располагая их в порядке снижения знаменателя в отношении ширины к высоте.

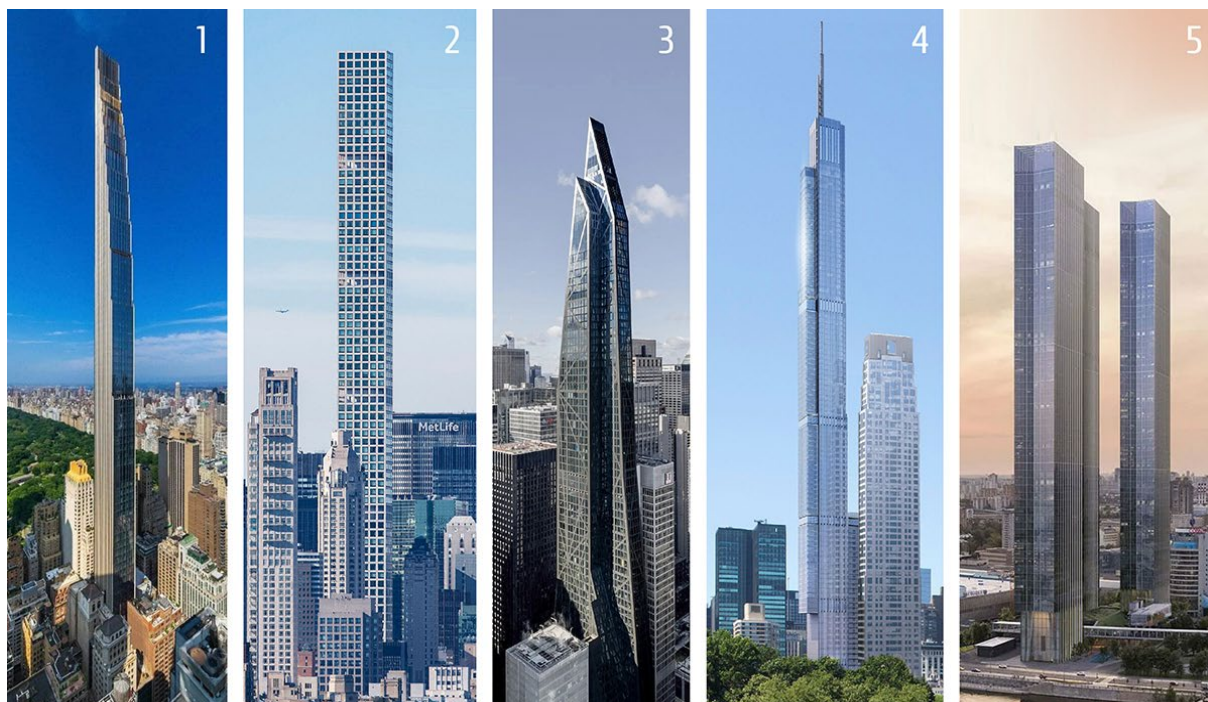
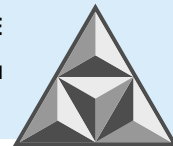


Рис. 1. Рассмотренные примеры типологии: 1 – Башня Steinway; 2 – 432 Парк Авеню;
3 – 53W53; 4 – Central Park Tower; 5 – 3 башни Кэпитал Тауэрс

Fig. 1. Examples of the typology: 1 - Steinway Tower; 2 - 432 Park Avenue;
3 - 53W53; 4 - Central Park Tower; 5 - 3 Capital Towers

Башня Steinway (111 West 57th Street). Высота здания составляет 435 м; считается самым тонким мировым небоскребом благодаря соотношению ширины к высоте, равной 1:24. Башня сужается; стена, обращенная к Центральному парку панорамными окнами, достигает максимальной высотной отметки, а ширина ее лишь немного превышает 18.0 м. Архитектор проекта – *SHoP Architects*; строительство было завершено в 2022 г. [15]. Стилистически башня стремится отразить диалог между прошлым и будущим; в оформлении фасадов, перпендикулярных панорамной стене, использованы керамические и бронзовые элементы, интерпретирующие *ар-деко* в современном ключе. Кроме того, в проекте был реконструирован исторический *Steinway Hall* (1925), фасады которого сохранены, а внутренняя часть стала основанием небоскреба. Каркас здания – железобетонный, с использованием бетона класса В80 (М1000). Лифты и инженерные коммуникации размещены в железобетонном ядре, толщина стен которого в некоторых местах превышает 1.0 м. Колонны, примыкающие к внешним стенам, связаны с ядром системой мегаферм-аутригеров, что обеспечивает жесткость конструкции. Колебаниям здания, вызванным, в первую очередь, ветровым воздействием, на одном из верхних этажей противостоит жидкостный демпфер, состоящий из двух маятников и двух резервуаров с водой. Они принудительно раскачиваются в противофазе колебаниям. Фундамент здания спроектирован так, что буровые сваи уходят в коренную породу острова Манхэттен.

432 Парк Авеню. На момент постройки в 2015 г. – самое высокое жилое здание в мире с высотой 425.5 м. Проектировщик: *бюро Рафаэля Виньоли*. Геометрически представляет собой параллелепипед с сечением в плане 28.4×28.4 м. Семь жилых модулей, каждый из которых содержит 12 этажей, сменяются двухэтажными техническими вставками. Фасад – равномерная ортогональная железобетонная сетка; технические этажи – круглые в плане и отступают внутрь от фасадной плоскости. Этот 96-этажный небоскреб имеет пропорцию ширины к



высоте 1:15. Конструктивно основные нагрузки, возникающие в здании, несет центральное ядро с толщиной стен до 1.5 м, содержащее все коммуникации и лифты. Двадцать четыре внешние колонны, формирующие фасад, связаны с ядром 30-сантиметровыми перекрытиями для обеспечения общей жесткости конструкции. Для борьбы с ветровыми нагрузками применяются два жидкостных демпфера весом по 800 т каждый, расположенные на верхних технических этажах. Фундамент здания представлен плитой, характеризующейся толщиной 4.5 м, со сваями, углубленными в скальное основание Манхэттена. Строительство происходило с помощью самоподъемной опалубки, что позволяло возводить один этаж за неделю.

53W53, или «Музейный дом». Проект известен тем, что связан с музеем современного искусства *MoMA*. Здание имеет сложную, почти скульптурную композицию, в отличие от весьма лаконичных форм. Проектированием занималось французское бюро *Жана Нувеля*. Высота здания составляет 320 м; формы планов каждого этажа различаются, при этом они вписываются в вытянутые прямоугольники. Соотношение ширины к высоте по короткой стороне плана варьируется в диапазоне 1:12–1:16. Несущая структура визуальнo обыгрывает скульптурную форму здания и вынесена на наружные фасады, добавляя сложности и необычности этой башне. Она получила название «каркас-экзоскелет» и представляет собой внешне неупорядоченную диагональную сетку стальных балок, покрытую бронзой [16]. Пространства между элементами сетки застеклены. Вместе с железобетонным ядром этот стальной «экзоскелет» образует гибридную несущую структуру, в которой внешняя составляющая распределяет ветровые нагрузки по весу здания, уменьшая давление на ядро, и работает как единая жесткая система. Также форма здания сужается в средней части по вертикали, улучшая аэродинамику. Как и в предыдущих примерах, здание имеет демпфер (600 т) для борьбы с колебаниями. Хотя связь этого жилого здания с музеем *MoMA* осуществляется только через подземные уровни, внешне в городскую среду транслируется подход современного искусства к созданию композиции.

Central Park Tower. Самый высокий из сверхтонких небоскребов, который по проекту должен был достичь по высоте 541.0 м, однако при согласовании утратил шпиль и остановился на отметке +472.4 м. На данный момент – самое высокое жилое здание в мире. При этом пропорция ширины к высоте 1:10 не столь велика (находится на грани попадания в рейтинг). Проект разработан студией *Адриана Смита и Гордона Гилла*, которые ранее построили 828-метровый мультифункциональный небоскреб *Бурдж-Халифа* в Дубае. В отличие от ранее перечисленных строений, этот небоскреб занимает в основании целый квартал, так что указанная выше пропорция образуется с 12-го этажа. Композиционно сверхтонкий небоскреб делится на несколько частей: основание – квартал, узкая часть до 25-го этажа, далее здание расширяется, а затем постепенно сужается по высоте за счет небольших уступов. В верхней части находится «корона», фасад которой разделен вертикальными прорезями. Конструкция схожа с перечисленными ранее: основную нагрузку несет ядро со стенами толщиной до 1.8 м из железобетона прочностью 14000 psi (аналог M1000); внешние колонны расположены по периметру; фасад выполнен из стекла. Колебания гасит жидкостный демпфер *TLD* массой 800 т. Фундаментная плита имеет толщину 4.5 м, а ниже на глубину до 50.0 м в грунт уходят буровые сваи.

Ближайший аналог в России — *Кэпитал Тауэрс*. В нашей стране имеется схожий по плотности комплекс зданий – *Москва-сити*, однако он не имеет таких параметров.



Неподалеку находятся три жилых небоскреба *Кэпитал Тауэрс* [17]. Они, хотя не удовлетворяют всем принципам супертонких небоскребов, тем не менее близки к ним по пропорциям.

