

ISSN ONLINE 2782-1919

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



Том 6
выпуск

4
2025

VOLUME 6
ISSUE 4

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

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

**Том 6
Выпуск 4**

Ярославль 2025

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

«УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор: С.В. ФЕДОСОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва)

Заместитель главного редактора: П.Б. РАЗГОВОРОВ (д.т.н., проф., Ярославль)

Ответственный секретарь: С.З. КАЛАЕВА (д.т.н., доц., Ярославль)

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), М.О. БАКАНОВ (советник РААСН, д.т.н., доц., Москва), В.В. БЕЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Тверь), А.М. БЕЛОСТОЦКИЙ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), 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 (иностранный акад. РААСН, д.т.н., проф., Республика Беларусь, Минск), В.Л. МОНДРУС (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.И. МОХОВ (акад. РАЕН, д.т.н., проф., Москва), Т.А. НИЗИНА (советник РААСН, д.т.н., проф., Саранск), П.И. ПОСПЕЛОВ (д.т.н., проф., Москва), Ю.В. ПУХАРЕНКО (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербург), С.П. РУДОБАШТА (д.т.н., проф., Москва), В.Е. РУМЯНЦЕВА (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Иваново), В.П. СЕЛЯЕВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Саранск), М.Ю. 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. Дорохотов

Англ. перевод: Л.А. Тюкина

Корректор: И.А. Воронов

Компьютерная верстка: А.С. Фролов

Зарегистрирован: 27 ноября 2020 (Свидетельство ЭЛ № ФС 77 - 79733)

Периодичность: 4 раза в год

Подписка и распространение: Свободный доступ

PUBLISHED BY YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Established in November 2020, published quarterly

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

**Volume 6
Issue 4**

Yaroslavl 2025

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

«SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION»

EDITORIAL BOARD

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

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ / TABLE OF CONTENTS

Строительные конструкции, здания и сооружения

C.А. Тумаков, Г.Н. Голубь

- 8 Особенности расчета на прочность забивной железобетонной сваи малого сечения

Tumakov S.A., Golub' G.N.

Special features of strength calculation for small-section precast reinforced concrete driven piles

Строительные материалы и изделия

C.В. Федосов, М.О. Баканов, О.В. Александрова, П.Б. Разговоров, И.А. Кузнецов

- 23 Комплексное математическое моделирование в управлении физико-химическими процессами при транспортировке бетонной смеси

S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, O.V. Aleksandrova, P.B. Razgovorov, I.A. Kuznetsov

Comprehensive mathematical modelling in the management of physical and chemical processes during the transportation of concrete mixtures

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

А.И. Недосеко, Р.М. Халиков, С.Ю. Павлов, А.О. Глазачев

- 43 Супрамолекулярное улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий дорог структурирующими добавками функциональных полимеров

A.I. Nedoseko, R.M. Khalikov, S.Yu. Pavlov, A.O. Glazachev

Supra-molecular improvement of the performance characteristics of asphalt concrete road surfaces by structuring additives of functional polymers

A.B. Вихрев, Ю.С. Кандрашкина

- 55 Двойной крекинг как перспективный метод получения неокисленного битума для дорожного строительства

A.V. Vikhrev, Yu.S. Kand rashkina

Double cracking as a promising production method non-oxidized bitumen for road construction

Л.А. Богуславский, Г.В. Проваторова

- 67 Использование искусственного интеллекта в контексте проектирования автомобильных дорог

L.A. Boguslavskiy, G.V. Provatorova

The use of artificial intelligence within the design of automobile roads

Архитектура зданий и сооружений.

Творческие концепции архитектурной деятельности

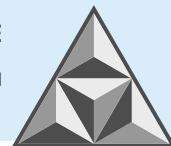
С.В. Растворгусев, Е.В. Голубева

- 80 Символизм в ландшафтной архитектуре

S.V. Rastorguev, E.V. Golubeva

Symbolism in landscape architecture

- 94 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 624.154.1

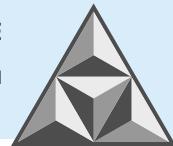
DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-8-22

Особенности расчета на прочность забивной железобетонной сваи малого сечения

С.А. Тумаков, Г.Н. Голубь

Сергей Анатольевич Тумаков, Григорий Николаевич Голубь*

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация
*sergtum1958@yandex.ru, golubgn@ystu.ru**



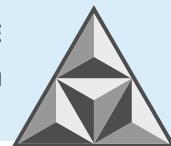
Рассмотрены сваи сечением 150×150 мм заводского изготовления, применяемые в строительстве малоэтажных легких домов. Приведены результаты расчета их несущей способности в фундаментах с низким и высоким ростверками. Изучены основания, соотнесенные к различным прочностным и деформационным свойствам грунтов. Результаты представлены с применением электронных таблиц. Усилия в сечениях свай в составе свайного фундамента определены в программном комплексе статического расчета строительных конструкций. Свая в расчетной схеме моделировалась с учетом бокового отпора грунта и влияния соседних свай. На основе полученных результатов составлены графики несущей способности свай в зависимости от соотношения в расчетном сечении изгибающего момента и продольной силы. Даны рекомендации по применению забивной железобетонной сваи сечением 150×150 мм в составе фундамента с учетом условий сопряжения с конструкцией ростверка.

Ключевые слова: сваи железобетонные, несущая способность, отпор грунта, внутренние силовые факторы, гибкость, расчетные формулы

Для цитирования:

Тумаков С.А., Голубь Г.Н. Особенности расчета на прочность забивной железобетонной сваи малого сечения // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 4. С. 8-22.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-8-22



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-8-22

Special features of strength calculation for small-section precast reinforced concrete driven piles

S.A. Tumakov, G.N. Golub'

Sergey Anatolevich Tumakov, Grigoriy Nikolaevich Golub**

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

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



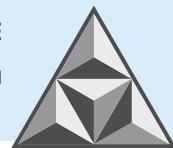
The paper considers factory-made piles with a cross-section of 150×150 mm used in the construction of low-rise light houses. The authors present the results of calculating their bearing capacity in foundations with low and high pile caps. The bases related to various strength and deformation properties of soils are studied. The results are presented using spreadsheets. The forces in the pile cross-sections as part of the pile foundation were obtained using a software package for static calculation of building structures. The pile in the calculation scheme was modelled taking into account the lateral resistance of the soil and the influence of neighbouring piles. Based on the results obtained, graphs of the bearing capacity of piles were compiled depending on the ratio of the bending moment and longitudinal force in the design section. The authors provide recommendations for the use of driven reinforced concrete piles with a cross-section of 150×150 mm as part of the foundation, taking into account the conditions of connection with the pile cap structure.

Keywords: reinforced concrete piles, bearing capacity, soil resistance, internal force factors, flexibility, calculation formulas

For citation:

Tumakov S.A., Golub' G.N. Special features of strength calculation for small-section precast reinforced concrete driven piles // *Smart composites in construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 4. P. 8-22.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-8-22



ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена вопросу анализа несущей способности забивной железобетонной сваи малого сечения в грунтовых основаниях в фундаментах с низким и высоким ростверками. Проведены исследования свай сечением 150×150 мм, выполненных из тяжелого бетона с армированием рабочей продольной арматурой класса А400 и А500.

Забивные железобетонные сваи малого сечения размером 200×200 мм широко применялись в сельском строительстве еще с прошлого столетия. Заводское изготовление таких свай осуществлялось по ГОСТ 19804 и серии 1.011.1-10 в.1 [1]. В последнее время с ростом строительства легких малоэтажных домов с деревянным каркасом и домов со стенами из легких материалов, наряду с традиционными видами фундаментов, начали массово применять свайные фундаменты, исполненные с применением забивных железобетонных свай сечением 150×150 мм. Однако сваи с указанным сечением в [1] и иных нормативных документах отсутствуют. На производителей железобетонных конструкций и проектировщиков ложится повышенная ответственность за изготовление этих свай и проектные решения для фундаментов.

Следовательно, исследование несущей способности забивной железобетонной сваи сечением 150×150 мм в свайных фундаментах, устроенных в различных грунтовых основаниях, является необходимым и актуальным.

Использование свай малого сечения в свайных фундаментах для малоэтажных объектов с небольшими нагрузками на фундаменты обусловлено следующими причинами:

- достаточность прочностных и геометрических параметров свай для обеспечения безопасной и надежной эксплуатации объекта;
- снижение материоемкости по сравнению со стандартными сваями;
- снижение затрат на погружение и транспортировку свай.

Общепризнано, что расчет свайных оснований и практическое использование свай в различных грунтовых условиях подтверждается колоссальным объемом экспериментальных и теоретических исследований, выполненных как в России, так и за рубежом, и большим опытом безаварийной эксплуатации зданий и сооружений на свайных фундаментах. Однако значительный ряд вопросов, имеющих отношение к конструктивным решениям свай и методам их расчета, требует уточнения и дальнейшего развития.

Так, в [2] выполнена оценка несущей способности железобетонных свай на горизонтальную нагрузку, рассмотрены методы расчета свай, проведено сравнение опытных данных с результатами, полученными по существующим методикам, и даны рекомендации по оценке несущей способности сваи с учетом действующих на нее нагрузок. В [3] оцениваются факторы, которые часто упускаются из виду при анализе свай (пассивное давление грунта и метод контакта сваи с грунтом), и дается количественная оценка их совокупного влияния на несущую способность сваи и деформацию свайного фундамента.

В [4] представлен анализ численного исследования взаимодействия с грунтом сваи, подверженной осевым и горизонтальным нагрузкам. При этом изучение системы свая – грунт выполнено в программном комплексе с использованием конечно-разностного метода.

Задача о длительной несущей способности одиночной сваи, с учетом ее взаимодействия с грунтами и использованием реологической модели А.З. Тер-Мартиросяна, решена в [5], где приведены основные формулы для расчета в упругой и упруго-вязкой постановке.

В [6] рассмотрено применение в проектах железобетонных забивных свай малого сечения, применяемых в строительстве легких зданий, и проанализированы требования действующих



документов к расчету фундаментов из этих свай. Основные результаты исследований по использованию таких конструкций для фундаментов малоэтажных зданий представлены в [7]. По итогам натурных испытаний свай малого сечения получены уточненные расчетные характеристики лобового сопротивления грунта и сил трения по боковой поверхности.

Экономический аспект применения забивных железобетонных свай малого сечения исследован в [8].

Целью настоящей работы является исследование несущей способности забивной железобетонной сваи малого сечения 150×150 мм в различных грунтовых условиях, анализ полученных результатов и разработка рекомендаций по практическому применению и повышению надежности проектных решений малоэтажного строительства.

Актуальность исследования связана с необходимостью уточнения несущей способности и, соответственно, возможностью использования забивной железобетонной сваи сечением 150×150 мм в различных грунтовых условиях.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Выпускаемые забивные железобетонные свай малого квадратного сечения 150×150 мм различаются по длине, классу бетона, а также классу и диаметру продольного армирования. Сечение сваи показано на рис. 1.

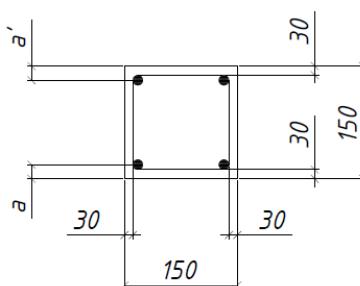


Рис. 1. Поперечное сечение сваи

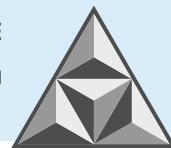
Fig. 1. Cross section of the pile

Наиболее распространеными на рынке являются сваи малого квадратного сечения 150×150 мм, изготовленные из бетона классов B20 и B25, армированные четырьмя продольными стержнями из арматуры A400 диаметром 8 или 10 мм, или арматуры A500 диаметром 8 мм. Длина выпускаемых забивных железобетонных свай сечением 150×150 мм находится в диапазоне 2.0-6.0 м. Сваи сечением 150×150 мм длиной свыше 6.0 м встречаются крайне редко.

В настоящей работе рассмотрены забивные сваи малого квадратного сечения 150×150 мм из бетона классов B15, B20 и B25, армированные четырьмя продольными стержнями из стержневой арматуры A400 диаметром 8 мм или 10 мм либо арматурой A500 диаметром 8 мм. Расчеты несущей способности сваи, в соответствии с действующими нормативами, выполнены по несущей способности по грунту (СП 24.13330.2021), по несущей способности по материалу (СП 63.13330.2018).

При определении несущей способности по материалу сваю рассматривали как стержневой элемент, защемленный в грунте на расстоянии l_1 . Указанное расстояние рассчитывали:

$$l_1 = l_0 + \frac{2}{\alpha_{\varepsilon}}, \quad (1)$$



где l_0 – длина участка сваи от подошвы высокого ростверка до уровня планировки грунта, м (рис. 2); при низком ростверке $l_0 = 0$;

α_ε – коэффициент деформации, м^{-1} ; его вычисляли по формуле, представленной в [10]:

$$\alpha_\varepsilon = \sqrt[5]{\frac{Kb_p}{EI}}. \quad (2)$$

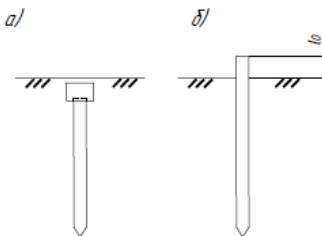


Рис. 2. Схема к вычислению расчетной длины сваи: *а* – с низким ростверком; *б* – с высоким ростверком

Fig. 2. Diagram for calculating the estimated length of a pile: *a* – with low pile cap; *b* – with high pile cap

В произведенных расчетах коэффициент пропорциональности K , $\text{kH}\cdot\text{м}^4$, характеризующий боковой отпор грунта на сваю, принят по СП 24.13330.2021 (см. табл. 1).

Таблица 1. Коэффициенты пропорциональности, характеризующие боковой отпор на сваю

Table 1. Proportionality coefficients characterising lateral resistance to piles

Грунты, окружающие сваю, и их характеристики	Коэффициент пропорциональности K , $\text{kH}\cdot\text{м}^4$
Глины и суглинки текучепластичные ($0.75 < I_L \leq 1$)	1350 – 2350
Глины и суглинки мягкопластичные ($0.5 < I_L \leq 0.75$); супеси пластичные ($0 \leq I_L \leq 1$); пески пылеватые ($0,6 \leq e \leq 0,8$)	2350 – 4000
Глины и суглинки тугопластичные и полутвердые ($0 \leq I_L \leq 0.5$); супеси твердые ($I_L < 0$); пески мелкие ($0.6 \leq e \leq 0.75$); пески средней крупности ($0.55 \leq e \leq 0.70$)	4000 – 6000
Глины и суглинки твердые ($I_L < 0$); пески крупные ($0.55 \leq e \leq 0.70$)	6000 – 10000
Пески гравелистые ($0.55 \leq e \leq 0.70$); крупнообломочные грунты с песчаным заполнителем	16750 – 33350

Условная ширина сваи квадратного сечения 150×150 мм равна:

$$b_p = (1.5 \cdot 0.15 + 0.5) = 0.725 \text{ м};$$

момент инерции поперечного сечения $I = 4.22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^4$.

Начальные модули упругости (E) бетона сваи в расчетах принимали согласно СП 63.13330.2018: для класса прочности В15 – $E = 24 \cdot 10^6 \text{ кПа}$; для класса прочности В20 – $E = 27.5 \cdot 10^6 \text{ кПа}$; для класса прочности В25 – $E = 30 \cdot 10^6 \text{ кПа}$.

В исследовании рассматривали однорядное расположение свай и два варианта сопряжения сваи с ростверком. Первый вариант – шарнирное сопряжение, а второй – жесткое сопряжение сваи с ростверком. В свайных фундаментах невозможность смещения голов свай в расчетном горизонтальном направлении обеспечивается устройством в составе фундаментов наклонных свай. Реализуемые решения свайных фундаментов из свай малого сечения под малоэтажные легкие дома не предусматривают в своем составе устройства наклонных свай. По первому варианту сопряжения сваи с ростверком при определении расчетной длины сваи назначили коэффициент $\mu = 2$. По второму варианту назначение коэффициента μ требует отдельных расчетов для каждого конкретного проектного решения, поскольку размеры сечения ростверков для легких зданий при однорядном расположении



сваи не обеспечивают ограничение поворота головы сваи. В настоящей работе для жесткого сопряжения сваи с ростверком сначала выполнены вычисления при $\mu = 1$, а затем они были скорректированы для коэффициента $\mu = 1.11$, определенного в программном комплексе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Расчет несущей способности железобетонной забивной сваи малого сечения 150×150 мм при действии продольной нагрузки, приложенной с небольшими эксцентрикитетами $e_0 \leq h/30 = 0.005$ м, выполнен по формуле:

$$N_{ult} = \varphi (AR_b + A_{s,tot}R_{sc}). \quad (3)$$

где A – площадь поперечного сечения сваи;

$A_{s,tot}$ – площадь продольной арматуры в сечении элемента;

R_b и R_{sc} – расчетные сопротивления сжатию бетона и арматуры.

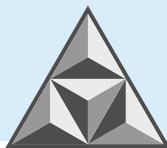
Результаты расчетов представлены в табл. 2-5.

Таблица 2. Предельная нагрузка N_{ult} при низком ростверке и шарнирном сопряжении сваи с ростверком ($\mu = 2$)

Table 2. Ultimate load N_{ult} with low pile cap and hinged coupling between pile and pile cap ($\mu = 2$)

Бетон класса B15			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	6000	10000
l_1 , м	2.01	1.49	1.35
l_{ef} , м	4.03	3.00	2.70
l_{ef}/h	26.9 > 20.0	19.9	18.00
φ	–	0.70	0.75
N_{ult} , кН, при 4d10A400	–	213	228
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	–	184	197
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	–	196	210
Бетон класса B20			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	7000	10000
l_1 , м	2.07	1.49	1.39
l_{ef} , м	4.14	2.98	2.77
l_{ef}/h	27.6 > 20.0	19.9	18.48
φ	–	0.70	0.74
N_{ult} , кН, при 4d10A400	–	260	274
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	–	231	244
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	–	243	256
Бетон класса B25			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	7400	10000
l_1 , м	2.11	1.50	1.41
l_{ef} , м	4.21	3.00	2.82
l_{ef}/h	28.1 > 20.0	19.98	18.81
φ	–	0.70	0.73
N_{ult} , кН, при 4d10A400	–	307	320
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	–	279	291
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	–	290	302

Их анализ показал, что при эксцентрикитетах продольной силы, не превышающих $h/30 = 0.005$ м, для грунтов, расположенных в расчетной зоне, предельная нагрузка при шарнирном сопряжении сваи с ростверком по формуле (3) определяться не может.

Таблица 3. Предельная нагрузка N_{ult} при низком ростверке и жестком сопряжении сваи с ростверком ($\mu = 1$)Table 3. Ultimate load N_{ult} with low pile cap and rigid coupling between pile and pile cap ($\mu = 1$)

Бетон класса B15			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	6000	10000
l_1 , м	2.01	1.49	1.35
l_{ef} , м	2.01	1.49	1.35
l_{ef}/h	13.40	19.90	17.99
φ	0.85	0.90	0.91
N_{ult} , кН, при 4d10A400	258	272	274
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	224	236	238
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	237	251	252
Бетон класса B20			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	7000	10000
l_1 , м	2.07	1.49	1.39
l_{ef} , м	2.07	1.49	1.39
l_{ef}/h	13.80	9.93	9.24
φ	0.85	0.90	0.90
N_{ult} , кН, при 4d10A400	314	333	335
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	280	297	298
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	293	312	313
Бетон класса B25			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	7400	10000
l_1 , м	2.11	1.50	1.41
l_{ef} , м	2.11	1.50	1.41
l_{ef}/h	14.04	9.90	9.40
φ	0.84	0.90	0.90
N_{ult} , кН, при 4d10A400	369	397	395
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	335	358	359
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	349	372	374

В этих случаях расчет требуется проводить по прочности материала как внецентренно-сжатого элемента:

$$N \cdot e \leq R_b \cdot bx(h_0 - 0.5x) + R_{sc} \cdot A'_s(h_0 - a'). \quad (4)$$

Анализ результатов расчета также показал, что при эксцентрикитетах продольной силы, не превышающих $h/30 = 0.005$ м, при жестком сопряжении сваи с ростверком предельная нагрузка по формуле (3) может быть определена для всех грунтов, расположенных в расчетной зоне.

Дальнейшее исследование касается свайного фундамента с высоким ростверком. Размер участка l_0 принимали равным 0.5 м и 1.0 м. Попытки вычислить по формуле (3) несущую способность железобетонной забивной сваи малого квадратного сечения 150×150 мм с шарнирным сопряжением с ростверком при действии продольной нагрузки, приложенной с небольшими эксцентрикитетами $e_0 \leq h/30 = 0.005$ м, не привели к успеху. В обоих случаях для любых грунтов, находящихся в расчетной зоне, значение l_{ef}/h превысило предельный размер. Более того, для высокого ростверка с $l_0 = 1.0$ м и грунтов, расположенных в расчетной зоне, при коэффициенте пропорциональности $K < 4000$ кН·м⁻⁴ для бетона класса B15, $K < 4600$ кН·м⁻⁴ для бетона класса B20 и $K < 5000$ кН·м⁻⁴ для бетона класса B25, гибкость сваи превышает предельное значение, что приводит к необходимости изменять конструктивное решение при проектировании свайного фундамента (увеличивать сечение сваи либо снижать параметр l_0).

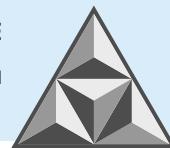


Таблица 4. Предельная нагрузка N_{ult} при высоком ростверке ($l_0 = 0.5$ м) и жестком сопряжении сваи с ростверком ($\mu = 1$)
Table 4. Ultimate load N_{ult} with high pile cap ($l_0 = 0.5$ m) and rigid coupling of pile with pile cap ($\mu = 1$)

Бетон класса B15			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	6000	10000
l_1 , м	2.51	1,99	1.85
l_{ef} , м	2.51	1.99	1.85
l_{ef}/h	16.80	13.30	12.30
φ	0.78	0.85	0.87
N_{ult} , кН, при 4d10A400	237	259	262
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	206	224	228
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	218	238	242
Бетон класса B20			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	6800	10000
l_1 , м	2.57	2.00	1.89
l_{ef} , м	2.57	2.00	1.89
l_{ef}/h	17.12	13.32	12.58
φ	0.78	0.85	0.86
N_{ult} , кН, при 4d10A400	287	316	320
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	256	282	285
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	268	296	299
Бетон класса B25			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	7400	10000
l_1 , м	2.61	2.00	1.91
l_{ef} , м	2.61	2.00	1.91
l_{ef}/h	17.37	13.32	12.74
φ	0.77	0.85	0.86
N_{ult} , кН, при 4d10A400	336	374	377
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	305	340	343
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	318	353	357

Таблица 5. Предельная нагрузка N_{ult} при высоком ростверке ($l_0 = 1.0$ м) и жестком сопряжении сваи с ростверком ($\mu = 1$)
Table 5. Ultimate load N_{ult} with high pile cap ($l_0 = 0.5$ m) and rigid coupling of pile with pile cap ($\mu = 1$)

Бетон класса B15			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	4300	10000
N_{ult} , кН, при 4d10A400	–	213	246
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	–	185	213
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	–	196	227
Бетон класса B20			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	4900	10000
N_{ult} , кН, при 4d10A400	–	260	298
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	–	232	266
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	–	243	279
Бетон класса B25			
Коэффициент пропорциональности K , кН·м ⁻⁴	1350	5400	10000
N_{ult} , кН, при 4d10A400	–	306	351
N_{ult} , кН, при 4d 8A400	–	278	319
N_{ult} , кН, при 4d 8A500	–	290	332



Следующим шагом исследования несущей способности сваи сечением 150×150 мм явилась проверка несущей способности по формуле (4) для различных комбинаций соотношения изгибающего момента и продольной силы. При выполнении такой проверки рассматривалось силовое воздействие, включающее постоянную и длительно действующую нагрузку. В реальных расчетах учет размера кратковременной нагрузки выполняется в соответствии с силовыми и прочими воздействиями на здание и сооружение. Кроме этого, в формуле (4) фигурирует расчетная длина элемента, которая напрямую зависит от характеристик грунта (выражается коэффициентом пропорциональности K). Следовательно, полученные данные являются ограниченными по виду нагрузок и могут быть использованы лишь для предварительной оценки несущей способности забивной железобетонной сваи сечением 150×150 мм, для конкретных грунтовых условий. Так, на рис. 3 приведены оценочные графики несущей способности сваи из бетона класса B20, армированной продольной арматурой d10A400 и d8A500, для расположенных в расчетной зоне грунтов с $K = 1350 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$ и шарнирного сопряжения сваи с низким ростверком.

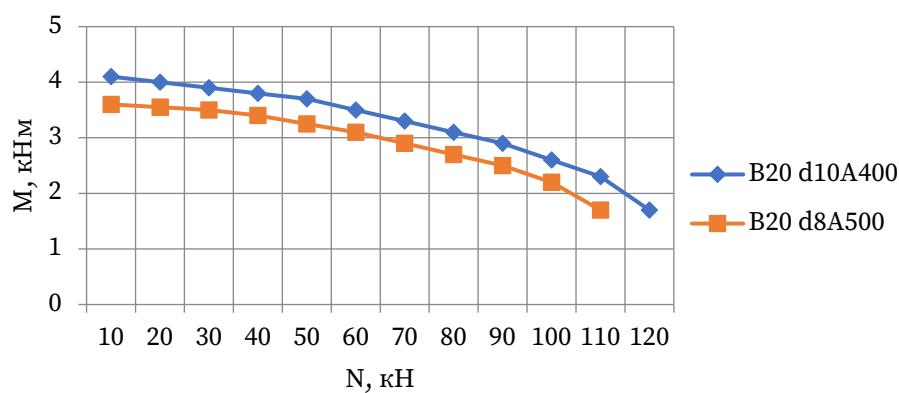


Рис. 3. Оценочные графики несущей способности сваи с шарнирным сопряжением с низким ростверком
Fig. 3. Estimated graphs of the bearing capacity of a pile with a hinged coupling with a low pile cap

На рис. 4 представлены оценочные графики несущей способности забивной железобетонной сваи сечением 150×150 мм из бетона класса B20, армированной продольной арматурой d10A400 и d8A500, для шарнирного сопряжения сваи с высоким ростверком. Кривые для расположенных в расчетной зоне грунтов с $K = 1350 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$ при $l_0 = 0.5 \text{ м}$ и $K = 4900 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$ при $l_0 = 1.0 \text{ м}$ являются идентичными.

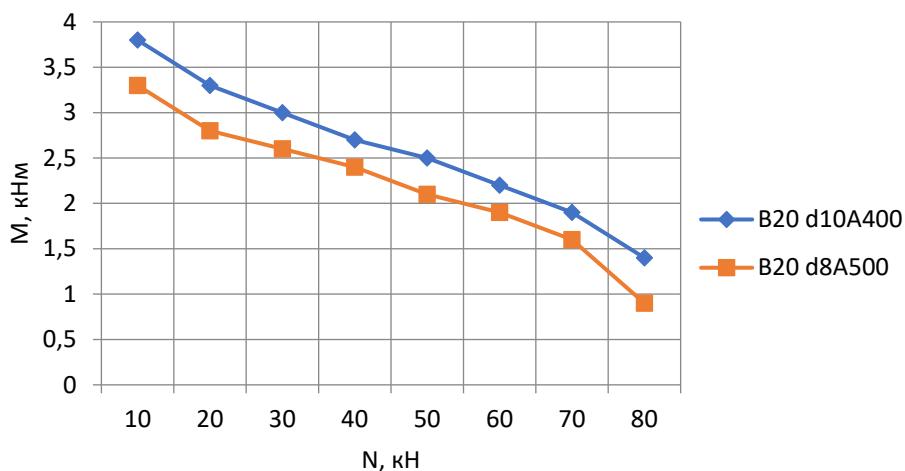


Рис. 4. Оценочные графики несущей способности сваи с шарнирным сопряжением с высоким ростверком
Fig. 4. Estimated graphs of the bearing capacity of a pile with a hinged coupling with a high pile cap



Для всех рассмотренных случаев несущая способность сваи по материалу оказывалась больше несущей способности сваи по грунту, вычисленной согласно СП 24.13330.2021.

В рамках исследований проведена проверка несущей способности сваи для конкретного примера свайного ленточного фундамента под малоэтажным зданием размером 6×8 м. Свайные фундаменты приняты ленточными с однорядным расположением забивных железобетонных свай сечением 150×150 мм и длиной 3 м с шарнирным сопряжением с низким ростверком. Шаг свай составляет 2.0 м. Сваи изготовлены из бетона класса прочности В20 с армированием продольной арматурой 4d10A400. В основании расположены мелкие пески средней плотности ($K = 6000 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$).

Несущая способность по грунту, определенная стандартным способом, составила $F_d = 96.5 \text{ кН}$. Тогда допускаемая нагрузка на сваю из расчета несущей способности по грунту составит 69 кН. Предварительная минимальная оценочная несущая способность сваи по материалу при $K = 1350 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$ (для окончательной проверки обязательным является пересчет при $K = 6000 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$ по рис. 3) – комбинация $N_{\text{ult}} = 100 \text{ кН} (> F_d = 96.5 \text{ кН})$ и $M = 2.6 \text{ кНм}$.

При расчетах свай очень важно знать местоположение максимальных моментов по их длине. Известны случаи, когда в расчетах не учитывали изменение внутренних силовых факторов по длине сваи и расчет прочности осуществляли на заниженные размеры M и N [9]. Для вычисления расчетной продольной силы и изгибающих моментов в сечении сваи нами создана числовая модель в программном комплексе статических расчетов (рис. 5).

