

ISSN ONLINE 2782-1919

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



**Том 7
выпуск**

1

2026

**VOLUME 7
ISSUE 1**

ИЗДАНИЕ ЯРОСЛАВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Основан в ноябре 2020 года, выходит 4 раза в год

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

**Том 7
Выпуск 1**

Ярославль 2026

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «УМНЫЕ КОМПОЗИТЫ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ»

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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

МЕЖДУНАРОДНАЯ РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А.А. АБДЫКАЛЫКОВ (д.т.н., проф., Кыргызстан, Бишкек), П.А. АКИМОВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), М.О. БАКАНОВ (советник РААСН, д.т.н., доц., Москва), В.В. БЕЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Тверь), А.М. БЕЛОСТОЦКИЙ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.М. БУРГОНУТДИНОВ (д.т.н., проф., Пермь), Н.И. ВАТИН (советник РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербурге), Г.В. ЕСАУЛОВ (вице-президент РААСН, акад. РААСН, д. архитектуры, проф., Москва) А.В. ЗАХАРОВ (советник РААСН, к. архитектуры, проф., Иваново), А.Б. КАПРАНОВА (д.ф.-м.н., проф., Ярославль), В.И. КОЛЧУНОВ (академик РААСН, д.т.н., проф., Москва), В.Г. КОТЛОВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Йошкар-Ола), Н.Н. КУДРЯШОВ (к. архитектуры, проф., Ярославль), А.Е. ЛЕБЕДЕВ (д.т.н., доц., Ярославль), С.Н. ЛЕОНОВИЧ (иностраннный акад. РААСН, д.т.н., проф., Республика Беларусь, Минск), В.Л. МОИДРУС (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.И. МОХОВ (акад. РАЕН, д.т.н., проф., Москва), Т.А. НИЗИНА (советник РААСН, д.т.н., проф., Саранск), П.И. ПОСПЕЛОВ (д.т.н., проф., Москва), Ю.В. ПУХАРЕНКО (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Санкт-Петербурге), С.П. РУДОБАШТА (д.т.н., проф., Москва), В.Е. РУМЯНЦЕВА (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Иваново), В.П. СЕЛЯЕВ (акад. РААСН, д.т.н., проф., Саранск), М.Ю. ТАРИШИС (д.т.н., доц., Ярославль), В.И. ТРАВУШ (вице-президент РААСН, акад. РААСН, д.т.н., проф., Москва), А.А. ТРЕЩЕВ (чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., Тула), В.Н. ФЕДОСЕЕВ (советник РААСН, д.т.н., проф., Иваново), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD по техн. н., проф., Республика Сербия, Белград)

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославский государственный технический университет»

Адрес редакции: 150023, Россия, г. Ярославль, Московский проспект, 88

Телефон: +7 (4852) 44-32-75
E-mail: razgovorovpb@ystu.ru
Электронный адрес: <http://comincon.ru>

Журнал издается при содействии Российской академии архитектуры и строительных наук

Редактор: В.Б. Доброхотов
Англ. перевод: Л.А. Тюкина
Корректура и компьютерная верстка: А.С. Фролов

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

PUBLISHED BY YAROSLAVL STATE TECHNICAL UNIVERSITY

SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Established in November 2020, published quarterly

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

Volume 7

Issue 1

Yaroslavl 2026

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

«SMART COMPOSITE IN CONSTRUCTION»

EDITORIAL BOARD

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

INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD

A.A. ABDYKALYKOV (doc.eng.sc., prof., Kyrgyzstan, Bishkek), P.A. AKIMOV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), M.O. BAKANOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., doc., Moscow) V.V. BELOV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tver), A.M. 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. SELYAIEV (acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Saransk), M.Yu. TARSHIS (doc.eng.sc., doc., Yaroslavl), V.I. TRAVUSH (Vice Pres. RAACS, acad. RAACS, doc.eng.sc., prof., Moscow), A.A. TRESHCHEV (corr. memb. RAACS, doc.eng.sc., prof., Tula), V.N. FEDOSEEV (adv. RAACS, doc.eng.sc., prof., Ivanovo), RADIVOJE MITROVIĆ (PhD eng.sc., prof., Serbia, Belgrade)

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

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

Editor: V.B. DobrokhotoV
English translator: L.A. Tyukina
Proofreading and layout designer: A.S. Frolov

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

СОДЕРЖАНИЕ / TABLE OF CONTENTS

Строительные материалы и изделия

- Т.А. Низина, А.О. Ковшов*
- 8 Современные подходы к созданию самовосстанавливающегося бетона с использованием бактерий родов *Bacillus* и *Sporosarcina*
Т.А. Nizina, A.O. Kovshov
Modern approaches to the creation of self-healing concrete using *Bacillus* and *Sporosarcina* bacteria
- П.Б. Разговоров, В.Б. Доброхотов, В.А. Кожухов, М.О. Баканов, И.Н. Давыдов*
- 30 Влияние добавок льняного волокна на прочность строительных композитов на основе гипса
P.B. Razgovorov, V.B. Dobrokhotov, V.A. Kozhukhov, M.O. Bakanov, I.N. Davydov
The effect of flax fiber additives on the strength of gypsum-based construction composites
- С.В. Федосов, Е.С. Шабанов, А.А. Титунин*
- 43 Снижение материалоемкости изготовления лепного декора с применением информационных технологий
S.V. Fedosov, E.S. Shabanov, A.A. Titunin
Reducing the material consumption of stucco decorations based on information technology
- В.Е. Румянцева, А.А. Овчинников, Д.В. Обручев, М.Г. Есина*
- 56 Оптимизации состава вяжущего для бетонов специального назначения с использованием активного эксперимента
V.E. Rumyantseva, A.A. Ovchinnikov, D.V. Obruchev, M.G. Esina
Optimization of binder composition for special-purpose concrete using active experimentation

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

А.А. Игнатъев, А.В. Бондарев, Д.А. Кочетков

- 71 Полуфабрикаты и технологические переделы: введение в предметную область стандартизации нового класса дорожно-строительных материалов

A.A. Ignatyev, A.V. Bondarev, D.A. Kochetkov

Semi-finished products and processing stages: an introduction to the standardisation scope for a new class of road construction materials

Архитектура зданий и сооружений.

Творческие концепции архитектурной деятельности

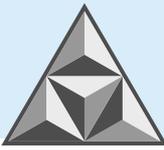
Н.А. Личак, Д.А. Личак, Н.Е. Ушакова

- 84 Архитектурные мегапроекты императора Цинь Шихуанди

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

Architectural megaprojects of emperor Qin Shi Huang

- 94 Информация для авторов



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.32

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-8-29

Современные подходы к созданию самовосстанавливающегося бетона с использованием бактерий родов *Bacillus* и *Sporosarcina*

Т.А. Низина, А.О. Ковшов

Татьяна Анатольевна Низина*, **Артем Олегович Ковшов**

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

*nizinata@yandex.ru**, *a-kovshov@list.ru*



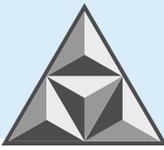
Представлен комплексный анализ современных биотехнологий самовосстановления бетона на основе микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция (MICP). Рассмотрены механизмы биохимической активности бактерий, включая штаммы *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus* и *Sporosarcina pasteurii*. Особое внимание уделено методам инкапсуляции микроорганизмов и питательных субстратов для обеспечения жизнеспособности бактерий в условиях высокощелочной среды цементной матрицы. Показаны ключевые факторы, влияющие на эффективность биоминерализации, и перспективные направления развития технологии самовосстанавливающихся строительных материалов.

Ключевые слова: самовосстанавливающийся бетон, долговечность, микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция, *Bacillus*, *Sporosarcina*, биоминерализация, инкапсуляция микроорганизмов

Для цитирования:

Низина Т.А., Ковшов А.О. Современные подходы к созданию самовосстанавливающегося бетона с использованием бактерий родов *Bacillus* и *Sporosarcina* // Умные композиты в строительстве. 2026. Т. 7, вып. 1. С. 8-29. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-8-29



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-8-29

Modern approaches to the creation of self-healing concrete using *Bacillus* and *Sporosarcina* bacteria

T.A. Nizina, A.O. Kovshov

Tatyana Anatolyevna Nizina*, **Artem Olegovich Kovshov**

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogaryov, Saransk, Russian Federation
nizinata@yandex.ru*, a-kovshov@list.ru



*The paper presents a comprehensive analysis of modern biotechnologies for concrete self-healing based on microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP). The authors consider the mechanisms of biochemical activity of bacteria, including strains of *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, and *Sporosarcina pasteurii*. Particular attention is paid to methods of encapsulating microorganisms and nutrient substrates to ensure the viability of bacteria in the highly alkaline environment of the cement matrix. The paper highlights key factors affecting the effectiveness of biomineralisation and promising areas for the development of self-healing building materials technology.*

Keywords: self-healing concrete, durability, microbially induced calcium carbonate precipitation, *Bacillus*, *Sporosarcina*, biomineralisation, encapsulation of microorganisms

For citation:

Nizina T.A., Kovshov A.O. Modern approaches to the creation of self-healing concrete using *Bacillus* and *Sporosarcina* bacteria // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 1. P. 8-29
URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-8-29



ВВЕДЕНИЕ

Современная инфраструктура, являющаяся каркасом урбанизированной среды, в значительной степени зависит от эксплуатационных характеристик традиционных строительных материалов, среди которых лидирующие позиции занимает бетон. Его повсеместное применение обусловлено высокой прочностью при сжатии и относительной доступностью. Однако парадокс заключается в том, что, являясь основой долговечности конструкций, он сам уязвим для целого ряда деградиационных процессов. Под постоянным воздействием агрессивных сред, механических нагрузок, циклического замораживания и оттаивания в материале формируются микротрещины, которые, разрастаясь, приводят к макроскопическим повреждениям, коррозии арматуры и разрушению конструкции. Данная уязвимость порождает серьезные экономические и эксплуатационные последствия. Необходимость в систематическом ремонте, усилении и преждевременной замене бетонных элементов ложится тяжелым бременем на муниципальные бюджеты и частных владельцев. Традиционные ремонтные технологии, такие как инъецирование трещин или нанесение защитных покрытий, зачастую носят симптоматический характер. Они требуют значительных трудозатрат, простоев объекта и не устраняют первопричину разрушения, а лишь замедляют ее проявление. В свете этих вызовов научное сообщество сфокусировалось на поиске проактивных и устойчивых решений. Одним из наиболее многообещающих направлений, находящихся на стыке материаловедения и биотехнологии, является разработка самовосстанавливающихся бетонов. В отличие от пассивных традиционных материалов, такие системы обладают функцией «заживления», по аналогии с живыми организмами. При этом ключевым механизмом выступает использование специфических штаммов бактерий, которые вводят в состав бетонной смеси на стадии производства совместно с биоразлагаемыми питательными веществами-капсулами. Инновационный принцип заключается в следующем: при образовании трещины и проникновении в нее влаги капсула с бактериями (например, рода *Bacillus*) разрушается. Микроорганизмы, активизируясь, начинают потреблять питательный субстрат и в процессе своей жизнедеятельности запускают биохимическую реакцию микробно-индуцированной кальцификации. Продуктом этой реакции является нерастворимый карбонат кальция ($CaCO_3$), который эффективно запечатывает трещину в бетоне, предотвращая дальнейшее проникновение в него воды и агрессивных агентов. Этот процесс не только восстанавливает целостность структуры, но и повышает водонепроницаемость материала.

Обзор вопроса о долговечности и восстановлении бетона

В современной строительной индустрии вопрос поддержания структурной целостности и эксплуатационной долговечности бетона сохраняет свою актуальность. Несмотря на высокую прочность при сжатии, бетонная матрица изначально обладает склонностью к образованию дефектов. Под совокупным воздействием механических напряжений, циклического замораживания и оттаивания, а также усадочных процессов в материале закономерно формируется сеть микротрещин. Эти дефекты, часто не различимые невооруженным глазом, играют роль «ахиллесовой пяты» конструкции: они не только снижают прочностные характеристики материала, но и способствуют проникновению вглубь бетона влаги и агрессивных компонентов, таких как хлориды и сульфаты. Контактная со стальной арматурой, эти вещества инициируют процесс коррозии, который приводит к потере несущей способности и прогрессирующему разрушению элемента [1].