Башни комплекса различаются по размерам в плане. По высоте они достигают 262.8 – 295.0 м. Среднюю пропорцию ширины к высоте можно определить в диапазоне от 1:8 до 1:12. Таким образом, они приближаются к пропорциям сверхтонких небоскребов. Башни спроектированы архитектурным бюро С. Скуратова, строительство их было завершено в 2023 г. Башни также имеют железобетонное ядро и каркас из аналогичного материала. Фасады выполнены из стекла. Существенной составляющей высокой стоимости квартир, помимо расположения, считаются панорамные виды на городской ландшафт Москвы.

ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДИКА

Перечислим некоторые принципы или общие элементы сверхтонких небоскребов на основе рассмотренных нами примеров:

- *Высота более 300 м, соотношение пропорций* (размеры этажа в плане к высоте здания) *от 1:10 до 1:24*;

- *Одна квартира на этаж*. Это правило не выполнялось в более ранних проектах, однако видна тенденция к его применению в данной типологии. Также присутствует стремление довести жилую ячейку до варианта «один пространственный куб на этаж». Куб может иметь высоту до 6-7 м и выступить аналогом некоего «особняка, поставленного на полку»;

- *Прочностное и коммуникационное железобетонное ядро*, расположение которого в плане основано на стремлении минимально затронуть жилую планировку. В идеале (как и в рассматриваемом примере) ядро полностью выносится из жилого объема;

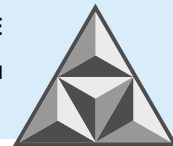
- *Максимизация значения видов на городской ландшафт*. По этой причине высотность здания по возможности увеличивается, а стены делаются преимущественно стеклянными, насколько это позволяют современные строительные технологии;

- *Социальный аспект: жизнь как аттракцион*, не тихое пристанище, а жилая среда, ставшая квинтэссенцией современного ритма жизни, высоко ставящая в ценностном диапазоне собственные презентационные способности («жизнь напоказ»);

- *Смешение функций и их вертикальная разбивка*: жилье может быть максимально приближено к месту работы. Интересно отметить, что такая концепция рассматривалась ранее Ф.Л. Райтом в башне *Прайс* и нереализованном проекте «Иллинойс» (по своим пропорциям попадает в категорию сверхтонких небоскребов) [18];

- *Композиционный аспект, а именно идеи модернистской архитектуры применительно к предельной социальной поляризации*: четкая ортогональность или даже кристалличность объемов. Однако в небоскребе *Steinway* сделана попытка обновить грамматику *Ар-Деко* применительно к ранее не доступной пропорции ширины к высоте;

- *Экономический аспект и узость зоны применения*. Пока что здания, полностью удовлетворяющие перечисленным принципам, можно встретить только на территории острова Манхэттен. Они чрезвычайно дороги в пересчете на квадратный метр площади, однако, предположительно, ареал их распространения расширится. Можно рассмотреть различные концепции гарантированного дохода (создание отелей); с другой стороны, явление концентрации капиталов в крупных мегаполисах все еще не завершено. Также имеет смысл отметить схожую, но имеющую ограничения по высоте, концепцию «точечных встроек», которую в определенных интерпретациях можно наблюдать в исторических центрах городов.



РОССИЙСКИЙ ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ, ИЛИ РУССКИЙ СЛЕД НА ЗЕМЛЕ МАНХЭТТЕНА

Можно было бы сказать, что описываемая типология зданий на 90% присуща именно Манхэттену и назвать его локальным явлением в архитектуре, не релевантным тематическому исследованию в средней полосе России.

Однако авторство одного из подобных небоскребов имеет свои корни именно в нашей стране. Проект *небоскреба 262 по Пятой авеню* выполнило архитектурное бюро «Меганом» на стадии «П» в проектной документации. Адаптацию проекта к местным нормам и условиям Нью-Йорка осуществляла компания *SLCE Architects*, а непосредственно проектированием интерьеров занималось бюро *Norm Architects* [19].

Автор принимал непосредственное участие в проектировании данного небоскреба, потому в настоящей работе представлено описание с реальным вовлечением в процесс. Однако проект был заморожен почти на десятилетие, строительство его началось только в прошлом году.

Концепция здания черпает вдохновение из авиации, а также включает в себе некоторые отсылки к Русскому авангарду, представляя отдельные этажи или многоэтажные жилые ячейки как парящие в воздухе «полки» или «супрематические кубы». Здесь уместно вспомнить «Летающий город» Г. Крутикова конца 1920-х [20] и упомянуть более поздние «бумажные» проекты 1980-х годов А. Бродского, И. Уткина и С. Бархина [21].

Первоначально проект предполагал высоту здания 308 м и 60 этажей, однако в процессе согласования и корректировок высота сократилась до 260 м и 52 этажей. При этом в небоскребе размещается всего 26 квартир, а некоторые из них занимают несколько этажей. Общая площадь составляет около 13 тыс. м². Размеры жилой части в плане – 14.0 × 16.0 м, максимальный горизонтальный размер вместе с ядром – 22.8 м. Пропорция ширины к высоте составляет от 1:11 до 1:19, что позволяет уверенно отнести здание к категории сверхтонких небоскребов (рис. 2).



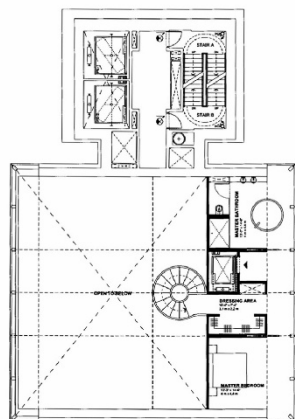
Рис. 2. Визуализация (слева) и фото строительства здания 262 на 5 авеню летом 2025 г.

Fig. 2. Visualization (left) and construction photo of the building at 262 Fifth Avenue, summer 2025



Одна квартира на этаже – результат эволюционного развития концепции сверхтонких небоскребов. Для Манхэттена эта ситуация не уникальная, схожую схему планировки имеет башня *Steinway*. Инновацией в данном случае является то, что здесь впервые найден способ вынести несущее и коммуникационное ядро за пределы квартиры (рис. 3). При этом планировка квартир становится полностью трансформируемой или свободной.

262 5th AVENUE
DUPLEX / mezzanine
45th Floor
833 sq.f
77 sq.m



DUPLEX
45th Floor
3307 sq.f
307 sq.m

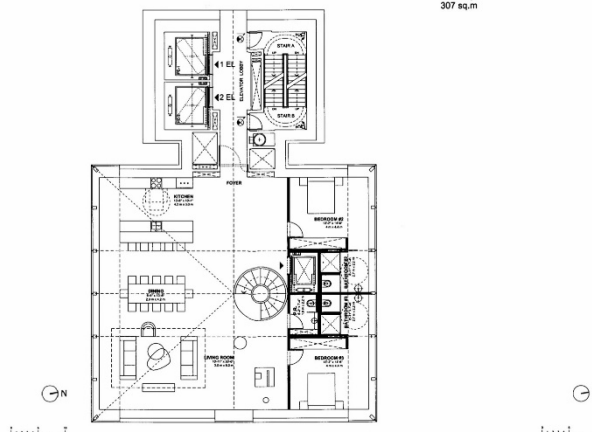


Рис. 3. Планировки квартиры с двусветным пространством на 45-46 этажах здания 262 на 5 авеню

Fig. 3. Floor plans of an apartment with a double-height space on the 45th - 46th floors of the building at 262 Fifth Avenue

При оценке композиции здания имеет смысл обратить внимание на специфику строительства на Манхэттене. «Воздушные права» (право застройщика владеть и распоряжаться пространством над земельным участком) влияют на высотность строительства. Для небоскребов Манхэттена не существует общего высотного ограничения; имеются первоначально заданные параметры участка, которые можно улучшать различными способами. Преимущество дается застройщику за то, что он использует для строительства только часть участка или застраивает лишь один участок из тех, которыми владеет. Это призвано поддерживать должный уровень инсоляции. Ранее на Манхэттене существовало правило, которое приводило к постройке пирамидальных зданий с уступами; указанный принцип, по сути – его модификация.

Строительство социальной инфраструктуры также потенциально благоприятствует приросту этажности. Кроме того, доступна покупка некоторой части «воздушных прав». Дополнительная потенциальная площадь обеспечивается проекту при согласовании с местной администрацией за выполнение специальных условий (повышенная энергоэффективность объекта, снижение теплопотерь, использование трехкамерных стеклопакетов и т.п.). Часть несущего ядра небоскреба 262 по 5 авеню облицована солнечными батареями для генерации электроэнергии, что позволило дополнительно получить для проектируемого здания 20% к общей площади.

Конструктивно же данный небоскреб во многом схож с предыдущими. Железобетонное ядро является главной несущей конструкцией здания. Оно отнесено вглубь квартала от 5 авеню. Кроме него, несущими являются две стены, проходящие параллельно 5 авеню (рис. 4).

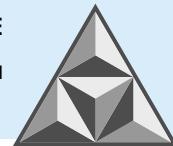


Рис. 4. Разрез 3D модели здания 262 на 5 авеню; видны ядро и несущие стены

Fig. 4. A sectional view of the 3D model of 262 Fifth Avenue; the core and load-bearing walls are visible

Благодаря выдвиганию ядра здания наружу и его изоляции от основных жилых объемов проект позволяет создать просторные незагороженные интерьеры квартир с панорамными видами (рис. 5).