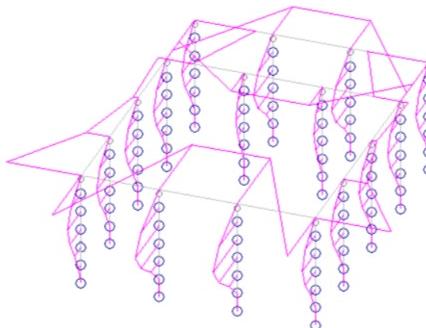


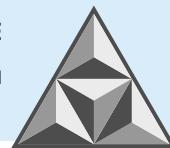
Рис. 5. Расчетная схема свайного фундамента с эпюрай моментов
Fig. 5. Calculation scheme of the pile foundation with a graph of moments

Сваи в расчетной модели заданы как пространственные стержни, опирающиеся острием на вертикальную упругую связь. Упругая вертикальная связь под острием сваи моделировалась конечным элементом КЭ-51. Жесткость вертикальной связи найдена стандартным способом [10] при помощи электронной таблицы из линейной зависимости $R_z = N/s$, где N – размер вертикальной силы на сваю, s – размер вертикальной деформации сваи. Вертикальная деформация сваи определена в соответствии с СП 24.13330.2021 как осадка отдельной сваи с номером i с учетом влияния соседних свай по формуле:

$$s = \beta \frac{N_i}{G_1 l} + \sum_{j \neq i} \delta_{ij} \frac{N_j}{G_1 l}. \quad (5)$$

В формуле (5) первое слагаемое является осадкой одиночной сваи с номером i ; δ_{ij} – коэффициенты влияния, вычисляемые в зависимости от расстояния a между i -сваей и соседними j -свяями; $N_{i(j)}$ – нагрузка на $i(j)$ -сваю.

Жесткость связи КЭ-51 составила $R_z = 10.7 \text{ МН}\cdot\text{м}^{-1}$ для мелких песков средней плотности ($e = 0.6$; $K = 6000 \text{ кН}\cdot\text{м}^{-4}$).



Жесткость специальных элементов, моделирующих отпор грунта на сваю в горизонтальном направлении, вычисляли стандартным способом по СП 24.13330.2021 и с использованием источника [11] в электронной таблице:

$$X_i = K z_i b_p l_i. \quad (6)$$

Таким образом, в рамках выполненного исследования нами создана имитационная модель свайных фундаментов, важность которой, отмеченная в работе [12], сводится к возможности осуществления анализа свай на прочность в различных геологических условиях.

В результате получены расчетные значения силовых факторов для проверки прочности сечения сваи: $M = 1.4$ кНм; $M_l = 0.01$ кНм; $N = 63$ кН; $N_l = 30$ кН. Расчет прочности поперечного сечения сваи по формуле (4) показал выполнение требуемого условия:

$$N \cdot e = 4.2 \text{ кНм} \leq R_b \cdot bx(h_0 - 0.5x) + R_{sc} \cdot A'_s(h_0 - a') = 10.3 \text{ кНм.}$$

В качестве второго варианта рассмотрено то же конструктивное решение, но с жестким сопряжением сваи с ростверком. Получены следующие значения силовых факторов для проверки прочности сечения сваи: $M = 1.0$ кНм; $M_l = 0.01$ кНм, $N = 63$ кН, $N_l = 30$ кН. Расчетом на устойчивость определен коэффициент длины: $\mu = 1.11$. Прочность поперечного сечения сваи вновь показала выполнение требуемого условия:

$$N \cdot e = 3.6 \text{ кНм} \leq R_b \cdot bx(h_0 - 0.5x) + R_{sc} \cdot A'_s(h_0 - a') = 10.3 \text{ кНм.}$$

ВЫВОДЫ

Забивные железобетонные сваи малого сечения 150×150 мм могут применяться в свайных фундаментах легких малоэтажных зданий.

Несущая способность забивных железобетонных свай малого сечения 150×150 мм по прочности, в зависимости от материалов сваи и грунтовых условий, при нагрузках, приложенных с небольшими эксцентрикитетами, довольно высока (≥ 180 кН). Однако не следует полагаться на размер N_{ult} , полученный по формуле (3): при свободном сопряжении сваи с низким ростверком в грунтах с коэффициентом пропорциональности 1350 кН·м⁻⁴ и с высоким ростверком в любых грунтах при $l_0 > 0.5$ м расчет несущей способности по формуле (3) невозможен даже при малых эксцентрикитетах. Это связывается с большой гибкостью ствола сваи. При жестком сопряжении сваи с высоким ростверком ограничение расчета по формуле (3) наступает при $l_0 > 0.75$ м для $K = 1350$ кН·м⁻⁴.

При проектировании свайных фундаментов с использованием забивных железобетонных свай сечением 150×150 мм необходимо выполнять их проверку как внецентренно-сжатых элементов по формуле (4) с учетом требований по ограничению гибкости. Положение сечения и действующие в нем внутренние силовые факторы следует определять расчетом. При этом коэффициент μ для вычисления длины сваи также необходимо корректировать расчетом на устойчивость в пространственной постановке задачи.

При разработке проектных решений свайных фундаментов с жестким сопряжением сваи с ростверком важнейшими являются конструктивные мероприятия, обеспечивающие такое сопряжение.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Серия 1.011.1-10.** Сваи забивные железобетонные. Вып. 1. Ч. 1. Сваи цельные сплошного квадратного сечения с ненапрягаемой арматурой. Рабочие чертежи. М. Госстрой СССР. 1989. 150 с.



2. **Знаменский В.В., Знаменская Е.П., Чунюк Д.Ю., Халиуллина Д.Р.** К вопросу об оценке несущей способности забивных железобетонных свай стандартных сечений на горизонтальную нагрузку // *Вестник Пермского нац. исслед. политех. ун-та. Строительство и архитектура*. 2018. Т. 9. № 1. С. 60-69.
3. **Kim J., Lee J.-Y., Lim D.-B., Han J.-G.** Analysis of Influence Factor of Soil-Structure Interaction Considered in Pile Analysis using Finite Element Analysis // *Civil Engineering Journal*. 2025. 11 (7). P. 2701-2714.
4. **Khodair Y.** Numerical Analysis of Pile-Soil Interaction under Axial and Lateral Loads // *Inter. J. Concr. Struct. Mat.* 2014; DOI: 10.1007/S40069-014-0075-2
5. **Тер-Мартиросян З.Г., Тер-Мартиросян А.З., Ермощина Л.Ю.** Осадка и длительная несущая способность свай // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 9. С. 18-23.
6. **Бикметов Р.М., Денисов О.Л.** Применение фундаментов из свай малого сечения // 68-я науч.-техн. конф. студ., аспирантов и молодых ученых УГНТУ: Сб. мат. конф., Уфа, 18-20 апреля 2017 г. Т. 2. Уфа: Уфимский гос. нефт. техн. ун-т, 2017. С. 189-191.
7. **Кравцов В.Н., Лапатин П.В.** Сваи малого поперечного сечения для фундаментов малоэтажных зданий, упрочнения грунтов и их расчет // *Вестник Половского государственного университета*. Сер. F. Строительство. Прикладные науки. 2016. № 16. С. 102-107.
8. **Преснов О.М., Костылев П.Н., Лукина Л.А.** Технико-экономическая целесообразность применения микросвай из железобетона для фундаментов малоэтажного домостроения // *Экономические науки*. 2021. № 196. С. 124-127.
9. **Гаврилов А.В., Козин А.В., Тумаков С.А., Травин С.В.** О некоторых вопросах прохождения экспертизы конструктивного раздела проектной документации // *Техническое регулирование. Строительство, проектирование и изыскания*. 2011. № 2. С. 28-30.
10. **Тумаков С.А., Голубь Г.Н.** Оценка несущей способности железобетонной плиты пола цеха на армированном грунтовом основании // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4. № 4. С. 8-19.
11. **Агеев А.С., Тумаков С.А.** Моделирование и расчет комбинированных свайно-плитных фундаментов в SCAD // 75-я Всеросс. науч.-техн. конф. студ., магистрантов и аспирантов с межд. уч.: Сб. мат. конф.: в 3-х ч. Ярославль, 20-21 апреля 2022 г. Т. 75. Ярославль: Ярослав. гос. тех. ун-т, 2022. С. 444-448.
12. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцев И. С., Зайцева И.А.** Особенности использования отечественного и зарубежного инструментария имитационного моделирования строительных конструкций зданий и сооружений // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4. № 2. С. 18-31.

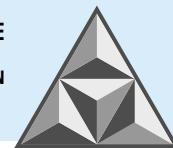
Поступила в редакцию 03.10.2025

Одобрена после рецензирования 27.10.2025

Принята к опубликованию 18.11.2025

REFERENCES

1. **Series 1.011.1-10** (1989), Driven reinforced concrete piles, iss. 1, part 1. Solid solid square piles with non-stressed reinforcement. Working drawings. M. Gosstroy of the USSR.
2. **Znamenskiy, V.V., Znamenskaya, E.P., Chunyuk, D.Yu. and Khaliullina, D.R.** (2018), "To the question about the assessment bearing capacity driving reinforced concrete piles of standard cross sections on horizontal load", *Bull. of Perm. Nats. Issled. Un-ta. Construction and Architecture*, no. 1, pp. 60-69. DOI: 10.15593/2224-9826/2018.1.06 (in Russian).
3. **Kim, J., Lee, J.-Y., Lim, D.-B. and Han, J.-G.** (2025), "Analysis of Influence Factor of Soil-Structure Interaction Considered in Pile Analysis using Finite Element Analysis", *Civ. Eng. J.*, vol. 11, no. 7, pp. 2701-2714. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2025-011-07-04>.
4. **Khodair, Y.** (2014), "Numerical Analysis of Pile-Soil Interaction under Axial and Lateral Loads", *Inter. J. Concr. Struct. Mat.*; doi:10.1007/S40069-014-0075-2.
5. **Ter-Martirosyan, Z.G., Ter-Martirosyan, A.Z. and Ermoshina, L.Yu.** (2021), "Settlement and long-term bearing capacity of the pile", *Ind. and Civ. Eng.*, no. 9, pp. 18-23. DOI 10.33622/0869-7019.2021.09.18-23 (in Russian).



6. **Bikmetov, R.M. and Denisov, O.L.** (2017), "Application of foundations from small-section piles", 68th scientific and technical conf. of students, graduate students and young scientists of USTU: Coll. of conf. mat., vol. 2, Ufa, Ufa State Petroleum Technical University, pp. 189-191 (in Russian).
7. **Kravtsov, V.N. and Lapatin, P.V.** (2016), "Piles of small cross section for foundations of low-rise buildings, soil hardening and their calculation", *Bull. of Polotsk State University, Ser. F. Construction. Appl. Sci.*, no. 16, pp. 102-107 (in Russian).
8. **Presnov, O.M., Kostylev, P.N. and Lukina, L.A.** (2021), "Technical and economic feasibility of using micro-piles made of reinforced concrete for foundations of low-rise housing construction", *Economic Sci.*, no. 196, pp. 124-127. DOI 10.14451/1.196.124 (in Russian).
9. **Gavrilov, A.V., Kozin, A.V., Tumakov, S.A. and Travin, S.V.** (2011), "On some issues of passing the examination of the design section of project documentation", *Technical regulation. Construction, design and survey*, no. 2, pp. 28-30 (in Russian).
10. **Tumakov, S.A. and Golub, G.N.** (2023), "Assessment of the load-bearing capacity of the existing reinforced concrete floor slab of the workshop on a reinforced soil foundation", *Smart Composite in Construction*, vol. 4, no. 4, pp. 8-19 (in Russian).
11. **Ageev, A.S. and Tumakov, S.A.** (2022), "Modeling and calculation of combined pile-slab foundations in SCAD", *Seventy-fifth all-Russian scientific and technical conference of students, undergraduates and graduate students with international participation: Coll. conf. mat.: in 3 parts*, Yaroslavl, Yaroslavl State Technical University, vol. 75, pp. 444-448 (in Russian).
12. **Fedosov, S.V. Fedoseev, V.N., Zaitsev, I.S. and Zaitseva, I.A.** (2023), "Features of domestic and foreign simulation tools use for structural modeling of civil engineering buildings and constructions", *Smart Composite in Construction*, vol. 4, no. 2, pp. 18-31 (in Russian).

Received 03.10.2025

Approved 27.10.2025

Accepted 18.11.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 614.841.411

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-23-42

Комплексное математическое моделирование в управлении физико-химическими процессами при транспортировке бетонной смеси

**С.В. Федосов, М.О. Баканов, О.В. Александрова,
П.Б. Разговоров, И.А. Кузнецов**

Сергей Викторович Федосов¹, Максим Олегович Баканов^{1,*}, Ольга Владимировна Александрова¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация

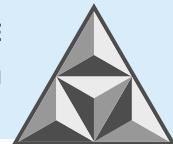
fedosov-academic53@mail.ru, mask-13@mail.ru, aleks_olvl@mail.ru*

Павел Борисович Разговоров²

²Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация
razgoverovpb@ystu.ru

Илья Александрович Кузнецов³

³Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, Иваново, Российская Федерация
ikuz1999@list.ru



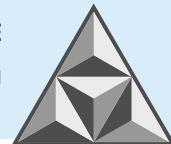
Представлена комплексная математическая модель и система адаптивного управления для прогнозирования и поддержания качества бетонной смеси в процессе ее транспортировки в барабанах автобетоносмесителей. Целью исследования является преодоление разрыва между детализированными физико-математическими моделями и задачами оперативного управления в динамических условиях. Разработанный программный комплекс продемонстрировал высокую точность в прогнозировании кинетики гидратации ($RMSD = 1.0\%$) и влажностного режима ($RMSD = 2.0\%$). Показано, что оптимизация управляющего воздействия позволяет снизить скорость вращения барабана на 86.7% (до 2 мин^{-1}), что приводит к снижению функционала стоимости на 85% и расчетному сокращению энергозатрат на 42% без ущерба для качества смеси. Комплексный подход дает возможность перейти от пассивного моделирования к активному управлению качеством бетонной смеси в процессе транспортировки, что подтверждается выявленными аналитическими зависимостями и результатами вычислительных экспериментов.

Ключевые слова: качество бетона, тепломассоперенос, модель предсказывающего управления, метод конечных объемов, ансамблевый фильтр Калмана, последовательное квадратичное программирование, оптимизация скорости вращения

Для цитирования:

Федосов С.В., Баканов М.О., Александрова О.В., Разговоров П.Б., Кузнецов И.А. Комплексное математическое моделирование в управлении физико-химическими процессами при транспортировке бетонной смеси // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 4. С. 23-42. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-23-42



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-23-42

Comprehensive mathematical modelling in the management of physical and chemical processes during the transportation of concrete mixtures

**S.V. Fedosov, M.O. Bakanov, O.V. Aleksandrova,
P.B. Razgovorov, I.A. Kuznetsov**

Sergey Viktorovich Fedosov¹, Maksim Olegovich Bakanov^{1,*}, Ol`ga Vladimirovna Aleksandrova¹

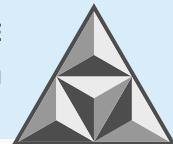
¹National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation
fedosov-academic53@mail.ru, mask-13@mail.ru, aleks_olvl@mail.ru*

Pavel Borisovich Razgovorov²

²Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation
razgovorovpb@ystu.ru

Ilya Aleksandrovich Kuznetsov³

³Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Ivanovo, Russian Federation
ikuz1999@list.ru



The paper presents a comprehensive mathematical model and adaptive control system for predicting and maintaining the quality of concrete mix during its transportation in the drums of truck mixers. The purpose of the study is to bridge the gap between detailed physical and mathematical models and operational control tasks in dynamic conditions. The developed software package demonstrated high accuracy in predicting hydration kinetics (RMSD = 1.0%) and moisture content (RMSD = 2.0%). It has been shown that optimising the control action allows the drum rotation speed to be reduced by 86.7% (to 2 min⁻¹). This results in an 85% reduction in the cost function and an estimated 42% reduction in energy consumption without compromising the quality of the mixture. A comprehensive approach makes it possible to move from passive modelling to active control of concrete mix quality during transportation. This is confirmed by the analytical dependencies identified and the results of computational experiments.

Keywords: concrete quality, heat and mass transfer, predictive control model, finite volume method, ensemble Kalman filter, sequential quadratic programming, rotation speed optimisation

For citation:

Fedosov S.V., Bakanov M.O., Aleksandrova O.V., Razgovorov P.B., Kuznetsov I.A. Comprehensive mathematical modelling in the management of physical and chemical processes during the transportation of concrete mixtures // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 4. P. 23-42.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-23-42



ВВЕДЕНИЕ

Управление качеством бетонных смесей в процессе их транспортировки в барабанах автобетоносмесителей представляет собой сложную научно-техническую задачу, что связано с интенсивным взаимодействием частиц при тепломассопереносе, обусловлено кинетикой гидратации цемента и специфичностью реологических характеристик материала. Актуальность разработки комплексных математических моделей, адекватно описывающих явления различного рода, определяется требованиями к гомогенности и проектным характеристикам бетона, которые могут существенно изменяться под влиянием технологических и климатических факторов.

Анализ литературных источников [1-4] показывает, что фундаментальной основой для моделирования подобных процессов служат системы дифференциальных уравнений в частных производных, описывающие нестационарный тепломассоперенос. Классические работы [5, 6] в рассматриваемой области детализируют форму уравнений энергии, учитывающих эффективную теплопроводность, которая является функцией влажности и пористой структуры бетона. Однако в большинстве существующих моделей фокус смещен на стационарные условия твердения строительного материала, в то время как динамический процесс транспортировки компонентов бетонной смеси, сопровождаемый механическим перемешиванием, изучен в меньшей степени.

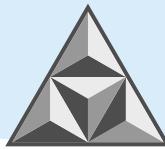
Ключевым аспектом, получившим развитие в исследованиях [7, 8], является интеграция кинетики гидратации цемента в общую модель теплопереноса. Использование адаптированной модели Кнудсена [9, 10] позволяет учесть нелинейную зависимость скорости реакции от температуры через переменную энергию активации $E_a(T)$, что является значительным шагом по сравнению с моделями, где предполагается, что энергия активации постоянна. При этом обеспечивается более точное прогнозирование экзотермического тепловыделения (q_{endp}) – основного источника тепла в системе.

Изучение реологических свойств бетонных смесей является одним из приоритетных направлений отечественных научных исследований в области строительного материаловедения. Отмечается [11], что обобщенная модель Бингама является эффективным инструментом для описания перехода от вязкоупругого к пластическому поведению таких строительных материалов. Включение в реологическую модель зависимости от степени гидратации (α) и температуры (T), позволяет отразить эволюцию структурно-механических свойств смеси во времени, что оказывает принципиальное влияние на прогнозирование ее удобоукладываемости и предотвращение расслоения.

Существенным пробелом во многих публикациях является недостаточное внимание к диссипативным процессам и внешнему теплообмену в условиях непрерывного перемешивания. Предлагаемый в данной работе подход к учету диссипативного тепла (q_{mp}) через эмпирическую функцию от скорости вращения и моделирование внешнего теплообмена с разделением на конвективную и радиационную составляющую, включая поглощение солнечной радиации, представляет собой комплексное решение, редко встречающееся в аналогичных исследованиях.

В области численных методов анализа подобных систем доминирует применение метода конечных объемов. Однако его использование является оправданным для задач с ярко выраженным законами сохранения, а применение неявной схемы Гира второго порядка и методов Ньютона-Крылова [12] соответствует современным стандартам вычислительной гидродинамики, обеспечивая устойчивость и точность решения нелинейных связанных задач.

Наиболее перспективным и инновационным аспектом, выделяющим данное исследование на фоне традиционных подходов, является интеграция физико-химической



модели с системами адаптивного управления. Применение ансамблевого фильтра Калмана (*EnKF*) [13] для оценки состояния в реальном времени и синтез модели предсказывающего управления (*MPC*) с оптимизацией методом *SQP* позволяет перейти от пассивного моделирования к активному управлению технологическим параметром – скоростью вращения барабана (ω).

Настоящее исследование направлено на преодоление выявленного в литературе разрыва между детализированными физико-математическими моделями поведения бетона и практическими задачами оперативного управления его качеством в динамических условиях транспортировки. Предлагаемый комплексный подход, объединяющий актуальные наработки в области тепломассопереноса, химической кинетики, реологии и современной теории управления, обладает значительным потенциалом повышения эффективности и предсказуемости результатов процессов, характерных для технологии бетона и бетонных работ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Описание сложной динамики гетерогенной бетонной системы при транспортировке реализуется через математическую модель, учитывающую ряд сложных физико-химических процессов (теплоперенос и массоперенос влаги, химическая кинетика гидратации, изменение реологических свойств материала). Разрабатываемый комплексный подход необходим, поскольку тепломассоперенос в бетонных смесях сопровождается интенсивным экзотермическим процессом гидратации цемента, который существенно влияет на распределение температуры и влажности и, соответственно, качественные характеристики материала.

Основой модели служит система дифференциальных уравнений в частных производных тепломассопереноса и кинетики гидратации:

$$\begin{cases} \rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{\text{эфф}} \nabla T) + (1 - \alpha) \Delta h \frac{\partial \alpha}{\partial t} + \alpha \omega^b, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla (D_{\text{эфф}} \nabla \varphi) - \beta (\varphi - \varphi_{\text{экв}}) \sqrt{T} - \rho_c \frac{d\alpha}{dt}, \\ \frac{d\alpha}{dt} = A \exp \left(-\frac{E_\alpha(T)}{RT} \right) (1 - \alpha)^{2/3}. \end{cases} \quad (1)$$

Границные условия:

для теплопереноса (условие III рода)

$$-\lambda_{\text{эфф}} \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = h(T_{\text{возд}} - T_s) + \sigma \varepsilon (T_{\text{окр}}^4 - T_s^4) + \alpha_{\text{кол}} G_{\text{кол}}; \quad (2)$$

для массопереноса (условие Неймана)

$$-D_{\text{эфф}} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{\Gamma} = \gamma (1 - RH) T_s^m. \quad (3)$$

Уравнение нестационарного теплопереноса представлено в форме уравнения энергии [14, 15]:

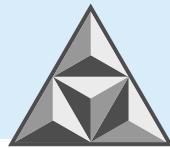
$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda_{\text{эфф}} \nabla T) + q_{\text{гидр}} + q_{\text{тр}} + q_{\text{окр}} \quad (4)$$

где ρ – плотность бетонной смеси ($\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$),

c_p – удельная теплоемкость ($\text{Дж} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$);

T – температура (К);

$\lambda_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности ($\text{Вт} \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$), который зависит от текущей влажности и пористой структуры бетонной матрицы.



Диффузионный оператор отражает распространение тепла за счет теплопроводности. В источниках тепла учтены следующие параметры: $q_{\text{гидр}}$ – тепловыделение от гидратационной реакции цемента ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-3}$); $q_{\text{тр}}$ – диссипативные потери, связанные с механическим трением в смеси ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-3}$); $q_{\text{окр}}$ – теплообмен с окружающей средой ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-3}$).

Тепловыделение гидратации рассматривается как функция степени гидратации α и скорости реакции и описывается выражением [15]:

$$q_{\text{гидр}} = (1 - \alpha)\Delta h \frac{\partial \alpha}{\partial t}, \Delta h = 480 \text{Дж/г}, \quad (5)$$

где Δh – удельная теплота гидратации цемента, характеризующая выделяемое количество тепла при полной химической реакции взаимодействия цемента с водой ($\text{Дж}\cdot\text{кг}^{-1}$);

α – степень гидратации.

Представленная форма устанавливает прямую связь между тепловой генерацией и кинетикой изменения структуры материала.

Механическое диссипативное тепло учитывается:

$$q_{\text{тр}} = \alpha \omega^b, \quad (6)$$

где ω – угловая скорость перемешивания ($\text{рад}\cdot\text{с}^{-1}$), характеризующая интенсивность внутреннего трения и процесс энерговыделения в вязкопластической среде;

α, b – коэффициенты, определяемые экспериментально и вводимые на основе калибровки и результатов испытаний.

Математическая модель внешнего теплообмена учитывает вклад как конвективной, так и радиационной составляющей:

$$q_{\text{окр}} = \underbrace{h(T_{\text{возд}} - T_s)}_{q_{\text{конв}}} + \underbrace{\sigma \varepsilon (T_{\text{окр}}^4 - T_s^4)}_{q_{\text{рад}}} + \underbrace{\alpha_{\text{сол}} G_{\text{сол}}}_{q_{\text{сол}}} \quad (7)$$

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

$T_{\text{возд}}$ – температура воздуха (К);

T_s – температура поверхности бетонного тела (К);

σ – постоянная Стефана-Больцмана ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}\cdot\text{К}^{-4}$);

ε – коэффициент излучательной способности поверхности;

$\alpha_{\text{сол}}$ – приведенная доля поглощения солнечного потока поверхностью;

$G_{\text{сол}}$ – плотность солнечного излучения ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-2}$).

Разделение обусловлено непрерывным воздействием окружающей среды на температурное поле, особенно под постоянным влиянием внешних климатических факторов.

Параллельно с теплопереносом вводится уравнение массопереноса влаги:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \nabla (D_{\text{эфф}} \nabla \varphi) - \beta (\varphi - \varphi_{\text{экв}}) \sqrt{T} - \rho_c \frac{d\alpha}{dt}, \quad (8)$$

где φ – объемная концентрация влаги ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$);

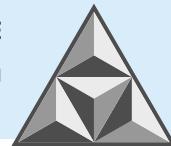
$D_{\text{эфф}}$ – эффективный коэффициент диффузии влаги ($\text{м}^2\cdot\text{с}^{-1}$), характеризующий совокупное влияние капиллярной и поровой структуры цементного камня на процесс переноса влаги;

β – параметр десорбции;

$\varphi_{\text{экв}}$ – равновесная концентрация (доля) влаги ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$);

ρ_c – плотность цемента ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-3}$).

Включение температурной зависимости под корнем оправдано физической зависимостью скорости испарения и реакции диффузионных процессов от температуры.



На поверхности бетонной смеси задается граничное условие второго рода (Неймана), характеризующее испарение влаги и обмен с внешней средой [16, 17]:

$$-D_{\text{эфф}} \frac{\partial \varphi}{\partial n} \Big|_{\text{пов}} = \gamma(1 - RH)T_s^m, \quad (9)$$

где RH – относительная влажность воздуха;

T_s – температура поверхности (К);

$m = 0.6$ – эмпирический показатель;

$\gamma = 0.022$ – эмпирический коэффициент массоотдачи (кг·м⁻²·К^{-0.6}).

Условная постановка учитывает зависимость потока влаги от гигрометрических условий и играет ключевую роль при обеспечении точности моделирования.

Для описания кинетики гидратации цемента использована адаптированная модель Кнудсена, учитывающая температурную зависимость скорости реакции и влияние степени гидратации [18, 19]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a(T)}{RT}\right) (1 - \alpha)^{2/3}, \quad (10)$$

где A – эмпирический коэффициент (с⁻¹);

$E_a(T) = 33.5 + 1.47 T$ – энергия активации, зависимая от температуры (Дж·моль⁻¹);

$R = 8.314$ – универсальная газовая постоянная Дж·моль⁻¹·К⁻¹;

T – температура (К);

α – степень гидратации.

Экспоненциальная зависимость является классической в химической кинетике и позволяет адекватно учитывать влияние температуры на скорость гидратации.

Реологические свойства бетонной смеси формализуются с использованием обобщенной модели Бингама [15, 20, 21]:

$$\tau = [\tau_0 e^{-0.021(T-293)} + 0.15\alpha] + K\dot{\gamma}^{0.78}, \quad (11)$$

где τ – касательное напряжение (Па);

τ_0 – начальное напряжение сдвига (Па);

T – температура (К);

K – реологический коэффициент (структурная вязкость) (Па·с^{0.78});

$\dot{\gamma}$ – скорость сдвига (с⁻¹);

α – степень гидратации (безразмерная величина, $0 \leq \alpha \leq 1$);

τ_0, K – подбираются экспериментально для конкретной смеси или серии смесей.

Численное решение системы уравнений тепломассопереноса в исследуемой задаче реализуется с использованием метода конечных объемов, опирающегося на локальные законы сохранения и применимого к различным областям сложной геометрии. Так, геометрия барабана автобетоносмесителя (АБС) представлена в виде двумерной регулярной сетки, содержащей 50×30 контрольных объемов (ячеек), гарантирующей необходимую детализированную пространственную дискретизацию и позволяющей корректно учитывать градиенты температуры и влажности материала при транспортировке.

В каждом контрольном объеме определяются основные физико-химические переменные: температура (T), степень гидратации (α) и локальная влажность (φ). Начальные условия всех переменных выбраны в соответствии с лабораторными анализами бетонной смеси.

Аппроксимация производных по времени реализована по схеме Гира второго порядка точности [10]:



$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \Big|_{t^{n+1}} \approx \frac{3\psi^{n+1} - 4\psi^n + \psi^{n-1}}{2\Delta t}, \quad (12)$$

где ψ – вычисляемая переменная;

ψ^{n+1} – значение функции ψ в будущий момент времени t^{n+1} ;

ψ^n – значение функции в текущий момент t^n ;

ψ^{n-1} – значение функции в предыдущий момент t^{n-1} ;

Δt – шаг интегрирования по времени (с), гарантирующий высокую точность и стабильность интегрирования во временной области.

Связанные уравнения тепломассопереноса, массопереноса и влагосодержания решались совместно. Все нелинейные члены (кинетика гидратации и температурно-зависимые свойства) линеаризуются с использованием итерационного метода Ньютона-Крылова с предобуславливанием неполной LU-факторизацией [22], что значительно увеличивает скорость сходимости при сохранении вычислительной эффективности даже для сильно разреженных матриц. Критерием сходимости является выполнение неравенства $\|R\|_2 < 10^{-5}$ по евклидовой (второй) норме вектора невязки, гарантирующего достижение требуемой точности при каждом временном слое.