В свете указанных вызовов традиционные подходы к ремонту и усилению бетонных конструкционных материалов, являясь трудоемкими и затратными, демонстрируют свою ограниченность, поскольку носят реактивный, а не превентивный характер. В материаловедении наиболее перспективным направлением признана разработка «интеллектуальных» материалов, наделенных функцией автономного самовосстановления. Среди инновационных стратегий лидирующие позиции занимает технология, основанная на фундаментальном биологическом процессе – микробно-индуцированном осаждении карбоната кальция (MICP) [2]. При этом предлагается принципиально новое решение, заимствованное у природы: использование метаболической активности специфических микроорганизмов (бактерий родов *Bacillus* или *Sporosarcina*) для биоминерализации.

Микробно-индуцированное осаждение карбоната кальция (MICP) представляет собой природный биологический феномен, в рамках которого микроорганизмы в процессе своей метаболической активности могут продуцировать неорганические соединения. Этот процесс, являющийся формой биоминерализации, всесторонне изучен в контексте строительных материалов [2-7] и рассматривается как одна из наиболее технологически обоснованных платформ для создания коммерчески жизнеспособных самовосстанавливающихся бетонов. Однако, чтобы преобразовать данный потенциал в надежную и предсказуемую функцию материала, необходимо обеспечить соблюдение ряда критически важных условий на всех этапах жизненного цикла конструкций.

Первым фундаментальным вызовом является обеспечение готовности самозалечивающего агента к моменту образования трещины. Поскольку микробные культуры не могут длительное время выживать в агрессивной (щелочной) среде бетона, а преждевременная их активация не допускается, применяется стратегия защиты. Наиболее эффективным методом признано инкапсулирование бактериальных спор в специальные оболочки-капсулы [8-11]. Эти микроконтейнеры (например, на основе отвержденного альгината кальция [12]) выполняют двойную функцию – защищают биологический агент от разрушения и выступают в роли механического триггера. В момент формирования трещины и ее распространения капсула разрушается, высвобождая микроорганизмы в области дефекта, что инициирует процесс восстановления материала.

Второе обязательное условие касается создания благоприятной среды для метаболизма бактерий после их активации. Разрушение капсулы является лишь первым шагом; для последующей жизнедеятельности аэробных бактерий и запуска процесса MICP необходим одновременный доступ к кислороду, влаге и заранее внесенным в бетонную матрицу питательным веществам [13]. Именно вода выступает ключевым проводником, растворяя питательные субстраты (например, лактат кальция) и обеспечивая их транспортировку к бактериальным клеткам. Максимальная эффективность самозалечивания достигается в конструкциях, эксплуатирующихся в условиях периодического увлажнения, или в среде с высокой влажностью воздуха, так как эти факторы гарантируют наличие жидкой фазы, необходимой для протекания биохимических реакций.

Третий, наиболее сложный аспект – обеспечение долговечности механизма самовосстановления. От источника залечивания требуется сохранять жизнеспособность и способность к активации на протяжении всего проектного срока службы конструкции, который может исчисляться десятилетиями. Для решения этой задачи производится тщательный отбор штаммов бактерий, обладающих способностью образовывать чрезвычайно устойчивые эндоспоры. В состоянии спор микроорганизмы метаболически неактивны и демонстрируют высокую резистентность к экстремальным значениям pH, механическим



нагрузкам, отсутствию питательных веществ и колебаниям температуры. Их особенность – способность быстро переходить от состояния анабиоза к активной фазе именно в момент трещинообразования, что как раз и является наиболее практичным решением для повышения долговечности бетона [14].

Эффективность и кинетика процесса микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция (MICP) находятся в прямой зависимости от сложного комплекса биотических и абиотических факторов. С одной стороны, ключевую каталитическую роль играют специфические штаммы бактерий, такие как *Sporosarcina* или *Bacillus*; их метаболическая активность служит двигателем реакции. С другой стороны, успешная минерализация определяется рядом физико-химических условий окружающей среды, включая уровень минерализации субстрата и pH, температурный режим, доступность питательных веществ. Совокупное воздействие этих переменных определяет вариабельность и результативность MICP в широком спектре сред – от пористой структуры бетона до песчаных грунтов [15].

Для целенаправленного управления и оптимизации данного биотехнологического процесса выделяют четыре параметра, выступающие критическими точками контроля:

(I) *Концентрация ионов кальция (Ca^{2+})*. Достаточная концентрация ионов кальция в растворе является первым обязательным условием. Эти ионы выступают в роли катионного реагента, который, связываясь с карбонат-анионами (CO_3^{2-}), формирует нерастворимый осадок карбоната кальция. Источником Ca^{2+} часто служат соли, такие как хлорид или ацетат кальция, вводимые в систему в качестве питательного субстрата.

(II) *Концентрация растворенного неорганического углерода (DIC)*. Данный фактор определяет анионную составляющую реакции. Растворенный неорганический углерод в форме карбонат-ионов (CO_3^{2-}) является прямым продуктом бактериального метаболизма. Его доступность зависит от интенсивности микробной активности, например, скорости гидролиза мочевины, в результате чего образуется CO_2 и аммоний, сдвигающий pH в щелочную область.

(III) *Значение водородного показателя (pH)*. Уровень pH среды является решающим фактором, влияющим как на жизнеспособность бактерий, так и на химическое равновесие карбонатной системы. Щелочная среда (pH > 8) является оптимальной, поскольку смещает равновесие в сторону преобладания карбонат-ионов (CO_3^{2-}) над бикарбонатами (HCO_3^-), что значительно ускоряет и облегчает реакцию осаждения кристаллов кальцита.

(IV) *Наличие центров зародышеобразования (нуклеаторов)*. Процесс кристаллизации требует наличия активных центров, на которых начинается рост кристаллов. Поверхность бактериальных клеток, обладающая отрицательным зарядом, идеально подходит для этого, эффективно адсорбируя положительно заряженные ионы Ca^{2+} . Так сами микробные клетки не только продуцируют реагенты, но и физически выступают матрицей для гетерогенного зародышеобразования, определяя морфологию и прочность формирующегося карбонатного цемента [14].

Биотехнологический подход к созданию самовосстанавливающегося бетона представляет собой инновационную стратегию, основанную на уникальной способности специфических микроорганизмов (главным образом, бактерий родов *Bacillus* и *Sporosarcina*) индуцировать процесс биоминерализации. В силу своей метаболической активности эти микроорганизмы продуцируют нерастворимые соединения карбоната кальция, которые эффективно заполняют микродефекты и полости, выполняя функцию естественного «залечивания» возникающих трещин [1, 2].



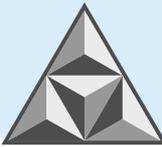
Среди наиболее изученных и технологически перспективных штаммов можно выделить *Bacillus subtilis*, *Bacillus cereus*, *Sporosarcina pasteurii* (известную ранее как *Bacillus pasteurii*) и *Sporosarcina ureae*. Ключевое эксплуатационное преимущество данных микроорганизмов заключается в их природной способности к спорообразованию. Это свойство позволяет бактериям переходить в латентное (метаболически неактивное) состояние, обеспечивая их длительную выживаемость в агрессивных условиях высокощелочной среды цементной матрицы ($\text{pH} > 12$). Микроорганизмы сохраняют жизнеспособность в виде устойчивых эндоспор, выходя из анабиоза и активируясь только при появлении доступа влаги и кислорода, который возникает вследствие образования новых трещин [1].

Эффективность и скорость процесса биологического самовосстановления находятся в прямой зависимости от ряда фундаментальных биологических характеристик применяемого микробного штамма. К числу наиболее значимых параметров относятся: уровень ферментативной активности уреазы, определяющий скорость гидролиза мочевины; кинетика роста микробной культуры; устойчивость к длительному воздействию высоких значений pH, а также общая продуктивность процесса биоминерализации. Согласно данным современных исследований, синергетическое применение бактериальных культур (например, штамма *Bacillus subtilis*) совместно с микрокремнеземом приводит к положительному эффекту. Помимо прямого залечивания трещин за счет осаждения карбоната кальция, наблюдается изменение микроструктуры цементного камня – уплотнение порового пространства и формирование более однородной и плотной гидратной фазы. Этот синергетический эффект не только восстанавливает целостность материала, но и приводит к существенному повышению его прочностных характеристик и долговечности [16].

Бактерии, относящиеся к роду *Bacillus*, являются грамположительными палочковидными микроорганизмами, обладающими фундаментальной способностью к образованию эндоспор. Эти специализированные структуры демонстрируют исключительную резистентность к широкому спектру экстремальных условий внешней среды, обеспечивая микроорганизмам выживаемость при критических температурных колебаниях, интенсивном ультрафиолетовом облучении, химическом стрессе и выраженном дефиците питательных ресурсов. С морфологической точки зрения, клетки бактерий *Bacillus* имеют прямую или незначительно изогнутую конфигурацию, что является одним из факторов, способствующих их успешной колонизации и адаптации в разнородных экосистемах [17].

Важнейшей физиологической особенностью бактерий рода *Bacillus* является их статус факультативных анаэробов. Данная метаболическая пластичность позволяет им осуществлять жизнедеятельность как в аэробных, так и в анаэробных условиях, переключаясь между различными биохимическими путями генерации энергии. Подобная адаптационная способность определила их повсеместное распространение и обитание в широком диапазоне экологических ниш – от почвенных покровов и водных резервуаров до высокоспециализированных и стрессовых сред, включая промышленные стоки.

Параллельно в ходе научных изысканий была обнаружена существенная сложность, касающаяся точной таксономической идентификации природных изолятов бактерий этого рода. Наблюдаемые варианты зачастую демонстрируют различие биологических свойств, оставаясь при этом филогенетически близкими к другим установленным видам, что требует применения методов молекулярной генетики для их дифференциации [18]. Кроме того, именно метаболическое разнообразие и пластичность этих микроорганизмов заложены в основу их высокой выживаемости и функциональной эффективности в изменчивых условиях.



Отдельного внимания заслуживает грамположительная бактерия *Bacillus subtilis* (*B. Subtilis*, см. рис. 1), которая признана непатогенной и практически безопасной для человека и животных. *B. subtilis* обладает высокоэффективной системой внеклеточной секреции белков и характеризуется отсутствием синтеза токсичных или опасных побочных продуктов метаболизма. Благодаря комбинации этих уникальных свойств штаммы *B. subtilis* нашли масштабное применение в качестве пробиотиков в ветеринарии и медицине, а также используются в различных отраслях промышленности в качестве сверхпродуцентов ряда целевых продуктов – иммуноактивных факторов, гидролитических ферментов, незаменимых аминокислот и витаминов [19, 20]. Этот комплекс полезных характеристик определяет *B. subtilis* как перспективного кандидата для биотехнологических превращений в строительной индустрии, в частности, создания самовосстанавливающихся цементных композитов.

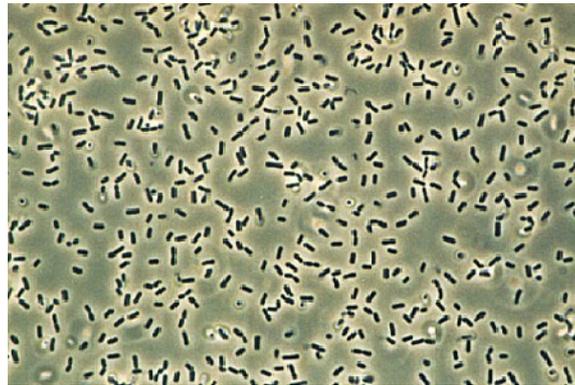


Рис. 1. *Bacillus Subtilis* под микроскопом [21]

Fig. 1. *Bacillus Subtilis* under microscope [21]

Исследования подтверждают, что биодобавки на основе бактерий *Bacillus subtilis* [4, 22] имеют значительный потенциал для автономного залечивания микротрещин, формирующихся в строительных конструкциях под воздействием механических нагрузок и агрессивных факторов внешней среды. Процесс биовосстановления инициируется при контакте бактерий с питательным субстратом, таким как лактат кальция. В ходе своей метаболической активности *Bacillus subtilis* индуцирует осаждение карбоната кальция (кальцита) [23, 24], который в дальнейшем кристаллизуется в полостях дефектов, эффективно заполняя их и постепенно восстанавливая структурную сплошность и монолитность материала [25].