Рис. 5. Визуализация интерьера второго этажа двухэтажной квартиры в здании 262 на 5 авеню (вид снаружи)

Fig. 5. Interior visualization of the 2nd floor of a two-story apartment in the building at 262 Fifth Avenue (exterior view)

Так, были обеспечены жилые пространства площадью порядка 185 м² на этаж без дополнительных опор в интерьере. Шесть технических этажей в здании гарантируют дополнительные конструктивные связи ядра и несущих стен и, соответственно, повышенную жесткость конструкции.



Ветроустойчивость такого здания улучшена с помощью испытаний в динамической трубе, включая аэроупругие исследования. Благодаря последним созданы пустоты в верхней части здания (рис. 6) и с высокой точностью была определена высота установки демпфера.



Рис. 6. Пустоты в верхней части здания 262 на 5 авеню на визуализации и в процессе строительства

Fig. 6. Voids in the upper part of the building at 262 Fifth Avenue in visualization and during construction

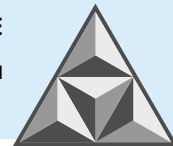
Стены из высокопрочного бетона с маркой 14000 psi (близка к М1000), армированные арматурой с пределом текучести 97 ksi (соответствует 690 МПа), сужаются по мере увеличения высоты, оптимизируя конструктивные характеристики и увеличивая полезное внутреннее пространство. Панорамные окна от пола до потолка выполнены из стеклянных панелей размером до 6.1×2.6 м. При этом используют тройное стекла с малым содержанием железа и низкоэмиссионным покрытием, а камеры заполнены аргоном, что улучшает теплоизоляцию и повышает прозрачность, снижает уровень внешнего шума.

Конструкция здания опирается с помощью буровых свай на манхэттенский сланец, обеспечивающий допустимую несущую способность до $60 \text{ кг}\cdot\text{см}^{-2}$, что является одним из самых высоких показателей на территории острова.

ВЫВОДЫ

Большинство небоскребов описанной типологии обладает простой геометрией, что во многом продиктовано экономическими характеристиками и необходимостью сочетания редких факторов для строительства таких сооружений. Технология проектирования и строительства быстро совершенствуется; в самих характеристиках зданий заложен ключ к дальнейшему их распространению. Небольшие размеры в плане создают благоприятные условия для использования 3D-печати, где важен размер сечения; некоторые небоскребы возводятся с применением самоподъемной опалубки.

Сверхтонкие небоскребы делают облик городов похожим на густой лес, в отличие от градоландшафта предыдущей эпохи, который представляется, скорее, «скалистым». Можно полагать, что архитектура будущего для зданий данной типологии видоизменится в направлении *органитека*.



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Jencks C.** The new paradigm in architecture // *Architectural Review*. 2003. Т. 213. № 1272. С. 68-72.
2. **Harris J.** Fractal architecture: organic design philosophy in theory and practice. Альбукерке: UNM Press, 2012. 409 с.
3. **Valdés S.P.V., David J.** Strange Attractor Factor beyond Performance Art in a Time – Based Media Context // *International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS)*. 2019. Т. 3. Вып. XI. Р. 153-164. ISSN 2454-6186.
4. **Рассторгуев С.В.** Иммерсивные технологии в архитектуре // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6. Вып. 2. С. 81-96. DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-81-96.
5. **Afkham M.R.** Sign and Symbol in Architecture // *Advances in Environmental Biology*. 2014. Т. 8. № 12. С. 445-452.
6. **Витрувий М., пер. Петровский Ф.А.** Десять книг об архитектуре. М.: Юрайт, 2019. 318 с.
7. **Von Moos S., Russell W.** The Politics of the Open Hand: Notes on Le Corbusier and Nehru at Chandigarh // *The Open Hand: Essays on Le Corbusier*. Apr. 21, 2021. С. 368-414.
8. **Baum A., Valins S.** Architecture and social behavior: Psychological studies of social density. Абингдон: Routledge, 2024. 126 с.
9. **Wolf M.** Architecture of Density, 2nd edition. Берлин: Peperoni Books, 2014. 128 с.
10. **Beltramo S.** Civic towers in medieval urban landscape in Northern Italy: architectures as urban identities // *Eikonocity. Storia e Iconografia delle Città e dei Siti Europei*. 2020. Т. 5. № 1. С. 31-45. DOI: 10.6092/2499-1422/6341.
11. **Neumann D.** Promontory to Lake Shore Drive: the evolution of space in Mies van der Rohe's high rise apartments // *Modern Wohnen: Möbeldesign und Wohnkultur der Moderne*. 2015. С. 1-22.
12. Highcliff: Facilities / Central Development Limited [Электронный ресурс]. URL: <https://central-development.com/highcliff/> (дата обращения: 11.03.2026).
13. Keret House: самый узкий дом в мире / iXBT.com [Электронный ресурс]. URL: <https://www.ixbt.com/live/offtopic/keret-house-samyu-uzkiy-dom-v-mire.html> (дата обращения: 11.03.2026).
14. **Caves R.W.** Encyclopedia of the City. Абингдон: Routledge, 2004. С. 269.
15. Супертонкие небоскребы / Портал cih.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://cih.ru/wp/bld/2026/01/21/супертонкие-небоскребы/> (дата обращения: 11.03.2026).
16. Музейный дом 53W53: Сверхтонкие небоскрёбы / «Дзен» [Электронный ресурс]. URL: https://dzen.ru/a/aXoBAwruuSxUQYzu#myzeiinii_dom_53w53 (дата обращения: 12.03.2026).
17. Подробный обзор МФК Capital Towers в Москве со всеми плюсами и минусами / Яндекс Недвижимость [Электронный ресурс]. URL: <https://realty.yandex.ru/journal/post/podrobnyy-obzor-mfk-capital-towers-v-moskve-so-vsemi-plyusami-i-minusami/> (дата обращения: 12.03.2026).
18. **Fortune J.W.** Elevator Frank Lloyd Wright's Mile-High Building // *Elevator Technology 4 Proceedings of Elevco* 1992. Т. 4. № 1. С. 86-95.
19. Первый русский небоскрёб на Манхэттене / Портал cih.ru [Электронный ресурс]. URL: <https://cih.ru/wp/bld/2025/11/28/первый-русский-небоскрёб-на-манхэтте/> (дата обращения: 12.03.2026).
20. **Лапшина Е.Г., Брындына А.** Динамика формы в архитектуре: футуристические проекты летающих городов // *Синергия наук*. 2018. № 21. С. 510-517.
21. **Коваленко Е.Ю.** Советская бумажная архитектура 1980-х годов и язык ее образов // *Актуальные проблемы теории и истории искусства*. 2024. Т. 14. С. 543-556. DOI: 10.18688/aa2414-7-43.

Поступила в редакцию 04.05.2026

Одобрена после рецензирования 02.06.2026

Принята к опубликованию 30.06.2026

REFERENCES

1. **Jencks, C.** (2003), The new paradigm in architecture, *Architectural Review*, vol. 213 (1272), pp. 68-72.
2. **Harris, J.** (2012), Fractal architecture: organic design philosophy in theory and practice. Albuquerque: UNM Press. 409 p.



3. **Valdés, S.P.V. and David, J.** (2019), Strange Attractor Factor beyond Performance Art in a Time – Based Media Context, *International Journal of Research and Innovation in Social Science (IJRISS)*, vol. III, iss. XI, pp. 153-164. ISSN 2454-6186.
4. **Rastorguev, S.V.** (2025), Immersive technologies in architecture, *Smart Composite in Construction*, vol. 6, iss. 2, pp. 81-96 (in Russian). DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-2-81-96.
5. **Afkham, M.R.** (2014) Sign and Symbol in Architecture, *Advances in Environmental Biology*, vol. 8, no. 12, pp. 445-452.
6. **Vitruvius, M., trans. Petrovskii, F.A.** (2019), Ten books on architecture. Moscow: Iurait (in Russian).
7. **Von Moos, S. and Russell, W.** (2021), The politics of the open hand: Notes on Le Corbusier and Nehru at Chandigarh, *The Open Hand: Essays on Le Corbusier*, pp. 368-414.
8. **Baum, A. and Valins, S.** (2024), Architecture and social behavior: Psychological studies of social density. Abingdon: Routledge.
9. **Wolf, M.** (2014), Architecture of Density, 2nd edition. Berlin: Peperoni Books.
10. **Beltramo, S.** (2020), Civic towers in medieval urban landscape in Northern Italy: architectures as urban identities, *Eikonocity. Storia e Iconografia delle Città e dei Siti Europei*, vol. 5, no. 1, pp. 31-45. DOI: 10.6092/2499-1422/6341.
11. **Neumann, D.** (2015), Promontory to Lake Shore Drive: the evolution of space in Mies van der Rohe's high-rise apartments, *Modern Wohnen: Möbeldesign und Wohnkultur der Moderne*, pp. 1-22.
12. Highcliff: Facilities / Central Development Limited [Online]. Available at: <https://central-development.com/highcliff/> (accessed: 11.03.2026).
13. Keret House: the narrowest house in the world / iXBT.com [Online]. Available at: <https://www.ixbt.com/live/offtopic/keret-house-samyy-uzkiy-dom-v-mire.html> (accessed: 11.03.2026) (in Russian).
14. **Caves, R.W.** (2004), Encyclopedia of the City. Abingdon: Routledge, p. 269.
15. Super-thin skyscrapers / Portal cih.ru [Online]. Available at: <https://cih.ru/wp/bld/2026/01/21/супертонкие-небоскребы/> (accessed: 11.03.2026) (in Russian).
16. Museum House 53W53: Ultra-thin Skyscrapers / "Zen" [Online]. Available at: https://dzen.ru/a/aXoBAwruuSxUQYzu#myzeiinii_dom_53w53 (accessed: 12.03.2026) (in Russian).
17. A detailed review of the Capital Towers multifunctional complex in Moscow, with all the pros and cons / Yandex Real Estate [Online]. Available at: <https://realty.yandex.ru/journal/post/podrobnyy-obzor-mfk-capital-towers-v-moskve-so-vsemi-plyusami-i-minusami/> (accessed: 12.03.2026) (in Russian).
18. **Fortune, J.W.** (1992), Elevating Frank Lloyd Wright's Mile-High Building, *Elevator Technology 4 Proceedings of Elevco*, vol. 4, no. 1, pp. 86-95.
19. The first Russian skyscraper in Manhattan / Portal cih.ru [Online]. Available at: <https://cih.ru/wp/bld/2025/11/28/первый-русский-небоскрег-на-манхэтте/> (accessed: 12.03.2026) (in Russian).
20. **Lapshina, E.G. and Bryndina, A.** (2018), Dynamics of form in architecture: futuristic projects of flying cities, *Synergy of Sciences*, no. 21, pp. 510-517 (in Russian).
21. **Kovalenko, E.Iu.** (2024), Soviet paper architecture of the 1980s and the language of its images, *Actual problems of the theory and history of art*, vol. 14, pp. 543-556 (in Russian). DOI: 10.18688/aa2414-7-43.