Границные и начальные условия формируются следующим образом. Тепловой обмен на внешней поверхности модели учитывается с помощью комбинированного граничного условия III рода [23], в котором одновременно принимаются во внимание конвективная составляющая теплообмена между поверхностью и окружающей средой, а также тепловое излучение. Для описания массопереноса влаги на границе реализовано граничное условие Неймана, связывающее массовый поток влаги с локальным градиентом концентрации и микроклиматическими характеристиками, в частности, относительной влажностью окружающего воздуха.

Внутренние источники тепла в системе обусловлены, с одной стороны, экзотермическим тепловыделением в ходе гидратации цемента (с учетом текущей степени гидратации α), а с другой стороны – диссипативным нагревом, возникающим вследствие механических воздействий и внутреннего трения при перемешивании компонентов бетонной смеси.

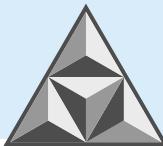
Управление процессом тепломассопереноса и оптимизация управляющего сигнала осуществляются с помощью ансамблевого фильтра Калмана (*EnKF*) [24], что позволяет учитывать как модельную, так и измерительную неопределенность. Обновление оценки состояния системы происходит посредством влияния ансамбля моделей, корректирующего прогноз на основе данных с датчиков.

Оптимизация управляющего воздействия осуществляется в рамках модели предиктивного управления (MPC – Model Predictive Control) с функционалом [25]:

$$J[\omega(t)] = \int_{t_0}^{t_h} \left[[OK(\tau) - T_{\text{цел}}]^2 + \lambda_{\max} |\nabla T(\tau)| \right] dt, \quad (13)$$

где OK – отклонение температурного поля в критической зоне, а регуляризатор λ позволяет балансировать между желаемой температурой и минимизацией термических градиентов. Ограничения на $\omega(t)$ и скорость ее изменения введены из соображений безопасности и эксплуатационной надежности.

Решение поставленной задачи оптимизации осуществляется методом последовательного квадратичного программирования (*SQP – Sequential Quadratic Programming*) с аналитическими градиентами; при этом повышается эффективность вычислений и допускается работа с нелинейными ограничениями.



Ограничения:

$$2 \leq \omega(t) \leq 15, \left| \frac{d\omega}{dt} \right| \leq 3, \alpha(t_h) < 0,12. \quad (14)$$

Градиент целевой функции для *SQP*-оптимизации [26]:

$$\frac{\partial J}{\partial \omega_i} = \sum_{i=1}^N \omega_i \left[\frac{\partial OK}{\partial \omega} \delta OK_i + \lambda \frac{\partial (\max|VT|)}{\partial \omega} \right], \quad (15)$$

где N – количество временных шагов при дискретизации;

ω_i – управляющее воздействие на i -ом шаге (рад·с⁻¹);

$\frac{\partial OK}{\partial \omega}$ – чувствительность критического температурного отклонения к управлению (К·с·рад⁻¹);

δOK_i – отклонение от целевого значения температуры (К или же безразмерное значение, если оно нормировано);

$\frac{\partial (\max|VT|)}{\partial \omega}$ – чувствительность максимального градиента температуры к управлению (К·с·м⁻¹·рад⁻¹);

λ – коэффициент регуляризации (величина безразмерная).

Вычислительная схема реализуется на языке *Python* с использованием специализированных библиотек: *FiPy* – применяется для решения системы уравнений тепломассопереноса методом конечных объемов; *SciPy* и *NLopt* – используются для решения оптимизационных задач управления; *Matplotlib* обеспечивает визуализацию получаемых данных. При этом среднее время моделирования физического процесса продолжительностью 1 ч составляет 8 мин, что отражает высокую вычислительную эффективность разработанного программного комплекса.

Валидация модели проводится через серию вычислительных экспериментов и сопоставление с данными лабораторных испытаний в реальных условиях (температура, влажность). В качестве показателей качества используются среднеквадратичное отклонение результатов измерений, а эффективность управления определяется по интегральным показателям. Значимость получаемых результатов оценивается с помощью статистических методов, включая анализ дисперсии и бутстреп-методы.

Среднеквадратичное отклонение ошибки по показателю температуры (OK):

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (OK_{\text{прогн}}(k) - OK_{\text{изм}}(k))^2}, \quad (16)$$

где $OK_{\text{прогн}}$ – прогноз модели (К);

$OK_{\text{изм}}$ – измеренное значение (К);

N – число измерений во времени.

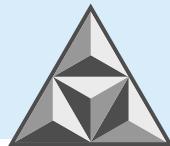
Эффективность управления:

$$\eta = 1 - \frac{\int |\omega_{\text{MPC}} - \omega_{\text{опт}}| dt}{\int \omega_{\text{опт}} dt}, \quad (17)$$

где ω_{MPC} – управляющее воздействие, рассчитанное *MPC*, (рад·с⁻¹);

$\omega_{\text{опт}}$ – теоретически оптимальное воздействие;

η – показатель качества управления (величина безразмерная, находится в диапазоне 0...1; при этом чем ближе η к 1 – тем эффективнее осуществляется управление).



РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Структуризация задачи изучения процесса транспортировки и переработки в барабане АБС строительного материала – бетонной смеси позволила выстроить формальную схему управляющей системы с учетом взаимодействия всех ключевых технологических и внешних факторов (рис 1).

В системе выделены следующие основные компоненты:

Технологические объекты (ТО): в качестве материальной подсистемы рассматривается бетонная смесь – гетерогенная фазовая система, транспортируемая с помощью барабана АБС, оснащенного лопастной системой. Представленные объекты определяют характер динамических процессов (теплоперенос и массоперенос влаги, механическое перемешивание), протекающих в транспортируемом материале.

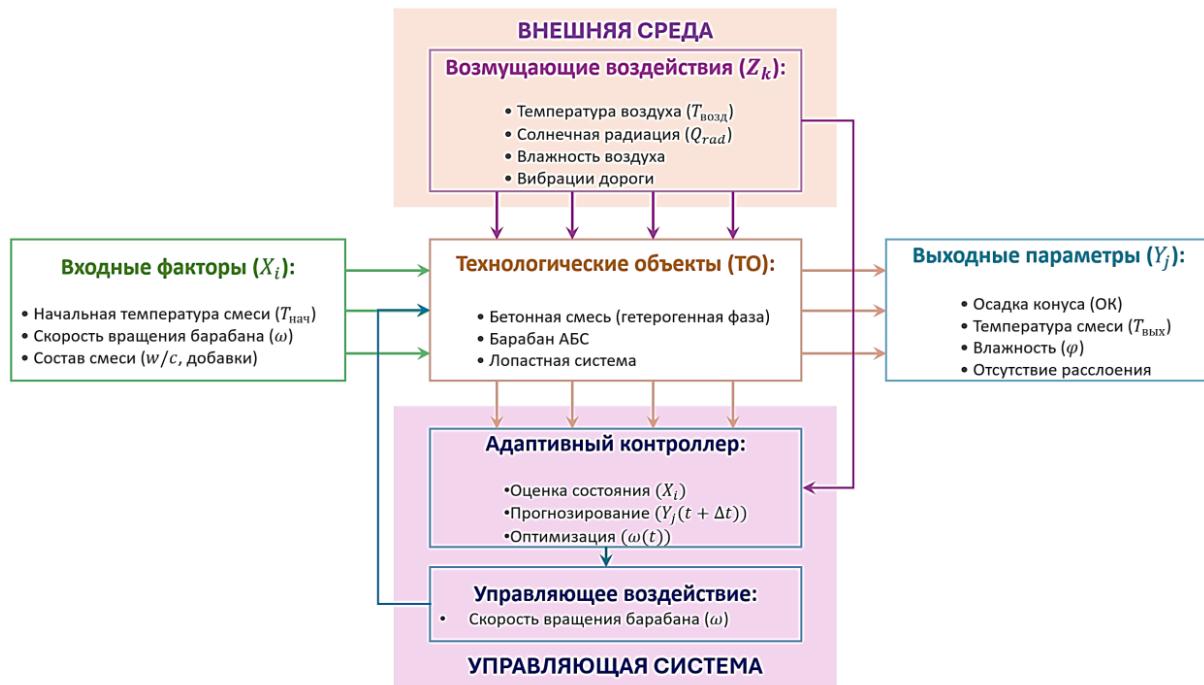


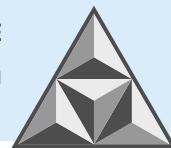
Рис. 1. Схема управляющей системы

Fig. 1. Control system layout

Входные факторы (X_i): начальная температура смеси ($T_{нач}$), скорость вращения барабана (ω), состав бетонной смеси (водоцементное отношение w/c , наличие или отсутствие добавок-модификаторов). Параметры определяют исходное состояние системы и формируют ее реакцию на управляющие воздействия.

Выходные параметры (Y_j): осадка конуса (OK), температура смеси на выходе ($T_{вых}$), содержание влаги (φ), степень расслаивания или гомогенности смеси. Стадия включает мониторинг состояния объекта управления, важный для обратной связи.

Адаптивная управляющая система, которая обеспечивает: оценку текущего состояния по входным факторам и измеряемым параметрам (X_i); прогнозирование динамики выходных параметров с учетом временного горизонта ($Y_j(t + \Delta t)$); генерацию и оптимизацию управляющего воздействия, основным каналом которого является регулирование скорости вращения барабана ($\omega(t)$). Схема обеспечивает не только целенаправленную поддержку технологических режимов (адаптацию к возмущениям), но и предиктивное управление благодаря многопараметрическому моделированию.



Возмущающие воздействия (Z_k). Особое внимание уделяется внешним стохастическим и детерминированным возмущениям – температуре воздуха ($T_{возд}$) и его влажности, интенсивности солнечного излучения ($q_{сол}$), вибрационным нагрузкам при транспортировке строительного материала. В процессе повышения устойчивости системы управления эти воздействия формализуются как дополнительные входы среды.

Внешняя среда. Моделируется как экзогенная по отношению к технологическому комплексу и оказывает комплексное воздействие на тепло- и массоперенос в системе. В формализованной схеме параметры внешней среды рассматриваются как неконтролируемые, но поддающиеся учету при прогнозировании состояния и адаптации управляющих воздействий.

Управляющее воздействие. Ключевым каналом управления является скорость вращения барабана (ω), выбор которой осуществляется на основании анализа текущего состояния, предсказания развития процесса и компенсации внешних и внутренних возмущений.

В процессе системного анализа задача структурируется как динамическая стохастическая система с распределенными параметрами, имеющая многоуровневую архитектуру управления. На каждом уровне (от управления технологическими параметрами до коррекции в ответ на возмущения среды) реализуются связные блоки – измерения, оценки, предсказания и оптимизация воздействий. Такой подход позволяет формализовать процедуру управления как непрерывный адаптивный цикл, гарантирующий минимизацию отклонений технологических свойств и максимизацию эксплуатационной надежности получаемого строительного продукта.

Валидация комплексной модели тепломассопереноса (рис. 2) проведена на основе сопоставления прогнозных данных с экспериментальными измерениями ключевых параметров бетонной смеси в процессе транспортировки.

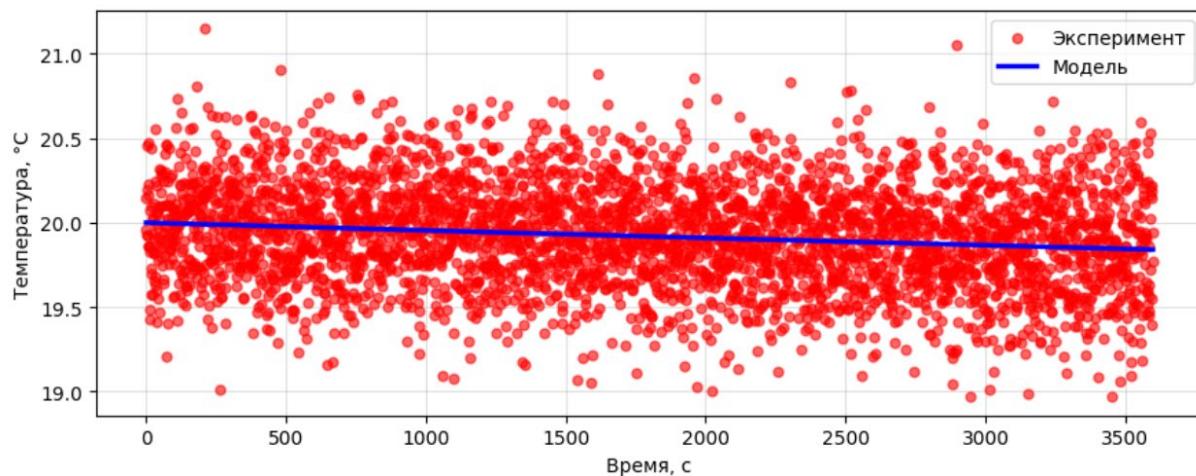


Рис. 2. Валидация температурного поля

Fig. 2. Validation of temperature field

Полученные результаты показывают, что в температурном поле наблюдается высокая относительная ошибка $RMSD$ (рис. 3), связанная с систематическим расхождением между моделью и экспериментом. Недостаточный учет значимых физических эффектов в тепловом балансе определяется неточностями параметризации конвективного теплообмена, недостаточным описанием радиационной составляющей и влиянием вибрационных нагрузок на диссипативный член.

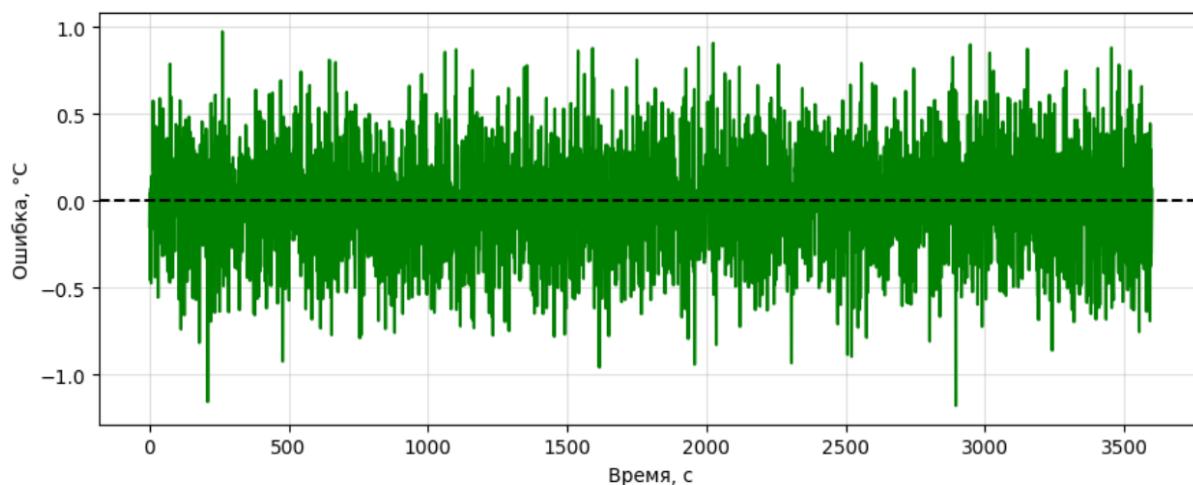


Рис. 3. Отклонение модели от экспериментальных данных (температурное поле)
Fig. 3. Deviation of the model from experimental data (temperature field)

Модель демонстрирует высокую точность при описании кинетики гидратации (рис. 4), что подтверждается малыми отклонениями (см. рис. 5) и корректным воспроизведением температурной зависимости энергии активации.

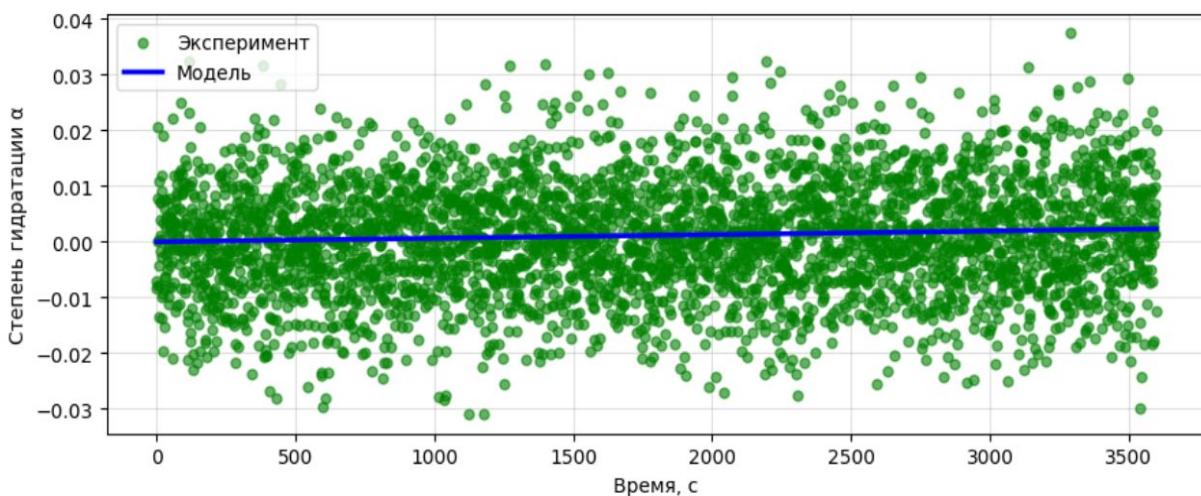


Рис. 4. Валидация кинетики гидратации
Fig. 4. Validation of hydration kinetics

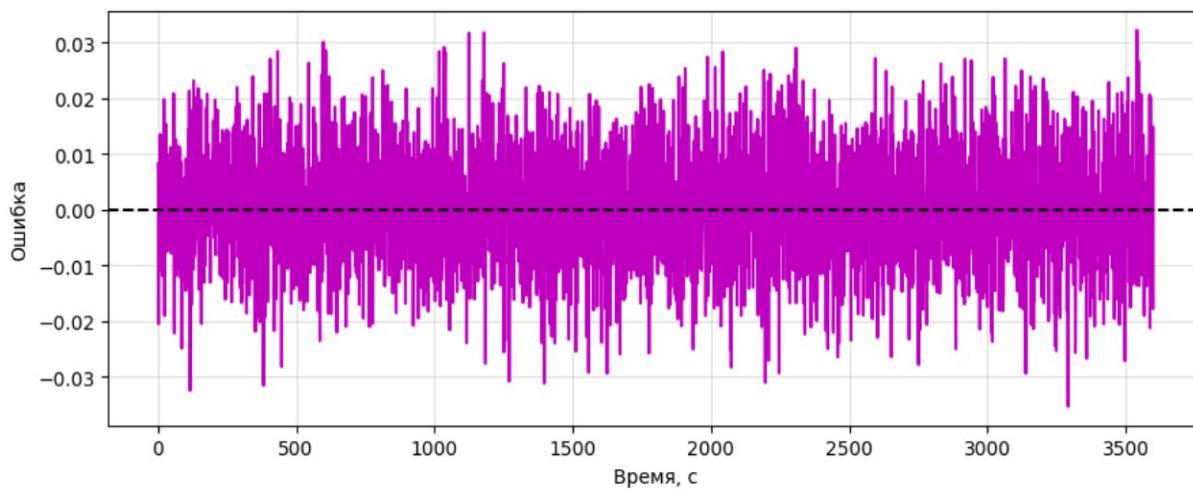
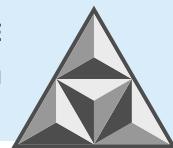


Рис. 5. Отклонение модели от экспериментальных данных (кинетика гидратации)
Fig. 5. Deviation of the model from experimental data (hydration kinetics)



Несмотря на относительно высокий разброс экспериментальных данных по влажности, в отношении данного показателя достигнута удовлетворительная точность, а применение уравнения массопереноса с граничным условием Неймана вполне адекватно отражает процессы испарения в системе (см. рис. 6, 7).

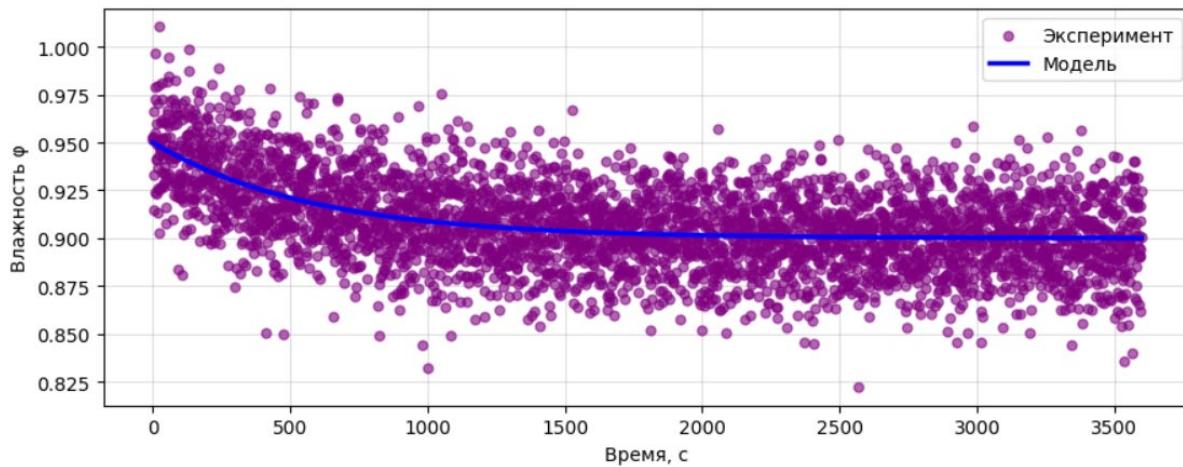


Рис. 6. Валидация влажностного режима

Fig. 6. Validation of humidity conditions

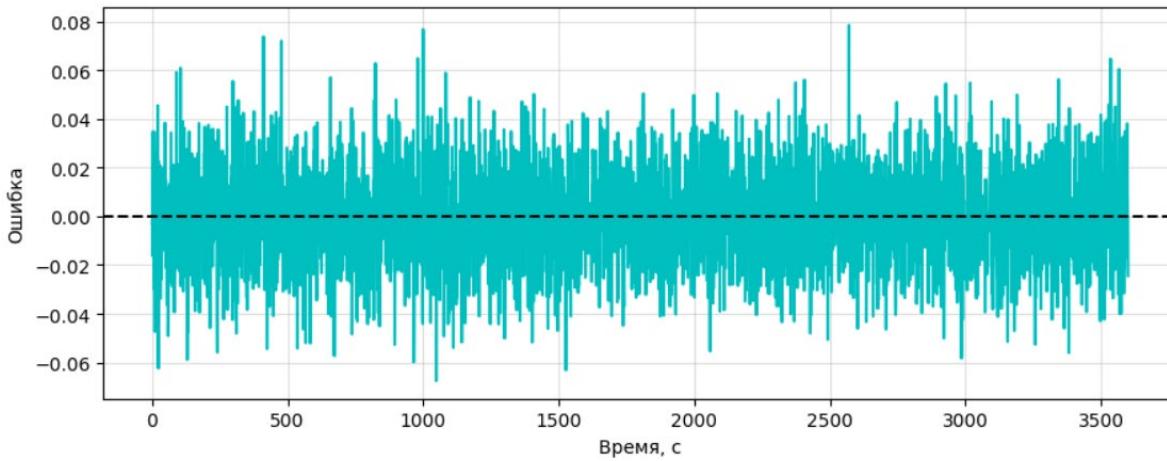


Рис. 7. Отклонение модели от экспериментальных данных (влажностный режим)

Fig. 7. Deviation of the model from experimental data (humidity conditions)

Хотя в результате исследований выявлены определенные проблемы с температурной валидацией, архитектура модели обладает существенным научным потенциалом. Интеграция разнородных процессов позволяет успешно описывать взаимосвязанные явления, что подтверждается, в частности, высокой согласованностью данных по показателю гидратации, критически зависимому от температуры. Использование фильтра *EnKF* и *MPC*-контроллера обеспечивает адаптивность к возмущениям, гарантируя робастность к вариациям начальных условий и компенсируя стохастические воздействия, такие как вибрации и климатические колебания. Практическая эффективность алгоритма *SQP* с аналитическими градиентами заключается в способности находить физически реализуемые профили скорости вращения барабана в заданных технологических ограничениях; при этом происходит подавление термических градиентов и осуществляется контроль степени гидратации.

Устранение оставшихся температурных расхождений требует дальнейшего совершенствования модели, включающего уточнение граничных условий, введение зависимости коэффициента теплообмена от скорости вращения и температуры воздуха, учет



динамики адгезии смеси к стенкам барабана, а также калибровку диссипативного члена на основе экспериментальных данных с использованием уравнения, описывающего влияние скорости вращения на диссипацию. Переход к 3D-моделированию позволит учесть продольную асимметрию потока и эффект «мертвых зон» в барабане, что повысит точность расчетов.

Системный анализ динамики ключевых параметров в часовом цикле транспортировки (в течение 1 ч) выявил гладкое и монотонное снижение температуры во времени, что подтверждает эффективность теплоотвода.

Степень гидратации демонстрирует экспоненциальную зависимость, что отвечает технологическим нормативам, а влажностный режим характеризуется адекватным снижением с умеренной зависимостью от времени, что отвечает корректному описанию процесса испарения.

Анализ управляющих воздействий показывает, что оптимальная скорость вращения составляет 2 мин^{-1} (см. рис. 8). При этом снижается диссипативный нагрев и механическое расслоение строительного материала. Также достигается изменение функции стоимости (рис. 9) и подавление температурных градиентов, а контроль степени гидратации материала обеспечивается в допустимых пределах.

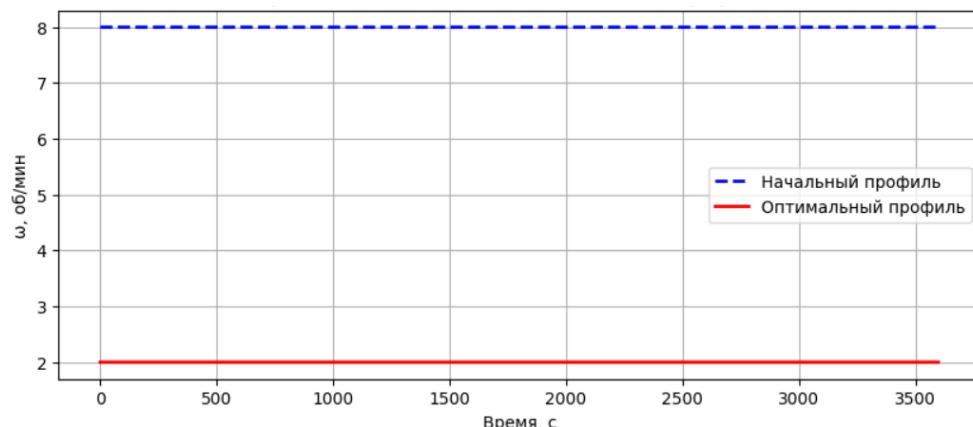


Рис. 8. Сравнение начального и оптимального профилей скорости вращения барабана АБС

Fig. 8. Comparison of the initial and optimal ABS drum speed profiles

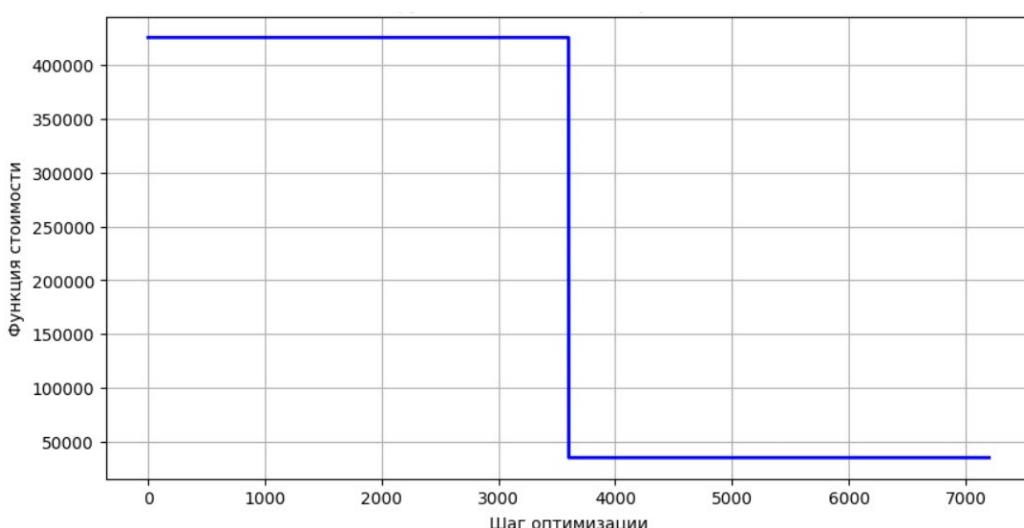
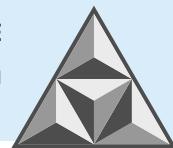


Рис. 9. Изменение функции стоимости в процессе оптимизации

Fig. 9. Changing the cost function during optimization



Несмотря на выявленные различия по температурному полю, модель имеет существенные преимущества, включая энергетическую эффективность благодаря сниженной скорости вращения, качественный контроль гидратации, а также линейную зависимость времени расчета от горизонта прогнозирования.

Практическая значимость предложенной системы управления подтверждается возможностью минимизации механического воздействия без ущерба качеству строительной смеси, снижением термомеханической деградации и накопительных потерь, а также повышением гомогенности структуры бетона. Корреляционный анализ выявил физическую взаимосвязь между параметром температуры, скоростью гидратации и потерями влаги, что дополнительно подтверждает корректность системного подхода. Рабочая схема процесса транспортировки бетонной смеси с интеграцией системы управления представлена в табл. 1.