Одним из наиболее значимых барьеров на пути коммерциализации биологического самовосстановления бетона является экстремальная щелочность цементной матрицы, создающая неблагоприятные условия для жизнедеятельности микроорганизмов. Физиологический оптимум для метаболической активности штамма *Bacillus subtilis* 1 ограничен диапазоном pH 4.5-8.0, в то время как показатель кислотности среды в традиционных цементных системах стабильно превышает 11.5 [21]. Это фундаментальное противоречие между биологическими требованиями и параметрами эксплуатации приводит к существенному снижению прогнозируемой эффективности биозалечивания. Преодоление указанного ограничения требует разработки специализированных подходов, таких как предварительная адаптация культур или применение многоуровневых систем защиты, включая инкапсуляцию.

Ключевым звеном в механизме микробиально-индуцированного карбонатного осаждения является уреазы, катализирующая гидролиз мочевины с образованием аммиака и диоксида углерода. Последующая гидратация CO_2 и диссоциация NH_3 приводят к локальному защелачиванию микросреды и увеличению концентрации карбонат-ионов (CO_3^{2-}), что в



присутствии катионов Ca^{2+} создает условия для гетерогенного нуклеогенеза и роста кристаллов карбоната кальция. Важно отметить, что ионы кальция не только выступают субстратом для реакции, но и выполняют сигнальную функцию, потенцируя клеточную активность на мембранном и цитоплазматическом уровнях [26]. Указанная комбинация физиологической пластичности и биохимической эффективности переводит бактерии рода *Bacillus* в ряд высокоперспективных агентов для создания инновационных строительных материалов с функцией автономного восстановления структурной целостности.

Bacillus cereus представляет собой грамположительную спорообразующую палочковидную бактерию, распространенную в природных экосистемах. Ключевым свойством этого микроорганизма является способность к формированию высокорезистентных эндоспор, обеспечивающих исключительную выживаемость в экстремальных условиях, включая температурные воздействия, дегидратацию и колебания кислотности среды [27].

В контексте строительной биотехнологии штаммы *Bacillus cereus* демонстрируют высокий потенциал, в первую очередь, благодаря выраженной уреазной активности и способности индуцировать микробное осаждение карбоната кальция (MICP). Исследования подтверждают их эффективность в процессах биоконсолидации трещин цементных материалов, где бактерии выступают в качестве активных агентов биоминерализации. Инкапсулируясь в защитные матрицы на основе пористых заполнителей или полимерных микрокапсул, споры *Bacillus cereus* сохраняют способность к метаболизму в высокощелочной среде цементного камня в течение длительного времени; их активация происходит при доступе влаги через образовавшиеся трещины [28].

Экспериментальные исследования демонстрируют, что применение штаммов *Bacillus cereus* позволяет эффективно залечивать трещины шириной до 0.8 мм. При этом образуется биогенный кальцит, который характеризуется плотной кристаллической структурой и высокой адгезией к поверхности цементной матрицы [29]. Синергетический эффект наблюдается при комбинации бактериальных культур, представленных на рис. 2, с минеральными добавками, такими как микрокремнезем, который не только улучшает условия бактериальной жизнедеятельности, но и способствует формированию однородной микроструктуры композита. Перспективность применения *B. cereus* в строительных материалах подтверждается исследованиями в области, где они используются для упрочнения и восстановления каменных конструкций, при сохранении устойчивой биоминерализующей активности в различных условиях эксплуатации [30].

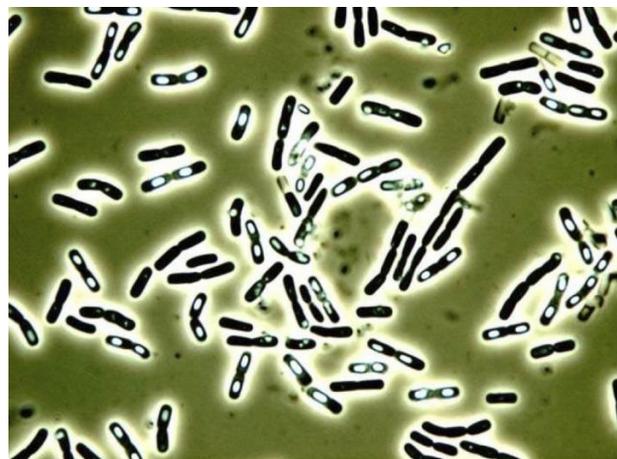
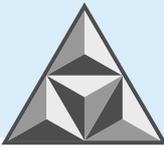


Рис. 2. *Bacillus Cereus* под микроскопом [31]

Fig. 2. *Bacillus Cereus* under microscope [31]



Sporosarcina pasteurii (рис. 3) представляет собой грамположительную хемоорганотрофную бактерию, которая с момента открытия претерпела таксономическую реклассификацию; ранее она называлась *Bacillus pasteurii*. Данный микроорганизм относится к классу *Bacillus* и является типичным представителем группы уробактерий – микроорганизмов, обладающих метаболической способностью к активному уреолизу [32].

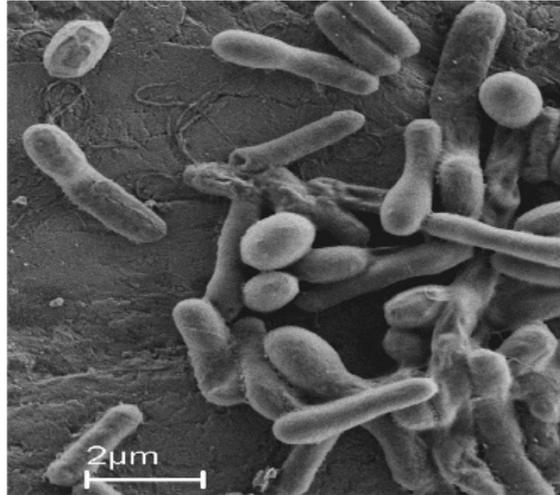


Рис. 3. *Bacillus pasteurii* под микроскопом [33]

Fig. 3. *Bacillus pasteurii* under microscope [33]

Фундаментальным свойством, определяющим интерес к *Sporosarcina pasteurii*, является ее способность продуцировать высокоактивный фермент уреазу. Этот фермент катализирует гидролиз мочевины в окружающей среде по реакции $CO(NH_2)_2 + H_2O \rightarrow 2NH_3 + CO_2$. Образующийся аммиак подщелачивает среду, что приводит к возрастанию pH. Одновременно углекислый газ (CO_2), взаимодействуя с ионами аммония (NH_4^+) и кальция (Ca^{2+}) в растворе, инициирует сложную цепь химических превращений, приводящих к осаждению карбоната кальция ($CaCO_3$) в виде кристаллов кальцита или арагонита. Этот процесс является краеугольным камнем в биотехнологических применениях данной бактерии [33].

Как и другие представители рода *Bacillus*, *Sporosarcina pasteurii* обладает способностью к спорообразованию в неблагоприятных условиях [34]. Эта особенность наделяет ее исключительной устойчивостью к экстремальным температурам, высушиванию, механическим нагрузкам и ультрафиолетовому излучению. В вегетативной форме клетки имеют палочковидную форму (бациллы) и являются подвижными. Способность формировать эндоспores выделяет данную бактерию как идеального кандидата для промышленного применения, так как споры можно транспортировать, хранить в сухом виде и активировать непосредственно на месте проведения работ, создавая биологический инокулят [35, 36].

Уникальное свойство бактерии *Sporosarcina pasteurii*, используемое в геотехнике, заключается в ее способности выступать в роли природного агента для скрепления влажных грунтов. При внесении в почву этот микроорганизм инициирует процесс, приводящий к слипанию и цементации твердых частиц. Данный феномен основан на биогеохимическом процессе – микробно-индуцированном осаждении карбоната кальция (MICP), который обеспечивает эффективную биологическую цементацию рыхлых грунтов.

Технология укрепления рыхлых оснований реализуется путем инфильтрации через массу суспензии бактерий и питательной среды, ключевыми компонентами которой являются мочевины и хлорид кальция. Процесс осуществляется в несколько стадий: первоначальная инфильтрация бактериальной суспензии для обеспечения равномерного распределения



микроорганизмов в пористой среде; внесение питательного раствора, содержащего мочевины и источник кальция; заключительная стадия инкубации для развития процесса биоминерализации [37].

В результате метаболической деятельности бактерий на поверхности отдельных песчинок происходит локальное осаждение карбоната кальция. Механизм процесса включает комплекс биохимических реакций: фермент уреазы, продуцируемый бактериями, катализирует гидролиз мочевины с образованием аммиака и углекислого газа. Аммиак вызывает повышение pH среды, что способствует переходу бикарбонат-ионов в карбонат-ионы. В присутствии ионов кальция происходит кристаллизация карбоната кальция, преимущественно в форме кальцита. Формирующиеся кристаллы выполняют функцию естественного цементирующего агента, создавая прочные мостики между частицами и существенно повышая механическую прочность и несущую способность грунтового массива [38].

Экспериментальные исследования демонстрируют, что образующиеся карбонатные связи обеспечивают высокую адгезию к поверхности минеральных частиц и значительную прочность на сдвиг. Микроструктурный анализ методом сканирующей электронной микроскопии подтверждает формирование непрерывной сети кристаллических мостиков, эффективно связывающих частицы грунта между собой. При этом оптимальное содержание осажденного карбоната кальция составляет 2-4% от массы грунта, что приводит к значительному улучшению механических характеристик при одновременной экономичности процесса [37].

В результате биоцементации рыхлая почва приобретает свойства, сходные с песчаником – осадочной породой, состоящей из плотно сцементированных зерен кварца. Происходит трансформация рыхлого сыпучего материала в конгломерат с выраженной структурной прочностью. Экспериментальные исследования подтвердили, что протекающие биотехнологические процессы обеспечивают существенное увеличение жесткости на сдвиг и несущей способности строительных оснований [39]. Детальный анализ механических характеристик биоцементированных грунтов указывает на увеличение модуля деформации в 2-3 раза по сравнению с исходным, рост прочности на одноосное сжатие – в 4-8 раз. При этом отмечается сохранение фильтрационной способности материала, что имеет *crucial importance* для дренажных характеристик укрепленных массивов. Технология демонстрирует особую эффективность при укреплении песчаных грунтов с коэффициентом фильтрации 10^{-3} – 10^{-5} м·с⁻¹, где достигается равномерное распределение биогенного цемента [38].

Важным преимуществом биологической цементации является экологическая безопасность и возможность применения в сложных гидрогеологических условиях. Технология позволяет укреплять грунты в непосредственной близости от существующих сооружений без вибрационных воздействий и может быть адаптирована для различных инженерно-геологических условий. Долговременные наблюдения подтверждают стабильность биоцементированных массивов не менее 5 лет без существенной деградации прочностных характеристик [39].

Благодаря безопасности и эффективности *Sporosarcina pasteurii* рассматривается в качестве перспективного экологически чистого биологического строительного агента. Потенциал бактерии не ограничивается геотехникой; научные изыскания демонстрируют возможность ее использования для создания инновационных композитов. Исследуется взаимодействие бактериальных культур с синтетическими полимерами и твердыми минералами, что позволяет формировать гибридные материалы, прочностные характеристики которых превосходят даже костную ткань.



Помимо широко известной *Sporosarcina pasteurii*, другой представитель этого рода – *Sporosarcina ureae* (рис. 4) демонстрирует не менее выдающуюся способность к индуцированному минералообразованию. Ключевым метаболическим процессом для данного микроорганизма также является гидролиз мочевины, катализируемый ферментом уреазой [17].