Received 04.05.2026

Approved 02.06.2026

Accepted 30.06.2026



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 69(091), 623.1(091)

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-79-94

Трансфер голландских технологий оборонительного зодчества: Ростовская крепость в России XVII столетия

Д.А. Личак, А.Л. Лебедев, Н.А. Личак

Дмитрий Алексеевич Личак^{1,*}

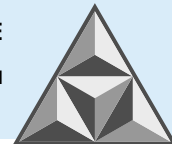
¹Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского, Ярославль,
Российская Федерация

*d_lichak@mail.ru**

Александр Львович Лебедев², Наталия Алексеевна Личак²

²Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

lebedeval@ytsu.ru, lichakna@ytsu.ru



Исследуется процесс внедрения голландских технологий оборонительного зодчества в России XVII столетия. Рассмотрены исторические предпосылки, экономические и технические аспекты трансфера европейской системы бастионных укреплений с использованием деревянного каркаса и грунта. Ростовская крепость является одним из первых примеров системного применения голландских технологий в российском градостроительстве и архитектуре. При анализе конструктивных особенностей Ростовской крепости выявлено ее типологическое сходство с зарубежными прототипами и показана возможность первой адаптации европейских инженерных решений к российским условиям. Особое внимание уделяется роли иностранных специалистов в модернизации российской оборонительной архитектуры, организации строительных работ, интеграции новых материалов и методов в отечественную практику. Используются архивные документы и данные современных исследований по истории установки фортификационных сооружений Европы в России в XVII веке. Применение композитов голландского типа позволило повысить экономичность строительства, ускорить возведение крепостных укреплений, обеспечить их ремонтпригодность и создать необходимые условия для формирования национальной школы оборонительного зодчества.

Ключевые слова: оборонительное зодчество, фортификационные сооружения, строительная инженерия, Ростовская крепость, XVII столетие, голландские технологии

Для цитирования:

Личак Д.А., Лебедев А.Л., Личак Н.А. Трансфер голландских технологий оборонительного зодчества: Ростовская крепость в России XVII столетия // Умные композиты в строительстве. 2026. Т. 7, вып. 3. С. 79-94.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-79-94



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-79-94

The transfer of Dutch fortification technologies: the Rostov fortress in 17th-century Russia

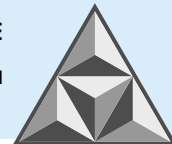
D.A. Lichak., A.L. Lebedev, N.A. Lichak

D.A. Lichak^{1,*}

¹Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, Yaroslavl, Russian Federation
*d_lichak@mail.ru**

A.L. Lebedev², N.A. Lichak²

²Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation
lebedeval@ytsu.ru, lichakna@ystu.ru



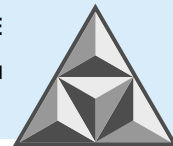
The paper examines the process of the introduction of Dutch fortification technologies in 17th-century Russia. The historical prerequisites, as well as the economic and technical aspects of the transfer of the European system of bastion fortifications using a wooden frame and earth fill, are considered. The Rostov fortress was one of the first examples of the systematic application of Dutch technologies in Russian urban planning and architecture. By analyzing the structural features of the Rostov fortress, its typological similarity to foreign prototypes is revealed, and the possibility of the first adaptation of European engineering solutions to Russian conditions is demonstrated. Particular attention is paid to the role of foreign specialists in the modernization of Russian defensive architecture, the organization of construction works, and the integration of new materials and methods into domestic practice. Archival documents and data from modern studies on the history of the construction of fortifications in Europe and in Russia in the 17th century are used. The use of Dutch-type composites made it possible to increase the cost-effectiveness of construction, accelerate the erection of fortress fortifications, ensure their maintainability, and create the necessary conditions for the formation of a national school of fortification architecture.

Keywords: fortification architecture, fortifications, construction engineering, the Rostov fortress, 17th century, Dutch technologies

For citation:

Lichak D.A., Lebedev A.L., Lichak N.A. The transfer of Dutch fortification technologies: the Rostov fortress in 17th-century Russia // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 3. P. 79-94. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7693/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-3-79-94



ВВЕДЕНИЕ

Распространение артиллерии в театрах военных действий XVI – XVII столетий привело к мощной трансформации строительной инженерии в части подготовки и установки новых защитных сооружений. На смену высоким каменным стенам средневековых замков пришли массивные земляные укрепления, способные поглощать энергию удара и эффективно противостоять осадной артиллерии. Ранее при попадании пушечного ядра энергия концентрировалась в ограниченной зоне, вызывая локальное разрушение, образование трещин и опасных для защитников осколков. В свою очередь, земляные валы, напротив, представляли собой рыхлую податливую среду. При этом ядро, попадая в толщу грунта, тратит энергию на трение и деформацию насыпи, быстро теряет скорость и увязает в ней. Указанное свойство «податливости» грунта предоставило возможность создавать эффективную защиту против артиллерии и запустить на новый виток стратегию и тактику сражения.

Колыбелью новой фортификации стала Италия, однако настоящий расцвет и широкое распространение земляная фортификация получила в Нидерландах в конце XVI века. Перед голландскими военными инженерами в ходе тяжелой затяжной войны за независимость (1566 – 1609 гг.) стояла нелегкая задача оперативного возведения укреплений, характеризующихся малой стоимостью. Экономические условия и недостаток времени потребовали от голландцев отказаться от каменных стен и казематов. Высокий уровень грунтовых вод заставил их прибегать к устройству низких валов (не более 5.5 м) в сочетании с широкими водяными рвами, за счет чего при штурме обеспечивалась повышенная безопасность. Возведение земляных укреплений позволило не только ускорить строительство, но и организовать его гораздо дешевле. В целом «голландская система» была представлена относительно низким профилем укреплений, а также активно использовала водные преграды и земляные валы [1].

Привлекательность «голландской системы» состояла в соединении относительной дешевизны и доступности материалов. Порох сделал войну весьма дорогим «удовольствием». Как отмечал Д. Келли, пушечный выстрел в XVI веке в Европе обходился в пять талеров (сумма, равная месячному жалованью пехотинца). Кроме того, изготовление и содержание пушек были разорительными. Высокооплачиваемые специалисты отливали их из дорогого металла, а для перевозки орудий на поле боя требовалось беспрецедентное количество тягловых животных. Воевавшая в Нидерландах в 1554 г. испанская армия, например, располагала артиллерийским обозом в пять тысяч лошадей и полусотней артиллерийских орудий [2]. Возможность противостоять дорогому наступательному вооружению, опираясь на относительную дешевизну установки новых оборонительных сооружений, становилась важным преимуществом.

В XVI – XVII веках в Русском государстве, как и в Европе, наблюдался активный рост фортификационного строительства, обусловленный необходимостью защиты расширяющихся рубежей от многочисленных захватчиков. В России распространение «голландской системы» фортификации связано с событиями первой общеевропейской Тридцатилетней войны. Частью этого масштабного вооруженного конфликта может рассматриваться Смоленская война 1632 – 1634 гг., при подготовке к которой на русскую службу в небывалых количествах приглашались европейские специалисты [3]. В числе таковых был и военный инженер, «городелец» (так называли этих людей наши соотечественники) Иоганн Корнилиус Ван Роденбург (Ян Корнилов). Он принял самое активное участие в строительстве нескольких укреплений, в том числе земляной крепости в Ростове.