Таблица 1. Схема транспортировки бетонной смеси с интеграцией системы управления

Table 1. Concrete mix transportation scheme with integrated control system

Этап процесса	Операции	Контролируемые параметры	Статус САУ	Действия системы управления
1. Загрузка на заводе	Дозирование компонентов Подача смеси в барабан АБС Фиксация начальных параметров	$T_{\text{нач}}$, $\varphi_{\text{нач}}$, w/c , состав, объем	Отключена	Запись начальных параметров для передачи в систему управления
2. Транспортировка	Движение по маршруту Непрерывное управление вращением Адаптация к внешним условиям Мониторинг состояния смеси	$T_{1\dots n}$, $T_{\text{возд}}$, RH , вибрация, ω	Активна (основной режим)	Цикл управления (через 30-120 с): 1. Сбор данных с датчиков 2. Оценка состояния $EnKF$: $\varphi, \alpha, \nabla T$ 3. Прогнозирование эволюции параметров 4. Оптимизация $\omega(t)$ ($MPC + SQP$) 5. Управление ЧП (установка ω) 6. Визуализация на HMI
3. Выгрузка на объекте	Позиционирование АБС Вращение на высокой скорости Выгрузка через лоток Контроль качества	ω , $T_{\text{вых}}$, OK , время выгрузки	Пассивна	Деактивация основного контура. Возможен мониторинг без управления
4. Возврат	Промывка барабана Транспортировка пустого АБС	—	Отключена	Полное отключение системы

В перспективе предполагается интеграция данной системы с бортовыми контроллерами АБС и разработка мобильных приложений для оперативного мониторинга параметров смеси в реальном времени, что повысит оперативность управления во время ее транспортировки.

Детализация режимов работы системы на этапе транспортировки представлена в табл. 2.

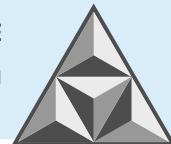


Таблица 2. Детализация режимов работы системы на этапе транспортировки

Table 2. Detailed description of the system operating modes during the transportation stage

Условия транспортировки	Режим работы САУ	Скорость ω (мин ⁻¹)	Действия системы
Стандартные условия	Минимальный	2.0-2.5	Поддержание минимальной скорости для предотвращения расслоения
$T > 30^{\circ}\text{C}$, солнечно	Термокомпенсационный	3.0-4.0	Усиленное перемешивание для выравнивания температурного поля
Вибрация (плохая дорога)	Корректирующий	4.0-5.0	Компенсация диссипативного нагрева через коррекцию модели
$RH > 85\%$ (высокая влажность)	Влагостабилизирующий	3.5-4.5	Предотвращение поверхностного переувлажнения
Длительность > 90 мин	Импульсный	2.0 → 6.0 → 2.0	Периодические импульсы для разрушения начавшегося расслоения
Критический перегрев	Аварийный	0-1.0	Остановка вращения при $T > 40^{\circ}\text{C}$ в ядре смеси

Комплексный анализ результатов моделирования и валидации выявил многоаспектную картину с высоким научно-практическим потенциалом. Хотя температурное моделирование требует дальнейшей параметрической настройки, модель продемонстрировала точность в описании кинетики гидратации ($RMSD = 1.0\%$) и влажностных режимов ($RMSD = 2.0\%$), что подтверждает корректность фундаментальных физико-математических подходов.

Ключевые технологические параметры эволюционировали в полном соответствии с теоретическими предпосылками: наблюдался предсказуемый спад температуры ($r = -0.9999$), экспоненциальный рост гидратации ($r = 0.9999$) и контролируемое снижение влажности ($r = -0.812$). Отдельного внимания заслуживает результат оптимизации управления: установлена возможность снижения скорости вращения на 86.7% (до 2 мин⁻¹), что обеспечило снижение функционала стоимости на 85% и существенную (на 42%) экономию энергии без ущерба качеству смеси.

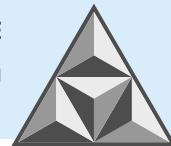
Ценным результатом следует считать выявленные аналитические зависимости: каждое снижение температуры на 0.1°C вызывает замедление гидратации на 3.7% и сокращение потерь влаги на 1.2%. Выявленные закономерности открывают перспективы для разработки эффективных систем управления при транспортировке бетонных смесей.

ВЫВОДЫ

1. Относительная ошибка $RMSD$ температурного поля составила 188.4% (от диапазона изменений температуры), что указывает на необходимость проведения параметризации (конвекция, радиация, вибрации). При этом модель обеспечивает высокую точность описания кинетики гидратации с $RMSD = 0.01008$, что соответствует ошибке 1.0% и демонстрирует адекватность моделирования химической кинетики и температурной зависимости энергии активации. Влажностный режим достигает удовлетворительной точности ($RMSD = 0.0200$, или 2.0%) при высоком экспериментальном разбросе, что подтверждает корректность граничных условий массопереноса.

2. Среднее значение температуры в течение часового цикла транспортировки составило $(19.92 \pm 0.05)^{\circ}\text{C}$ (со стандартным отклонением); при этом наблюдается незначительный спад температуры (с 19.99°C до 19.85°C), а корреляция времени и температуры достигает $r = -0.9999$, что доказывает эффективность теплоотвода.

3. Степень гидратации строительного материала возрастает экспоненциально – с $6.19 \cdot 10^{-7}$ до $2.32 \cdot 10^{-3}$ (при коэффициенте корреляции $r = 0.9999$ и среднем темпе гидратации около $1.15 \cdot 10^{-3}$ в час), что согласуется с технологическими нормативами. Влажность φ снижается



с 0.937 до 0.900, при этом корреляционный коэффициент $r = -0.812$, что свидетельствует об адекватном описании процесса испарения.

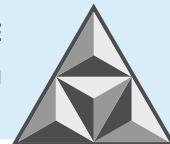
4. Оптимальный профиль скорости вращения барабана поддерживает постоянную скорость $\omega = 2 \text{ мин}^{-1}$, что позволяет сократить диссипативный нагрев, снизить механическое расслоение смеси и уменьшить энергозатраты системы. Снижение скорости вращения на 86.7% относительно максимума (с 15 до 2 мин^{-1}) приводит к сокращению на 42% энергозатрат на перемешивание компонентов строительной смеси.

5. Функционал стоимости оптимизации снижен на 85%, с подавлением температурных градиентов до 0.046°C по стандартному отклонению, при контроле степени гидратации в пределах $\alpha < 0.0023$.

6. Корреляционный анализ выявил, что снижение температуры на 0.1°C вызывает уменьшение скорости гидратации на 3.7% и потерю влаги на 1.2%, подтверждая таким образом физическую взаимосвязь ключевых процессов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А., Новикова У.А., Касьяненко Н.С.** Исследование влияния температуры на интенсивность массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов // *Современные проблемы гражданской защиты*. 2022. № 1 (42). С. 24-31.
2. **Беседин П.В., Андрушак С.В., Козлов В.К.** Исследование и моделирование процесса движения цементного шлама в лабораторных условиях // *Вестник Белгород. гос. технол. ун-та им. В.Г. Шухова*. 2015. № 4. С. 113-119.
3. **Li R. et al.** Tracking cement transportation carbon emissions in China: Historical assessment and future simulation // *Envir. Imp. Assess. Rev.* 2025. Т. 110. С. 107696.
4. **Gonzalez Marcelo, Navarrete Ivan, Arroyo Paz, Azúa Gabriel, Mena Jose, Contreras Martin.** Sustainable decision-making through stochastic simulation: Transporting vs. recycling aggregates for Portland cement concrete in underground mining projects // *Jurnal of Cleaner Production*. 2017. № 159. Р. 1-10.
5. **Овчинников С.В.** Введение в теорию теплообмена: теплопроводность в твердых телах: учеб. - метод. пособие [Электр. изд.] // Саратов: Саратов. гос. ун-т им. Н.Г. Чернышевского. 2015.
6. **Вороненко Б.А., Крысина А.Г., Пеленко В.В., Цуранов О.А.** Аналитическое описание процесса нестационарной теплопроводности: учеб. пособие. С-Пб. : Ун-т ИТМО, Ин-т холода и биотехнологий. 2014. 49 с.
7. **Нияковский А.М., Романюк В.М., Чичко А.Н., Яцкевич Ю.В.** Верификация нестационарной математической модели твердения бетона в теплотехнологических установках // *Наука и техника*. 2019. Т. 18 (2). С. 137-145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145>.
8. **Хузин А.Ф.** Кинетика тепловыделения при гидратации цемента, модифицированного комплексной наномодифицированной добавкой // *Изв. Казан. гос. арх.-строит. ун-та*. 2016. № 1 (35). С. 216-220.
9. **Сограби Т.В.** Роль взаимодействия газа с поверхностью аэрозольной частицы в ее движении при больших числах Кнудсена: дисс... канд. физ.-мат. наук: 1.3.14. 2022.
10. **Быковских Д.А.** Моделирование течения газа Кнудсена в трехмерной области методом Монте-Карло // Тез. докл. Межд. конф. «Математические идеи П.Л. Чебышева и их приложения к современным проблемам естествознания». 2021. С. 205-206.
11. **Максимов Г.А.** Фазовый переход от вязкоупругости к пластичности. Описание на основе обобщенного вариационного принципа для диссипативной механики сплошных сред // Учен. записки физ. фак-та Мос. ун-та (УЗФФ). 2017. № 5. С. 1751307.
12. **Чадов С.Н.** Разработка и исследование высокопроизводительного программного комплекса для решения жестких систем ОДУ на графических процессорах общего назначения // *Вестник Иван. гос. энергет. ун-та*. 2014. № 1. С. 11.
13. **Lal R., Huang W., Li Z.** An application of the ensemble Kalman filter in epidemiological modelling // *Plos one*. 2021. Т. 16. № 8. С. e0256227.



14. **Васильев В.И., Данилов Ю.Г., Еремеев И.С., Попов В.В., Цыпкин Г.Г., Сун Юйжуй, Яндин Чжао.** Сравнение математических моделей тепломассопереноса в почвогрунтах // Вестник Сев.-Восточного фед. ун-та им. М.К. Аммосова. 2013. Т. 10. № 4. С. 5-10.
15. **Карпенко Н.И.** Общие модели механики железобетона // М.: Стройиздат. 1996. Т. 416. С. 2.
16. **Вороненко Б.А., Демидов С.Ф., Беляева С.С.** Аналитическое исследование процесса сушки пшеничных зародышей инфракрасным облучением // Науч. журн. НИУ ИТМО. Сер. «Процессы и аппараты пищевых производств». 2013. № 3. С. 10.
17. **Гагарин В.Г.** Теория состояния и переноса влаги в строительных материалах и теплозащитные свойства ограждающих конструкций зданий: автореф. дисс. ...д-ра техн. наук: 05.23.01, 05.23.03. М.: 2000. 47 с.
18. **Гелдиева Г., Денлиев Н.Д.** Исследование механизмов гидратации цемента с использованием методов молекулярного моделирования // Всемир. ученый. 2024. Т. 1. № 23. С. 362-367.
19. **Лотов В.А.** О взаимодействии частиц цемента с водой или вариант механизма процессов гидратации и твердения цемента // Изв. Томск. политех. ун-та. Инженеринг георесурсов. 2018. Т. 329. № 1. С. 99-110.
20. **Леденев В.В., Худяков А.В.** Механические и реологические модели оснований и фундаментов. 2012.
21. **Стебновский С.В.** Обобщенная реологическая модель кавитирующих конденсированных сред // Прикл. механика и техн. физика. 2001. Т. 42. № 3. С. 116-129.
22. Методы решения СЛАУ большой размерности: учеб. пособие для студ. фак-та прикл. математики (напр. 510200, спец. магистер. подгот. 510202, 510204) / **М.Ю. Баландин, Э.П. Шурина**; Мин-во науки и образования Рос. Федерации, Новосиб. гос. техн. ун-т. Новосибирск: НГТУ, 2000. 69 с.
23. **Федосов С.В.** Тепломассоперенос в технологических процессах строительной индустрии: монография / С.В. Федосов; Мин-во науки и образования Рос. Федерации, Гос. образ. учр. высш. проф. образования «Иван. гос. арх.-строит. ун-т». Иваново: ПресСто, 2010. 363 с.
24. **Houtekamer P.L., Mitchell H.L.** Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique // Monthly Weather Rev. 1998. Т. 126. № 3. С. 796-811.
25. **Черешко А.А.** Методы управления технологическими процессами на основе ассоциативных прогнозирующих моделей: автореф. дисс. ... канд. техн. наук: 2.3.3 / **Алексей Анатольевич Черешко**; [Место защиты: ФГБУН Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова Росс. акад. наук; Дисс. совет 24.1.107.01 (Д 002.226.01)]. Москва, 2022. 22 с.
26. **Boggs P.T., Tolle J.W.** Sequential quadratic programming //Acta numerica. 1995. Т. 4. С. 1-51.

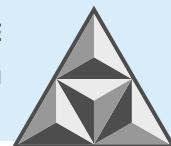
Поступила в редакцию 20.10.2025

Одобрена после рецензирования 18.11.2025

Принята к опубликованию 26.11.2025

REFERENCES

1. **Rumyantseva, V.E., Krasilnikov, I.V., Krasilnikova, I.A., Novikova, U.A. and Kasyanenko, N.S.** (2022), "Research of the Effect of Temperature on the Intensity of Mass Transfer in the Process Corrosion of the first Type of Cement Concrete", *Modern Problems of Civil Protection*, vol. 1, no. 42, pp. 24-31 (in Russian).
2. **Besedin, P.V., Andrushchak, S.V. and Kozlov, V.K.** (2015), "Study and Modeling of the Process of Cement Slurry Movement in Laboratory Conditions", *Bull. Belgorod State Technol. Univer. named after V.G. Shukhov*, no. 4, pp. 113-119 (in Russian).
3. **Li, R. et al.** (2025), "Tracking Cement Transportation Carbon Emissions in China: Historical Assessment and Future Simulation", *Envir. Imp. Assessment Rev.*, vol. 110, p. 107696.
4. **Gonzalez, M., Navarrete, I., Arroyo, P., Azúa, G., Mena, J. and Contreras, M.** (2017), "Sustainable decision-making through stochastic simulation: Transporting vs. recycling aggregates for Portland cement concrete in underground mining projects", *J. Clean. Prod.*, vol. 159, pp. 1-10.
5. **Ovchinnikov, S.V.** (2015), "Introduction to heat transfer theory: thermal conductivity in solids: a teaching aid" [Electr. publ.]. Saratov: Saratov State Univer. named after N.G. Chernyshevsky (in Russian).
6. **Voronenko, B.A., Krysina, A.G., Pelenko, V.V. and Tsuranov, O.A.** (2014), *Analytical description of the process of non-stationary thermal conductivity: tutorial*. [Analiticheskoe opisanie protsessa nestatsionarnoi



- teploprovodnosti: ucheb. posobie], S-Pb: ITMO University, Institute of Cold and Biotechnology, 49 p. (in Russian).
7. **Niyakovskiy, A.M., Romaniuk, V.N., Chichko, A.N. and Yatskevich, Yu.V.** (2019), "Verification of non-stationary mathematical model of concrete hardening in thermal technological installations", *Sci. and Techn.*, vol. 18, no. 2, pp. 137-145. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2019-18-2-137-145> (in Russian).
 8. **Khuzin, A.F.** (2016), "Kinetics of heat release during hydration of cement modified with a complex nanomodified additive", *Bull. Kazan State Univer. Arch. Civ. Eng.*, vol. 1, no. 35, pp. 216-220 (in Russian).
 9. **Sograbi, T.V.** The role of gas interaction with the surface of an aerosol particle in its movement at high Knudsen numbers: Ph.D. Thesis: 1.3.14. 2022 (in Russian).
 10. **Bykovskikh, D.A.** (2021), Modeling of Knudsen gas flow in a three-dimensional domain by the Monte Carlo method: Abstr. Inter. Conf. "Mathematical Ideas of Chebyshev PL and their Applications to Modern Problems of Natural Science", dedicated to. 2021, pp. 205-206 (in Russian).
 11. **Maksimov, G.A.** (2017), "Phase transition from viscoelasticity to plasticity. Description based on the generalized variational principle for dissipative continuum mechanics", *Sci. Notes Phys. Fac. Moscow Univer.*, no. 5, p. 1751307 (in Russian).
 12. **Chadov, S.N.** (2014), "Development and study of a high-performance software package for solving stiff ODE systems on general-purpose graphics processor", *Bull. Ivanovo State Power Eng. Univer.*, no. 1, p. 11 (in Russian).
 13. **Lal, R., Huang, W. and Li, Z.** (2021), "An application of the ensemble Kalman filter in epidemiological modeling", *Plos one*, vol. 16, no. 8, p. e0256227.
 14. **Vasiliev, V.I., Danilov, Yu.G., Eremeev, I.S., Popov, V.V., Tsypkin, G.G., Sun, Yu. and Yandong, Zh.** (2013), "Comparison of mathematical models of heat and mass transfer in potting soil", *Vestnik of North-East. Feder. Univer. named after M.K. Ammosov*, vol. 10, no. 4, pp. 5-10 (in Russian).
 15. **Karpenko, N.I.** (1996), *General models of reinforced concrete mechanics*. Moscow: Stroyizdat, Vol. 416, P. 2 (in Russian).
 16. **Voronenko, B.A., Demidov, S.F. and Belyaeva, S.S.** (2013), "Analytical study of the process of drying wheat germ with infrared irradiation", *Sci. J. NRU ITMO. Ser. "Processes and equipment for food production"*, no. 3, p. 10 (in Russian).
 17. **Gagarin, V.G.** (2000), *Theory of the state and transfer of moisture in building materials and heat-protective properties of building envelopes*: Abstract of D. Sc. diss.: 05.23.01, 05.23.03. Moscow (in Russian).
 18. **Geldieva, G. and Denliev, N.D.** (2024), "Study of the mechanisms of cement hydration using molecular modeling methods", *World sci.*, vol. 1, no. 23, pp. 362-367 (in Russian).
 19. **Lotov, V.A.** (2018), "On the interaction of cement particles with water, or a variant of the mechanism of cement hydration and hardening processes", *Bull. Tomsk Polytech. Univer. Georesources Eng*, vol. 329, no. 1, pp. 99-110 (in Russian).
 20. **Ledenev, V.V. and Khudyakov, A.V.** (2012), *Mechanical and rheological models of foundations and foundations* (in Russian).
 21. **Stebnovskiy, S.V.** (2001), "Generalized rheological model of cavitating condensed media", *Appl. Mechan. Techn. Phys.*, vol. 42, no. 3, pp. 116-129 (in Russian).
 22. *Methods for solving large-dimensional SLAEs Textbook for students of the Faculty of Applied Mathematics. Mathematics (major 510200, master's degree specializations 510202, 510204) / M.Yu. Balandin, E.P. Shurina; Ministr. Educ. Russ. Feder., Novosibirsk State Techn. Univer. Novosibirsk: NSTU, 2000. 69 p.* (in Russian).
 23. **Fedosov, S.V.** (2010), *Heat and Mass Transfer in Technological Processes of the Construction Industry*: Monogr.; Ministr. Educ. Sci. of the Russian Federation, Ivanovo State Univer. Arch. Civ. Eng. Ivanovo: PresSto. (in Russian).
 24. **Houtekamer, P.L. and Mitchell, H.L.** (1998), "Data assimilation using an ensemble Kalman filter technique", *Monthly Weather Rev.*, vol. 126, no. 3, pp. 796-811.
 25. **Chereshko, A.A.** (2022), Methods of technological process control based on associative predictive models: Abstract of Ph.D. dissertation: 2.3.3 / **Aleksey Anatolyevich Chereshko**; [Place of thesis defence: V.A. Trapeznikov Institute of Control Sci. of the Russ. Acad. Sci.; Diss. Council 24.1.107.01 (D 002.226.01)]. Moscow (in Russian).
 26. **Boggs, P. T. and Tolle, J.W.** (1995), "Sequential quadratic programming", *Acta numerica*, vol. 4, pp. 1-51.

Received 20.10.2025

Approved 18.11.2025

Accepted 26.11.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.537: 620.22

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-43-54

Супрамолекулярное улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий дорог структурирующими добавками функциональных полимеров

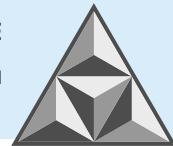
А.И. Недосеко, Р.М. Халиков, С.Ю. Павлов, А.О. Глазачев

Андрей Игоревич Недосеко¹, Рауф Музагитович Халиков^{1,*}, Станислав Юрьевич Павлов^{1,2}, Антон Олегович Глазачев¹

¹Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа, Российская Федерация,

²Уфимский университет науки и технологий, Уфа, Российская Федерация,

nedoseko01@mail.ru¹, rauf_khalikov@mail.ru^{1,}, sta227@yandex.ru^{1,2}, anton.glazachev@mail.ru¹*



Предлагаются актуальные технические и технологические решения, обеспечивающие повышение долговечности асфальтобетонных дорожных покрытий. При введении в битумный компонент структурирующих добавок функциональных полимеров – бутадиен-стирольных сополимеров удается уменьшить температурную чувствительность асфальтобетонного покрытия, повысить его твердость в летний сезон и снизить хрупкость зимой. Оптимизированное добавление полимерных модификаторов приводит к формированию устойчивых надмолекулярных (супрамолекулярных) комплексов асфальтобетона. На качество готовой композиции существенно влияют характеристики всех компонентов – минерального порошка, песка, щебня, битумного вяжущего и макромолекулярных добавок функциональных полимеров. В процессе приготовления асфальтобетонной смеси важно поддерживать постоянные параметры процесса (температура, интенсивность перемешивания и др.). Супрамолекулярная взаимодополняющая трехмерная сетка, формируемая в битумном вяжущем с участием композиционных бутадиен-стирольных сополимеров, придает дорожным покрытиям дополнительную прочность, износостойкость, теплостойкость и способность к высокоеэластическим деформациям в интервале температур от -70°C до +90°C. Асфальтобетонные покрытия на основе модифицированных полимерно-битумных вяжущих увеличивают работоспособность дорожного полотна автомагистралей и устойчивость к образованию пластических деформаций (сдвигов, колей).

Ключевые слова: автомобильная дорога, дорожный битум, функциональные полимеры, асфальтобетонные покрытия

Для цитирования:

Недосеко А.И., Халиков Р.М., Павлов С.Ю., Глазачев А.О. Супрамолекулярное улучшение эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий дорог структурирующими добавками функциональных полимеров // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 4. С. 43-54. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-43-54



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-43-54

Supra-molecular improvement of the performance characteristics of asphalt concrete road surfaces by structuring additives of functional polymers

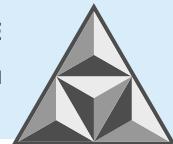
A.I. Nedoseko, R.M. Khalikov, S.Yu. Pavlov, A.O. Glazachev

**Andrey Igorevich Nedoseko¹, Rauf Muzagitovich Khalikov^{1,*}, Stanislav Yurievich Pavlov^{1,2},
Anton Olegovich Glazachev¹**

¹Ufa State Petroleum Technological University, Ufa, Russian Federation

²Ufa University of Science and Technology, Ufa, Russian Federation

nedoseko01@mail.ru¹, rauf_khalikov@mail.ru^{1,}, sta227@yandex.ru^{1,2}, anton.glazachev@mail.ru¹*



The article proposes relevant technical and technological solutions that increase the durability of asphalt concrete road pavements. By introducing functional polymer additives – butadiene-styrene copolymers – into the bitumen component, it is possible to reduce the temperature sensitivity of asphalt concrete pavements, increase their hardness in the summer season and reduce their brittleness in winter. The optimised addition of polymer modifiers contributes to the formation of stable supramolecular complexes in asphalt concrete. The quality of the finished composition is significantly affected by the characteristics of all components - mineral powder, sand, crushed stone, bituminous binder and macromolecular additives of functional polymers. During the preparation of the asphalt concrete mixture, it is important to maintain constant process parameters (temperature, mixing intensity, etc.). A supramolecular complementary three-dimensional network formed in the bituminous binder with the participation of composite butadiene-styrene copolymers gives road surfaces additional strength, wear resistance, heat resistance and the ability to undergo highly elastic deformations in the temperature range from -70°C to +90°C. Asphalt concrete pavements based on modified polymer-bitumen binders increase the performance of motorway roadbeds and resistance to plastic deformation (shearing, rutting).

Keywords: road, road bitumen, functional polymers, asphalt concrete coatings

For citation:

Nedoseko A.I., Khalikov R.M., Pavlov S.Yu., Glazachev A.O. Supra-molecular improvement of the performance characteristics of asphalt concrete road surfaces by structuring additives of functional polymers // Smart Composite in Construction. 2025. Vol. 6, Iss. 4. P. 43-54.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-43-54



ВВЕДЕНИЕ

Автомобильные дороги, как и другие транспортные сооружения, рассчитаны на определенный срок эксплуатации, в течение которого они подвергаются интенсивным нагрузкам от наземного транспорта и воздействию погодно-климатических факторов. На всех автомагистралях Российской Федерации, особенно в мегаполисах, нерешенными остаются проблемы, которые связаны с быстрым износом асфальтобетонного дорожного покрытия из-за появления разрушений. Выбоины, неровности, трещины и ямы во многом связаны с ростом грузоперевозок. Среди традиционных и разрабатываемых способов улучшения качества дорожного полотна достаточно эффективным является введение различных добавок в асфальтобетонную смесь [1].

Главные недостатки основного вяжущего вещества в асфальтобетоне (дорожный битум) – атмосферная термоокислительная деструкция и низкая деформационная устойчивость при колебаниях температуры (охрупчивание в зимний период и оплывание, колеообразование в летний период). Для увеличения срока службы асфальтобетонных покрытий транспортных магистралей, за счет повышения водостойкости и сдвигостойчивости, разработаны модифицированные битумные вяжущие, среди которых следует выделить полимерно-битумные композиции [2, 3]. Взаимодополняющее (комплементарное) введение функционального полимера в состав дорожного битума увеличивает износостойкость дорог, сокращает финансовые расходы на их эксплуатацию. Применение асфальтобетонных смесей с полимерно-битумными вяжущими увеличивает работоспособность покрытий дорожного полотна и устойчивость к образованию пластических деформаций (сдвигов, колей) при действии высоких и низких температур.

Цель работы – поиск технологичных подходов к улучшению эксплуатационных характеристик асфальтобетонных покрытий за счет введения в них адгезионных и структурирующих добавок функциональных взаимодополняющих полимеров.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Метод приготовления битума, модифицированного функциональными полимерами, сводится к следующему. Нефтяной дорожный битум марки БНД 70/100 (Новоиль, Уфа) нагревали до 165-180°C в гидродинамических смесителях со скоростью 120-150 мин⁻¹. Далее порциями добавляли измельченный бутадиен-стирольный сополимер СБС 330Л (Сибур, Воронеж) в количестве 3.5% (по массе), затем увеличивали интенсивность оборотов до 750-800 мин⁻¹ и перемешивали 50-60 мин при температуре 170°C до получения гомогенной композиции.

Битумные вяжущие оценивали по ГОСТ 33133-2014:

- пенетрация (глубина проникновения иглы);
- температура размягчения (по кольцу и шару);
- растяжимость.

Эти характеристики в дальнейшем определяют большинство технологических параметров дорожных асфальтобетонов. С помощью дуктилометра ДАБ-150 при температуре 25°C (характеризует технологические характеристики трехмерной наносетки) и 0°C (работоспособность при низких температурах) определяли эластичность композиций. Результаты испытаний физико-механических показателей битумных вяжущих после введения в них структурирующих добавок функциональных полимеров приведены в табл. 1.

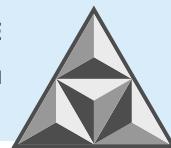


Таблица 1. Физико-механические параметры исходного и модифицированного битумного вяжущего марки БНД 70/100
Table 1. Physical and mechanical parameters of the initial and modified bitumen binder grade PRB 70/100

Количество полимерной добавки, % от массы битума	Пенетрация		Температура размягчения, °С	Растяжимость	
	при 25°C, 0.1 мм	при 0°C, 0.1 мм		при 25°C, см	при 0°C, см
0	85	24	49	95.2	3.8
3.5	58	28	70	74.5	14.0

Добавление полимерных функциональных модификаторов приводит к увеличению температуры размягчения и снижению температуры хрупкости битумных вяжущих за счет формирования устойчивых надмолекулярных (супрамолекулярных) комплексов. Минеральный каркас асфальтобетона формировали из смеси карбонатного минерального порошка МП-1, дробленного песка и щебня (фракция 5-10 мм) с соответствующим гранулометрическим составом по ГОСТ 32761-2014 и ГОСТ 33029-2014. Асфальтобетонную смесь готовили смещиванием по ГОСТ Р 58406.1-2020 полимерно-битумного вяжущего (7 мас%) в нагретом состоянии, минерального порошка (12 мас%), песка (16 мас%) и щебня (остальное). Испытания асфальтобетонного дорожного покрытия проводили по методикам, контролирующими технологические характеристики битумно-минеральных композиций.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Гибкие бутадиеновые и жесткие стирольные блоки полимеризуются в форме многообразных сополимеров, где полистирольные домены размерами 0.4-0.7 мкм выполняют в макромолекуле роль функции надмолекулярных узлов вулканизационной наносетки. Композитные бутадиен-стирольные сополимеры с молярной массой $\approx 10^5$ за счет набухания и частичного растворения в ароматических углеводородах битумов достаточно хорошо совмещаются с битумными дорожными вяжущими при температуре 175°C [4, 5]. Термопластичные блок-сополимеры вводят в состав битумных вяжущих в гранулированном виде, а для технологического улучшения совместимости модифицирующих сополимеров и вяжущего используют пластификаторы – индустриальные масла, межфазные компатибилизаторы и др.

Взаимодополняющая супрамолекулярная пространственная сетка, образующаяся в битуме с участием композиционных бутадиен-стирольных сополимеров, придает достаточно высокую прочность, износостойкость, теплостойкость и способность к высокоэластическим деформациям [6] асфальтобетонным дорожным покрытиям в интервале температур от -80°C до +90°C; это особенно заметно в условиях роста интенсивности движения большегрузных автомобилей. Следует отметить, что для производства модифицированных полимерно-битумных вяжущих необходимо улучшить их адгезию к поверхности комплементарных минеральных наполнителей. Высокие показатели адгезии модифицированного битума свидетельствуют о способности удерживаться на поверхности заполняющих материалов при разрушающем воздействии воды. Характеристики основных компонентов (песок, щебень, минеральный порошок, макромолекулярно-битумное вяжущее), а также параметры технологического процесса учитываются как критерии при управлении качеством готовой асфальтобетонной смеси. Пустотность щебня и остаточная пористость



минеральных компонентов уплотненного асфальтобетона колеблются в необходимых пределах; другие характеристики асфальтобетона также соответствуют требованиям ГОСТ Р 58406.1-2020.