Хотя *Sporosarcina ureae* является высокоэффективным агентом биоминерализации, значительный интерес сфокусирован и на других представителях обширного рода *Bacillus* (к которому ранее относили и *S. pasteurii*).

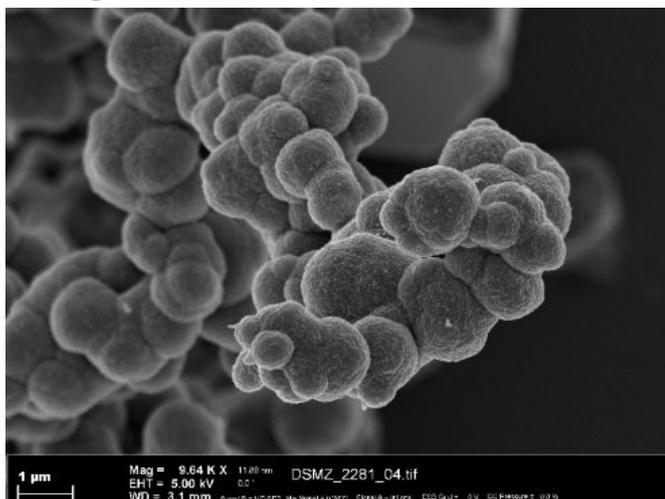


Рис. 4. *Sporosarcina ureae* под микроскопом [40]

Fig. 4. *Sporosarcina ureae* under microscope [40]

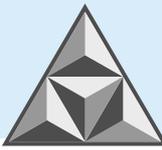
Многие виды этого рода, такие как *Bacillus sphaericus*, *Bacillus cohnii* и *Bacillus pseudofirmus*, обладают схожими метаболическими способностями [41]. Их изучение открывает путь к созданию универсальных и адаптируемых биотехнологий. Исследования показывают, что штаммы *Cytobacillus horneckiae* и новый вид *Sutcliffeiella* сохраняют жизнеспособность в бетонной матрице и обладают уреазной активностью, индуцирующей биоминерализацию карбоната кальция [42].

Использование бактерий рода *Bacillus* рассматривается как безопасная и экологичная альтернатива традиционным химическим методам модификации бетона. В отличие от синтетических добавок, микробные агенты являются природными компонентами окружающей среды и не вносят в материал токсичные соединения [9].

Современные исследования демонстрируют разнообразие подходов к введению микроорганизмов в бетон. Наиболее распространенным методом является прямое добавление вегетативных клеток или спор в затворяющую воду, однако этот подход имеет ограниченную эффективность из-за высокой щелочности цементной среды. Альтернативной стратегией выступает использование иммобилизованных форм бактерий в пористых носителях. Исследования [14] показали эффективность инкапсуляции спор *Bacillus subtilis* в альгинате натрия, где образующиеся микрокапсулы диаметром 1-2 мм обеспечивают механическую защиту и постепенное высвобождение микроорганизмов.

Перспективным направлением является использование легких пористых заполнителей в качестве носителей. В [8] демонстрируется успешное применение керамзита, предварительно пропитанного бактериальной суспензией и питательными веществами. Такая система позволяет создать в объеме бетона распределенную сеть микрокапсул, обеспечивая локальную активацию биоминерализации при образовании трещин в любой точке конструкции.

Ключевым аспектом технологии является обеспечение жизнеспособности микроорганизмов в экстремальных условиях бетонной матрицы. Исследования [9] показывают, что инкапсуляция в полимерные гидрогели на основе желатина позволяет



поддерживать в течение 6 мес. метаболическую активность бактерий при pH до 12.5. Механизм защиты заключается в создании буферной зоны вокруг клетки и контроле диффузии ионов через полимерную матрицу.

Активация биологических процессов происходит при появлении трещин и проникновении влаги. Исследователями был предложен каскадный механизм активации: при растрескивании происходит разрушение защитных оболочек, высвобождение спор и их прораствание в присутствии воды и кислорода. Последующий метаболизм питательных веществ приводит к продуцированию уреазы и запуску процесса микробно-индуцированного осаждения карбоната кальция [8].

Эффективность самовосстановления напрямую зависит от состава питательных субстратов. Установлены преимущества комбинации инкапсулированных спор с лактатом кальция, который служит источником энергии для бактерий и одновременно субстратом для биоминерализации [14]. Исследования демонстрируют, что оптимальное соотношение C/N в питательной среде составляет 20:1, что обеспечивает максимальную скорость осаждения карбоната кальция [4].

Температурный режим существенно влияет на кинетику биологических процессов. Отмечается, что оптимальный диапазон температур для большинства продуцентов уреазы составляет 25-30°C [12]; при этом кратковременное ее повышение до 60°C не приводит к потере жизнеспособности инкапсулированных спор.

Методы оценки эффективности биологических систем самовосстановления включают комплекс физико-механических и микроструктурных исследований. Применяется методология, основанная на определении восстановления прочности материалов на сжатие, коэффициента водонепроницаемости и динамического модуля упругости после циклов повреждения-восстановления [14].

Долговечность систем оценивается путем ускоренных испытаний в агрессивных средах. Исследования [8] показывают, что правильно инкапсулированные бактериальные споры сохраняют жизнеспособность в течение 5 лет в условиях циклического замораживания-оттаивания и карбонизации. С применением электронной сканирующей микроскопии подтверждено образование плотных кристаллических структур карбоната кальция, интегрированных в цементную матрицу.

Современные исследования направлены на создание гибридных материалов, сочетающих биологические и химические механизмы самовосстановления. Изучают синергетический эффект от совместного использования бактериальных спор и наночастиц оксида железа, выполняющих роль катализаторов биоминерализации [10].

Перспективным направлением является разработка программируемых систем с контролируемым временем активации. Исследуются многослойные капсулы с различной прочностью оболочек, позволяющие осуществлять поэтапное высвобождение биологических агентов в зависимости от величины повреждения [12].

Современные исследования в области строительного материаловедения все чаще фокусируются на разработке интеллектуальных материалов, обладающих функцией самовосстановления. Среди различных биологических агентов, применяемых для этих целей, спорообразующие бактерии родов *Bacillus* и *Sporosarcina* зарекомендовали себя как наиболее эффективные и перспективные агенты для получения самовосстанавливающегося бетона (биобетона) [43]. Их ключевым преимуществом является исключительная устойчивость в агрессивной высокощелочной среде (pH = 12-13), характерной для цементной матрицы, где большинство микроорганизмов не выживает [44]. Эта устойчивость обеспечивается способностью данных бактерий переходить в латентное состояние, формируя эндоспоры,



которые могут сохранять жизнеспособность в экстремальных условиях на протяжении десятилетий.

Согласно комплексному анализу современных исследований [43], данный биологический процесс имеет впечатляющую эффективность. Кристаллические новообразования способны полностью заполнять микропоры и эффективно залечивать трещины шириной до 0.97 мм. Это приводит к ряду значительных улучшений физико-механических свойств восстановленного бетона:

1. *Повышение прочности.* Наблюдается существенный прирост прочности на сжатие, который, по данным различных исследований, составляет от 24% до 35% по сравнению с контрольными образцами, не подвергавшимися биовосстановлению;

2. *Снижение проницаемости.* Герметизация пор и трещин карбонатной пленкой резко снижает проницаемость бетонной матрицы; при этом уменьшается проникновение воды и агрессивных хлорид-ионов (главная причина коррозии стальной арматуры в железобетонных конструкциях);

3. *Увеличение долговечности.* Совокупность перечисленных факторов (восстановление целостности структуры, повышение прочности и снижение проницаемости) напрямую способствует значительному увеличению проектного срока службы бетонных конструкций, их устойчивости к циклам замораживания-оттаивания и воздействию карбонизации [43].

Таким образом, интеграция бактерий родов *Bacillus* и *Sporosarcina* в бетоны открывает путь к созданию новых, более долговечных и экологически устойчивых строительных материалов, способных к автономному восстановлению и продлению своего жизненного цикла.

Для успешной реализации технологии самовосстанавливающегося бетона критически важным является решение задачи по сохранению жизнеспособности микроорганизмов в бетонной матрице. Современные исследования предлагают различные стратегии введения бактерий в состав строительного материала. Наиболее эффективным подходом признано не внесение вегетативных клеток или спор в бетонную смесь, а их предварительная иммобилизация на специальных носителях или инкапсуляция.

В качестве защитных матриц применяются высокопористые материалы, такие как диатомит, легкие пористые заполнители (керамзит, перлит), а также полимерные гидрогели и микрокапсулы. Эти носители выполняют двойную функцию: во-первых, они защищают микроорганизмы от механических повреждений на этапе перемешивания высоконапряженной бетонной смеси, а во-вторых, создают буферную зону, частично нивелируя разрушительное воздействие высокой щелочности среды ($pH = 12-13$) в начальный период гидратации цемента. Такой подход позволяет не просто сохранить бактерии, но и продлить на десятилетия их жизнеспособность, обеспечивая долгосрочный потенциал самовосстановления конструкции [14, 42].

Наряду с бактериями, в защитные капсулы или непосредственно в состав бетона вводят питательные компоненты. Ключевыми элементами являются источник ионов кальция (лактат, нитрат или ацетат указанного металла) и мочевины, которые выступают субстратом для запуска процесса биоминерализации в момент активации бактерий влагой, проникающей через трещины [44].

Ключом к созданию эффективных и долговечных самовосстанавливающихся материалов является тщательный отбор целевых штаммов микроорганизмов. Биологические агенты, претендующие на интеграцию в бетон, должны соответствовать ряду строгих критериев, обусловленных спецификой среды их будущего обитания [14, 42]:

- *Способность к спорообразованию.* Это свойство является фундаментальным для длительного анабиотического сохранения в условиях дефицита питательных веществ и влаги.



Споры метаболически инертны и могут выживать в неблагоприятных условиях десятилетиями, активируясь только при появлении воды и кислорода в трещине;

- *Высокая алкалофильность и устойчивость при pH = 12-13.* Штамм должен быть толерантен к экстремально щелочной среде цементного камня, которая является причиной гибели большинства микроорганизмов;

- *Наличие механизмов биоминерализации.* Наиболее изученным является высокая уреазная активность, обеспечивающая гидролиз мочевины с последующим осаждением карбоната кальция. Перспективными также считаются штаммы, использующие альтернативные пути с участием фермента карбоангидразы, которая катализирует гидратацию диоксида углерода с образованием карбонат-ионов [14, 44];

- *Термостойкость.* Бактерии должны выдерживать воздействие температур до 60-70°C, которые могут возникать в бетоне в процессе гидратации цемента или при эксплуатации в жарком климате.

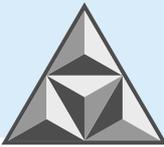
Исследования показывают, что культуры, обладающие необходимым комплексом свойств, в природных условиях встречаются редко. В связи с этим особый научный интерес представляют микробные сообщества, адаптировавшиеся к экстремальным условиям искусственной среды. Выдвигается научная гипотеза о том, что бактерии, сохранившие жизнеспособность в «цементной матрице» исторических и археологических сооружений на протяжении столетий, могут обладать уникальными адаптационными механизмами [42].

Переход от лабораторных исследований к широкомасштабному применению биологического самовосстановления бетона требует решения ряда технологических и экономических задач. Ключевым вопросом является разработка рентабельных методов производства и введения биодобавок в бетонную смесь в промышленных масштабах.

Одним из перспективных направлений является использование в качестве носителей для бактерий и питательных веществ легких пористых заполнителей, таких как керамзит или перлит [8, 29]. Эти материалы не только обеспечивают эффективную защиту микроорганизмов, но и являются стандартным компонентом легких бетонов, что упрощает их интеграцию в существующие технологические процессы. Исследования показывают, что предварительно насыщенные бактериальными спорами и питательными субстратами керамзитовые гранулы могут равномерно распределяться в бетонной смеси, обеспечивая объемный эффект самовосстановления [11].