Целью настоящего исследования является анализ роли европейских инженеров в трансфере передовых фортификационных технологий в Россию XVII века и изучение их влияния на эволюцию отечественного оборонительного зодчества (на примере строительства земляной крепости в Ростове под руководством голландца Иоганна ван Роденбурга). Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- реконструкция истории строительства Ростовской земляной крепости (1632 – 1634 гг.) и уточнение роли голландского военного инженера Иоганна ван Роденбурга в проектировании и возведении указанного сооружения;

- анализ конструктивных особенностей и технологических приемов строительства земляных укреплений крепости в контексте передовых европейских фортификационных систем XVII века;

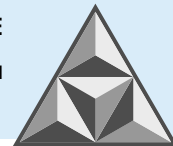
- оценка влияния инженерных решений, примененных Яном ван Роденбургом, на дальнейшее развитие земляного бастионного строительства в России, адаптации на русской почве западноевропейского опыта.

При подготовке работы авторами были использованы классические общенаучные методы – наблюдение, синтез, дедукция и историко-сравнительный метод.

РЕЗУЛЬТАТЫ АВТОРСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Приглашение военных специалистов, в том числе в сфере строительной инженерии и возведения крепостей, было распространенной практикой в Российском государстве. Кремлевские башни и стены в конце XV века строили мастера-иноземцы итальянского происхождения [4]. Посол императора Священной римской империи Сигизмунд Герберштейн, дважды (в 1517 и 1526 годах) посещавший Россию, упоминает, в частности, пушечных литейщиков, немцев и итальянцев [5]. Как полагает Т.В. Черникова, найм западных специалистов был начат сразу с момента становления единого Московского государства [6]. Некоторые обстоятельства прибытия в Россию Иоганна Корнилиуса Ван Роденбурга известны из «вестовых писем» (сообщений в Посольский приказ Русского государства) стокгольмского купца Мелхера Бекмена, беседовавшего с указанным голландским военным инженером во время путешествия последнего в нашу страну. М. Бекман сообщал, что проживавший в Амстердаме инженер узнал о потребности России в инженерах от Юлиуса Ван Экселя, представившегося послом и выполнявшего поручения русских властей – от закупки оружия до вербовки специалистов, необходимых российскому государству. Голландский военный инженер, которого в русских документах стали именовать Яном Корниловым, находясь в Риге проездом, начал рассказывать о намерении российского правителя после завершения перемирия с Польско-Литовским государством осадить город Смоленск. Для этого, по его словам, закуплено российским правителем множество мушкетов и пистолетов и «хочет он добрых капитанов да инженеров добрых себе принять, которые б его людей к ратному делу понаучали» [7].

Процедура приема на русскую службу для голландского военного инженера растянулась на несколько месяцев, но это вряд ли было связано с его рижскими разговорами о намерении русских осадить Смоленск. Приготовление к войне и приглашение большого количество военных специалистов в Россию, судя по сообщениям агентов Посольского приказа, не были секретными. Стокгольмский купец М. Бекман извещал Посольский приказ о слухах, распространяемых в Риге наемниками и исходивших якобы от польского вельможи Гасевского, знавшего от лазутчиков о военных приготовлениях русских к нападению на



Смоленск и о высоком жаловании, выдаваемом наемникам в Москве. Это жалование Гасевский называл «манливым хлебом» [7].

В Русском государстве начала XVII века военных инженеров очень ценили. Самое высокое месячное жалование, выдававшееся вдовам служивых людей, судя по Расходной книге Иноземского приказа 1632 г., составляло 73 рубля; его получали вдова и дети «голландской земли горододельца Домонморона» [8]. Для сравнения: на русской службе подполковники в 1632 – 1634 гг. получали в Иноземском приказе жалование 100 руб., майоры – по 50 руб., а ротмистры – по 25 руб. [9]. Ван Роденбург, как он сам рассказывал в Риге М. Бекману, прибыл в Россию в связи с образовавшейся «вакансией». Впрочем, жалование, ему назначенное, первоначально было меньше – 50 рублей в месяц [9].

В 1631 г. Иоганн Корнилиус ван Роденбург создал макет земляного городка «по голландской системе». Макет лично осмотрел царь Михаил Федорович, который за работу повелел наградить инженера сукном, соболями и серебряным ковшом. Награду получил и его ученик Уланка [9]. В XVII столетии модели укрепленных городов получили широкое распространение едва ли не во всей Европе. Немецкий военный инженер и архитектор, автор трактата «О строительстве крепостей» писал: «Поскольку же властитель и другие господа не всегда сведущи в чтении чертежей или чертежной перспективы, то необходимо изготовить модель постройки из дерева, чтобы представить все высокие, широкие и толстые эскарпы на крепостных валах, стенах, брустверах, рвах, канавах, и все вычертить в новом масштабе... наглядно для глаз, чтобы можно было судить о том, как это будет построено...» [10]. По результатам рассмотрения макета, представленного Ван Роденбургом, инженеру поручили укрепить Ростов. А.Г. Мельник связывал строительство крепости в этом городе (рис. 1) с памятью о событиях 1608 г., когда не имеющий укреплений город был легко захвачен врагами, большая часть его населения уничтожена, а ростовский митрополит Филарет Романов, отец будущего царя, был взят в плен [11].



Рис. 1. План центральной части Ростова в черте земляной крепости (1755 – 1760 гг.) [11]

Fig. 1. Plan of the central part of Rostov within the earthen fortress boundaries (1755-1760) [11]

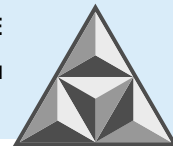


Ван Роденбург обратился к русским властям с просьбой вызвать из-за границы шесть подмастерьев, «которые умеют делать городовое дело». В условиях бушующей в Европе войны найти их было непросто. Однако в августе 1632 г. подмастерья прибыли в Ростов, где с июля находился и сам Ван Роденбург. Вместе с подмастерьями в Россию прибыли и родственники инженера: жена, три сына и четыре дочери [12].

Обстоятельства строительства крепости отражены в нескольких сохранившихся документах, опубликованных в разное время. Два из них, касающиеся возведения земляной крепости в Ростове, были опубликованы в 1855 г. ярославским краеведом П.В. Хлебниковым в газете «Ярославские губернские ведомости». Ростовские земские старосты и целовальники в челобитной царю писали, что «по дозорнымъ книгамъ Ростовское городовое дело делали с нами Кинешемцы и Пошехонцы, тысяча сто человекъ пешихъ да сто человекъ с лошадми. А велено, государь, с нами Кинешемцомъ и Пошехонцемъ быти в Ростове до городовые отделки». Согласно грамоте из Пушкарского приказа, необходимо было заготовить лес «где пригоже» и доставить его в Ростов для строительства крепости. Старосты писали, что «городелца немчина Яна Корнильева по сметке и по росписи на то Ростовское городовое дело надобно лесу приготовить 6200 бревенъ мерныхъ полупяты сажени, в отрубе осми вершковъ; да Ярославскаго тесу тысяча трехъ сажень мерныхъ, а тонкова тесу столко же, тысяча тесницъ» и просили царя, чтобы, наряду с жителями Ростова, до полного завершения крепостного строительства в работах участвовали, как и предписывалось ранее, люди Кинешемского и Пошехонского уездов. Имело значение и качество материала. Жители Ростова жаловались, что во всем уезде не найти бревен и теса, необходимых, по мнению голландца, для успешного строительства. Ссылаясь на Яна Корнилова, потребность в указанных материалах «на ворота и на подлазы, и на мосты, и на караульные дворы» подтверждал в своей челобитной государю и князь Иван Федорович Волконский – представитель властей, который руководил строительством [13]. В итоге крепость снабдили: тайными выходами – «подлазами»; деревянными караульнями; деревянными воротами; деревянными тынами перед ними; деревянными мостами через ров.

Как отмечали современные голландские исследователи, изучившие ростовскую крепость, в систему укреплений входят девять бастионов, соединенных между собой куртинами (земляными валами). Шесть сторон из девяти направлены на сушу, где валы оснащены дополнительными низкими валами (фоссебреями). Только один основной вал имел укрепления со стороны озера. Судя по всему, с воды ожидалось меньше угрозы. Дополнительная защита фоссебреями наблюдается и у схожего проекта крепости в Нидерландах (Хесден). Для голландских фортов этого периода характерны и прямые углы между фланками и куртинами, которые есть и в Ростове. Сходство между бастионными укреплениями Ростова и теми, что установлены в Нидерландах, называют «староголландской системой», и это, по мнению Йона ван Роойена и Даана Лависа, явно указывает, что здесь работал инженер, обучавшийся в Нидерландах [14].

Эффективность земляных валов с деревянным каркасом в XVII веке, по сравнению с традиционными каменными стенами, объясняется не одним фактором, а целым комплексом: во-первых, податливая земляная толща не разрушалась, а поглощала энергию чугунных ядер. Во-вторых, деревянный каркас армировал насыпь, придавая ей форму и дополнительную прочность. В-третьих, соблюдалась геометрия крепостей «голландского образца». Переход к низким и толстым валам в рамках бастионной системы сделал крепости менее заметными целями и устранил «мертвые зоны» на подступах к укреплениям, превратив их в систему активного перекрестного огня. Четвертый фактор (экономический) также имел большое



значение, поскольку земля и дерево были значительно дешевле и доступнее камня. Это позволяло возводить сооружения быстрее, и, что не менее важно, оперативно ремонтировать укрепления в условиях боевых действий. 4 января 1632 г. Ван Роденбург (в русскоязычной среде – Ян Корнилов) уже докладывал, что «сомкнул вал длиной в 2 версты кругом, так что нигде полого места нет», и просил о прибавке жалования себе и своим подмастерьям.