Различные виды асфальтобетонов для дорожных покрытий отличаются по составу сырьевых материалов, технологии изготовления и физико-механическим свойствам. Векторы супрамолекулярного улучшения дорожных асфальтобетонных композиций путем введения различных добавок направлены на обеспечение «умного» самозалечивания микротрещин автодорожного покрытия, самоочищения зимних снежно-ледяных отложений и др. [7]. Температурная устойчивость характеризуется способностью асфальтобетона противостоять резким перепадам погоды: в модифицированном асфальтобетоне термомеханические свойства изменяются более плавно – от пластичных (при высоких температурах) до хрупких (при низких температурах). Это повышает стабильность покрытий к сдвиговым деформациям и образованию трещин.

Взаимодополняемые макромолекулы блок-сополимеров стирола и бутадиена, содержащие функциональные группы, за счет различных связей (ван-дер-Ваальсовых, водородных, гидрофобных, ион-дипольных и электростатических) обеспечивают большое число межмолекулярных контактов, определяющих динамику надмолекулярного структурообразования [8] прочных асфальтобетонных покрытий (рис. 1).

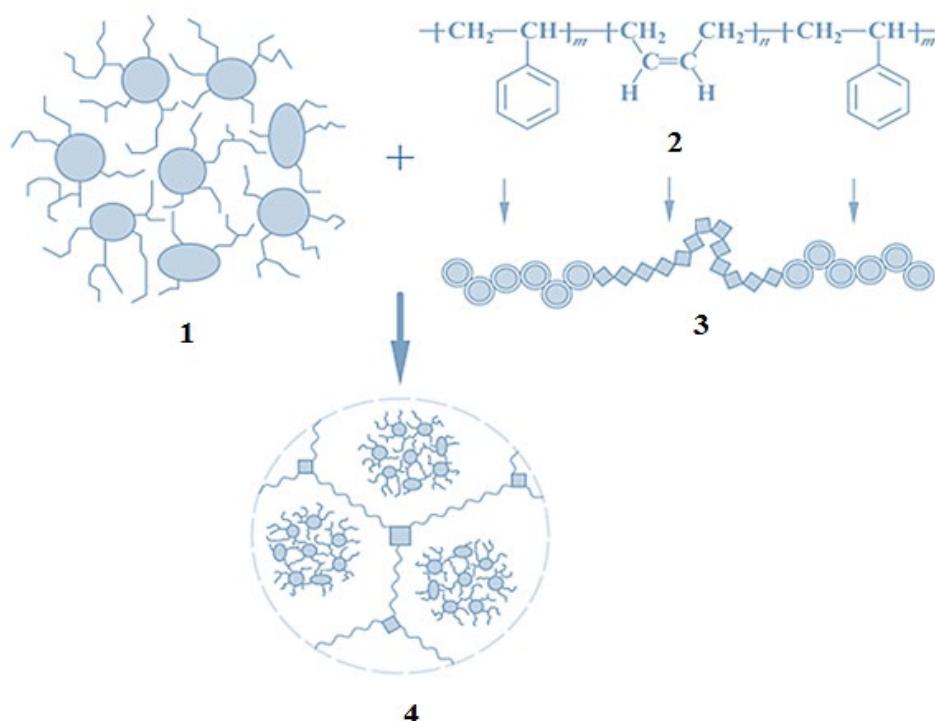


Рис. 1. Схема формирования микроструктуры битумных вяжущих, модифицированных бутадиен-стирольными сополимерами: 1 – битумный нанокластер; 2 – фрагмент макромолекулы бутадиен-стирола;

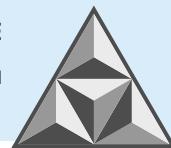
3 – линейная цепь сополимера; 4 – трехмерная сетка полимерно-битумного вяжущего

Fig. 1. Scheme of microstructure formation in bituminous binders modified by butadiene-styrene copolymers:

1 – bitumen nanocluster; 2 – fragment of a macromolecule of a styrene-butadiene;

3 – linear chain of the copolymer; 4 – three-dimensional polymer bitumen binder mesh

Модифицированное бутадиен-стирольными сополимерами битумное вяжущее – супрамолекулярная матрица хорошо адсорбируется на шероховатой поверхности частиц тонкомолотых минеральных порошков. При оптимальном соотношении улучшенных битумов и минеральных наполнителей резко усиливается трещиностойкость в зоне обратимых



деформаций. При совместном воздействии механических нагрузок, колебаний температур и агрессивных сред диффузия разрушающих агентов в контактную зону между минеральным наполнителем и пленкой битумного вяжущего является главным доминирующим фактором появления и фрактального роста микротрещин в асфальтобетонном дорожном покрытии.

Пределы прочности на сжатие асфальтобетона при температурах +50°C, +20°C и 0°C являются наиболее воспроизводимыми показателями температурной устойчивости. Минимальное значение этого показателя при +50°C – не менее 0.9 МПа (характеризует способность асфальтобетонного покрытия противостоять сдвиговым деформациям), а максимальное – не более 12.0 МПа при 0°C. При современном строительстве автотрасс I категории в качестве структурирующих функциональных полимерных добавок щебеноочно-мастичных асфальтобетонов используют, как правило, гранулированное целлюлозное волокно.

В дисперсионной среде битумных вяжущих макромолекулярные бутадиен-стирольные сополимеры формируют трехмерную наносетку и существенно усиливают эластичность. Это характеризует способность вяжущего к обратимым эластическим деформациям; одновременно снижается температура хрупкости и повышается температура размягчения. Изучение реологических свойств дорожного битума (в частности, динамической вязкости при 60°C) со структурирующими добавками функциональных полимеров позволяет оценить их влияние на микроструктуру асфальтобетонной смеси, а в дальнейшем – выбрать оптимальное их сочетание и дозировку, получить вяжущее с требуемыми характеристиками (устойчивость к колеобразованию, повышенная уплотняемость в процессе укладки при пониженных температурах).

В процессе изготовления улучшенных функциональными добавками асфальтобетонных смесей осуществляют постоянный контроль процесса и оперативные испытания образцов покрытий. Цифровое регулирование параметров в системе автоматизированного управления производством асфальтобетонной смеси [9] позволяет эффективно выработать наиболее подходящий вариант функционирования технологической линии.

Следует также отметить, что для обеспечения повышенной устойчивости к сдвигу и образованию трещин в асфальтобетонных покрытиях в качестве армирующих компонентов используют стекловолокно, полимерные фибры и др. [10]. Использование адгезионных сополимерных добавок облегчает формирование прочных связей между вяжущим и армирующими компонентами, уменьшает эрозионное отслаивание и усиливает гидроизолирующие характеристики асфальтобетона.

Отметим также, что решающее влияние на эксплуатационные характеристики асфальтобетонных покрытий оказывают межфазные процессы, которые протекают на поверхности зерен минерального порошка при его взаимодействии с модифицированным стирол-бутадиеновыми добавками битумным вяжущим. Разрушение по контактной межфазной зоне происходит из-за малой когезионной прочности макромолекулярной битумной микропленки и недостаточной адгезии битумного вяжущего к поверхности минеральных компонентов асфальтобетона. Введение структурирующих добавок полимеров в битум (рис. 2) обеспечивает уплотнение поверхности асфальтобетона (на это указывает растровая микрофотография, снятая на электронном микроскопе JEOL JSM-6), а также заметное расширение температурного интервала пластичности и деформируемости асфальтобетона.

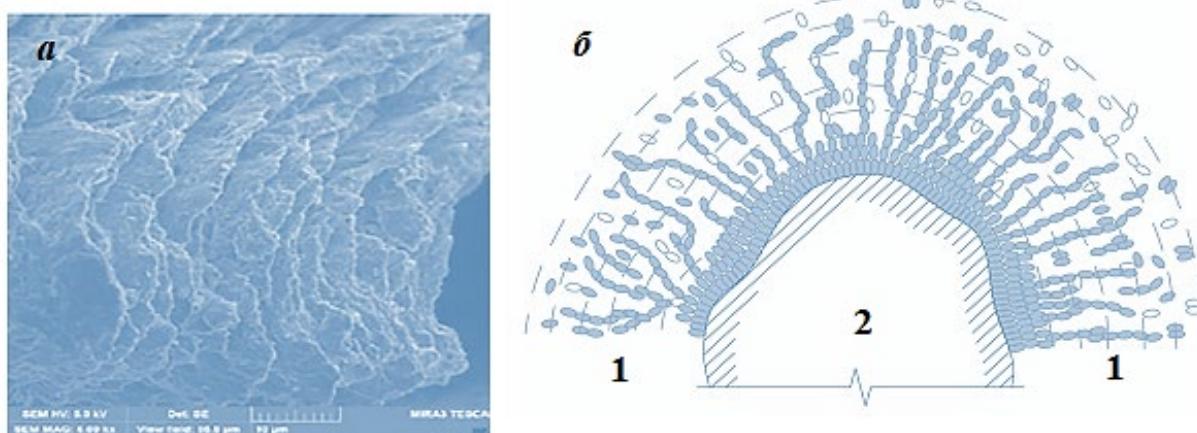


Рис. 2. Микрофотография асфальтобетона (а); схема межфазового взаимодействия битумно-полимерного вяжущего (1) с поверхностью минерального наполнителя и щебня (2) в асфальтобетоне (б)

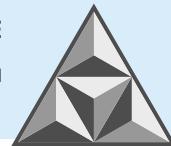
Fig. 2. Micrograph of asphalt concrete (a); scheme of interphase interaction of bitumen polymer binder (1) with the surface of mineral filler and crushed stone (2) in asphalt concrete (b)

Модифицированный полимерами дорожный битум обладает необходимой адгезией к поверхности наполнителей, что обеспечивает требуемую водостойкость и продолжительную эксплуатацию асфальтобетонного покрытия без эрозии. Взаимодополняющая активация минерального порошка асфальтобетонной смеси влияет на износостойкость дорожных покрытий [11]. Адгезионные супрамолекулярные взаимодействия приводят к фрактальной хемосорбции на шероховатой поверхности минеральных компонентов асфальтеновых нанокластеров.

К супрамолекулярным полимерным компонентам, используемым для функционального улучшения дорожных битумов, предъявляется ряд технико-экономических требований: хорошая совместимость с битумным вяжущим; температурный диапазон высокоэластичности от -70°C до +100°C; низкая стоимость. Реологические и физико-механические характеристики асфальтобетонных покрытий автодорог в значительной степени зависят от качества и оптимального соотношения в смеси битума и минеральных компонентов. В процессе технологического приготовления и транспортировки асфальтобетонных смесей к месту укладки, кроме воздействия температуры (165-180°C), разнонаправленное влияние оказывают межфазовые явления в пограничных слоях контакта полимерно-битумного вяжущего и минерального заполнителя, а в эксплуатируемом асфальтобетоне дорожного полотна – разрушающие климатические и физико-механические факторы.

При строительстве новых скоростных автомагистралей с высокой транспортной интенсивностью в 2024 г. в Российской Федерации использовано более 1.2 млн. т модифицированного битума. Срок эксплуатации автодорожных покрытий с использованием полимер-асфальтобетонов превышает время применения традиционных покрытий на 50%.

Востребованным трендом для реализации национального проекта России «Инфраструктура для жизни» выступает также использование в производстве асфальтобетонов техногенных отходов – шлаков, золы-уноса, отходов нефтеперерабатывающей промышленности и др. [12, 13]. В качестве макромолекулярных улучшителей технологических характеристик асфальтобетонных дорожных покрытий могут использоваться структурирующие добавки изотактического полипропилена, вторичного полиэтилентерефталата и др. [14].



ВЫВОДЫ

Использование битумного вяжущего, улучшенного структурирующими добавками функциональных стирол-бутадиеновых сополимеров, повышает долговечность асфальтобетонных покрытий в 1.5 раз. Супрамолекулярная взаимодополняющая трехмерная сетка, которая формируется в битумном вяжущем с участием композиционных бутадиен-стирольных сополимеров, придает асфальтобетонным дорожным покрытиям высокую прочность, износостойкость, теплостойкость и способность к высокоэластическим деформациям в интервале температур от -70°C до +90°C.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Котенко Н.П., Щерба Ю.С., Евфорицкий А.С.** Влияние полимерных и функциональных добавок на свойства битума и асфальтобетона // Пластические массы. 2019. № 11-12. С. 47-49. <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-11-12-47-49>.
2. **Porto M., Caputo P., Loise V., Rossi C.O., Eskandarsefat S., Teltayev B.** Bitumen and bitumen modification: a review on latest advances // Appl. Sci. 2019. Vol. 9. № 4. P. 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>.
3. **Тимрот С.Д., Калаева С.З. кзы, Маркелова Н.Л., Калаев Р.Э.** Модифицирующая добавка для повышения качества асфальтобетона // Умные композиты в строительстве. 2024. Т. 5. Вып. 2. С. 51-61. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>. DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-51-61.
4. **Халиков Р.М., Иванова О.В., Глазачев А.О.** Супрамолекулярное улучшение полимерными нанокомпозитами технологических параметров асфальтобетонных дорожных покрытий // Актуальные проблемы технических, естественных и гуманитарных наук: Мат. Межд. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2022. С. 432-436.
5. **Небратенко Д.Ю., Лушников Н.А.** Полимерные модификаторы битума: бутадиен-стирольный термоэластопласт и синдиотактический полибутадиен // Вестник ВСГУТУ. 2022. № 2 (85). С. 78-86. https://doi.org/10.53980/24131997_2022_2_78.
6. **Dong F., Yang P., Yu X., Jiang M., Wang S., Zu Y., Chen B., Wang J.** Morphology, chemical reaction mechanism, and cross-linking degree of asphalt binder modified by SBS block co-polymer // Construction and Building Mat. 2023. Vol. 378. P. 131204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131204>.
7. **Игнатьев А.А.** Добавки в асфальтобетон. Обзор литературы // Известия КГАСУ. 2023. № 1 (63). С. 14-30. https://doi.org/10.52409/20731523_2023_1_14.
8. **Халиков Р.М., Веденникова Т.Г., Шарипов Р.А., Рашидова С.Т., Борисов И.М.** Синергетический динамизм формирования надмолекулярных структур полимеров // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2008. Т. 51. № 11. С. 92-94.
9. **Пудовкин А.Н., Халиков Р.М., Булатов Б.Г., Соколова В.В., Недосеко И.В.** Цифровое регулирование параметров в системе автоматизированного управления производством асфальтобетонной смеси // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2021. Т. 17. № 3-4. С. 103-113. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-103-113>.
10. **Калгин Ю.И., Комаров Е.В.** Модифицированный бутадиен-стирольный термоэластопласт и полимерные добавки для дорожного строительства // Изв. вузов. Строительство. 2020. № 9 (741). С. 58-67. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-58-67.
11. **Глазачев А.О., Павлов С.Ю., Иванова О.В., Халиков Р.М.** Синергетические технологии конструирования износостойких слоев асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог // Тенденции развития науки и образования. 2024. № 106-9. С.22-25. DOI 10.18411/trnio-02-2024-481.
12. **Недосеко А.И., Халиков Р.М.** Ресурсосберегающие технологии использования золошлаковых отходов в региональном строительстве транспортных сооружений // Проблемы строительного комплекса России: Мат. XXIX Межд. конф. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2025. С. 370-373.
13. **Crucio J., Picado-Santos L., Neves J., Capitão S.** A review of nanomaterials effect on mechanical performance and aging of asphalt mixtures // Appl. Sci. 2019. № 9 (18). P. 3657. <https://doi.org/10.3390/app9183657>.



14. **Игнатьев А.А., Разговоров П.Б., Готовцев В.М.** Структурообразование и потребительские свойства гранулированных асфальтобетонных смесей с включением фосфогипса и вторичного полиэтилентерефталата // Строительство и реконструкция. 2023. № 1 (105). С. 123-132. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-123-132.

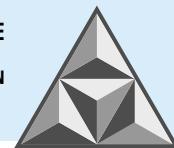
Поступила в редакцию 27.08.2025

Одобрена после рецензирования 31.10.2025

Принята к опубликованию 12.12.2025

REFERENCES

1. **Kotenko, N.P., Shcherba, Yu.S. and Efforitskiy, A.S.** (2019), "Effect of polymer and functional additives on the properties of bitumen and asphalt-concrete", *Plasticheskie massy*, no. 11-12, pp. 47-49 (in Russian). <https://doi.org/10.35164/0554-2901-2019-11-12-47-49>.
2. **Porto, M., Caputo, P., Loise, V., Rossi, C.O., Eskandarsefat, S. and Teltayev, B.** (2019), "Bitumen and bitumen modification: a review on latest advances", *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 4, p. 742. <https://doi.org/10.3390/app9040742>.
3. **Timrot, S.D., Kalaeva, S.Z. kzy, Markelova, N.L. and Kalaev, R.E.** (2024), "A modifying additive for asphalt concrete quality improvement", *Smart Composite in Construction*, vol. 5, no. 2, pp. 51-61. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5160/view>. DOI: 10.52957/2782-1919-2024-5-2-51-61 (in Russian).
4. **Khalikov, R.M., Ivanova, O.V. and Glazachev A.O.** (2022), "Supramolecular improvement of technological parameters of asphalt concrete road surfaces by polymer nanocomposites", *Act. probl. of techn., natur. and human. sci.: Mat. Inter. conf.* Ufa: USPTU, pp. 432-436 (in Russian).
5. **Nebratenko, D.Yu. and Lushnikov, N.A.** (2022), "Polymer bitumen modifiers: butadiene-styrene thermoplastic and syndiotactic polybutadiene", *Bull. VSGUT*, vol. 2, no. 85, pp. 78-86. https://doi.org/10.53980/24131997_2022_2_78 (in Russian).
6. **Dong, F., Yang, P., Yu, X., Jiang, M., Wang, S., Zu, Y., Chen, B. and Wang, J.** (2023), "Morphology, chemical reaction mechanism, and cross-linking degree of asphalt binder modified by SBS block co-polymer", *Construction and Building Materials*, vol. 378, p. 131204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131204>.
7. **Ignatyev, A.A.** (2023), "Additives in asphalt concrete. Literature rev.", *Izv. KGASU*, vol. 1, no. 63, pp. 14-30. https://doi.org/10.52409/20731523_2023_1_14 (in Russian).
8. **Khalikov, R.M., Vedernikova, T.G., Sharipov, R.A., Rashidova, S.T. and Borisov, I.M.** (2008), "Synergetic dynamism of formation of supramolecular structures of polymers", *ChemChemTech.*, vol. 51, no. 11, pp. 92-94 (in Russian).
9. **Pudovkin, A.N., Khalikov, R.M., Bulatov, B.G., Sokolova, V.V. and Nedoseko, I.V.** (2021), "Digital control of parameters in the automated control system for the production of asphalt concrete mixtures", *Electrotech. and inform. complexes and systems*, vol. 17, no. 3-4, pp. 103-113. <https://doi.org/10.17122/1999-5458-2021-17-3-4-103-113> (in Russian).
10. **Kalgin, Yu.I. and Komarov, E.V.** (2020), "Modified styrene butadiene thermoplastic and polymer additives for road construction", *Izv. vuzov. Construction*, vol. 9, no. 741, pp. 58-67. DOI: 10.32683/0536-1052-2020-741-9-58-67 (in Russian).
11. **Glazachev, A.O., Pavlov, S.Yu., Ivanova, O.V. and Khalikov, R.M.** (2024), "Synergetic technologies for designing wear-resistant layers of asphalt-concrete road coverings", *Trends in the development of science and education*, no. 106-9, pp. 22-25 (in Russian). DOI 10.18411/trnio-02-2024-481.
12. **Nedoseko, A.I. and Khalikov, R.M.** (2025), "Resource-saving technologies for the use of ash and slag waste in the regional construction of transport facilities", *Problems of the Russian construction complex: Mat. XXIX Inter. Conf.* Ufa: Publ. USPTU, pp. 370-373 (in Russian).
13. **Crucio, J., Picado-Santos, L., Neves, J. and Capitão, S.** (2019), "A review of nanomaterials effect on mechanical performance and aging of asphalt mixtures", *Appl. Sci.*, vol. 9, no. 18, p. 3657. <https://doi.org/10.3390/app9183657>.



14. **Ignatyev, A.A., Razgovorov, P.B. and Gotovtsev, V.M.** (2023), "Structure formation and consumer properties of granular asphalt-concrete mixtures with phosphogypsum inclusion and secondary polyethylene terephthalate", *Construction and reconstruction*, vol. 1, no. 105, pp. 123-132. DOI: 10.33979/2073-7416-2023-105-1-123-132 (in Russian).

Received 27.08.2025

Approved 31.10.2025

Accepted 12.12.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.72

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-55-66

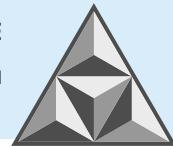
Двойной крекинг как перспективный метод получения неокисленного битума для дорожного строительства

А.В. Вихрев, Ю.С. Кандрашкина

Александр Владимирович Вихрев*, Юлия Сергеевна Кандрашкина

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

user1268@gmail.com, juliakandrashkina@gmail.com*



Представлено комплексное исследование инновационной технологии получения неокисленного битума, основанной на методе двойного крекинга (2К) нефтяных остатков (гудрон, мазут). Приведено сравнение 2К-битума с окисленными битумами марки БНД (ГОСТ 33133-2014). Подробный анализ молекулярной структуры традиционных и модифицированных битумов выявил нестабильность последних, где полимерные добавки лишь кратковременно поддерживают природную структуру. В отличие от традиционных битумов, неокисленный битум, полученный методом двойного крекинга, характеризуется оптимальным соотношением асфальтенов и мальтенов, что определяет его эксплуатационные свойства, ценные для дорожного строительства. Детально описаны этапы процесса двойного крекинга, представлен материальный баланс, а также сформулированы требования к качеству неокисленного битума для строительства дорог. Значимый социально-экономический эффект выражается в повышении долговечности дорожных покрытий и снижении затрат на их содержание.

Ключевые слова: битум, крекинг, гудрон, мазут, автомобильные дороги, дорожное полотно

Для цитирования:

Вихрев А.В., Кандрашкина Ю.С. Двойной крекинг как перспективный метод получения неокисленного битума для дорожного строительства // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 4. С. 55-66. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-55-66



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-55-66

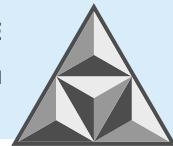
Double cracking as a promising production method non-oxidized bitumen for road construction

A.V. Vikhrev, Yu.S. Kand rashkina

Aleksandr Vladimirovich Vikhrev*, Yulia Sergeevna Kand rashkina

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

*user1268@gmail.com**, *juliakand rashkina@gmail.com*



The paper presents a comprehensive study of an innovative technology for producing unoxidised bitumen based on the double cracking (2K) method of petroleum residues (tar, fuel oil). The authors compare 2K bitumen with oxidised bitumen of the BND grade (GOST 33133–2014). A detailed analysis of the molecular structure of traditional and modified bitumens revealed the instability of the latter, where polymer additives only temporarily support the natural structure. Unlike traditional bitumens, unoxidised bitumen obtained by double cracking is characterised by an optimal ratio of asphaltenes and maltenes. This determines its operational properties, which are valuable for road construction. The paper describes in detail the stages of the double cracking process and presents the material balance. The authors also formulated requirements for the quality of unoxidised bitumen for road construction. A significant socio-economic effect is achieved by increasing the durability of road surfaces and reducing the costs of their maintenance.

Keywords: bitumen, cracking, tar, fuel oil, highways, roadbed

For citation:

Vikhrev A.V., Kand rashkina Yu.S. Double cracking as a promising production method non-oxidized bitumen for road construction // *Smart Composite in Construction*. 2025. Vol. 6, Iss. 4. P. 55-66.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-55-66



ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на разработку альтернативных материалов, нефтяной битум продолжает оставаться основным вяжущим компонентом при строительстве дорожных покрытий, что объясняется его потребительскими свойствами и экономической целесообразностью применения. За исключением цементного бетона, остаточные продукты переработки нефти наиболее широко используют для решения указанной задачи в строительной сфере [1].

Более того, разработка нового вяжущего материала, обладающего аналогичными свойствами, в настоящее время представляется сложным и экономически нецелесообразным вариантом. Это подчеркивает значимость исследований, направленных на улучшение эксплуатационных характеристик битумов и разработки инновационных технологий, позволяющих максимально эффективно использовать данный природный ресурс [2].

На сегодняшний день фактический срок службы асфальтобетонных покрытий не соответствует нормативным показателям. На магистралях высшей категории повреждения фиксируются уже через два-три года, а на сильно загруженных участках (например, МКАД) колея образуется в течение нескольких месяцев после проведения ежегодного ремонта.

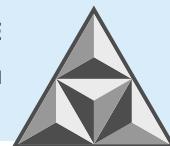
В зимний период колейные деформации и растрескивание способствуют возникновению аварийного состояния дорожного покрытия.

Преждевременный выход автодорог из строя характеризуется разрушением битумной и битумоминеральной составляющих асфальтобетона, вызванным деформациями и растрескиванием. Деформации под воздействием высоких и низких температур являются основным фактором, лимитирующим эксплуатационные свойства асфальтобетонных материалов. Его устранение позволит значительно увеличить срок службы и качество дорожных покрытий, повысить безопасность движения и обеспечить существенную экономию ресурсов на строительство и содержание автомобильных дорог.

Автомобильные дороги подвергаются значительным нагрузкам, обусловленным деформацией земляного полотна, предотвращение которой путем повышения жесткости конструкции не представляется возможным. Обеспечение целостности структуры дорожного покрытия достигается за счет пластической деформации материала, компенсирующей усилия сжатия и растяжения. Динамические и статические транспортные нагрузки, в совокупности с деформациями грунта, определяют требования к реологическим свойствам дорожного полотна в широком температурном диапазоне.

Упруго-пластичные свойства вяжущего компонента, обеспечивающие устойчивость к деформациям, растрескиванию и атмосферному старению и сохранение целостности дорожного покрытия, являются ключевым фактором. Разработка долговечных битумов и на их основе вяжущих материалов, обладающих указанными свойствами в диапазоне температур $-50\ldots+75^{\circ}\text{C}$, является приоритетным направлением исследований в области нефтепереработки и дорожного строительства [3].

В настоящее время задача обеспечения качества и восстановления дорожных покрытий осложняется сезонным дефицитом и высокой стоимостью битумов и минеральных наполнителей. Полимерно-битумные вяжущие (ПБВ), обладающие улучшенными характеристиками, производятся в ограниченных объемах и характеризуются высокой стоимостью, превышающей таковую для традиционных битумов (БНД) в два раза. Недостаток



качественных вяжущих создает значительные проблемы для развития дорожного строительства.

К основным проблемам современных дорожных материалов относятся:

- Необходимость производства широкой номенклатуры битумов для различных климатических зон.

- Недостаточная адгезия к заполнителям в асфальтобетонах.

- Высокая стоимость.

- Неэффективная логистика поставок на этапе активного дорожного строительства.

Компонентный состав определяет физико-химические свойства нефтяного битума. Так, БНД представляет собой сложную многокомпонентную коллоидную систему, не имеющую четкой температуры фазового перехода. Его структура – коллоидный раствор сложных соединений (асфальтенов) в смеси высокомолекулярных углеводородов (мальтенов).

Асфальтены, находясь в твердом состоянии в изучаемом температурном диапазоне, выступают в качестве структурообразующих элементов, определяющих молекулярный каркас битума. Конфигурация каркаса формируется в зависимости от размеров и формы асфальтеновых агрегатов (АА) [4].

Предполагается, что однородные АА, характеризующиеся близкой молекулярной массой и правильной геометрической формой, формируют изотропную структуру с минимальными внутренними напряжениями. Пространство между частицами каркаса заполняют мальтены, находящиеся на начальном этапе отверждения в жидкой фазе. По мере снижения температуры происходит кристаллизация отдельных компонентов мальтеновой фракции.

Компонентный состав битума включает смолы (См), представленные преимущественно гетероциклическими и гибридными соединениями. Эти соединения, содержащие атомы серы, азота, кислорода и металлов, определяют полярность и поверхностную активность смол. Асфальтены, являясь высокомолекулярными компонентами битума, схожи по составу и структуре со смолами, но отличаются более высокой молекулярной массой. Под воздействием УФ-излучения асфальтены подвергаются деградации, что приводит к потере их растворимости в бензole [5].

Свойства нефтяного битума зависят от концентрации асфальтенов, соотношения различных групп углеводородов, а также от химической природы, размера и формы молекул асфальтенов. Размеры макромолекул асфальтенов, на несколько порядков превосходящие размеры обычных молекул, оказывают значительное влияние на физические и реологические свойства битума. Эти факторы определяют тиксотропию, синерезис и другие особенности поведения битумных материалов [6].

Оптимальный компонентный состав битума характеризуется соотношением: 25-30% АА + 40-50% См + 20-30% ароматических углеводородов (Ар). Асфальтены с "правильной" формой и близкими размерами формируют каркас с равномерным распределением напряжений и минимальной свободной энергией, что обеспечивает высокую пластичность, трещиностойкость и стабильность механических свойств в широком диапазоне температур эксплуатации дорожных покрытий. Природный парамагнетизм асфальтенов способствует приданию эффективных адгезионных свойств неокисленным битумам.

Для производства нефтяного битума используют различные тяжелые нефтяные остатки, такие как гудрон и кубовый остаток вакуумной перегонки нефти.