Важным аспектом является также влияние биодобавок на физико-механические свойства бетона на стадии твердения. Многочисленные эксперименты подтверждают, что правильно подобранные и инкапсулированные бактериальные культуры не оказывают негативного воздействия на прочностные характеристики бетона, а в ряде случаев, благодаря уплотняющему эффекту биоминерализации, даже улучшают их [5, 6, 16]. Так, было установлено, что для бетона с добавлением *Bacillus subtilis* уже на 28-е сутки твердения прочность на сжатие увеличивается на 10-15% по сравнению с контрольными образцами [23].

Экономическая целесообразность технологии оценивается с позиции жизненного цикла конструкций. Хотя первоначальная стоимость биобетона может быть на 15-30% выше по сравнению с традиционным строительным материалом, значительное увеличение срока службы, сокращение затрат на ремонт и техническое обслуживание определяют его применение как экономически выгодное решение при строительстве таких объектов инфраструктуры, как мосты, тоннели, гидротехнические сооружения и высотные здания [8, 11]. Расчеты показывают, что экономия средств в течение 50-летнего жизненного цикла конструкции может достигать 40-50% за счет снижения эксплуатационных расходов [14].



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перед внедрением технологии биологического восстановления цементного камня стоят серьезные вызовы. К ним относятся стандартизация биодобавок, прогнозирование долгосрочной эффективности их действия в различных климатических условиях, а также разработка нормативной базы, регламентирующей применение биобетона в строительстве.

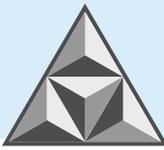
Наиболее перспективными направлениями дальнейших исследований являются:

- генетический инжиниринг штаммов для усиления их уреазной активности и устойчивости в экстремальных условиях;
- разработка «умных» капсул с контролируемым временем высвобождения питательных веществ;
- создание гибридных систем, комбинирующих бактериальное самовосстановление с другими технологиями, например, использованием полимерных микрокапсул или волокон, наполненных герметиком;
- изучение синергии с использованием промышленных отходов, таких как шлаки и зола-унос, для создания экологически чистых композитов.

Современная строительная индустрия стоит на пороге биотехнологической революции, и самовосстанавливающийся бетон является одним из наиболее ярких ее символов. Представленные данные демонстрируют, что бактерии родов *Bacillus* и *Sporosarcina*, благодаря уникальному сочетанию спорообразования, алкалофильности и высокой метаболической активности, представляют собой ценный инструмент, применяемый для коренного улучшения эксплуатационных свойств бетона.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Jaf D.** A review on self-healing concrete: A biological approach // *International Journal of Advanced Research in Engineering and Technology (IJARET)*. 2020. Vol. 11. Iss. 4. P. 1-10. DOI: 10.5937/ior2301001J.
2. **Строкова В.В., Власов Д.Ю., Франк-Каменецкая О.В., Духанина У.Н., Балицкий Д.А.** Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития // *Строительные материалы*. 2019. № 9. С. 83. DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103.
3. **Баженов Ю.М., Ерофеев В.Т., Салман А.Д.С.Д., Смирнов В.Ф., Фомичев В.Т.** Технология самовосстановления железобетонных конструкций с помощью микроорганизмов // *Русский инженер*. 2018. № 4 (61). С. 46-48.
4. **Jonkers H.M., Thijssen A., van Breugel K.** Bacteria mediated remediation of concrete structures // *Proceedings of the second international symposium on service life design for infrastructures*. 2010. P. 833-840.
5. **Ghosh P., Mandal S., Chattopadhyay B.D., Pal C.** Use of microorganism to improve the strength of cement mortar // *Cement and Concrete Research*. 2005. Vol. 35. Iss. 10. P. 1980-1983. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.005.
6. **Ghosh S., Biswas M., Chattopadhyay B.D., Mandal S.** Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar // *Cement and Concrete Composites*. 2009. Vol. 31. Iss. 2. P. 93-98. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001.
7. **Dhami N.K., Reddy M.S., Mukherjee A.** Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications : a review // *Frontiers in Microbiology*. 2013. No. 4. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00314
8. **Wang J.Y., Snoeck D., Van Vlierberghe S., Verstraete W., De Belie N.** Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. P. 110-119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018.
9. **Seifan M., Ebrahiminezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A.** Microbial calcium carbonate precipitation with high affinity to fill the concrete pore space: nanobiotechnological approach // *Bioprocess and Biosystems Engineering*. 2018. Vol. 42. Iss. 1. P. 37-46. DOI: 10.1007/s00449-018-2011-3.



10. **Seifan M., Sarmah A.K., Samani A.K., Ebrahimezhad A., Ghasemi Y., Berenjian A.** Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2018. Vol. 102. Iss. 10. P. 4489-4498. DOI: 10.1007/s00253-018-8913-9.
11. **Иноземцев С.С., До Т.Ч.** Состояние и перспективы развития технологии самовосстанавливающихся дорожных материалов // *Вестник МГСУ*. 2020. Т. 15. № 10. С. 1407-1424. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1407-1424.
12. **Wang J.Y., Soens H., Verstraete W., De Belie N.** Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores // *Cement and Concrete Research*. 2014. Vol. 56. P. 139-152. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009
13. **Nielsen S.D., Koren K., Löbmann K., Hinge M., Scoma A., Kjeldsen K.U. et al.** Constraints on CaCO₃ precipitation in superabsorbent polymer by aerobic bacteria // *Applied Microbiology and Biotechnology*. 2019. Vol. 104. Iss. 1. P. 365-375. DOI: 10.1007/s00253-019-10215-4.
14. **Черных Т.Н., Горбачевских К.А., Криушин М.В., Орлов А.А., Комелькова М.В., Платковский П.О.** Биоминеральные добавки для самозалечивания бетона // *Вестник МГСУ*. 2024. Т. 19. Вып. 4. С. 569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.569-579
15. **Ерофеев В.Т., Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Смирнов В.Ф.** Бактерии для получения самовосстанавливающихся бетонов // *Интернет-журнал «Транспортные сооружения»*. 2018. Т. 5. № 4. DOI: 10.15862/07SATS418.
16. **Qtiashat D., Al Khazaleh M.** Influence of Bacillus Subtilis Bacteria on Strength and Durability of Concrete with Silica Fume // *Civil and Environmental Engineering*. 2022. Vol. 18. Iss. 1. P. 254-264. DOI:10.28991/CEJ-2025-011-05-013.
17. **Журавская Н.Е., Шевченко К.В., Журавский Д.А.** Биоповреждения бетонных конструкций, мероприятия по восстановлению // *Проблемы современного строительства. Мат. Межд. науч.-техн. конф.* Минск, 28 мая 2020 г. С. 231-232.
18. **Симонов А.А., Алфимов А.В., Бабакулиев Р.** Исследование механизма самовосстановления микротрещин в бетонных конструкциях с использованием бактерий // *Сб. науч. ст. Всерос. молод. науч. конф. «За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества»*. 2020. Т. 4. С. 81-86. EDN: DSVVSS.
19. **Карпов Д.С., Домашин А.И., Котлов М.И., Осипова П.Д. и др.** Биотехнологический потенциал штамма Bacillus subtilis 20 // *Молекулярная биология*, 2020. Т. 54. № 1. С. 137-145. DOI:10.31857/S0026898420010085.
20. **Van Dijk J.M., Hecker M.** Bacillus subtilis: From soil bacterium to super-secreting cell factory // *Microbial Cell Factories*. 2013. DOI:10.1186/1475-2859-12-3.
21. **Функциональная гастроэнтерология: Bacillus subtilis (сенная палочка)** [Электронный ресурс]. URL: <https://gastroscan.ru/handbook/144/5648> (дата обращения 20.10.2025).
22. **Аль Дулайми С.Д.С.** Самовосстанавливающиеся бетоны, модифицированные микробиологической добавкой : дисс. канд. техн. наук. М., 2019. 310 с. EDN: OVDXMN.
23. **Joshi K.A., Kumthekar M.B., Ghodake V.P.** Bacillus Subtilis Bacteria impregnation in concrete for enhancement in compressive strength // *International Research Journal of Engineering and Technology*. 2016. Vol. 3. Iss. 5. P. 1229-1234.
24. **De Leeuw N.H., Parker S.C.** Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: an atomistic approach // *The Journal of Physical Chemistry B*. 1998. Vol. 102. Iss. 16. P. 2914-2922. DOI: 10.1021/jp973210f.
25. **Jongvivatsakul P., Janprasit K., Nuaklong P., Pungrasmi W., Likitlersuang S.** Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 212. P. 737-744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035.
26. **Мальчевский В.А., Береговой В.А., Болдырев С.А., Капустин А.Е., Субботин А.М., Петров С.А.** Использование добавки экзометаболита микроорганизма Bacillus cereus, полученного из обводненных грунтов, в качестве пластификатора для улучшения прочности цементных растворов // *Байкал – Ворота в Азию. Мат. Межд. науч.-практ. конф. Улан-Удэ*, 2021. С. 122-126. DOI:10.31554/978-5-7925-0605-3-2021-122-126.

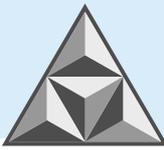


27. *Bacillus cereus* – Микробиологический контроль [Электронный ресурс]. URL: <https://mibio.ru/mikrobiologiya/mikrobiologicheskij-kontrol-produktov-bacillus-cereus/> (дата обращения 20.10.2025).
28. **Achal V., Mukherjee A., Reddy, M.S.** Microbial concrete: A way to enhance the durability of building structures // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2011. Vol. 23(6). P. 730-734. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000159.
29. **Xu J., Wang X.** Self-healing of concrete cracks by ceramsite-loaded microorganisms // *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 1-12. DOI:10.1155/2018/5153041.
30. **Yang Y., Chu J., Cao B., Hanlong L.** Biocementation of soil using non-sterile enriched urease-producing bacteria from activated sludge. *Journal of Cleaner Production*. 2020. 262. 121315. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121315.
31. EurekaAlert!: *Bacillus cereus* under the Microscope [Электронный ресурс]. URL: <https://www.eurekaalert.org/multimedia/707853> (дата обращения 20.10.2025).
32. *Sporosarcina pasteurii* – Alchetron, The Free Social Encyclopedia [Электронный ресурс]. URL: <https://alchetron.com/Sporosarcina-pasteurii> (дата обращения 20.10.2025).
33. **Mobley H.L., Hausinger R.P.** Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization // *Microbiological Rev.* 1989. P. 90-92. DOI:10.1128/MMBR.53.1.85-108.1989.
34. **Yoon J.-H., Lee K.-C., Weiss N., Kho Y.H., Kang K.H., Park Y.-H.** *Sporosarcina aquimarina* sp. nov., a bacterium isolated from seawater in Korea, and transfer of *Bacillus pasteurii* to the genus *Sporosarcina* // *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*. 2001. P. 1079. DOI:10.1099/00207713-51-3-1079.
35. **Mitchell A.C., Ferris F.G.** The coprecipitation of Sr into calcite precipitates induced by bacterial ureolysis in artificial groundwater: Temperature and kinetic dependence // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 2005. P. 4201. DOI: 10.1016/j.gca.2005.03.014.
36. **Whiffin V.S., van Paassen L.A. & Harkes M.P.** Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique // *Geomicrobiology Journal*. 2007. P. 417. DOI:10.1080/01490450701436505.
37. **DeJong J.T., Mortensen B.M., Martinez B.C., Nelson D.C.** Bio-mediated soil improvement // *Ecological Engineering*. 2010. P. 201. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2008.12.029.
38. **Al Qabany A., Soga K. & Santamarina C.** Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation // *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2012. P. 993. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000666.
39. **DeJong J.T., Martinez B.C., Ginn T.R., Hunt C., Major D., and Tanyu B.** Development of a Scaled Repeated Five-Spot Treatment Model for Examining Microbial Induced Calcite Precipitation Feasibility in Field Applications // *Geotechnical Testing Journal*. 2014. Vol. 37. № 3. P. 424-435. DOI:10.1520/ GTJ20130089. ISSN 0149-6115.
40. BacDive: *Sporosarcina ureae* DSM 2281 is a mesophilic bacterium of the family Caryophanaceae [Электронный ресурс]. URL: <https://bacdive.dsmz.de/strain/11990>.
41. **Baskar S., Baskar R., Maucclair L.** Microbially induced calcite precipitation in culture experiments: Possible origin for stalactites in the caves of the Meghalaya Plateau // *Current Sci*. 2006. P. 58.
42. **Чистяков В.А., Сидоренко Н.Г.** Живой бетон: как микроорганизмы помогают строительным материалам самовосстанавливаться // *Межд. науч.-практ. конф. «Состояние и перспективы развития фундаментальной и прикладной микробиологии»*, 24-25 сентября 2025 г. С. 3. DOI:10.5281/zenodo.17214973.
43. **Beskopylny A.N., Shcherban' E.M., Stel'makh S.A., Shilov A.A., Chernil'nik A., El'shaeva D., Chistyakov V.A.** Analysis of the Current State of Research on Bio-Healing Concrete (Bioconcrete) // *Materials (Basel)*. 2024 Sep 13;17(18):4508. DOI:10.3390/ma17184508.
44. **Aramova O., Kornienko I., Chistyakov V., Alliluyeva E., Kirsanova T.** Properties of the urease enzyme as a component of self-healing concrete: Rev. // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024; 113:11310. DOI: 10.4123/CUBS.113.10.