Земляные укрепления в 30-е годы XVII столетия стали важным элементом крупных городов-крепостей. Однако использовали их и противники России. На гравюре Вильгельма Гондиуса «Изображение атаки и обороны Смоленска» видны земляные фортификационные сооружения с очертаниями в форме звезды, характерными для голландской системы [18]. План для изображенной на гравюре карты подготовил служивший польскому королю военный инженер Иоанн Плейтнер, а гравюры с этого плана были изготовлены в Польше Вильгельмом Гондиусом (рис. 2).



Рис. 2. План г. Смоленска В. Гондиуса. 1636 г. (фрагмент) [16]

Fig. 2. Plan of the city of Smolensk by W. Hondius. 1636 (fragment) [16]

Известно, что после того, как к маю 1633 г. русским войскам удалось занять Покровскую гору и укрепить позиции окопами и рогатками, связь осажденных с внешним миром была сильно затруднена [15]. Это говорит о важной роли полевой фортификации при осаде Смоленска.

Земляные укрепления в России возводились не только в городах. Они были важным элементом так называемой «Засечной черты» – полосы укреплений на южных границах, прикрывавших страну от набегов крымских татар. Здесь укрепления сочетали различные виды фортификационных сооружений: лесные завалы-засеки, надолбы, частоколы, ямы, валы, рвы, острожки, городки, башни. Города, входившие в эти линии, назывались «городами от поля», или «украинными» городами (например, Болхов, Орел, Крапивна). Сами крепости, известные как остроги, строились из дерева. Однако для повышения обороноспособности по периметру острожных стен часто отсыпали земляной вал и выкапывали ров, что превращало их в мощные сооружения. Классическим примером является Земляной город в Туле, где земляной вал со сложной внутренней конструкцией из бревен прикрывал деревянную стену острога.



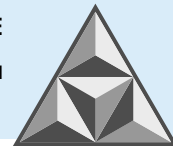
В связи с ожиданием крупного набега татар была предпринята масштабная перестройка Засечной черты. К реконструкции привлекались инженеры Ян Корнилов (Ван Роденбург), Давыд Николь и Юст Монсен (Матсен), которые руководили возведением укреплений по принятым европейским стандартам того времени [17]. С октября 1635 г. Корнилов был послан на строительство оборонительных сооружений в Тульский уезд, где под его руководством возводился «Завитай» – земляное укрепление протяженностью в 14 верст. Его жалование военного инженера к этому времени составляло уже 100 руб. Однако в конце 1637 г. Ван Роденбург уехал из России в шведскую Лифляндию, где был принят на военную службу. Тем не менее, в 1639 г. к югу от Старого Завитая на протяжении 2.2 км было сделано еще три прясла вала и два редана Нового Завитая, а вдоль него выкопан ров глубиной 3.24 м и длиной 1.93 км, больше половины которого было заполнено водой из-за близости к реке Воронке. В бастионах Старого Завитая было устроено четыре зеленых (пороховых) погреба, а вблизи вала – три колодца, жилые «земляные избы» и шалаши для «начальных людей». Вдоль западного склона Завитая шла приступка для защитников укрепления, усиленная плетнем против осыпания, а поверх вала были поставлены набитые землей плетеные туры для защиты обороняющихся от всех видов стрельбы. По мнению И.Г. Бурцева, бастионы Завитая конструктивно близки к «башням» Земляного города Тулы, поскольку они возводились практически синхронно одними и теми же людьми [18].

Земляная крепость в Ростове никогда не подвергалась осаде, но сыграла значительную роль в дальнейшем развитии города. По мнению Ф.Ю. Тышковского, система фортификационных сооружений традиционно генерирует целый комплекс узловых точек и пространственных связей самого различного свойства. Сравнивая разные города-крепости бывшей Шведской империи и возведенные по подобным технологиям крепости России, Ф.Ю. Тышковский приходит к выводу, что в Ростове имеет место 10% утрат: сохранился средневековый кремль (построен, по факту, с 1664 по 1680-е годы) и бастионные укрепления 1632 – 1634 гг. голландца Ван Роденбурга – «земляного дела горододелца» (рис. 3), установившего в шведских владениях фортификационные укрепления Нарвы, Риги, Гетеборга, Ниена [19].



Рис. 3. Земляные валы старинной крепости (авторское фото Ростовского музея-заповедника)

Fig. 3. Earthen ramparts of the ancient fortress (author's photo from the Rostov Museum-Reserve)



В последующие годы XVII столетия служилые иноземцы также принимали участие в проектировании и модернизации фортификационных сооружений. Интересно, что действия иностранцев, связанные с русскими крепостями, настораживали наших соотечественников. Так, в 1650 г. жители Пскова сообщили государю в челобитной о «подозрительных» действиях полковника Александра Крафerta, который «во Пскове городских всяких крепостей осматривал». В ответ из столицы сообщили, что полковник Краферт служит государю «и подал чертеж, какие во Пскове крепости и бой учинить, в городе и около города» [20].

Русская армия, реорганизованная накануне Смоленской войны офицерами, перешедшими со шведской службы в русскую, принимала новшества, выработанные опытом Нидерландской буржуазной революции. В их пользу свидетельствует, в частности, то обстоятельство, что чуть позже эта же «военная школа» была перенесена из Голландия и Швеции в революционную Англию. В связи с этим Б.Ф. Поршнев даже называл офицеров-наемников (преимущественно шотландцев) военными учителями Густава Адольфа и Кромвеля. Интересно, что один из главных реформаторов русской армии – полковник Александр Лесли приходился сыном знаменитому герою Тридцатилетней войны, ставшему в 1636 году фельдмаршалом шведской армии, а позже главой шотландской пресвитерианской армии Александру Лесли-старшему, в молодости сражавшемуся на стороне голландцев против испанцев [21].

Не будет преувеличением отметить, что выходцы из Европы, пополняющие ряды военных инженеров «горододельцев» и служилых иноземцев Московского государства, оказывались в пределах другой цивилизации, если принять трактовку «цивилизации» как способа бытия и одновременно способа разрешения противоречий, в том числе в системе связей «социум – индивид» и «традиция – новация» [22]. С одной стороны, европейцы способствовали освоению русскими людьми новых технологий фортификации и военного дела, а с другой стороны, они сами знакомились с российскими практиками реализации фортификационных и архитектурных проектов, обеспечивая таким образом контакт своих соотечественников с Россией.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ДИСКУССИЯ

Исследование строительства Ростовской земляной крепости под руководством Ван Роденбурга позволяет вписать этот объект не только в контекст военной истории, но и в историю создания новых строительных материалов – эволюцию так называемых «грунтовых» композитов. Под таким композитом в настоящей работе подразумевается искусственная двухкомпонентная система «грунт – деревянный каркас», в которой каждый элемент выполняет взаимодополняющие функции: рыхлая земляная масса служит диссипатором энергии удара, а деревянная обвязка (клетки, ряжи, тын, фашинник) обеспечивает форму насыпи, сопротивление оползневым деформациям и возможность проведения оперативного ремонта. Материальной основой для «новой фортификации» в России XVII века стал именно такой композит, а не исключительно земляные или каменные конструкции.

Полученные результаты показывают, что Ростовская крепость (1632 – 1634 гг.) является одним из наиболее ранних и хорошо задокументированных примеров применения в России голландской бастионной системы. Сравнительный анализ с фортификациями Нидерландов (Хесден) и крепостями в шведских владениях показал прямое типологическое сходство: девять бастионов, соединенных куртинами, фоссебреи на сухопутных фронтах, прямые углы между фланками и куртинами – признаки, соответствующие «староголландской системе» первой трети XVII века. Особый интерес, напомним, вызывает и то, что Ван Роденбург еще до начала



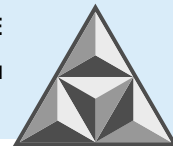
строительства изготовил модель (макет) крепости, которую одобрил царь Михаил Федорович. Этот факт, зафиксированный в делопроизводственных документах Российского государства, демонстрирует не только высокий статус инженера, но и использование прототипирования как метода согласования сложных пространственных решений с заказчиком, что для XVII века являлось передовой практикой.

Ростовская крепость представляет уникальный пример системного подхода с точки зрения материаловедения: при строительстве деревянные элементы (бревна, тес) использованы не только для армирования валов (внутренние связи, предотвращающие расползание насыпи), но и для создания инженерных устройств – подлазов, мостов, ворот, караульных дворов. Челобитные ростовских старост и князя Волконского позволяют количественно оценить масштаб деревянной составляющей: 6200 единиц мерных бревен, тысяча единиц трехсаженного теса и т.д. Таким образом, «композитность» проявлялась на двух уровнях – уровне отдельного вала (грунт + деревянная арматура) и уровне крепости как целого (земляная масса, деревянные конструкции и рвы, наполненные водой).

Первый дискуссионный вопрос касается оригинальности Ван Роденбурга как проектировщика. Исследователи Ван Ройен и Лавис справедливо указывают на сходство его творений с голландскими прототипами, но при этом оставляют открытым вопрос: адаптировал ли инженер готовые типовые решения или же он вносил коррективы с учетом российских условий (климат, грунт, наличие рабочих рук, особенности местности, в том числе со стороны озера Неро)? Результаты настоящего исследования позволяют принять версию творческой адаптации принятых решений. В частности, асимметрия укреплений (только один вал со стороны озера) свидетельствует о рациональном учете вероятных направлений штурма, что не слепо копирует голландские образцы, где водные преграды использовались иначе вследствие высокого уровня грунтовых вод.