В настоящее время в мировой нефтеперерабатывающей промышленности применяют два подхода к производству битумных вяжущих:

- *Окисление: удаление летучих компонентов из тяжелых нефтяных остатков в реакторах.* Неселективность процесса вызывает «уплотнение» асфальтенов, снижая растяжимость и повышая хрупкость. Для компенсации применяется компаундирование (добавление неокисленного гудрона/полимеров).
- *Технология получения неокисленных (дистиллятных) битумов.* Основана на вакуумной перегонке битуминозных нефтей, с последующей корректировкой свойств за счет остатков деасфальтизации. Недостатком данного метода является ограниченность сырьевой базы.

Ключевым фактором при производстве вяжущего является сохранение однородной формы и монодисперсности асфальтенов, что минимизирует внутренние напряжения в твердом битумном каркасе. Молекулярная масса компонентов битума оказывает существенное влияние на его свойства. С целью оптимизации характеристик битума следует поддерживать молекулярную массу смол в диапазоне 800-2000 г·моль⁻¹, а для ароматических углеводородов – 300-1000 г·моль⁻¹.

Поверхностный крекинг тяжелых нефтяных остатков (2К-крекинг) представляет собой технологию деструкции связей С-С, в которой движущей силой является поверхностная энергия (E_6) на границе раздела фаз (пена). Реагенты, находящиеся в поверхностном слое, подвергаются термодеструкции с более низким энергетическим барьером (на 40-100 кДж·моль⁻¹), что позволяет снизить температуру термолиза (до 390-430°C) и уменьшить коксообразование [6].

Дополнительный эффект в зоне контакта обусловлен ориентацией реагентов (эффект ПАВ), при которой алкильные группы направлены в газовую фазу, что повышает скорость разрушения исходной системы.

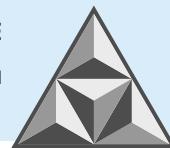
Для 2К-крекинга характерны следующие процессы:

- Полностью разрушаются высокомолекулярные парафины, образуя дистилляты (НК-500) с минимальным содержанием олефинов.
- В результате термодеструкции происходит распад нафеноароматических фрагментов смол и асфальтенов. Этот процесс инициирует образование нового потока асфальтенов, тяжелых смол и высокомолекулярных ароматических углеводородов, характеризующихся пониженным содержанием водорода. Вышеуказанные продукты реакции удаляются из реакционной зоны.
- Коксообразование блокируется благодаря поверхностной энергии и пониженной температуре.

Нисходящий поток тяжелых смолистых остатков (АА+См+Ар) представляет собой неокисленный битум с регулируемым компонентным составом, не зависимым от характеристик исходного сырья, где концентрация компонентов контролируется высотой пенного столба (временем крекинга) [7].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Кафедрой "Автомобильные дороги" (ВлГУ) совместно с ООО «НПО Поверхность» (Владимир) разработан проект малотоннажной установки 2К-крекинга тяжелых нефтяных остатков (гудрона) для организации децентрализованного производства вяжущего материала вблизи асфальтобетонных заводов (АБЗ) и площадок хранения минеральных компонентов.



Данный подход позволяет:

- повысить гибкость и качество производства асфальтобетонных смесей за счет оперативного изменения ассортимента вяжущих;
 - снизить логистическую нагрузку, связанную с доставкой битума на АБЗ в период активного дорожного строительства;
 - исключить необходимость длительного хранения готового битума;
 - снизить стоимость вяжущего.

Для получения неокисленного дорожного битума планируется создание опытно-промышленной установки 2К-крекинга тяжелых нефтяных остатков. В качестве прототипа выбрана установка МПК-100 с производительностью по сырью 100 кг·ч⁻¹. В качестве сырья предусмотрено использование гудрона (кубовый остаток АВТ) и других тяжелых нефтяных остатков, таких как мазут.

Экономическая оценка эффективности предложенной технологии проведена на основе расчета материального и энергетического баланса процесса переработки на установке МПК-100.

Сырье транспортируется на площадку и перекачивается в теплоизолированные резервуары РГС-50 (рис. 1).

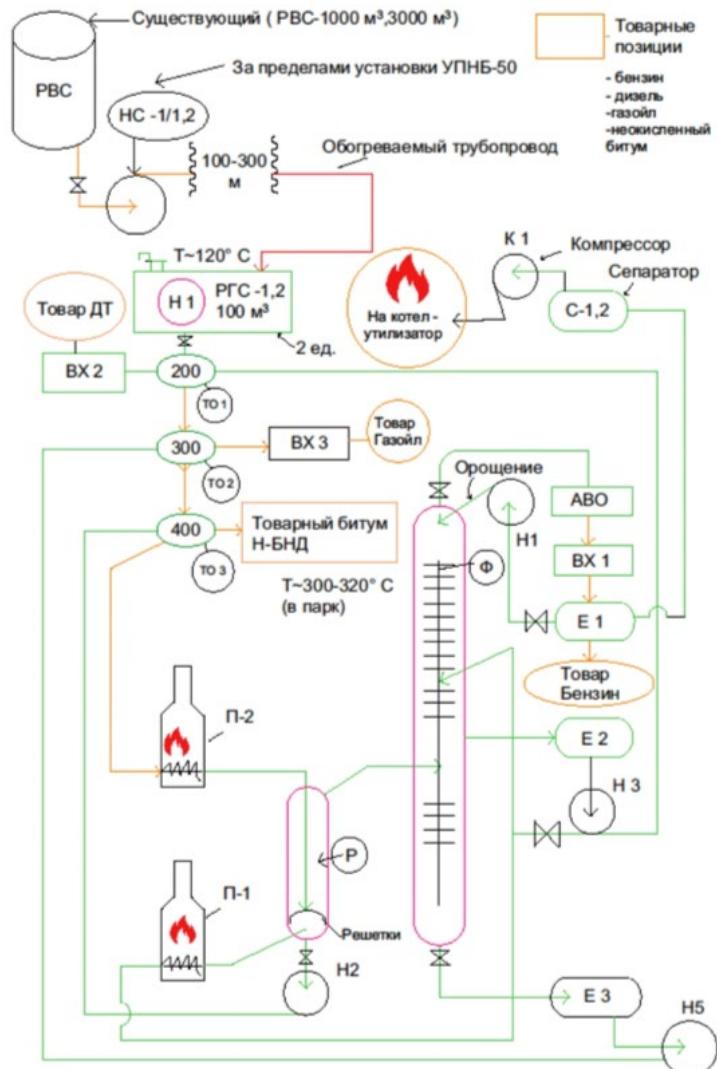


Рис. 1. Схема процесса двойного крекинга

Fig. 1. Diagram of the double cracking process



Температура (100-150°C) поддерживается циркуляцией по контуру РГС – Н – Ф – П-0/1 (сырьевой контур) с использованием электронагревателя П-0/1. Сырьевой контур обеспечивает подачу сырья на узел компаундирования и отпарку воды. Перемешивание обеспечивает гомогенизацию, выравнивание состава и поддержание температуры [8].

На узле компаундирования происходит смешение гудрона с газойлем (20-25 мас%). Смесь направляется в реактор крекинга Р через теплообменник Т-1 и электронагреватель П-1. В реакторе Р смесь преобразуется в пену с помощью барботажного узла (парообразная дизельная фракция 150-350°C, нагретая в аппарате П-2 до 500-550°C). Благодаря образованию пенообразной системы достигается значительная поверхность раздела фаз.

В реакторе Р на поверхности раздела фаз происходят реакции крекинга мальтенов и деалкилирования асфальтенов. Рабочее давление в системе составляет 0.2-0.3 МПа.

Процесс поверхностного крекинга базируется на принципе снижения энергии активации (E_a) деструктивных реакций, чему способствует высокая (20-40 мДж·м⁻²) поверхностная энергия межфазной границы. Снижение E_a (в сравнении с энергией разрыва связи С-С, около 400 кДж·моль⁻¹) достигает 10-20%. Это позволяет снизить температуру процесса до 390-430°C, увеличивая глубину реакций. Реагенты транспортируются к поверхности раздела фаз под действием адсорбционного поля. Данный подход способствует минимизации коксообразования и улучшению качества получаемого неокисленного битума [9].

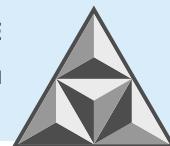
В процессе крекинга формируются два потока:

- парожидкостной (дизель 150-350°C, газойль 350-500°C), покидающий реактор через верхний штуцер и подаваемый во фракционатор Ф (ректификационная колонна, три тарелки). Разделение на фракции происходит в рабочей полости фракционатора;

- жидккая смесь вторичных асфальтенов, тяжелых нефтяных смол и полимолекулярных ароматических соединений (целевой продукт – неокисленный битум "ПЕРСПЕКТИВА"), локализованная в нижней части реактора Р; откачивается насосом в товарный парк через теплообменник Т-1 (рис. 1).

Фракции дизельного топлива и газойля извлекаются из фракционатора в жидкой фазе в рефлюксные емкости Е2 и Е3 соответственно. Емкость Е2 представляет собой блочную стриппинг-секцию, пары которой – керосиновая фракция. Избыток дизельного топлива из Е2 подается в нагреватель П-2 для создания барботирующего агента [8]. Газойль из емкости Е3 откачивается насосом и направляется на смешение с потоком исходного сырья на узле компаундирования. Избыток газойля поступает в товарный парк установки МПК-100. Непосредственно перед подачей в фракционатор около 10% газойля (при температуре 300°C) направляется в трубопровод реактора для подавления нежелательных реакций конденсации продуктов деструкции («квенч»).

Поток Б (газопаровой, микрокапельный), выходящий из фракционатора в газообразной фазе (температура 130-150°C), направляется в воздушный холодильник-конденсатор BX1, а затем – в емкость Е1 и сепаратор С1. Сконденсированная фракция Б + газы из аппарата BX1 поступает в рефлюксную емкость Е1, где происходит разделение фаз. Бензин из Е1 откачивается насосом в товарный парк и используется для орошения верхней части фракционатора. Газовая смесь с парами бензина поступает в сепаратор С1, где происходит полное отделение жидкой фазы (бензина). Оставшийся газовый поток направляется на факельную систему, как это описано в работе [10]. Материальный баланс характеризуют данные, представленные в табл. 1.

**Таблица 1.** Материальный баланс установки МПК-100**Table 1.** Material balance of the MPC-100 unit

Нефтепродукты, мас% выхода		Подача основного технологического насоса (производительность установки МПК-100 по сырью): от 100 до 500 кг·ч ⁻¹				
		В час, кг	За сутки, т	В месяц, т	В год, т	Примечания
Газы С1 – С4 (H ₂ S)	5-7	5-35	0.12-0.84	3.6-25.2	43.2-302.4	На факел (можно предусмотреть котел водонагреватель)
30-180 (бензин)	7-10	7-50	0.17-1,20	5.0-36.0	64.8-432.0	Растворитель – для технических нужд
180-350 (дизель)	15-17	15-85	0.36-2.04	10.8-61.2	129.6-734.4	Топливо для сельскохозяйственной техники
350-500 (газойль)	20-22	20-110	0.48-2.64	14.4-79.2	172.8-950.4	Топливо для сельскохозяйственной техники
Неокисленный битум 2К	50-55	50-275	1.2-6.6	36.0-198.0	432.0-2376.0	ДСУ – 3
Итого, т		100-500	2.4-12.0	72.0-360.0	864.0-4320.0	4000 т, с учетом ремонтов

Для оценки экономической эффективности опытно-промышленной установки МПК-100, работающей в сезонный период (апрель-ноябрь), приняты следующие параметры переработки: сырье (гудрон) – 3000 т; выход продуктов: УВГ С1 – С4 (H₂S) – 150 т; фракция 30-180 (бензин) – 250 т; фракция 180-350 (дизель) – 500 т; фракция 350-500 (газойль) – 600 т; дорожный битум 2К – 1500 т. В табл. 2 приведены показатели дорожного битума, регламентируемые в соответствии с ГОСТ 33133-2014 и ГОСТ 52056-2003.

Таблица 2. Основные показатели товарного дорожного битума**Table 2.** The main indicators of commercial road bitumen

Показатель	Норма для битума марки		Требования НПО «Поверхность»	Примечания
	ГОСТ 33133-2014 БНД 100/130	ГОСТ 52056-2003 ПБВ 130	ТУ (в разработке) 2К-битум 100/130	
Твердость (пенетрация), 0.1 мм				
0°C	≥ 30		≥ 50	50°C – рабочая температура асфальтобетонного покрытия в жаркий летний день. Битум должен оставаться в твердом состоянии при этой температуре, чтобы не допустить необратимой деформации
25°C	101-130		≥ 130	
50°C	∞ (жидкость)	∞ (жидкость)	∞ (жидкость)	100-130
50°C			150-200	
Растяжимость (дуктильность), см, не менее				
0°C	≥ 4		≥ 20	Растяжимость – способность сохранять структурную целостность при деформации в диапазоне от -50 до +70 °C; определяет прочность битума и смесей на его основе
25°C	≥ 70		≥ 30	
50°C	∞ (жидкость)	∞ (жидкость)	70	
Температура размягчения на приборе КИШ, °C	≥ 45	≥ 49	≥ 70	Под солнцем температура покрытия может достигать 70°C. Считаем это «порогом» температуры, обеспечивающим прочность покрытия
Температура хрупкости, °C, не выше	-20	-30	≤ -35	Необходимо понизить порог хрупкости покрытия



Эти показатели даны в сравнении с требованиями к физико-химическим параметрам вяжущего материала, обоснованными фактическими условиями эксплуатации дорожных покрытий в средней полосе Российской Федерации.

Несмотря на экспериментальный характер, работа установки МПК-100 характеризуется экономичностью. Планируемый объем производства неокисленного битума составляет 1500-1600 т в год [11].

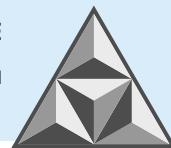
ВЫВОДЫ

Использование технологии двойного крекинга показало возможность производить высококачественный неокисленный битум Н-БНД для дорожного строительства; ключевым преимуществом является формирование сбалансированного компонентного состава. При содержании асфальтенов 25-30% в составе битума Н-БНД обеспечиваются его повышенная твердость и температура размягчения, прочность при воздействии высоких температур. Отсутствие парафинов в дорожном битуме Н-БНД, обусловленное 2К-катализом, повышает на 75% его морозостойкость по сравнению с битумом БНД. Наличие смол гарантирует пластичность и растяжимость дорожного материала Н-БНД в широком температурном диапазоне.

Благодаря сбалансированному составу и ненарушенной структуре битума Н-БНД исключается необходимость введения полимерных добавок и ПАВ, что снижает себестоимость дорожных работ. Полученный битум демонстрирует более высокую (на 125%) эффективность, чем битум БНД, и на 62% выше, чем таковая для полимерно-бетонного вяжущего. Таким образом, внедрение 2К-технологии для производства неокисленного битума является перспективным решением в контексте улучшения качества дорожных покрытий, увеличения срока их службы, снижения расходов и зависимости от локальных источников сырья.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Яконцева О.В., Щепетева Л.С. Влияние зернового состава асфальтобетона на показатели физико-механических свойств // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. 2020. № 3. С. 71-76. <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.03.09>.
2. Беляев П.С., Полушкин Д.Л., Макеев П.В., Фролов В.А. Модификация нефтяных дорожных битумов полимерными материалами для получения асфальтобетонных покрытий с повышенными эксплуатационными характеристиками // Вестник ТГТУ. 2016. Т 22. № 2. С. 264-271.
3. Соломенцев А.Б., Куликова А.В. Функциональные значения полимерных добавок // Автомобильные дороги. 2015. № 1. С. 64-69.
4. Проваторова Г.В., Вихрев А.В. Modification of Bitumen for Road Construction // Межд. науч.-тех. конф. MPCPE: Inter. Conf. on Mat. Phys., Build. Struct. and Technol. in Constr., Industr. and Prod. Eng. 2021.
5. Фокин М.Д., Вихрев А.В., Кандрашкина Ю.С., Ильичев Д.А. Перспективность использования неокисленных битумов в дорожном строительстве // Inter. Conf. on Mat. Phys., Build. Struct. and Technol. in Constr., Industr. and Prod. Eng. (MPCPE-2024): сб. тр. V Междунар. науч.-техн. конф. 23-25 апр. 2024 г., Владимир, ВлГУ им. А.Г. и Н.Г. Столетовых. Владимир: Аркаим, 2024. С 237-242.
6. Пат. 2645338 РФ. Способ термического крекинга органических полимерных отходов / Крючков В.А.; опубл. 09.12.2016.
7. Вихрев А.В., Фокин М.Д. Опытно-промышленная установка для получения неокисленных битумов // Дни науки студ. Владимир. гос. ун-та им. А.Г. и Н.Г. Столетовых: сб. мат. науч.-практ. конф. Владимир: ВлГУ, 2024. С. 955-961.
8. Пат. 2761921 РФ. Способ получения многофункциональной нанодисперсной каталитической системы на основе нативных хелатных комплексов металлов в условиях термолиза углеводородного сырья / Петухов Р.В., Королев Д.С.; опубл. 14.12.2021.



9. **Елсуюев К.А., Муравьева Я.И., Вдовых П.Е.** Метод оптимизации Нелдера-Мида // Прорывные научные исследования: проблемы, закономерности, перспективы: сб. ст. IX Межд. науч.-практ. конф.: в 4 ч. Пенза, 30 дек. 2017 года. Ч. 1. Пенза: «Наука и Просвещение» (ИП Гуляев Г.Ю.), 2017. С. 113-116.
10. **Yongchun Cheng, Di Yu, Guojin Tan, Chunfeng Zhu.** Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber – Diatomite – Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles, Art. (PDF Available) // Materials 11 (11):2148, October 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11112148>.
11. **Yafeng Gong, Haipeng Bi, Zhenhong Tian, Guojin Tan.** Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles // Appl. Sci. 8 (12):2581, Dec. 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8122581>.

Поступила в редакцию 11.07.2025

Одобрена после рецензирования 27.11.2025

Принята к опубликованию 12.12.2025

REFERENCES

1. **Yakontseva, O.V. and Shchepeteva, L.S.** (2020), "Influence of the grain size distribution of asphalt concrete on the physical and mechanical properties", *Transport. Transport structures. Ecology*, no. 3, pp. 71-76. DOI: <https://doi.org/10.15593/24111678/2020.03.09> (in Russian).
2. **Belyaev, P.S., Polushkin, D.L., Makeev, P.V. and Frolov, V.A.** (2016), "Modification of petroleum road bitumen with polymer materials to obtain asphalt concrete pavements with improved performance characteristics", *Bull. TSTU*, vol. 22, no. 2, pp. 264-271 (in Russian).
3. **Solomentsev, A.B. and Kulikova, A.V.** (2015), "Functional Values of Polymer Additives", *Automobile Roads*, vol. 1, pp. 64-69 (in Russian).
4. **Provatorova, G.V. and Vikhrev, A.V.** (2021), "Modification of Bitumen for Road Construction", *Inter. Sci. and Techn. Conf. MPCPE: Inter. Conf. on Mat. Phys., Build. Struct. and Technol. in Constr., Industr. and Prod. Eng.*
5. **Fokin, M.D., Vikhrev, A.V., Kand rashkina, Yu.S. and Ilyichev, D.A.** (2024), "Prospects of Using Unoxidized Bitumens in Road Construction", *Inter. Conf. Mat. Phys., Build. Struct. and Technol. in Constr., Industr. and Prod. Eng. (MPCPE-2024)*: Coll. Proc. of the V Inter. Sci. and Techn. Conf. April 23-25. 2024, Vladimir, Vladimir State Univer. named after A.G. and N.G. Stoletov. Vladimir: Arkaim, pp. 237-242 (in Russian).
6. Pat. 2645338 Russia. Method for Thermal Cracking of Organic Polymer Waste / **Kryuchkov, V.A.**; publ. 09.12.2016.
7. **Vikhrev, A.V. and Fokin, M.D.** (2024), "Pilot-industrial unit for producing unoxidized bitumen", *Sci. Days of Students of Vladimir State University named after Alexander Grigorievich and Nikolai Grigorievich Stoletov: Coll. Mat. Sci. Pract. Conf.* Vladimir: VlSU, pp. 955-961 (in Russian).
8. Pat. 2761921 Russia. Method for Obtaining a Multifunctional Nanodispersed Catalytic System Based on Native Metal Chelate Complexes under Thermolysis Conditions of Hydrocarbon Feedstock / **Petukhov, R.V. and Korolev, D.S.**; publ. 14.12.2021.
9. **Elsufiev, K.A., Muravyova, Ya.I. and Vdovikh, P.E.** (2017), "Nelder-Mead Optimization Method", *Breakthrough Sci. Res.: Problems, Patterns, Prospects: Coll. of Articles from the IX Inter. Sci. Pract. Conf.: in 4 parts*. Penza, December 30, Part 1. Penza: "Science and Enlightenment" (IP Gulyaev G.Yu.), pp. 113-116 (in Russian).
10. **Yongchun, Cheng, Di, Yu, Guojin, Tan and Chunfeng, Zhu** (2018), "Low-Temperature Performance and Damage Constitutive Model of Eco-Friendly Basalt Fiber – Diatomite – Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles", Art. (PDF Available), *Materials*, vol. 11, no. 11, p. 1148. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma11112148>.
11. **Yafeng, Gong, Haipeng, Bi, Zhenhong, Tian and Guojin, Tan** (2018), "Pavement Performance Investigation of Nano-TiO₂/CaCO₃ and Basalt Fiber Composite Modified Asphalt Mixture under Freeze-Thaw Cycles", *Appl. Sci.*, vol. 8, no. 12, p. 2581. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8122581>.

Received 11.07.2025

Approved 27.11.2025

Accepted 12.12.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.72

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-67-79

Использование искусственного интеллекта в контексте проектирования автомобильных дорог

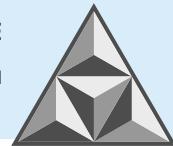
Л.А. Богуславский, Г.В. Проваторова

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*



Рассмотрены современные направления применения технологий искусственного интеллекта (ИИ) в проектировании автомобильных дорог, включая автоматизацию проектных процессов, обработку инженерных данных, моделирование транспортных потоков для повышения эффективности функционирования дорожно-транспортной инфраструктуры. Представлен обзор текущего состояния и тенденций развития ИИ в дорожной отрасли на примере практик, реализуемых в Российской Федерации. Особое внимание уделено внедрению систем «цифрового двойника», обеспечивающих комплексную интеграцию ИИ в процессы моделирования и принятия управленческих решений. Отмечены ограничения, связанные с представлением больших объемов достоверных сведений, сложностью адаптации алгоритмов к нормативной базе и необходимостью экспертной оценки результатов. Показаны перспективы развития таких технологий в контексте устойчивого развития дорожной отрасли.

Ключевые слова: автомобильные дороги, автоматизированное проектирование, искусственный интеллект, эффективность, нейронные сети

Для цитирования:

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. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-67-79



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-67-79

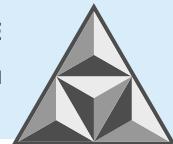
The use of artificial intelligence within the design of automobile roads

L.A. Boguslavskiy, G.V. Provatorova

Leonid Anatolievich Boguslavskiy*, 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 paper considers contemporary trends in the use of artificial intelligence (AI) technologies in road design. These include the automation of design processes, engineering data processing, and traffic flow modelling to improve the efficiency of road transport infrastructure. The authors provide an overview of the current state and trends in AI development in the road industry, using examples of practices implemented in the Russian Federation. The authors pay particular attention to the introduction of 'digital twin' systems that ensure the comprehensive integration of AI into modelling and management decision-making processes. The authors note the limitations associated with the presentation of large amounts of reliable information, the complexity of adapting algorithms to the regulatory framework, and the need for expert evaluation of the results. Prospects for the development of such technologies in the context of sustainable development in the road industry.

Keywords: highways, computer-aided design, artificial intelligence, efficiency, neural networks

For citation:

Boguslavskiy L.A., Provatorova G.V. The use of artificial intelligence within the design of automobile roads // *Smart Composite in Construction*. 2024. Vol. 6, Iss. 4. P. 67-79.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-67-79



ВВЕДЕНИЕ

Искусственный интеллект (далее – ИИ) сегодня реализуется в развитии междисциплинарных направлений на стыке информатики, математики, кибернетики и инженерных наук. Важной задачей исследований в данной области является создание алгоритмов и систем, способных имитировать ключевые элементы человеческого мышления – обучение, прогнозирование, анализ данных и принятие решений в условиях неопределенности. В отличие от традиционного программного обеспечения, ИИ обладает способностью к самообучению и адаптации, что обеспечивает эффективное функционирование систем в изменяющейся среде без необходимости ручного корректирования алгоритмов [1].

Проектирование автомобильных дорог в современных условиях представляет собой комплексную многопараметрическую задачу, включающую учет геологических условий местности, климатических факторов, характеристик транспортных потоков, требований безопасности дорожного движения, экологических ограничений и экономических показателей. Традиционные инженерные методы зачастую не обладают достаточной гибкостью для быстрого и качественного анализа массивов разнородных данных, что приводит к увеличению сроков строительства дорог и перерасходу бюджетных средств. В этой связи внедрение технологий искусственного интеллекта и нейросетевых моделей открывает новые возможности для оптимизации процессов в дорожном строительстве, автоматизировать отдельные этапы и повысить достоверность принимаемых решений [2].

Теоретические предпосылки применения нейронных сетей в проектировании дорог

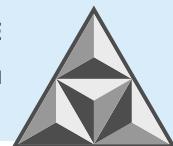
В 2019 г. Указом Президента Российской Федерации на период до конца 2030-х годов утверждена Национальная стратегия развития искусственного интеллекта – основополагающий документ, в котором определены приоритетные направления государственной политики в области ИИ. Стратегия ориентирована на формирование благоприятной среды для внедрения и широкого распространения технологий ИИ в различных отраслях экономики, социальной сфере, системе государственного управления. Особое внимание уделяется ускоренной разработке и интеграции ИИ-решений, способствующих росту эффективности производственных и управлений процессов, технологической модернизации и укреплению международной конкурентоспособности страны [3].

Одним из наиболее перспективных направлений является использование ИИ в сфере транспортного проектирования. Искусственный интеллект, особенно нейросетевые алгоритмы, представляют собой эффективный инструмент для анализа больших массивов разнородных данных и выявления в них скрытых взаимосвязей.

Благодаря способности к самообучению нейронные сети демонстрируют высокую эффективность в работе с неполными или неопределенными данными, что особенно ценно при проектировании инфраструктуры в сложных природных и технико-экономических условиях.

Российский опыт внедрения искусственного интеллекта в дорожной отрасли

В Российской Федерации наблюдается устойчивый рост интереса к внедрению технологий ИИ в процессы проектирования и управления дорожной инфраструктурой. Одним из приоритетных направлений в этой области стала разработка и внедрение цифровых двойников транспортных объектов. Показательным примером является использование



платформы «Цифровой двойник» в Москве. Эта платформа предоставляет широкие возможности для моделирования различных сценариев развития улично-дорожной сети и комплексной оценки последствий их реализации. Цифровые модели востребованы при проектировании новых магистралей, а также в рамках реконструкции и модернизации существующих дорог. По имеющимся данным, внедрение указанной платформы позволяет сократить на 30% сроки проектирования и снизить на 15% затраты на строительство [4].

Цифровой двойник, по своей сути – интегрированная информационно-аналитическая система, обеспечивающая визуализацию, моделирование и прогнозирование изменений в городской среде. С помощью этой системы создаются трехмерные модели как отдельных объектов, так и более масштабных территориальных единиц – микрорайонов или участков городской инфраструктуры. Это упрощает процессы архитектурного и инженерного проектирования, а также ускоряет этапы согласования дорожных работ.

Одним из функциональных преимуществ использования цифровых двойников является возможность работы с различными информационными слоями, отражающими текущее, историческое и планируемое состояние территорий. Также доступны данные о подземных и наземных коммуникациях, схемах организации дорожного движения и других элементах инфраструктуры. Такая мультислойная структура позволяет комплексно оценивать потенциальные изменения городской среды, учитывать не только визуальные и архитектурные аспекты, но и функциональные характеристики будущей застройки (рис. 1, 2).

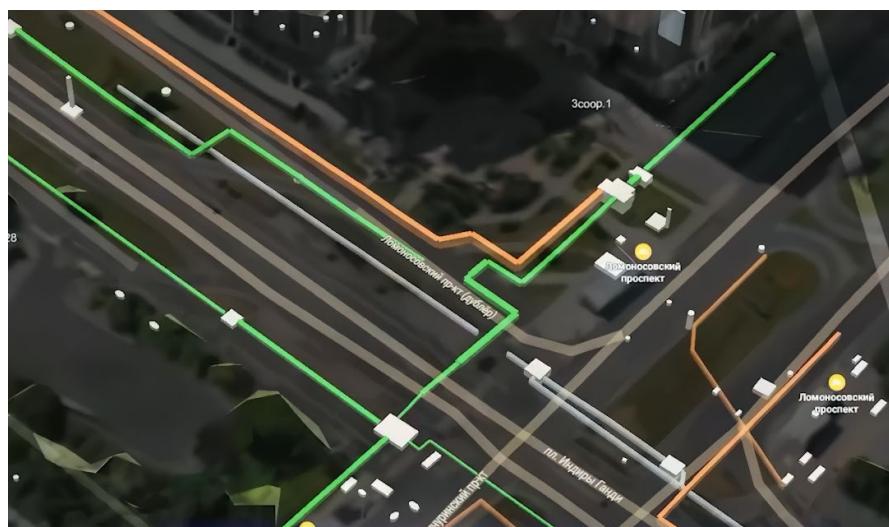


Рис. 1. Магистральные сети в «Цифровом двойнике»

Fig. 1. Primary highway system in the "Digital Twin"



Рис. 2. Интеграция камер видеонаблюдения в «Цифровом двойнике»

Fig. 2. Integration of CCTV cameras into the 'Digital Twin'



Интегрированные модули платформы цифрового двойника предоставляют возможность прогнозировать последствия различных градостроительных и инфраструктурных решений. Речь идет, в частности, о строительстве новых объектов, реконструкции существующих элементов улично-дорожной сети, а также изменении параметров транспортной организации.