Поступила в редакцию 15.12.2026

Одобрена после рецензирования 17.01.2026

Принята к опубликованию 10.03.2026



REFERENCES

1. **Jaf, D.** A review on self-healing concrete: A biological approach (2020), *Inter. J. Adv. Res. Eng. Technol. (IJARET)*, vol. 11, iss. 4, pp. 1-10. DOI:10.5937/ror2301001J.
2. **Strokova, V.V., Vlasov, D.Yu., Frank-Kamenetskaya, O.V., Dukhanina, U.N. and Balitsky, D.A.** (2019), Application of microbial carbonate biomineralization in biotechnologies for the creation and restoration of building materials: analysis of the state and development prospects, *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*, no. 9, p. 83. DOI: 10.31659/0585-430X-2019 774 9 83 103 (in Russian).
3. **Bazhenov, Yu.M., Erofeev, V.T., Salman, A.D.S.D., Smirnov, V.F. and Fomichev, V.T.** (2018), Technology of self-healing of reinforced concrete structures using microorganisms, *Russkij Inzhener [Russian Engineer]*, vol. 4, no. 61, pp. 46-48 (in Russian).
4. **Jonkers, H.M., Thijssen, A. and van Breugel, K.** (2010), Bacteria mediated remediation of concrete structures, *Proc. sec. inter. symposium on service life design for infrastructures*, pp. 833-840.
5. **Ghosh, P., Mandal, S., Chattopadhyay, B.D. and Pal, C.** (2005), Use of microorganism to improve the strength of cement mortar, *Cement and Concrete Res.*, vol. 35, iss. 10, pp. 1980-1983. DOI: 10.1016/j.cemconres.2005.03.005.
6. **Ghosh, S., Biswas, M., Chattopadhyay, B.D. and Mandal, S.** (2009), Microbial activity on the microstructure of bacteria modified mortar, *Cement and Concrete Composites*, vol. 31, iss. 2, pp. 93-98. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.001.
7. **Dhami, N.K., Reddy, M.S. and Mukherjee, A.** (2013), Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: a rev., *Frontiers in Microbiology*, no. 4. DOI: 10.3389/fmicb.2013.00314.
8. **Wang, J.Y., Snoeck, D., van Vlierberghe, S., Verstraete, W. and De Belie, N.** (2014), Application of hydrogel encapsulated carbonate precipitating bacteria for approaching a realistic self-healing in concrete, *Construction and Building Mat.*, vol. 68, pp. 110-119. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.06.018.
9. **Seifan, M., Ebrahiminezhad, A., Ghasemi, Y. and Berenjian, A.** (2018), Microbial calcium carbonate precipitation with high affinity to fill the concrete pore space: nanobiotechnological approach, *Bioprocess and Biosystems Eng.*, vol. 42, iss. 1, pp. 37-46. DOI: 10.1007/s00449 018 2011 3.
10. **Seifan, M., Sarmah, A.K., Samani, A.K., Ebrahiminezhad, A., Ghasemi, Y. and Berenjian, A.** (2018), Mechanical properties of bio self-healing concrete containing immobilized bacteria with iron oxide nanoparticles, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 102, iss. 10, pp. 4489-4498. DOI: 10.1007/s00253 018 8913 9
11. **Inozemtsev, S.S. and Do, T.Ch.** State and prospects of development of self-healing road materials technology (2020), *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, vol. 15, no. 10, pp. 1407-1424. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.10.1407-1424 (in Russian).
12. **Wang, J.Y., Soens, H., Verstraete, W. and De Belie, N.** (2014), Self-healing concrete by use of microencapsulated bacterial spores, *Cement and Concrete Res.*, vol. 56, pp. 139-152. DOI: 10.1016/j.cemconres.2013.11.009.
13. **Nielsen, S.D., Koren, K., Löbmann, K., Hinge, M., Scoma, A. and Kjeldsen, K.U. et al.** (2019), Constraints on CaCO₃ precipitation in superabsorbent polymer by aerobic bacteria, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 104, iss. 1, pp. 365-375. DOI: 10.1007/s00253 019 10215 4.
14. **Chernykh, T.N., Gorbachevskikh, K.A., Kriushin, M.V., Orlov, A.A., Komelkova, M.V. and Platkovskiy, P.O.** (2024), Biomineral additives for self-healing concrete, *Vestnik MGSU [Monthly Journal on Construction and Architecture]*, vol. 19, iss. 4, pp. 569-579. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.4.569-579 (in Russian).
15. **Erofeev, V.T., Al Dulaimi Salman, Daoud Salman and Smirnov, V.F.** (2018), Bacteria for producing self-healing concretes, *Int.-zhurn. «Transportnye sooruzheniya» [Online J. "Transport Structures"]*, vol. 5, no. 4. DOI: 10.15862/07SATS418 (in Russian).
16. **Qtiasht, D. and Al Khazaleh, M.** (2022), Influence of Bacillus Subtilis Bacteria on Strength and Durability of Concrete with Silica Fume, *Civ. Envir.Eng.*, vol. 18, iss. 1, pp. 254-264. DOI:10.28991/CEJ-2025-011-05-013.
17. **Zhuravskaya, N.E., Shevchenko, K.V. and Zhuravsky, D.A.** (2020), Biodamage of concrete structures, restoration measures, *Problemy sovremennogo stroitel'stva. Mat. Mezhd. nauch.-tekhn. konf. [Problems of Modern Construction. Materials of the International Scientific and Technical Conference]*, Minsk, May 28, pp. 231-232 (in Russian).



18. **Simonov, A.A., Alfimov, A.V. and Babakuliev R.** (2020), Study of the mechanism of self-healing of microcracks in concrete structures using bacteria, *Sb. nauch. st. Vseross. molod. nauch. konf. «Za nami budushchee: vzglyad molodykh uchenykh na innovatsionnoe razvitie obshchestva» [Coll. sci. art. All-Russ. Youth Sci. Conf. "The Future is Ours: The View of Young Scientists on the Innovative Development of Society"]*, vol. 4, pp. 81-86 (in Russian).
19. **Karpov, D.S., Domashin, A.I., Kotlov, M.I. and Osipova, P.D. et al.** (2020), Biotechnological potential of the *Bacillus subtilis* 20 strain, *Molekulyarnaya Biologiya [Molecular Biology]*, vol. 54, no. 1, pp. 137-145. DOI:10.31857/S0026898420010085 (in Russian).
20. **Van Dijk, J.M. and Hecker, M.** (2013), *Bacillus subtilis*: From soil bacterium to super-secreting cell factory, *Microb. Cell Fact.* DOI:10.1186/1475-2859-12-3.
21. Functional Gastroenterology: *Bacillus subtilis* (hay bacillus) [Electronic]. Available at: <https://gastroscan.ru/handbook/144/5648> (accessed 20.10.2025) (in Russian).
22. **Al Dulaimi, S.D.S.** Self-healing concretes modified with a microbiological additive: diss. ... cand. tech. sci. M., 2019. 310 p.
23. **Joshi, K.A., Kumthekar, M.B. and Ghodake, V.P.** (2016), *Bacillus Subtilis* Bacteria impregnation in concrete for enhancement in compressive strength, *Inter. Res. J. Eng. Tech.*, vol. 3. iss. 5, pp. 1229-1234.
24. **De Leeuw, N.H. and Parker, S.C.** (1998), Surface structure and morphology of calcium carbonate polymorphs calcite, aragonite, and vaterite: an atomistic approach, *J. Phys. Chem. Ser. B*, vol. 102, iss. 16, pp. 2914-2922. DOI: 10.1021/jp973210f.
25. **Jongvivatsakul, P., Janpravit, K., Nuaklong, P., Pungrasmi, W. and Likitlersuang, S.** (2019), Investigation of the crack healing performance in mortar using microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) method, *Construction and Building Materials*, vol. 212, pp. 737-744. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.04.035
26. **Malchevsky, V.A., Beregovoy, V.A., Boldyrev, S.A., Kapustin, A.E., Subbotin, A.M. and Petrov, S.A.** (2021), Use of an exometabolite additive of the microorganism *Bacillus cereus*, obtained from water-saturated soils, as a plasticizer to improve the strength of cement mortars, *Baikal – Vorota v Aziyu. Mat. Mezhd. nauch.-prakt. konf.*, Ulan-Ude, pp. 122-126. DOI:10.31554/978-5-7925-0605-3-2021-122-126 (in Russian).
27. *Bacillus cereus* – Microbiological control [Electronic]. Available at: <https://mibio.ru/mikrobiologiya/mikrobiologicheskij-kontrol-produktov-bacillus-cereus/> (accessed 20.10.2025) (in Russian).
28. **Achal, V., Mukherjee, A., and Reddy, M.S.** (2011), Microbial concrete: A way to enhance the durability of building structures, *J. Mat. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 6, pp. 730-734. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000159.
29. **Xu, J., & Wang, X.** (2018), Self-healing of concrete cracks by ceramsite-loaded microorganisms, *Advances in Mat. Sci. Eng.*, vol. 1-12. DOI:10.1155/2018/5153041.
30. **Yang, Y., Chu, J., Cao, B. and Hanlong, L.** (2020), Biocementation of soil using non-sterile enriched urease-producing bacteria from activated sludge, *J. Clean. Prod.*, vol. 262, p. 121315. DOI:10.1016/j.jclepro.2020.121315.
31. EurekaAlert!: *Bacillus cereus* under the Microscope [Electronic]. Available at: <https://www.eurekaalert.org/multimedia/707853> (accessed 20.10.2025).
32. *Sporosarcina pasteurii* - Alchetron, The Free Social Encyclopedia [Electronic]. Available at: <https://alchetron.com/Sporosarcina-pasteurii> (accessed 20.10.2025).
33. **Mobley, H.L. and Hausinger, R.P.** (1989), Microbial ureases: significance, regulation, and molecular characterization, *Microbiol. Rev.*, pp. 90-92. DOI:10.1128/MMBR.53.1.85-108.
34. **Yoon, J.-H., Lee, K.-C., Weiss, N., Kho, Y. H., Kang, K. H. and Park, Y.-H.** (2001), *Sporosarcina aquimarina* sp. nov., a bacterium isolated from seawater in Korea, and transfer of *Bacillus pasteurii* to the genus *Sporosarcina*, *Inter. J. System. Evol. Microbiol.*, p. 1079. DOI:10.1099/00207713-51-3-1079.
35. **Mitchell, A.C. and Ferris, F.G.** (2005), The coprecipitation of Sr into calcite precipitates induced by bacterial ureolysis in artificial groundwater: Temperature and kinetic dependence, *Geochim. Cosmochim. Acta*, p. 4201. DOI:10.1016/j.gca.2005.03.014.
36. **Whiffin, V.S., van Paassen, L.A., and Harkes, M.P.** (2007), Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique, *Geomicrobiol. J.*, p. 417. DOI:10.1080/01490450701436505.