Второй дискуссионный вопрос – функции описанных композитов в последующем русском фортификационном строительстве и архитектуре. Работы Ван Роденбурга, Давыда Николи и Юста Монсена на южных рубежах (Засечная черта, строительство Нового Завитая в 1639 – 1640 гг.) указывают на то, что к концу 1630-х годов в России сформировалась школа «земляного горододелства». Однако, как следует из данных И.Г. Бурцева, в ряде случаев (Тульский Земляной город) сохранялась гибридная схема, согласно которой земляной вал прикрывал деревянную стену острога. Почему же чисто земляные бастионы голландского типа полностью не вытеснили смешанные конструкции? Вероятный ответ – учет экономического и кадрового факторов. Возведение голландского бастиона требовало значительного объема земляных работ, точного профилирования и постоянного надзора опытного инженера. На южных окраинах, где угроза крымских набегов была хронической, но боевые действия не носили длительного характера, более рентабельным оказывалось устройство ускоренных «осадных» форм (туры из плетня, а в лесной местности – засеки, реданы), которые можно рассматривать также как композитные, но одновременно менее материалоемкие.

Третий дискуссионный аспект – долговечность постройки. Ф.Ю. Тышковский оценил сохранность бастионов Ростова в 90% (Ростовский кремль построен позже, в 1664 – 1680-х годах). Это поднимает вопрос о консервации земляных композитов. В отличие от каменных сооружений, земляные валы подвержены эрозии, зарастанию, расползанию. Не исключено, что сравнительно высокая сохранность ростовских укреплений объясняется, вероятно, их последующим неиспользованием (отсутствие масштабных реконструкций) и благоприятными гидрогеологическими условиями (см. рис. 3). Однако этот факт важен как пример долговечности армированного земляного материала при правильном



профилировании и дренаже (аспект, который может быть полезен для современного реставрационного материаловедения).

Наконец, в научной литературе (Б.Ф. Поршнев, М.А. Барг) подчеркивается: иноземные инженеры переносили в Россию не только технологии, но и модели поведения (индивидуальная ответственность, рациональное проектирование, высокая материальную заинтересованность). Процедура найма, контроля и вознаграждения (соболя, ковши, сукно) показывает, что Московское государство умело встраивать европейских специалистов в систему государственного заказа, сохраняя при этом свои обычаи, институционально не копируя чуждые элементы. Это позволяет говорить о селективном трансфере фортификационных композитов: материал и геометрия заимствуются, а социальная организация строительства остается традиционной (принудительный труд отбывающих государственную повинность жителей нескольких уездов, надзор воевод). Данный вывод требует дальнейшей верификации при обзоре других архитектурных и фортификационных объектов России 1630 – 1640-х годов (Новый Завитай, Тула, Козлов). Таким образом, проведенное исследование позволяет формировать направления последующего изучения трансфера перспективных технологий фортификации в России XVII столетия.

ВЫВОДЫ

1. Реконструкция событий 1631 – 1634 гг. подтверждает, что голландский военный инженер Иоганн Корнилиус ван Роденбург (Ян Корнилов) был приглашен на русскую службу через посредничество Юлиуса ван Экселя в рамках подготовки к Смоленской войне. После успешной демонстрации деревянной модели «земляного городка по голландской системе» ему было поручено строительство крепости в Ростове. Археографические данные (жалованье 50 руб. в месяц, одаривание сукном, соболями и серебряным ковшом) фиксируют высокий статус «горододелца». Ростовская крепость стала одним из первых бастионных сооружений голландского типа на территории России, возведенных по указу царя.

2. Анализ плана крепости и ее архитектуры показывает, что Ван Роденбург применил «староголландскую систему»: девять бастионов с прямыми углами между фланками и куртинами, земляные валы (основной и фоссебреи на сухопутных фронтах), водяной ров. Материальная основа – земляной композит: местный грунт в сочетании с деревянным каркасом (ряжи, клетки, тын). Документы зафиксировали точную номенклатуру лесоматериалов (6200 бревен, тес, тесницы) для ворот, подлазов, мостов и караульных дворов. Сравнение с нидерландским фортом Хесден и шведскими крепостями указывает на голландское происхождение технологии и ее адаптацию к ростовской топографии (ослабление укреплений с озерной стороны).

3. Ростовский опыт не остался изолированным и получил дальнейшее распространение в процессе модернизации Засечной черты (Новый Завитай, бастионы с земляными погребями, плетневыми турами). Это позволяет говорить о возникновении в России школы «земляного горододелства», воспринявшей голландские принципы, адаптированные к условиям обороны от татарских набегов. В то же время сохранение гибридного типа (Земляной город в Туле) указывает на сосуществование различных фортификационных композитов, применяемых в зависимости от размера угрозы и ресурсов. Сам факт систематического приглашения в 1630 – 1650-х годах. западных инженеров и военных специалистов (Краферт, Лесли и др.) свидетельствует об устойчивом трансфере в Россию зодческих и фортификационных технологий.



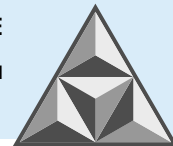
4. Ростовская крепость является ярким историческим примером «умного композита» доиндустриальной эпохи. Земляная насыпь, армированная деревом, реализует принцип функционально-градиентного распределения свойств: внешние слои (брустверы) работают на локальное восприятие удара и диссипацию энергии, а внутренний каркас обеспечивает общую геометрическую стабильность. Экономическая эффективность, скорость возведения и ремонтпригодность такого композита стали ключевыми факторами его доминирования в XVII веке. Высокая степень сохранности ростовских бастioned (около 90% первоначальной формы) позволяет рассматривать их как натуральный полигон для изучения долговечности грунтовых композиционных материалов.

Полученные данные могут быть применены при реставрации объектов культурного наследия (земляные валы XVII в.), а также для проведения историко-технической экспертизы. Методология реконструкции «композитных» технологий прошлого может служить основой для междисциплинарных исследований на стыке архитектуры и строительного материаловедения, археологии и военной истории. Работа демонстрирует плодотворность сочетания исторического и архитектурного подхода к фортификации с эволюцией композитных материалов под влиянием баллистических вызовов.

Таким образом, деятельность европейских инженеров в России XVII века на примере Ван Роденбурга и его Ростовской земляной крепости раскрывается как комплексный процесс, включающий одновременно архитектурное и инженерное проектирование, адаптацию материалов, государственный заказ и долговременное влияние на российскую национальную школу оборонительного зодчества.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Яковлев В.В.** Эволюция крепостей: история долговременной фортификации. М., 1931. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.rulit.me/books/istoriya-krepostej-evolyuciya-dolgovremennoj-fortifikacii-s-illyustratsiyami-read-635495-25.html> (дата обращения: 02.05.2026).
2. **Келли Дж.** Порох. От алхимии до артиллерии: история вещества, которое изменило мир; **пер. с англ. А. Турова.** М.: КоЛибри, 2005. [Электронный ресурс] URL: https://militera.lib.ru/tw/kelly_j/05.html (дата обращения: 02.05.2026).
3. **Поршнев Б.Ф.** Тридцатилетняя война и вступление в нее Швеции и Московского государства. М., 1976. 433 с.
4. **Платонов С.Ф.** Москва и Запад в XVI-XVII веках. Л., 1925. 190 с.
5. **Герберштейн С.** Записки о Московии. М., 1988. 776 с.
6. **Черникова Т.В.** Иноземцы в русской жизни XV-XVI вв. // *Вестник МГИМО-Университета*. 2011. № 6 (21). С. 146-152.
7. Вести-куранты: в 8 т. Т. 1: 1600 – 1639 гг. / *Акад. наук СССР, Ин-т рус. яз.; изд. Н.И. Тарабасова, В.Г. Демьянова, А.И. Сумкина; под ред. С.И. Коткова.* М.: Наука, 1972. С. 133-134.
8. Расходная книга иноземского приказа 1632 г. // РГАДА. Ф. 210. Оп. 6. Д. 45. Л. 127.
9. Акты исторические, собранные и изданные Археографической комиссией. СПб., 1842. 592 с.
10. **Ревзина Ю. Е.** Город на ладони: макеты в практике европейской фортификации // *Academia. Архитектура и строительство*. 2017. № 2. С. 72-78.
11. **Мельник А.Г.** Мифы Ростовской земляной крепости // *История и культура Ростовской земли*. 2013. С. 67-81.
12. **Сташевский Е.Д.** Смоленская война 1632 – 1634 гг. Киев, 1919. 328 с.
13. О Ростовском земляном вале: **публ. П. Хлебникова** // *Ярославские губернские ведомости*. 1855. Ч. неофиц. № 3. С. 20-21; № 4. С. 25.
14. **Роойен Йон ван, Лавис Д.** Забытая крепость Ростова Великого / *Голландская крепость в русском городе: сб. ст.; под ред. В.И. Алявдина, Д.Б. Ойнаса.* М.: Национальный фонд «Возрождение русской усадьбы», 2014. С. 41-49.