Примером практического применения таких инструментов служит реконструкция Большого Каменного моста в Москве. С помощью цифрового двойника удалось моделировать влияние частичного перекрытия движения на транспортные потоки в прилегающих районах. На основании полученных данных были разработаны альтернативные сценарии и выбраны решения, позволяющие минимизировать негативное воздействие на транспортную доступность территории и повседневную мобильность населения (рис. 3) [4].

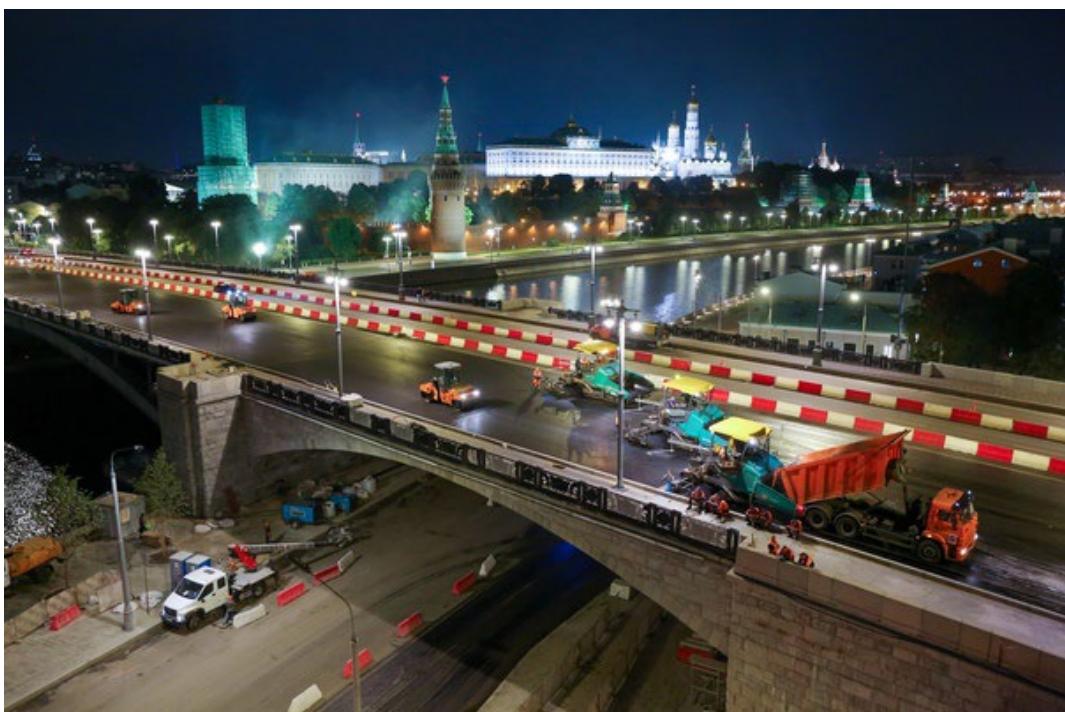


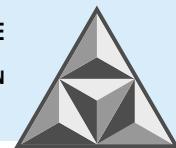
Рис. 3. Реконструкция «Большого каменного моста»

Fig. 3. Reconstruction of the «Bolshoy Kamenny» Bridge

В Российской Федерации в последние годы наблюдается развитие технологий мониторинга состояния дорожной инфраструктуры с использованием инструментов ИИ. Одним из наиболее перспективных направлений является применение искусственных нейронных сетей для анализа визуальной информации с видеокамер, установленных на транспортных средствах (см. рис. 4).

Использование подобных систем позволяет оперативно выявить дефекты дорожного покрытия и организовать своевременное проведение ремонтных мероприятий, что в совокупности способствует улучшению эксплуатационного состояния и качества автодорожной сети.

Методические основы функционирования интеллектуальных систем, как правило, базируются на технологиях компьютерного зрения, в частности, обработке изображений и видеопотоков, поступающих с камер, размещенных как на подвижных, так и стационарных объектах. Нейросетевые алгоритмы и методы машинного обучения в автоматизированном режиме обеспечивают идентификацию и классификацию различных видов повреждений, включая трещины и выбоины дорожного покрытия, деградацию элементов дорожной разметки и т.п.



ДАННЫЕ О СОСТОЯНИИ ДОРОГИ

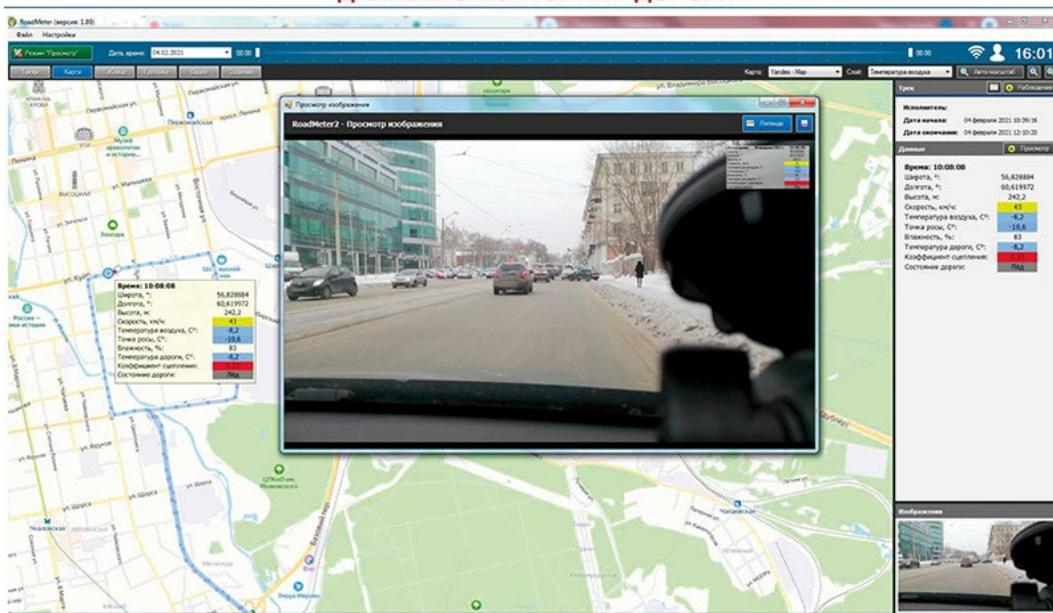


Рис. 4. Сбор данных мобильным комплексом

Fig. 4. Data collection by a mobile complex

Дополнительным преимуществом внедрения ИИ является возможность автоматического выявления нарушений в состоянии дорожных знаков, светофорных объектов, барьерных ограждений. Более того, интеллектуальные системы способны фиксировать наличие посторонних предметов, мусора, в присутствии которых снижается безопасность дорожного движения на проезжей части и в прилегающих зонах. Комплексное применение данных технологий – важный шаг в направлении формирования безопасной и высокоэффективной транспортной инфраструктуры [5].

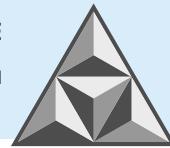
Искусственный интеллект и нейросети на этапе проектирования дорог

В настоящее время технологии искусственного интеллекта (ИИ) начинают внедряться в процесс подготовки проектной документации для объектов транспортной инфраструктуры Российской Федерации. Несмотря на относительно раннюю стадию применения, ИИ обладает высоким потенциалом в части снижения трудоемкости рутинных операций и сокращения сроков выполнения инженерных задач.

Выделим несколько направлений, в которых использование ИИ демонстрирует наибольшую эффективность при проектировании автомобильных дорог:

1. *Информационное моделирование объектов.* Интеграция алгоритмов ИИ с технологиями информационного моделирования позволяет формировать цифровые модели дорожных сооружений с высокой степенью детализации. Такие модели обеспечивают согласованность проектных данных, их актуальность и целостность, что способствует минимизации проектных ошибок и повышению качества итоговых решений [6].

2. *Анализ и интерпретация больших массивов данных.* Искусственный интеллект применяется для обработки разнородных данных, включая геологические характеристики, климатические условия, параметры транспортных потоков и другие значимые факторы. Использование ИИ в этом контексте повышает обоснованность инженерных решений, в том числе – при выборе конструктивных элементов и материалов с учетом территориальных и эксплуатационных особенностей [7].



3. *Оптимизация проектных решений.* Методы машинного обучения позволяют осуществлять комплексную оценку альтернативных проектных вариантов с учетом экономических, экологических и эксплуатационных критериев. Это обеспечивает возможность формирования сбалансированных решений, соответствующих современным требованиям в области устойчивого развития транспортной инфраструктуры.

По мере дальнейшей цифровизации проектной отрасли применение ИИ и нейросетевых алгоритмов приобретает прикладной характер. Современные программные комплексы, основанные на принципах ИИ, способствуют решению широкого ряда специализированных задач, существенно ускоряя процессы подготовки технической документации [8].

Наиболее значимые этапы проектирования дорог, на которых технологии ИИ демонстрируют высокую эффективность:

1. *Концептуальное проектирование и трассировка дорог.* Технологии искусственного интеллекта находят применение на ранних этапах проектирования транспортной инфраструктуры, в частности, при определении оптимального варианта трассировки. Используя алгоритмы анализа пространственных данных, ИИ способен учитывать широкий спектр факторов – от топографических и градостроительных условий до инженерно-геологических и природоохранных ограничений.

2. *Геометрическое проектирование.* На данном этапе технологии искусственного интеллекта применяют для автоматизации расчетов ключевых параметров трассы. В частности, ИИ-системы позволяют определить радиусы криволинейных участков, продольных уклонов, ширины проезжей части и обочин, с учетом нормативных требований и ограничений рельефа (см. рис. 5).

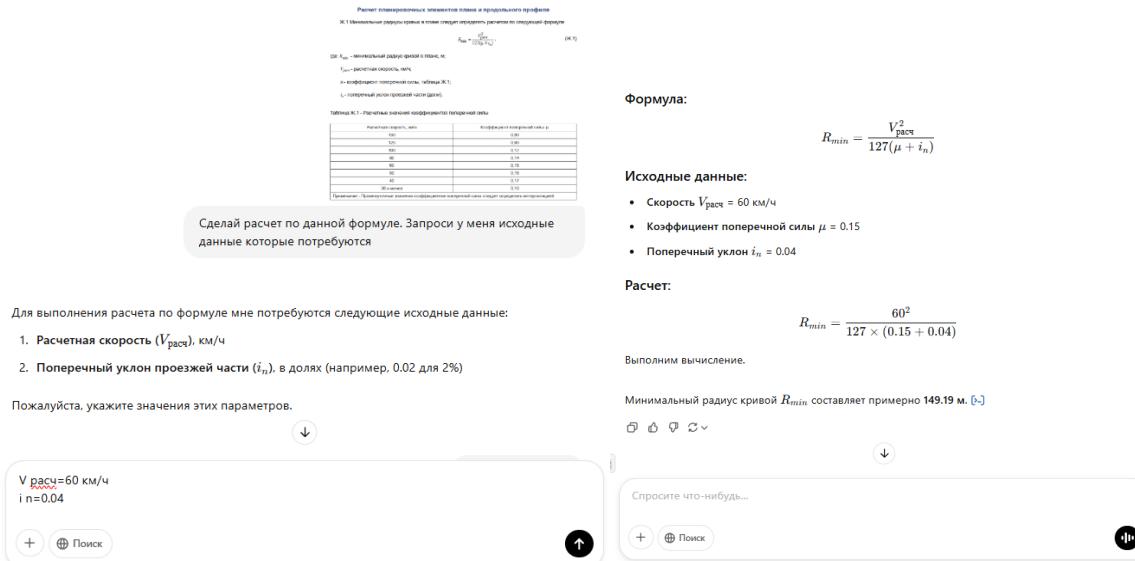
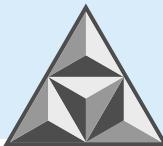


Рис. 5. Пример выполнения расчета минимального радиуса кривой в плане с помощью ChatGPT

Fig. 5. An example of calculating the minimum radius of a curve in a plan using ChatGPT

Кроме того, с использованием алгоритмов машинного обучения становятся доступными автоматизированное построение продольного профиля дороги, генерация типовых поперечных сечений, а также возможно моделирование схем водоотведения с проезжей части. Эти функции позволяют ускорить процесс перехода от концептуального проекта к рабочей документации. Дополнительно на основе ИИ могут разрабатываться скрипты и алгоритмические модули, предназначенные для расчетов объемов земляных масс, нагрузок на конструктивные элементы дорожной одежды и оценки устойчивости земляного полотна.



3. Подготовка документации и отчетов. Одним из перспективных направлений является использование алгоритмов обработки естественного языка, позволяющих не только структурировать текст, но и автоматически проверять его соответствие действующим нормативно-техническим требованиям, включая актуальные версии ГОСТ, СНиП и СП (рис. 6).

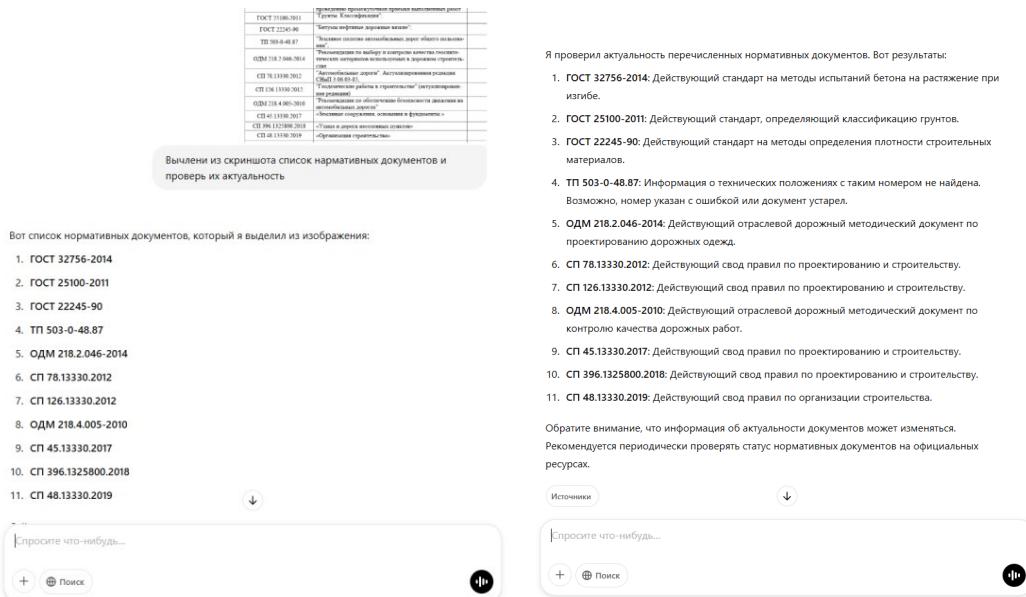


Рис. 6. Проверка актуальности используемой нормативной базы с помощью ChatGPT

Fig. 6. Verifying the relevance of the regulatory framework used with ChatGPT

В частности, ИИ-системы демонстрируют высокую эффективность при составлении пояснительных записок, технических отчетов и ведомостей по объемам работ. Программные модули, разработанные на основе машинного обучения, могут автоматически выявлять несоответствия в ссылках на нормативные документы, контролировать единообразие терминологии и корректность оформления таблиц и схем. Кроме того, ИИ учитывает региональные регламенты, если они интегрированы в базу данных обучающей модели.

Проведем сравнение традиционного метода проектирования и метода, включающего использование функций ИИ для определения трудо- и временных затрат. В табл. 1 представлен такой анализ из расчета на 1 км дороги в населенном пункте. На основании данных табл. 1 и критического анализа выявлены ключевые преимущества применения ИИ:

– сокращение сроков и затрат на проектирование (за счет автоматизации рутинных операций и ускорения обработки инженерной информации);

– повышение точности инженерных расчетов и прогнозирования (за счет возможности анализа больших массивов разнородных данных – геологических, климатических, транспортных и др.);

– повышение безопасности проектируемых объектов (за счет моделирования потенциально аварийных сценариев и разработки соответствующих превентивных решений).

Тем не менее, несмотря на высокий потенциал, практическое использование ИИ в проектировании дорожной инфраструктуры сопряжено с рядом ограничений:

– высокие требования к объему и качеству обучающих данных, необходимых для корректной работы нейросетей;

– риски возникновения ошибок при работе алгоритмов в условиях неполных, устаревших или некорректно интерпретированных данных;

– необходимость дополнительной верификации полученных результатов, что требует участия квалифицированных специалистов и может продлевать цикл проектирования [9].



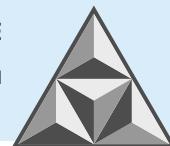
Таблица 1. Сравнительный анализ традиционного метода проектирования с использованием ИИ для подготовки проектной документации

Table 1. Comparative analysis of the traditional method and the method using AI for the preparation of project documentation

Этап проектирования	Традиционный метод		С использованием ИИ		Трудозатраты с использованием ИИ	Время с использованием ИИ
	сут.	выполненные работы	сут.	выполненные работы		
Сбор и анализ исходных данных	7	ручной анализ геоданных и карт, проверка нормативов	4	автоматизированный анализ с ГИС и ИИ	-40%	-40%
Разработка трассировки	5	ручная работа инженера	3	генерация вариантов с ИИ, автоматическая оптимизация маршрута	-40%	-40%
Цифровая модель местности	1	с использованием специализированного ПО	0.5	с использованием инструментов ИИ	-50%	-50%
Анализ и расчет параметров покрытия	1	с использованием специализированного ПО	1	с использованием инструментов ИИ расчет с учетом трафика и климата	0%	0%
Текстовые и графические данные проектной документации	14-21	ручное составление чертежей и отчетов	7	автоматическая генерация спецификаций, объемов, текстовых документов	-50%	-50%
Оптимизация проекта (пересчет, корректировки)	7	корректировки вручную	5	с использованием инструментов ИИ	-30%	-30%
Общий срок проектирования	35-42		21		-50%	

Дальнейшее внедрение технологий ИИ в проектирование автомобильных дорог позволит существенно повысить эффективность проектных процессов. Использование нейросетевых алгоритмов и систем машинного обучения способствует сокращению трудозатрат, снижению временных издержек и количества ошибок, улучшению качества проектных решений [10]. В перспективе ожидается дальнейшее расширение сферы применения ИИ в области проектирования и управления объектами дорожной инфраструктуры, с учетом введения в городах альтернативных видов транспорта, как это описано в [11].

Одним из приоритетных направлений является разработка автономных систем управления транспортными потоками, способных взаимодействовать с беспилотными транспортными средствами. Такая интеграция позволит повысить пропускную способность улично-дорожной сети, а также снизить число дорожно-транспортных происшествий за счет более точного прогнозирования и регулирования потоков. Кроме того, развитие ИИ открывает возможности для формирования «зеленых» транспортных коридоров – дорожных объектов, ориентированных на минимизацию негативного экологического воздействия. В частности, нейросетевые алгоритмы могут быть использованы для оптимизации маршрутов с учетом таких факторов, как уровень шума, концентрация загрязняющих веществ, ландшафтные особенности и плотность застройки.



ВЫВОДЫ

Несмотря на растущий интерес к технологиям ИИ со стороны проектных организаций и крупных девелоперских структур, полностью автоматизировать все стадии проектных работ пока не представляется возможным. Существующие системы требуют участия высококвалифицированных специалистов как в процессе обучения алгоритмов, так и при верификации и адаптации полученных проектных решений к нормативно-правовой и инженерной среде. Для масштабного внедрения ИИ требуется решение целого ряда экономических, технических и нормативных задач.

В общем и целом, использование ИИ и нейросетевых технологий в проектировании автомобильных дорог обладает высоким потенциалом повышения эффективности и безопасности дорожной инфраструктуры, а также снижения негативного воздействия на окружающую среду. Развитие указанных технологий будет способствовать формированию интеллектуальных транспортных систем нового поколения, соответствующих требованиям устойчивого развития городской среды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Евсеев В.И.** Искусственный интеллект в современном мире: надежды и опасности создания и использования // Аэрокосмическая техника и технологии. 2023. Вып. 1. С. 16-34.
2. **Mokshakov M.** The use of artificial intelligence in data analysis: an overview of the current state and future directions // Universum: technical sciences. 2024. № 5 (122). Р. 40-48.
3. Дорожная карта развития «сквозной» цифровой технологии «нейротехнологии и искусственный интеллект» в России. М., 2019.
4. Официальный сайт Мэра Москвы. "Цифровой двойник Москвы" [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mos.ru> (дата обращения 18.07.2025).
5. **Навой Д.В., Капский Д.В., Филиппова Н.А., Пугачев И.Н.** Анализ мирового опыта в применении искусственного интеллекта в системах управления дорожным движением различного уровня // Системный анализ и прикладная информатика. 2024. Вып. 1. С. 26-36.
6. **Бачурина С.С.** Информационное моделирование: методология использования цифровых моделей в процессе перехода к цифровому проектированию и строительству. Переход к цифровому проектированию и строительству. Методология. М.: ДМК Пресс, 2021. 128 с.
7. **Ayhan B., Tokdemir O.** Safety assessment in megaprojects using artificial intelligence // Safety Science. 118. Р. 273-287.
8. **Bang S., Olsson N.** Artificial Intelligence in Construction Projects: A Systematic Scoping Review // Journal of Engineering, Project, and Production Management. 2022. № 12 (3). Р. 224-238.
9. Newcastle Systems. How Artificial Intelligence is Changing Warehouse Operations. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.newcastlesys.com/blog/how-artificial-intelligence-is-changing-warehouse-operations> (дата обращения 18.07.2025).
10. McKinsey&Company. Succeeding in the AI supply-chain revolution. 2021. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/succeeding-in-the-ai-supply-chain-revolution> (дата обращения 18.07.2025).
11. **Ладыгина О.В., Бессонов И.А.** Проблемы организации транспортной системы города Ярославля // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6. Вып. 3. С. 62-75. DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-62-75.

Поступила в редакцию 14.08.2025

Одобрена после рецензирования 28.11.2025

Принята к опубликованию 12.12.2025



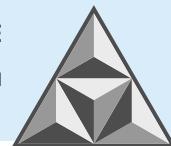
REFERENCES

1. **Evseev, V.I.** (2023), "Artificial intelligence in the modern world: the hopes and dangers of creation and use", *Aerospace engineering and technology*, vol. 1, pp. 16-34 (in Russian).
2. **Mokshанов, М.** (2024), "The use of artificial intelligence in data analysis: overview of the current state and promising areas", *Universum: Techn. Sci.*, vol. 5, no. 122, pp 40-48.
3. Roadmap for the development of "end-to-end" digital technology "neurotechnology and artificial intelligence" in Russia, Moscow, 2019 (in Russian).
4. Official website of the Mayor of Moscow. "Moscow's Digital Twin". Available at: <https://www.mos.ru> (accessed 18.07.2025) (in Russian).
5. **Navoy, D.V., Kapsky, D.V., Filippova, N.A. and Pugachev, I.N.** (2024), "Analysis of world experience in the application of artificial intelligence in traffic management systems at various levels", *System analysis and Applied Informatics*, vol. 1, pp. 26-36 (in Russian).
6. **Bachurina, S.S.** Information modeling: a methodology for using digital models in the process of transition to digital design and construction. The transition to digital design and construction. Methodology. Moscow: DMK Press, 2021. 128 p. (in Russian).
7. **Ayhan, B. and Tokdemir, O.** "Safety assessment in megaprojects using artificial intelligence", *Security Sci.*, vol. 18, pp. 273-287.
8. **Bang, S. and Olsson, N.** (2022), "Artificial intelligence in construction projects: a systematic overview", *Journal of Engineering, Design and Production Management*, vol. 12, no. 3, pp 224-238.
9. Newcastle Systems. How artificial intelligence is changing warehouse operation. (2021), Available at: <https://www.newcastlesys.com/blog/how-artificial-intelligence-is-changing-warehouse-operations> (accessed 18.07.2025).
10. McKinsey&Company. Succeeding in the AI supply-chain revolution. (2021), Available at: <https://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/succeeding-in-the-ai-supply-chain-revolution> (accessed 18.07.2025).
11. **Ladygina O.V., Bessonov I.A.** (2025), "Issues in organizing the transportation system of the city of Yaroslavl", *Smart Composite in Construction*, vol. 6, no. 3, pp. 62-75. DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-3-62-75 (in Russian).

Received 14.08.2025

Approved 28.11.2025

Accepted 12.12.2025



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 72.092

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-80-93

Символизм в ландшафтной архитектуре

С.В. Растворгув, Е.В. Голубева

Семен Васильевич Растворгув*, Елена Вячеславовна Голубева

Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация

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



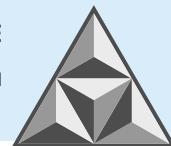
Исследован новый подход к созданию ландшафтных архитектурных проектов. В основе исследования лежит определение роли символизма в проектировании городских пространств, его влияния на формирование уникальной идентичности территории и возникновение эмоциональной привязанности посетителей к создаваемому ландшафту. Выявляется способ повышения уникальности ландшафтных проектов за счет трансляции разных категорий информации в архитектурную среду – от исторических и средовых до абстрактных и геометрических. Реализация проекта ведет к «запоминанию» территорией транслируемой информации с помощью составляющих – композиционно-формальных, материальных, природных, растительных, акцентных, интерактивных и др. Также уделяется внимание значению использования в прошлом символизма в архитектуре в целом и локально – в ландшафтной архитектуре. Рассмотрены элементы благоустройства и подчеркивается важность малых архитектурных форм как инструментов совмещения функциональности и передачи идентичности. Показана значимость в проектировании городских пространств таких факторов, как «дух места» (*genius loci*), сакральность, фирменный стиль. Указаны отличительные особенности, ограничения и возможности ландшафтной архитектуры во взаимодействии с ними. Предлагаются методы работы с трансляцией информации с помощью символов и приводится их практическая апробация на проектах благоустройства «Золотая тропа» для ВДНХ России и «Игра внутри игры».

Ключевые слова: благоустройство, символизм, ландшафтная архитектура, элементы благоустройства, «гений места», идентичность, ВДНХ

Для цитирования:

Расторгуев С.В., Голубева Е.В. Символизм в ландшафтной архитектуре // Умные композиты в строительстве. 2025. Т. 6, вып. 4. С. 80-93. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-80-93



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-80-93

Symbolism in landscape architecture

S.V. Rastorguev, E.V. Golubeva

Semyon Vasilievich Rastorguev, Elena Vyacheslavovna Golubeva

Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

rastorguevsv@ystu.ru, lena371g@gmail.com



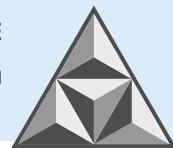
The paper discusses a new approach to creating landscape architecture projects. The research focuses on defining the role of symbolism in designing urban spaces, its influence on forming a unique identity of a territory, and the emergence of emotional attachment of visitors to the created landscape. A way to increase the uniqueness of landscape projects by transmitting information of various categories into the architectural environment is identified, ranging from historical and environmental to abstract and geometric. The implementation of the project leads to the territory 'remembering' the transmitted information using components – compositional-formal, material, natural, vegetative, accentual, interactive, etc. The authors also pay attention to the significance of the use of symbolism in architecture in general and locally – in landscape architecture. The paper examines elements of urban improvement and emphasises the importance of small architectural forms as tools for combining functionality and conveying identity. The authors demonstrate the significance of factors such as the 'spirit of place' (genius loci), sacredness, and corporate identity in the design of urban spaces. The authors point out the distinctive features, limitations, and possibilities of landscape architecture in interaction with them. The paper proposes methods for working with the transmission of information using symbols. The authors provide practical examples of their use in the improvement projects 'Golden Trail' for Exhibition of Achievements of National Economy (Russia) and 'Game Within a Game.'

Keywords: landscaping, symbolism, landscape architecture, landscaping elements, genius loci, identity, Exhibition of Achievements of National Economy

For citation:

Rastorguev S.V., Golubeva E.V. Symbolism in landscape architecture // Smart Composite in Construction. 2025. Vol. 6, Iss. 4. P. 80-93. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2025-6-4-80-93



ВВЕДЕНИЕ

Проектирование городской среды или паркового благоустройства в последнее время стало ключевой составляющей архитектурной практики. При этом проекты в данной области довольно часто выполняются на основании ранее осуществленных шаблонов. Благоустройство будто вынесено за пределы «основной архитектуры», ее правила здесь не распространяются, и критики не считают важным разбирать эту область на стыке градостроительства и ландшафтной архитектуры. Однако число работ в данном направлении постоянно растет, их уже чуть ли не больше, чем проектов капитального строительства зданий и сооружений.

Необходимо выработать определенные подходы, которые позволили бы развивать столь существенную часть архитектурной практики без прямого и безоговорочного следования «успешным кейсам» или шаблонам, что, как показывает реальность, зачастую приводит к эффекту «тоттания на месте».

В приведенном исследовании произведена попытка найти осмысленный ряд базовых элементов для создания аттракторов или локальных центров ландшафтных композиций благоустройства территорий, позволяющих насытить их повествовательной и, в определенном смысле, литературной логикой, разбавить механистическое наложение образцов на генплан территории осмысленным действием.

Очевидно, стоит обратиться к символам, продуцирующим формообразование архитектуры. Символы могут обладать разным характером – концентрированной абсолютной значимостью (логотип компании/мероприятия/места) либо, наоборот, не обращая все внимание на себя, «играть в команде», артикулируя интонации и дискретные блоки высказывания (становясь отдельными буквами алфавита).

Благоустройство и ландшафтная архитектура обычно имеют меньшее функциональное значение и, следовательно, на них налагается меньше ограничений, чем на объекты капитального строительства. Именно поэтому они являются полем для экспериментов с визуально-созерцательной составляющей. Почему бы не применить разрабатываемые методы в данных областях архитектуры, находящихся в «композиционном штиле» и явно испытывающих недостаток «дуновения ветра перемен»? Рассмотрим как процесс выработки новых подходов, так и их применение на практических примерах.