37. **DeJong, J.T., Mortensen, B.M., Martinez, B.C. and Nelson, D.C.** (2010), Bio-mediated soil improvement, *Ecolog. Eng.*, p. 201. DOI:10.1016/j.ecoleng.2008.12.029.
38. **Al Qabany, A., Soga, K. and Santamarina, C.** (2012), Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation, *J. Geotechn. Geoenviron. Eng.*, p. 993. DOI:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000666.
39. **DeJong, J. T., Martinez, B. C., Ginn, T. R., Hunt, C., Major, D., and Tanyu, B.** (2014), Development of a Scaled Repeated Five-Spot Treatment Model for Examining Microbial Induced Calcite Precipitation Feasibility in Field Applications, *Geotechn. Testing J.*, vol. 37, no. 3, pp. 424-435, DOI:10.1520/GTJ20130089. ISSN 0149-6115.
40. BacDive: *Sporosarcina ureae* DSM 2281 is a mesophilic bacterium of the family Caryophanaceae [Electronic]. Available at: <https://bacdive.dsmz.de/strain/11990> (accessed 20.10.2025).
41. **Baskar, S., Baskar, R. and Mauclaire, L.** (2006), Microbially induced calcite precipitation in culture experiments: Possible origin for stalactites in the caves of the Meghalaya Plateau, *Current Sci.*, p. 58.
42. **Chistyakov, V.A. and Sidorenko, N.G.** (2025), Living concrete: how microorganisms help building materials self-heal, *Mezhd. nauch.-prakt. konf. «Sostoyanie i perspektivy razvitiya fundamental'noj i prikladnoj mikrobiologii» [Inter. Sci. Pract. Conf. "State and Prospects of Development of Fundamental and Appl. Microbiology"]*, Sept. 24-25, p. 3. DOI:10.5281/zenodo.17214973 (in Russian).
43. **Beskopylny, A.N., Shcherban', E.M., Stel'makh, S.A., Shilov, A.A., Chernil'nik, A., El'shaeva, D. and Chistyakov, V.A.** (2024), Analysis of the Current State of Research on Bio-Healing Concrete (Bioconcrete), *Materials (Basel)*, September 13;17(18):4508. DOI:10.3390/ma17184508.
44. **Aramova, O., Kornienko, I., Chistyakov, V., Alliluyeva, E. and Kirsanova, T.** (2024), Properties of the urease enzyme as a component of self-healing concrete: Rev., *Constr. Uniq. Build. Struct.*; 113:11310. DOI: 10.4123/CUBS.113.10.

Received 15.12.2026

Approved 17.01.2026

Accepted 10.03.2026



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.311

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-30-42

Влияние добавок льняного волокна на прочность строительных композитов на основе гипса

**П.Б. Разговоров, В.Б. Доброхотов, В.А. Кожухов,
М.О. Баканов, И.Н. Давыдов**

Павел Борисович Разговоров¹, Владимир Борисович Доброхотов^{1,*}, Илья Николаевич Давыдов¹

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация
razgovorovpb@ystu.ru, dobrokhotovvb@ystu.ru*, ilya-davydov-00@list.ru

Виктор Анатольевич Кожухов²

²Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнева,
Красноярск, Российская Федерация
vkozuhkhov@mail.ru

Максим Олегович Баканов³

³Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет,
Москва, Российская Федерация
mask-13@mail.ru



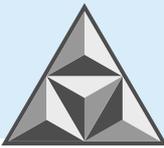
Рассмотрены перспективы использования добавок льняного волокна для повышения физико-механических свойств строительных композитов. Отмечается, что регламентированный подход к вопросам подготовки армирующих добавок из растительного сырья способствует улучшению эксплуатационных характеристик строительных материалов на основе гипса. Установлено, что внесение 1-3% льняного волокна с влажностью 18-20% в гипс марки ГЗ существенно (на 83%) повышает прочность на растяжение при изгибе для образцов, полученных из отвержденных гипсовых смесей, и более чем вдвое – прочность на сжатие готовых композитов. Выявлено положительное влияние степени предварительного помола льняного волокна (до 50-70° по шкале Шоппер-Риглера), смешиваемого с гипсом (марка ГЗ) и водой, на достижение эффекта упрочнения готовых композитов. Разработка таких материалов соответствует современным нормативным и законодательным требованиям в области устойчивого строительства и охраны окружающей среды.

Ключевые слова: гипс, льняное волокно, степень помола, строительные композиты, армирующая добавка, прочность на изгиб, прочность на сжатие

Для цитирования:

Разговоров П.Б., Доброхотов В.Б., Кожухов В.А., Баканов М.О., Давыдов И.Н. Влияние добавок льняного волокна на прочность строительных композитов на основе гипса // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 1. С. 30-42. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-30-42



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-30-42

The effect of flax fiber additives on the strength of gypsum-based construction composites

**P.B. Razgovorov, V.B. Dobrokhotov, V.A. Kozhukhov,
M.O. Bakanov, I.N. Davydov**

Pavel Borisovich Razgovorov¹, Vladimir Borisovich Dobrokhotov^{1,*}, Ilya Nikolaevich Davydov¹

¹Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

razgovorovpb@ystu.ru, dobrokhotovvb@ystu.ru, ilya-davydov-00@list.ru*

Viktor Anatolyevich Kozhukhov²

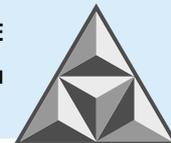
²Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

vkozhukhov@mail.ru

Maksim Olegovich Bakanov³

³National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow, Russian Federation

mask-13@mail.ru



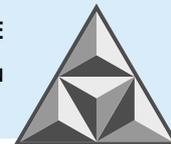
The paper considers the prospects of using flax fibre additives to improve the physical and mechanical properties of building composites. The authors note that a regulated approach to the preparation of reinforcing additives from plant raw materials contributes to improving the performance characteristics of gypsum-based building materials. It has been established that the addition of 1-3% flax fibre with a moisture content of 18-20% to G3 gypsum significantly (by 83%) increases the flexural tensile strength of samples obtained from hardened gypsum mixtures and more than doubles the compressive strength of finished composites. The authors identified a positive effect of the degree of preliminary grinding of flax fibre (up to 50-70° on the Shopper-Rigler scale), mixed with gypsum (G3 grade) and water, on achieving the strengthening effect of the finished composites. The development of such materials complies with modern regulatory and legislative requirements in the field of sustainable construction and environmental protection.

Keywords: gypsum, linen fibre, freeness, construction composites, reinforcing additive, bending strength, compressive strength

For citation:

Razgovorov P.B., DobrokhotoV V.B., Kozhukhov V.A., Bakanov M.O., Davydov I.N. The effect of flax fiber additives on the strength of gypsum-based construction composites // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 1. P. 30-42. URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-30-42



ВВЕДЕНИЕ

В последние 5-7 лет вопросы введения растительного сырья и древесных отходов в строительные композиты с целью повышения их технологических и эксплуатационных характеристик активно изучаются зарубежными исследователями [1-4]. Это во многом объясняется возможностью возобновления указанных ресурсов [5], повышенной экономичностью [6], экологичностью [7] и достигаемой оптимизацией реологических и прочностных характеристик получаемых смесей [7, 8].

В свою очередь, в России перспективными направлениями являются переработка природного сырья и отходов в композиционные материалы [9], а также модифицирование свойств строительных материалов путем дисперсного армирования различными добавками. Хорошо известно, что Россия богата лесными массивами и, следовательно, объем древесных отходов, образующихся в процессе лесозаготовок и переработки древесины, весьма велик. Переработка и утилизация этих отходов являются привлекательной задачей, решаемой как на промышленных предприятиях, так и в сфере экологии. Повышенный интерес к ним проявляется в строительстве, поскольку они могут широко использоваться в производстве композитных панелей, изоляционных материалов и т.д. Древесно-цементные композиты также хорошо зарекомендовали себя, в частности, в качестве внутреннего декоративного отделочного материала. В работах отечественных авторов [10, 11] показано, что введение растительных волокон [10] и опилок [11] в бетонную или гипсовую матрицу позволяет на 25-40% повысить ее трещиностойкость и экономичность, значительно изменить характер разрушения – от хрупкого к квазипластичному [10].

Известны также композиты на основе гипса (45 мас%) марки Г16 с включением до 16 мас% древесных опилок фракции до 5 мм и воды (остальное) [11]. В отличие от изделий из натурального камня и чистого гипса, которые имеют высокий вес и стоимость, такой композит характеризуется уменьшенной теплопроводностью (коэффициент теплопроводности $0.181 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{К}^{-1}$ по сравнению с $0.373 \text{ Вт}\cdot\text{м}^{-1}\text{К}^{-1}$ у гипса). Кроме того, благодаря снижению расхода гипсового вяжущего ($600 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ для композита против $1400 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$ для гипса) древесно-гипсовый композит предлагает более экономичное решение для внутренней отделки помещений [11].

Весьма интересным техническим и технологическим решением в производстве бетонных композитов представляется использование сухого борщевика Сосновского. Такой подход позволяет не только утилизировать сорное растение, но и способствует устойчивости композита к окружающей среде, снижая потребность в традиционных строительных материалах и уменьшая экологический след [12]. Дисперсно-армированные композиты с включением в состав растительной добавки борщевика Сосновского в настоящее время используются в строительстве при изготовлении и ремонте бетонных и железобетонных изделий. Их характерной особенностью являются повышенные прочностные характеристики при сжатии и изгибе, улучшенная удельная работа разрушения и деформационное упрочнение после появления первой микротрещины. При этом достижение максимальной прочности испытываемых образцов обеспечивалось при длине волокон добавки, составляющей 50 мм [13].

В целом применению натуральных растительных волокон и текстильных отходов в качестве армирующих и модифицирующих добавок строительных материалов уделяется особое внимание [14]. Их преимущества перед химическими аналогами очевидны: они биоразлагаемы, обладают низкой углеродной эмиссией при производстве и доступны по стоимости. Так, например, использование 1 т льняного волокна взамен синтетической фибры позволяет снизить углеродный след материала на 2-3 т CO_2 -эквивалента. В ряду отечественных растительных волокон с повышенными физико-механическими свойствами льняное волокно выделяют отдельно: его прочность на разрыв достигает 1500 МПа, что сравнимо со стальной



арматурой малого диаметра, а удельная прочность превышает показатели стекловолокна. При этом экологически чистый лен является традиционной сельскохозяйственной культурой для России. Так, в 2024 году площади посевов льна-долгунца составили более 50 тыс. га, а потенциал производства волокна оценивается в 100-120 тыс. т. в год, что создает устойчивую сырьевую базу для его использования в области пищевой химии и эндозекологии [15], а также сфере строительной индустрии в качестве ценного армирующего материала [16].

На основании вышеизложенного сформулирована цель настоящего исследования, которая заключается в изучении влияния степени помола льняного волокна, добавляемого в смеси на основе гипса, на показатель прочности получаемых композитов, что вносит вклад в развитие теории строительных конгломератов и практики использования разработок с применением растительного сырья в отечественном строительстве.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Подготовка льняного волокна

Отходы переработки льна в виде пакли, представляющие собой внешние части стебля с заостренностью волокон до 20% и относительной влажностью 12-17%, предварительно измельчали сухим способом на дезинтеграторе-дробилке (рис. 1) с последующим замачиванием в воде при 293 К в течение 24 ч. Процесс осуществляли путем однократного пропускания через дезинтегратор-дробилку «Рекорд» (рис. 1) при частоте 3000 мин⁻¹ и ударном воздействии 2.3 кВт, до получения волокнистого полуфабриката, прошедшего через сито диаметром 3.0 мм.

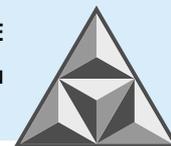


Рис. 1. Общий вид дезинтегратора-дробилки «Рекорд»

Fig. 1. General view of the "Record" disintegrator-crusher

Массоподготовку льняного полуфабриката проводили в полупромышленной дисковой мельнице, имеющей габаритные размеры (м) 0.95×0.60×0.80, зазор между ножами 0.30 мм при точности их установки 0.05 мм, с частотой оборотов 2000 мин⁻¹. Привод мельницы, в которую по трубопроводам поступала дробленая масса волокон, характеризуется номинальной мощностью 22 кВт. Гидроразбиватель представлял собой емкость объемом 320 л с двумя мешалками – вертикальной рамной (60 мин⁻¹) и наклонной дисковой (900 мин⁻¹); расход жидкости составлял 3 л·с⁻¹.