15. Гравюра Вильгельма Гондиуса «Изображение атаки и обороны Смоленска» / *Старинные гравированные карты и планы XV – XVIII веков*. М., 1992.
16. **Сапожников Н.В.** Оборонительные сооружения Смоленска (до постройки крепости 1596 – 1602 гг.) / Смоленск и Гнездово. М., 1991. С. 50-79.
17. **Меньшиков Д.Н.** По ту сторону стены (Что знали о происходящем в осажденном Смоленске К. Радзивилл и М.Б. Шеин в 1633 г.) // *История военного дела: исследования и источники*. 2017. № 54. С. 270-288.
18. **Бурцев И.Г., Дедук А.В.** Укрепления Тульских засек: выявленные объекты и перспективы дальнейшего поиска // *Тульский кремль и южные рубежи России: Мат. Всеросс. науч. конф. Ин-т росс. истории Росс. акад. наук*. М.: 2020. С. 271.
19. **Бурцев И.Г.** Археологическое изучение тульских засек // *Археология Окско-Донского водораздела: в 2 кн.* Тула: Гос. военно-истор. и природный музей-заповедник «Куликово поле». 2022. Кн. 2. С. 48-90.
20. **Тышковский Ф.Ю.** Деструкция архитектурного ландшафта городов-крепостей Шведской империи: типология и методика определения // *Науч. тр. Санкт-Петербург. акад. художеств*. 2024. № 70. С. 63-87.
21. **Орленко С.** «Шкотские немцы» в Московии: западноевропейские офицеры в России XVII века // *Родина*. 2025. № 11 [Электронный ресурс] URL: <https://rodina-history.ru/2025/08/26/shkotskie-nemcy-v-moskovii.html> (дата обращения: 02.05.2026).
22. **Барр М.А.** Категория "цивилизация" как метод сравнительно-исторического исследования // *История СССР*. 1991. № 5. С. 70-86.

Поступила в редакцию 24.06.2026

Одобрена после рецензирования 21.07.2026

Принята к опубликованию 25.08.2026

REFERENCES

1. **Iakovlev, V.V.** (1931), The evolution of fortresses: the history of long-term fortification, Moscow. Available at: <https://www.rulit.me/books/istoriya-krepostej-evolyuciya-dolgovremennoj-fortifikacii-s-illyustraciyami-read-635495-25.html> (accessed 02.05.2026) (in Russian).
2. **Kelli, Dzh.** (2005), Gunpowder. From alchemy to artillery: the history of the substance that changed the world; **transl. from Eng. by A. Turov**, Moscow, KoLibri. Available at: https://militera.lib.ru/tw/kelly_j/05.html (accessed 02.05.2026) (in Russian).
3. **Porshnev, B.F.** (1976), Tr. The Thirty Years' War and the entry of Sweden and the Moscow State into it, Moscow, 433 p. (in Russian).
4. **Platonov, S.F.** (1925), Moscow and the West in the XVI-XVII centuries, Leningrad, 190 p. (in Russian).
5. **Gerbershtein, S.** (1988), Notes on Muscovy, Moscow, 776 p. (in Russian).
6. **Chernikova, T.V.** (2011), Foreigners in Russian life of the XV – XVI centuries, *Vestnik MGIMO-Universiteta [Bulletin of MGIMO University]*, vol. 6, no. 21, pp. 146-152 (in Russian).
7. *Vesti-kuranty* (1972): в 8 т. Т. 1: 1600 – 1639 гг., *Akad. nauk SSSR, In-t rus. iaz.; izd. podgot. N.I. Tarabasova, V. G. Demianov, A.I. Sumkina; pod red. S.I. Kotkova*, Moscow, Nauka, pp. 133-134 (in Russian).
8. *Raskhodnaia kniga inozemskogo prikaza 1632 g.*, *RGADA*, f. 210, op. 6, d. 45, l. 127 (in Russian).
9. *Akty istoricheskie, sobrannye i izdannye Arheograficheskoy komissiej* (1842) (in Russian).
10. **Revzina, Iu.E.** (2017), City in the palm of your hand: layouts in the practice of European fortification, *Academia. Arhitektura i stroitel'stvo [Academia. Architecture and construction]*, no. 2, pp. 72-78 (in Russian).
11. **Melnik, A.G.** Myths of the Rostov earth fortress, *History and culture of the Rostov land [Istoriia i kul'tura Rostovskoi zemli]*. 2013. S. 67-81 (in Russian).
12. **Stashevskii, E.D.** (1919), The Smolensk War of 1632-1634, Kiev, 328 p. (in Russian).
13. About the Rostov zemlyanoe val; **publ. P. Hlebnikova** (1855), *Yaroslavl Provincial Gazette [Iaroslavskie gubernskie vedomosti]*, ch. neofic. , no. 3, pp. 20-21; no. 4, p. 25 (in Russian).

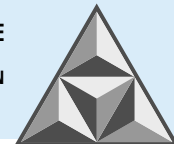


14. **Rooien, Jon van and Lavis, D.** (2014), The forgotten fortress of Rostov the Great, *The Dutch fortress in the Russian city: collection of articles*; ed. by **V.I. Aliavdin, D.B. Oinas** [*Gollandskaia krepost' v russkom gorode*], pp. 41-49 (in Russian).
15. Engraving by Wilhelm Gondius (1992), *Ancient engraved maps and plans of the XV - XVIII centuries* (in Russian).
16. **Sapozhnikov N.V.** (1991), *Oboronitel'nye sooruzheniya Smolenska (do postrojki kreposti 1596-1602 gg.)*, *Smolensk i Gnezdovo*, pp. 50-79 (in Russian).
17. **Menshikov, D.N.** (2017), On the other side of the wall (What was known about what was happening in besieged Smolensk K. Radziwill and M.B. Shein in 1633), *Istoriia voennogo dela: issledovaniia i istochniki* [*History of military affairs: research and sources*], no 54, pp. 270-288 (in Russian).
18. **Burtsev, I.G. and Deduk, A.V.** (2020), Fortifications of the Tula zasek: identified objects and prospects for further search», *Tulskii kreml i iuzhnye rubezhi Rossii* [*The Tula Kremlin and the southern borders of Russia*]: *Mat. All-Russian Sci. Conf.*, p. 271 (in Russian).
19. **Burtsev, I.G.** (2022), Archaeological study of the Tula zasek: in 2 vol. [Arheologicheskoe izuchenie tulskikh zasek: v 2 kn.], *Archeology of the Oka-The Don watershed*, kn. 2, pp. 48-90 (in Russian).
20. **Tyshkovskii, F.Iu.** (2024), Destruction of the architectural landscape of the fortress cities of the Swedish Empire: typology and methodology of definition, *Nauchnye trudy Sankt-Peterburgskoi akademii hudozhestv* [*Scientific papers of the St. Petersburg Academy of Arts*], no. 70. pp. 63-87 (in Russian).
21. **Orlenko, S.** (2025), "Shkot germans" in Muscovy: Western European officers in Russia of the XVII century [«Shkotskie nemtsy» v Moskovii: zapadnoevropeiskie ofitsery v Rossii XVII veka], *Rodina*, no. 11. Available at: <https://rodina-history.ru/2025/08/26/shkotskie-nemcy-v-moskovii.html> (accessed: 02.05.2026) (in Russian).
22. **Barg, M.A.** (1991), The category "civilization" as a method of comparative historical research, *Istoriia SSSR* [*History of the USSR*], no. 5, pp. 70-86 (in Russian).

Received 24.06.2026

Approved 21.07.2026

Accepted 25.08.2026



ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция строго придерживается норм и правил международной публикационной этики.

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

Представление статьи в журнал подразумевает следующее:

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

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

Авторские права

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

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

Приватность

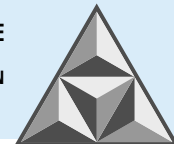
Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте данного журнала, используются исключительно для достижения целей, совпадающих с миссией журнала; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

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

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

Рубрики журнала

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



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

Статьи, направляемые в журнал, должны удовлетворять следующим требованиям:

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

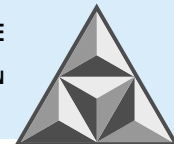
Статьи должны представлять сжатое, конкретное изложение результатов, без повторения одних и тех же данных в тексте, рисунках и таблицах.

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

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

Структура статьи

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



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

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

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

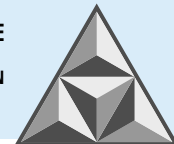
Основной текст научной статьи рекомендуется излагать согласно структуре IMRAD, содержащей следующие заголовки: Введение, Экспериментальная часть, Результаты и их обсуждение, Выводы, Список источников. Каждый заголовок приводится прописными буквами высотой 12 пт и выделяется одной пустой строкой перед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

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

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

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

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



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

Формат

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

Оформление литературных ссылок

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

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

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

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

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

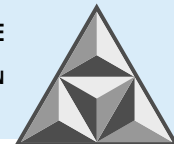
СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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

Поступила в редакцию

Одобрена после рецензирования

Принята к опубликованию



REFERENCES

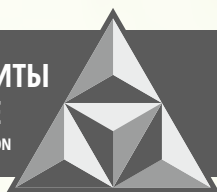
1. **Treybaks, E.A.** (2017) Utilization of unique properties of glued wood CLT panels in the construction of public buildings, *Innovatsii v nauke*, 10(71), pp. 68-69 (in Russian).
2. **Ammari, M.S., Belhadj, B., Bederina, M., Ferhat, A. & Quéneudec, M.** (2020) Contribution of hybrid fibers on the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

Received

Approved

Accepted

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



ТОМ 7, ВЫПУСК 3, 2026 | VOL. 7, ISS. 3, 2026