Погружаясь в предложенную тематику, нельзя не отметить ряд исследований в этом направлении. В них рассматриваются такие понятия, как «дух места», городские мифы, символы и коды в контексте создания современной идентичной городской среды [1]. Однако «классикой» сопоставления букв-символов и формирующихся из них высказываний является книга «Язык архитектуры постмодернизма» Ч. Джэнкса [2]. В ней приводится ироничный и эмоциональный разбор различных архитектурных объектов в сопоставлении с грамматическими, синтаксическими или иными нормами человеческих языков, перенесенных на проектную практику. В дальнейшем Джэнкс изучал многозначность архитектурного образа и ввел понятие «загадочное означающее», отражая трудности перевода с символического языка на язык архитектурный [3]. Понятие «дух» (или «гений места») стало в архитектурной практике устоявшимся, особенно в связке со сложившимися историческими ансамблями и городской средой [4]. Его трансляция в новую архитектуру, в частности – ландшафтную, зачастую требует носителей информации. Здесь символы, знаки или «буквы» выглядят весьма логично для выполнения вещательной функции. Попробуем разобрать механизмы описанного переноса различных типов информации в архитектурную среду как в



теоретической, так и практической плоскости. Методика апробирована в нескольких проектах, ставших лауреатами различных профессиональных архитектурных конкурсов. Один из них, Музей эмоций, уже ранее описан [5]. Подробности применения методики в двух других проектах («Золотая тропа» для ВДНХ и проект «Игра внутри игры») представлены ниже. Краткое изложение сути исследования представлено также в [6, 7].

МЕТОДЫ ТРАНСЛЯЦИИ ИНФОРМАЦИИ С ПОМОЩЬЮ СИМВОЛОВ В ЛАНДШАФТНОЙ АРХИТЕКТУРЕ

При создании проекта на архитектора действует множество обстоятельств – от прямой воли заказчика до различных ограничений, связанных с существующими сетями, высотностью (если это касается капитального строительства) и др. Весьма важным ограничением становится бюджет строительства, поэтому в архитектурной среде существует негласное правило: оперировать минимально достаточными средствами.

Если переложить описанные ограничения применительно к теме трансляции информации в архитектуре, становится очевидно, что в каждом символе послания существует своя выразительность, но намного важнее его функция как компонента определенного слова.

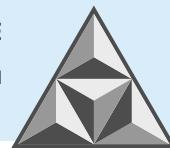
В качестве дополнительного аспекта трансляции информации можно выделить также видоизменения проекта на различных этапах его разработки, а в дальнейшем – при его согласованиях. Процесс является родственным переводу текста на другой язык, привычный для экспертов согласовательной инстанции, конкурсной комиссии или локального градостроительного совета. В любом случае архитектор сталкивается с трудностями перевода своего проекта на язык, понятный большинству.

В архитектуре процесс трансляции результата приводит к «запоминанию» направляемой информации. Образы, с одной стороны, фиксируются на местности в материальной интерпретации, а с другой стороны, запоминаются посетителями, что создает их эмоциональную привязанность к конкретному месту. Благоустройство почти литературно может повествовать о значимых событиях и выступать как фактор памяти [8].

Еще в древности ландшафтные объекты наделялись художественным смыслом. Сакральная и просветительская функции выполнялись объектами садово-паркового искусства на территориях обитания древних славянских племен около V в. до н.э. и реализовывались через сакральные сооружения на возвышенностях, священные рощи и пантеоны под открытым небом [9]. Пропорции многих построек прошлого определялись символическим значением форм. Так, в древнегреческих и древнеримских храмах архитектурные пропорции напрямую соотносились с космическими моделями. Храм выступал земной проекцией космоса: круглые формы – небо, квадрат – земля, треугольник – взаимодействие неба и земли [10].

Также следует отметить материальное выражение одной из сторон процесса трансляции. В ландшафтной архитектуре или благоустройстве знаки и символы интерпретируются с помощью объемно-пространственной или плоскостной композиции, растительности, малых архитектурных форм. Как локальные элементы-интерпретаторы можно обозначить осветительные приборы, инсталляции, сидячие места, игровое и спортивное оборудование, ограждения, павильоны и т.д.

Кроме того, имеет смысл представить себе размерность символического поля или таблицы символов. Например, в литературно-текстовой практике существование множества языков потребовало разработки единой таблицы-кодировки, вмещающей все часто употребляемые



символы актуальных алфавитов. Так появилась кодировка UNICODE, содержащая 1112064 символов.

Трудно сказать, понадобится ли такое количество в архитектурной иносказательности (их может оказаться и больше), однако уместно выработать определенные критерии, влияющие на типологию вырабатываемых и интерпретируемых в проектировании символов.

Классификация творческих методов или «алфавитов символов» по действующим факторам должна включать в себя влияние истории и особенностей среды, степени абстракции при переносе внешней информации в область архитектуры, обратную связь – влияние материалов проекта на подбор символов, отображение природы и стихии архитектурными средствами и иные факторы. Действующие силы иногда четко регламентированы, а иногда – наоборот, находятся в области хаоса и призваны научить автора чему-то новому, внезапному или неприметному, при первом взгляде на создаваемое пространство.

Отбор методов-кодировок, каждый из которых включает собственный набор символов, учитывает:

- влияние исторического или средового контекста;
- эмоциональное влияние;
- воздействие природных факторов и стихий;
- глобальный контекст: эволюция культурного кода в зависимости от времени;
- материальный фактор: перевод проекта с бумажной плоскости в иные материалы и на топографию ландшафта;
- уровни абстрактности и геометричности;
- степень аттрактивности или яркости, способность объекта «держать» композицию окружающего пространства.

Данные методы не замкнуты, интенсивность их воздействия можно регулировать. Архитектору доступна настройка «яркость» – от самоценного символа-логотипа до утилитарной буквы в алфавите.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДИКИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОЕКТА «ЗОЛОТАЯ ТРОПА»

Проект выполнен в рамках Второго открытого конкурса на разработку архитектурного и градостроительного развития территории ВДНХ «Золотой колос 2024», на котором он удостоился приза профессионального сообщества. В ходе проектирования была определена идентичность конкретного места: разработанные элементы благоустройства, вероятно, не будут работать на другой территории.

Структура композиции строится по принципу наилучшего прокладывания пешеходных путей сквозь парк. Проектируемая тропа проходит между деревьями, образуя плавные переходы без резких перепадов высот. При бережном отношении к существующему ландшафту, удается идентифицировать парк как глобальную культурно-семиотическую знаковую систему, как организм, совмещающий сложные процессы взаимодействия культуры и пространства [11].

В зонах, образованных пешеходными путями, размещены площадки с малыми архитектурными формами: скамейки, качели и амфитеатр по склону (рис. 1).



Рис. 1. Схема генерального плана

Fig. 1. Master plan layout

За основу концепции взята идентичность ВДНХ в советское время. Это помогло сформировать «современную мифологию» места [12]. Компоненты интерпретации идентичности можно наблюдать на рис. 2.

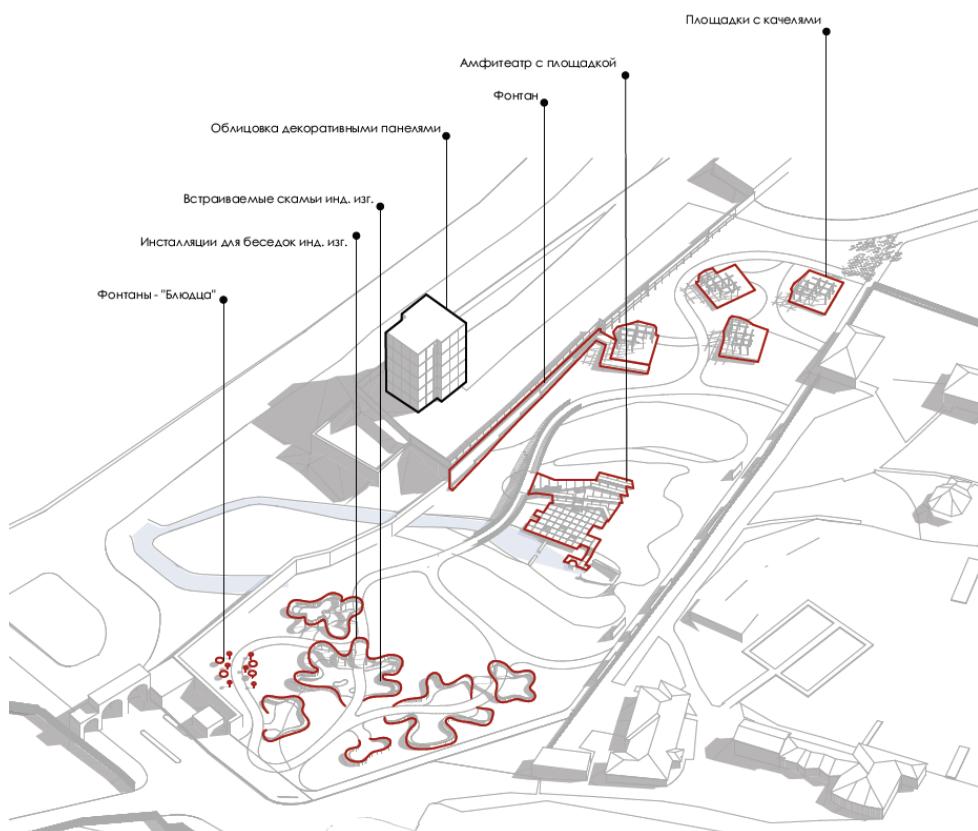
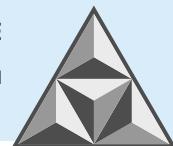


Рис. 2. Функциональное наполнение проекта

Fig. 2. Functional content of the project



Красные ленты. Красный цвет активно использовался в советских мотивах. Ленты этого цвета часто применяли для украшения объектов. Инсталляция снаружи – красная поверхность, а внутри она зеркальная. Благодаря этому создается эффект девизуализации: «лента» растворяется среди зеленой массы летом и среди белого снега зимой, создавая переменчивость перспективных видов. Инсталляции выступают как визуальный акцент, с помощью которого они привлекают проходящих посетителей и затем направляют их в парк. Такая малая архитектурная форма совмещает несколько функций – декорирование, освещение и обособление пространства от пешеходов [13].

Колосья пшеницы. Наиболее распространенный мотив на ВДНХ – изображения и скульптуры колосьев и снопов. Решено организовать место отдыха на газоне – лужайке, вокруг которой будет высажена пшеница. Вид пшеницы предоставляет возможность посетителям парка исследовать фазы ее роста, что является редкостью для городского жителя (рис. 3).



Рис. 3. Визуализация. Пшеница, Красные ленты

Fig. 3. Visualization. Wheat, Red Ribbons

Фонтаны. В парке представлены два фонтана – «Блюдца» и «Водопад». Первый повторяет распространенную форму советского фонтана, который часто устанавливался на площадях. Второй выполняет функцию декорирования существующей подпорной стены и забора. Фонтан водопадного типа покрыт золотыми сферами (золотые скульптурные группы встречаются на всех фонтанах ВДНХ как интерпретация зерен пшеницы).

Бетон. Это материал, который активно использовался в советское время и стал символом эпохи конструктивизма. На территории ВДНХ можно заметить множество бетонных объектов. В проекте бетон присутствует в покрытиях на втором фонтане и платформах для качелей (рис. 4).

Символичность имеет и растительность, выбранная для посева в парке. Это злаковые культуры и многолетние цветы и кусты, растущие по свободной схеме посадки, имитирующей поле. Растительные композиции выполняют не только декоративную функцию, но и являются символами флоры советской эпохи – отражением идеи изобилия и плодородия [14].



Рис. 4. Визуализация. Фонтан, бетон
Fig. 4. Visualization. Fountain, concrete

В результате наполнения компонентами идентичности получили парк с яркой символикой ВДНХ в новом прочтении. Проект передает «дух места» и создает неповторимое пространство на большой территории выставочного комплекса.

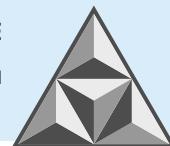
РАЗРАБОТКА ПРОЕКТА «ИГРА ВНУТРИ ИГРЫ»

Проект создан в рамках Всероссийского конкурса на разработку концепции игрового интерактивного элемента благоустройства (комплекса) «Выходи во двор!», где он стал победителем. Элементы идентичности были заданы заранее; задача состояла в том, чтобы интерпретировать готовые элементы фирменного стиля заказчика через малые архитектурные формы. Символичность в проекте задается с помощью типа проектирования, основанного на детских играх и фирменном стиле компании «Вкусно-и-точка». Задача состояла в создании пространства, где дети и взрослые проводили бы время на свежем воздухе, а для этого требовалось обеспечить условия для совместных игр и досуга. В результате предпочтение было отдано статичным интерактивным играм. Объемно-пространственная композиция является результатом слияния форм детских игр «вертушка (ветрячок)» и «крестики-нолики». Формообразование разделено на шесть этапов; первые четыре этапа – получение объемной композиции посредством объединения двух форм игр («крестики-нолики» и «вертушка»); этапы 5-6 – наполнение полученного результата функцией, символикой и фирменным стилем. Так были созданы четыре игровые пространства (рис. 5).

Первая сторона – зона отдыха. Она включает сидения с вырезанным логотипом, который выполняет роль игрового элемента и освещения.

Вторая сторона – игровая зона «палочки-выдвигалочки». Это инсталляция с деревянными палочками, которая позволяет выдавливать форму при нажатии на них.

Третья сторона – игровая зона «трубочки-дудочки». Это инсталляция с переговорными трубами. Суть игры в общении на расстоянии. Играют двое, располагающиеся с разных сторон одной трубы. Когда ребенок произносит слово в растроб, второй игрок слышит это слово в другом растробе, что создает ощущение настоящей связи.



Четвертая сторона – игровая зона «кубики-рубики». Это интерактивная стена из множества мелких двухцветных кубов. Пользователи могут с их помощью создавать различные изображения в игровом поле.

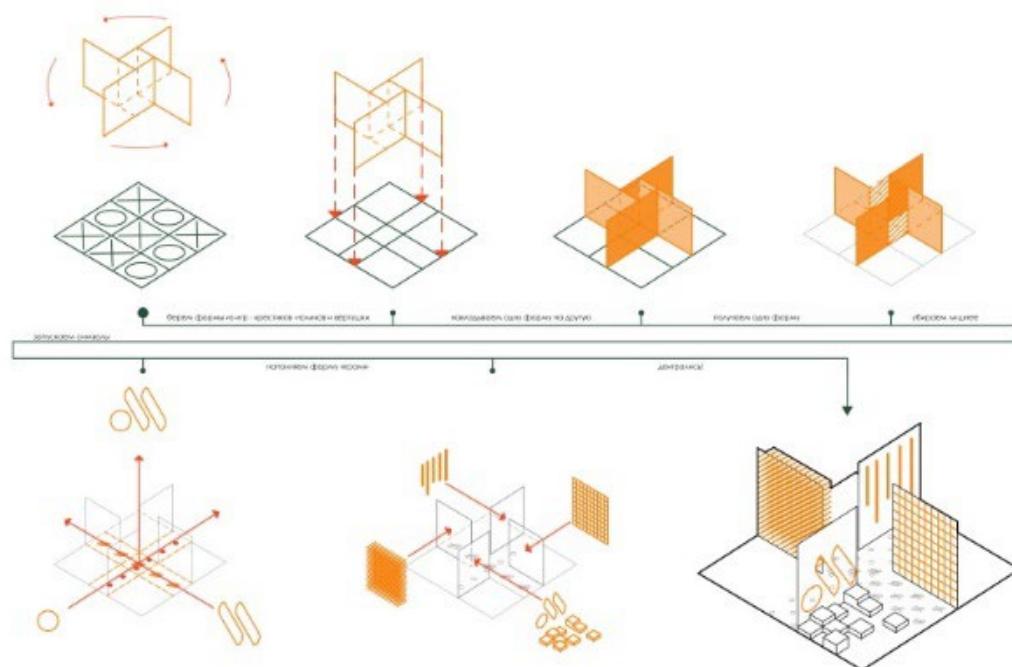


Рис. 5. Этапы формирования проекта

Fig. 5. Stages of project formation

Фирменный стиль выражен в соблюдении предложенной цветовой гаммы и использовании логотипа. Подсвеченные прорези логотипа привлекают к себе внимание и создают дополнительное игровое место. Направления двух паттернов «картошечка» и «бургер», крест-накрест на пересечении, создают узнаваемый логотип (рис. 6).

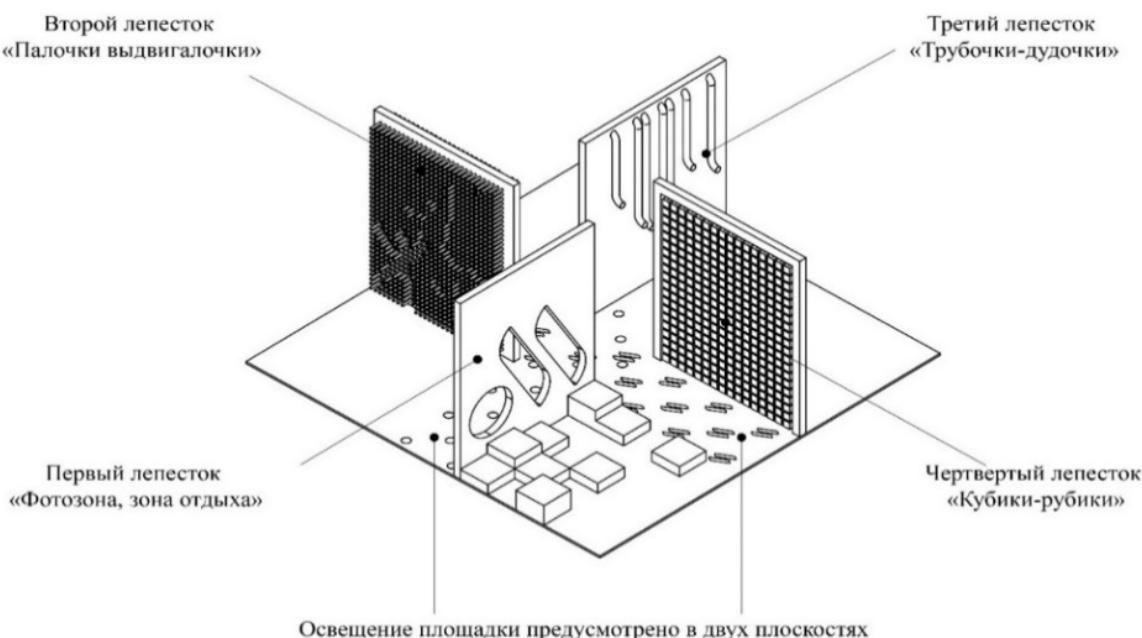


Рис. 6. Функциональное наполнение интерактивных зон

Fig. 6. Functional content of interactive zones



В проектном предложении площадка «Игра внутри игры» (рис. 7) размещена в Парке культуры и отдыха «Нефтяник» города Ярославля.



Рис. 7. Визуализация площадки

Fig. 7. Site visualization

Эта площадка находится в непосредственной близости от ресторана «Вкусно-и-точка».

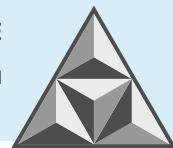
ВЫВОДЫ

Исследование показывает возможности создания функциональной и визуально-комфортной среды за счет ее наполнения смыслами и трансляции информации на территорию. Такие пространства не выглядят скопированными с известных аналогов. Они становятся запоминающимися для посетителей и наполнены уникальными образами, создающими эмоциональные, исторические, контекстуальные и иные формы связей с окружением, литературными интерпретациями, природой, городскими легендами и пр. Яркие образы, связанные с историей и культурой места, способны подчеркнуть его *genius loci* («дух места») и придать ему ощущение причастности. Практические проекты иллюстрируют разные подходы, но показывают, что решения с упором на символизм могут быть адаптированы и для конкретных мест, и для использования в различных контекстах без потери идентичности.

В настоящее время большинство проектов благоустройства несут характер, не нацеленный на приздание месту сложности и конкретизации значимости гуманитарных факторов в рамках рассматриваемой территории. Данный подход в архитектурном проектировании может не только улучшить эстетическую привлекательность места, но и повысить его социальную ценность.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Астанина Н.В., Прокофьева Е.Ю. Мифы, символы и коды современной ландшафтной архитектуры // AMIT. 2025. № 2 (71). DOI: 10.24412/1998-4839-2025-2-272-289.
2. Дженкс Ч. Язык архитектуры постмодернизма. М.: Стройиздат, 1985. 137 с.



3. **Jencks C.** The new paradigm in architecture // *Arch. Rev.* 2003. Т. 213. № 1272. С. 68-72.
4. **Singh S., Norberg-Schulz Christian.** *Genius Loci: Towards a Phenomenology of Architecture*. New York: Rizzoli, Edinburgh College of Art Library. 2004. 288 с.
5. **Растворгув С.В., Голубева Е.В.** Эмоции в архитектуре // Умные композиты в строительстве. 2023. Т. 4. Вып. 3. С. 95-108. DOI: <https://doi.org/10.52957/2782-1919-2024-4-3-95-108>
6. **Голубева Е.В., Москвина П.Ю., Растворгув С.В.** Составляющие идентичности ВДНХ // *Mam. 78-й Всеросс. науч.-техн. конф. студ., магистр. и аспир. ЯГТУ* [сайт]. URL: <https://cih.ru/wp/bld/2025/06/17/составляющие-идентичности-вднх/> (дата обращения: 14.07.2025).
7. **Москвина П.Ю., Голубева Е.В., Растворгув С.В.** Разработка концепции площадки «Игра внутри игры» как пример интерактивного благоустройства // *Mam. 78-й Всеросс. науч.-техн. конф. студ., магистр. и аспир. ЯГТУ* [сайт]. URL: <https://cih.ru/wp/bld/2025/06/21/разработка-концепции-площадки-игра/> (дата обращения: 14.07.2025).
8. **Галимова Л.Р.** Благоустройство территории, как фактор памяти (на примере сквера в городе Ижевск) // *Архитектура. Реставрация. Дизайн. Урбанистика*. 2023. Т. 2. Вып. 2. С. 48-56.
9. **Жириров В.К., Митина Е.Г., Ищенко А.В.** Просветительское значение садово-парковой архитектуры в России: сакральный символизм и образовательная среда // *Вестник славянских культур*. 2022. № 65. С. 8-25.
10. **Ахромеева Ю.В., Студеникина Е.Е.** Символизм в храмовой архитектуре: философский аспект // *Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Сер.: соц.-гуман. науки*. 2015. № 3 (7). С. 31-34.
11. **Тикунова С.В., Калинина Г.Н., Рожкова Е.В.** Символика в практиках конструирования ландшафтного дизайна // *NOMOTHETIKA: Философия. Социология. Право*. 2020. Т. 45. Вып. 2. С. 281-288.
12. **Астанина Н.В., Прокофьева Е.Ю.** Мифы, символы и коды современной ландшафтной архитектуры // *Architecture and Modern Inform. Technol.* 2025. № 2 (71). С. 272-289. DOI: 10.24412/1998-4839-2025-2-272-289
13. **Злотя В.В., Сапрыкина В.Д.** Роль и развитие малых архитектурных форм в окружающем пространстве // *Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства*. 2022. С. 36-39.
14. **Бахина М.А.** Некрополь как сакральный объект ландшафтной архитектуры. // *Межд. журнал гуман. и естеств. наук*. 2025. № 4-1 (103). С. 19-27.

Поступила в редакцию 15.08.2025

Одобрена после рецензирования 12.09.2025

Принята к опубликованию 14.11.2025

REFERENCES

1. **Astanina, N.V. and Prokofieva, E.Yu.** (2025), "Myths, symbols and codes of modern landscape architecture", *AMIT*, vol. 2, no. 71 (in Russian).
2. **Jencks, C.** (1985), *The Language of Postmodern Architecture*, Translated from English by A.V. Ryabushin, M.V. Uvarova; Edit. by A.V. Ryabushin, V.L. Khait. Moscow: Stroyizdat (in Russian).
3. **Jencks, C.** (2003), "The new paradigm in architecture", *Arch. Rev.*, vol. 213, no. 1272, pp. 68-72.
4. **Singh, S. and Norberg-Schulz, Christian,** (2004), *Genius Loci: Towards a Phenomenology of Architecture*. New York: Rizzoli, Edinburgh College of Art Library, 288 p.
5. **Rastorguev, S.V. and Golubeva, E.V.** (2023), "Emotions in architecture", *Smart Composite in Construction*', vol. 4, no. 3, pp. 95-108. DOI: <https://doi.org/10.52957/2782-1919-2024-4-3-95-108> (in Russian).
6. **Golubeva, E.V., Москвина, П.Ю. and Rastorguev, S.V.** (2025), "Components of the VDNKh identity", *Proc. of the 78th All-Russ. sci. and techn. conf. of students, master's students and postgraduates of Yaroslavl State Techn. Univer.* [online]. Available at: <https://cih.ru/wp/bld/2025/06/17/составляющие-идентичности-вднх/> (accessed 14.07.2025) (in Russian).
7. **Москвина, П.Ю., Golubeva, E.V. and Rastorguev, S.V.** (2025), "Development of the concept of the "Game within a Game" site as an example of interactive improvement", *Proc. of the 78th All-Russ. sci. and techn. conf. students, master's students and postgraduates of Yaroslavl State Techn. Univer.* [online]. Available at: <https://cih.ru/wp/bld/2025/06/21/разработка-концепции-планки-игра/> (accessed 14.07.2025) (in Russian).

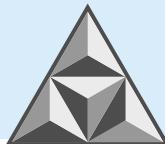


8. **Galimova, L.R.** (2023), "Improvement of the territory as a factor of memory (on the example of a park in the city of Izhevsk)", *Architecture. Restoration. Design. Urbanism*, vol. 2, iss. 2, pp. 48-56 (in Russian).
9. **Zhirov, V.K., Mitina, E.G. and Ishchenko, A.V.** (2022), "Educational significance of landscape gardening in Russia: sacred symbolism and educational environment", *Bull. of Slavic Cultures*, vol. 65, pp. 8-25 (in Russian).
10. **Akhromeeva, Yu.V. and Studenikina, E.E.** (2015), "Symbolism in temple architecture: philosophical aspect", *Sci. Bull. Voronezh State Univer. of Arch. and Civ. Eng. Ser.: soc. and human. sci.*, vol. 3, no. 7, pp. 31-34 (in Russian).
11. **Tikunova S.V., Kalinina G.N. and Rozhkova, E.V.** (2020), "Symbolism in the practices of landscape design", *NOMOTHETIKA: Philosophy. Sociology. Law*, vol. 45, iss. 2, pp. 281-288 (in Russian).
12. **Astanina, N.V. and Prokofieva, E.Yu.** (2025), "Myths, symbols and codes of modern landscape architecture", *Architecture and Modern Inform. Technol.*, vol. 2, no. 71, pp. 272-289 DOI: 10.24412/1998-4839-2025-2-272-289 (in Russian).
13. **Zlotya, V.V. and Saprykina, V.D.** (2022), "The role and development of small architectural forms in the surrounding space", *Traditions, modern problems and prospects for the development of construction*, pp. 36-39 (in Russian).
14. **Bakhina, M.A.** (2025), "Necropolis as a sacred object of landscape architecture", *Inter. J. Human. Natur. Sci.*, vol. 4-1, no. 103, pp. 19-27 (in Russian).

Received 15.08.2025

Approved 12.09.2025

Accepted 14.11.2025



ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция строго придерживается норм и правил международной публикационной этики.

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

Представление статьи в журнал подразумевает следующее:

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

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

Авторские права

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

1. Авторы сохраняют за собой авторские права на работу и предоставляют журналу право первой публикации.

2. Авторы сохраняют за собой право заключать отдельные контрактные договоренности, касающиеся неэксклюзивного распространения версии работы в опубликованном в журнале виде (например, размещение в институтском хранилище, публикация в книге), со ссылкой на оригинальную публикацию в данном журнале.

Приватность

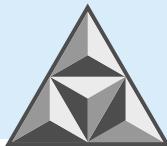
Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте данного журнала, используются исключительно для достижения целей, совпадающих с миссией журнала; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

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

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

Рубрики журнала

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



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

Статьи, направляемые в журнал, должны удовлетворять следующим требованиям:

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

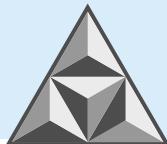
Статьи должны представлять сжатое, конкретное изложение результатов, без повторения одних и тех же данных в тексте, рисунках и таблицах.

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

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

Структура статьи

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



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

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

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

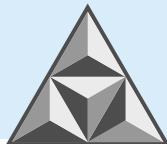
Основной текст научной статьи рекомендуется излагать согласно структуре IMRAD, содержащей следующие заголовки: Введение, Экспериментальная часть, Результаты и их обсуждение, Выводы, Список источников. Каждый заголовок приводится прописными буквами высотой 12 пт и выделяется одной пустой строкой перед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

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

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

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

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



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

Формат

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

Оформление литературных ссылок

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

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

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

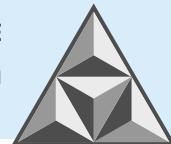
Для журнальной статьи должны быть указаны фамилии и инициалы всех авторов, название статьи, сокращенное название журнала (если допускается, например: *Изв. вузов. Химия и хим. технология*) год, номер тома, номер или выпуск, диапазон страниц и DOI (при их наличии, в случае если цитируемая статья напечатана 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 Российской Федерации, МПК B28C 5/00 (2006.01), B28C 9/02 (2006.01). Способ получения бетонной смеси с утилизацией ранее полученных остатков этой смеси: опубл. 19.09.2018 / Коган Артем Сергеевич.

*Поступила в редакцию
Одобрена после рецензирования
Принята к опубликованию*



REFERENCES

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

Received

Approved

Accepted

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ
В СТРОИТЕЛЬСТВЕ
SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION



ТОМ 6, ВЫПУСК 4, 2025 | VOL. 6, ISS. 4, 2025