Для измерения степени помола волокнистой массы (в градусах Шоппер-Риглера, далее – °ШР) применяли прибор СР-2. Водой в объеме 1.0 л заливали 2.0 г сухого льняного волокна, перемешивали суспензию, затем помещали ее в рабочий цилиндр и после подъема клапана прибора осуществляли обезвоживание суспензии на сетке. Степень помола льняного волокна, фиксируемая по делениям на стекле, составляла соответственно 30, 50 и 70°ШР.



Фракционный состав растительной массы (по геометрическому признаку) оценивали по ГОСТ 13425-93 с использованием аппарата ФДМ. Ниже представлены характеристики сеток:

№ 9/9 по ТУ 13 – 0281036 – 06 (крупная фракция, размер ячейки 0.61 мм);

№ 20 по ТУ 13 – 0281151 – 20 (средняя фракция, размер ячейки 0.25 мм);

№ 40 по ТУ 13 – 0281151 – 20 (мелкая фракция, размер ячейки 0.12 мм).

Волокно, проходящее через сетку № 40 (< 0.12 мм), направляли в унос.

По методу Джайме (в соответствии с ISO 23714:2014) определяли водоудерживающую способность волокон после центрифугирования и замеров массы высушенных образцов на аналитических весах ВЛА-200 г-М с точностью 0.1 мг.

Приготовление композитов и тестирование их физико-механических характеристик

Приготовление композитного материала осуществляли путем перемешивания льняных волокон в емкости с водой и последующего введения гипса установленной марки Г3, степень помола II ("ВОЛМА-Алебастр" ГОСТ 125-2018; ООО "Волма", г. Волгоград) до образования тестообразной массы. Волокна (влажность 10%) распределяли в матрице путем механического перемешивания с частотой 60 мин⁻¹ до получения однородной консистенции. Из гипсового теста формовали стандартные образцы – балочки размером 40×40×160 мм, которые выдерживали в воздушно-сухих условиях (влажность воздуха 55-65%, температура 293 К) до затвердевания в течение 24-48 ч.

Оценку прочности на изгиб и сжатие образцов затвердевшего гипса (марка Г3) и композитов на основе вяжущего с включением 1-5 мас% льняного волокна, имеющего степень помола 30-70°ШР, производили на специализированном оборудовании – прессах (ГОСТ 23789, ГОСТ 10180-2012). Шкала Шоппер-Риглера характеризует степень дисперсности волокон, где более высокие значения соответствуют мелкому помолу, что должно оказывать влияние на адгезионные свойства и распределение в матрице. Введение добавки льняного волокна на трех уровнях (1, 3 и 5% от массы гипса) обеспечивает систематический анализ эффекта армирования и модифицирования физико-механических свойств композита. Суммарное количество вариаций составляет 9, включая контрольный образец (гипс марки Г3 без добавок).

Применение предлагаемого подхода при исследовании строительных композитов с добавлением льняных волокон позволяет объективно оценить влияние добавок растительного сырья на формирование структуры гипсового камня и физико-механические характеристики затвердевших образцов. Так, предел прочности образцов на изгиб определяли с использованием испытательной машины МИИ-100 (рис. 2).



Рис. 2. Испытательная машина МИИ-100 для определения прочности гипсовых композитов на изгиб

Fig. 2. МИИ-100 Test Machine for Determination of Bending Strength of Gypsum Composites



Для определения предела прочности на сжатие строительных композитов применяли гидравлический пресс П-10. Результаты анализа физико-механических свойств полученных материалов (прочность на растяжение при изгибе и прочность на сжатие) сравнивали с контрольными образцами, что позволило оценить эффективность армирования льняными волокнами и оптимизировать составы для применения.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Нами установлена зависимость фракционного состава волокна от степени помола (табл. 1). Согласно данным, приведенным в табл. 1, с увеличением степени помола волокнистой массы от 30 до 70°ШР снижается число волокон крупной фракции за счет попадания в зазор ротора и статора мельницы. Уменьшение длины волокон приводит к повышению содержания средней и мелкой фракции; также возрастает процент уноса волокна в сток.

Таблица 1. Изменение фракционного состава льняного волокна в процессе размола

Table 1. Change in Linen Fiber Fractional Composition During Milling

Степень помола, °ШР	Содержание фракций, мас%			
	Крупная	Средняя	Мелкая	Унос
30	77.46	10.87	4.02	7.65
50	68.09	16.17	6,60	9.15
70	52.85	23.37	10.37	13.41

В процессе помола льна реализована возможность получить волокнистую массу с определенным фракционным составом и обеспечить фибриллирующее воздействие на волокно. Внешняя фибрилляция заключается в отделении от волокна клеточных оболочек и фибрилл, что приводит к повышению числа свободных гидроксидов на его поверхности и обеспечивает активизацию адсорбции воды на поверхности волокна.

Подтверждением данных процессов является увеличение водоудерживающей способности волокна при его интенсивном помоле на дисковой мельнице (рис. 3).

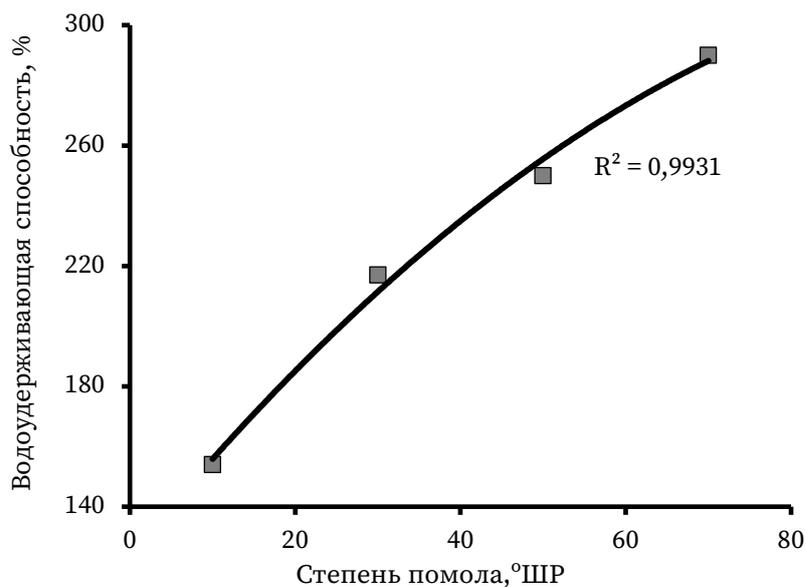
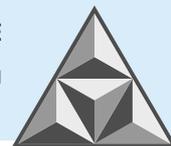


Рис. 3. Зависимость водоудерживающей способности льняного волокна от степени его помола на дисковой мельнице

Fig. 3. Dependence of the water retention capacity of flax fibre on the degree of its grinding in a disc mill



Согласно данным по водоудерживающей способности, полученным при варьировании степени помола льняного волокна, наименьшие значения (217%) получены при показателе 30°ШР. Помол армирующей добавки до 70°ШР способствовал росту водоудерживающей способности до 290%, что объясняется фибрилляцией волокна и увеличением числа активных связей с участием гидроксильных групп как в структуре суспензии, так и в смеси с гипсом.

При изучении прочности на растяжение ($\sigma_{\text{раст}}$) гипсовых композитов с включением влажного льняного волокна установлено (см. рис. 4): по мере повышения степени помола растительной добавки, измеряемой в градусах Шоппер-Риглера, прочность на изгиб, по сравнению с контрольным образцом, возрастает в среднем:

при 30°ШР – в среднем на 23.0%;

при 50°ШР – в среднем на 43.6%;

при 70°ШР – в среднем на 60.6%.

Таким образом, наблюдается практически прямо пропорциональная зависимость между степенью помола льняного волокна и прочностью образцов гипсовых композитов при испытании их на изгиб в присутствии указанной добавки, взятой в количестве 1-5% от массы вяжущего компонента.

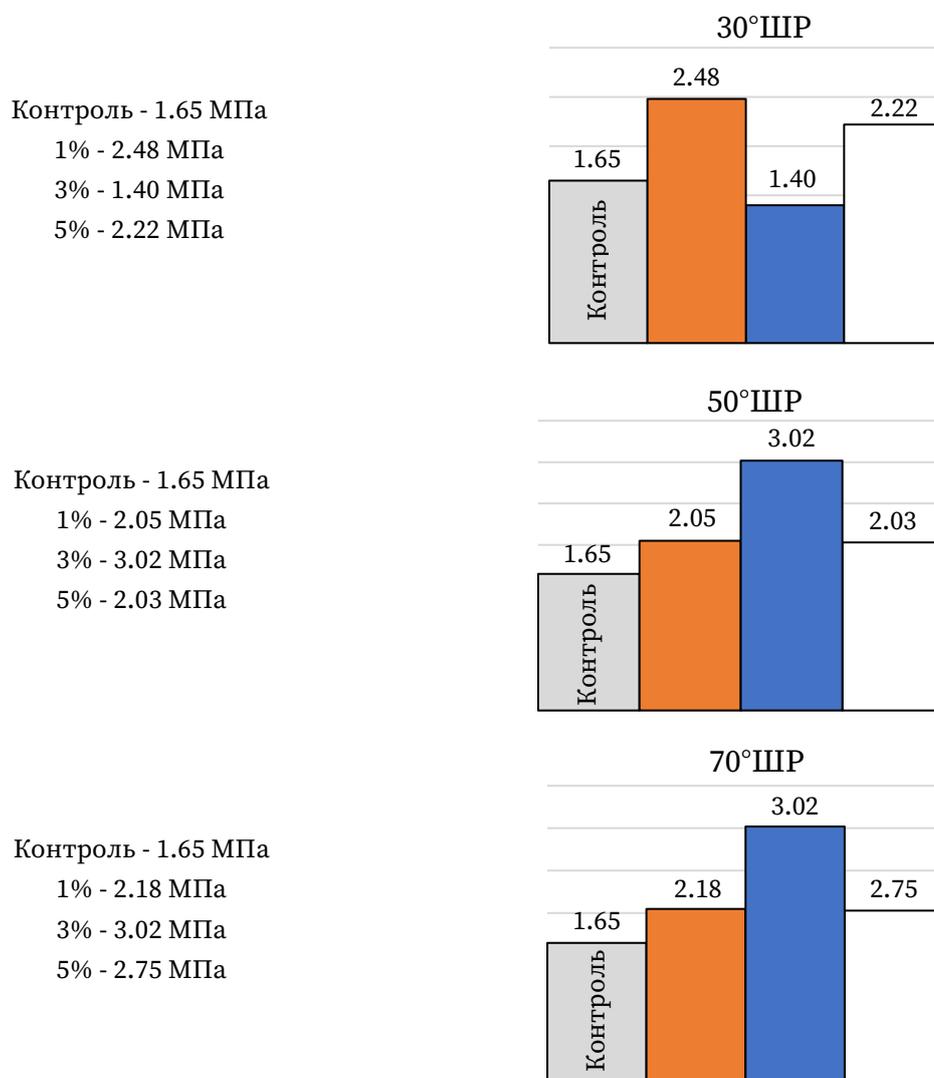


Рис. 4. Расчетная прочность гипсовых композитов (марка гипса Г3) на растяжение с включением 1-5 мас% влажных льняных волокон с различной степенью их помола (30, 50, 70°ШР)

Fig. 4. Design tensile strength of gypsum composites (grade G3) with inclusion 1-5 wt% wet linen fibers with varying degrees of grinding (30, 50, 70 degrees Schopper-Riegler)



Анализ рис. 4 показывает, что введение всего 1 мас% льняного волокна в гипс марки Г3 при степени помола указанной добавки в диапазоне 30-70°ШР обеспечивает повышение прочности композитов на растяжение при изгибе в пределах 24-50%. Также выявлено, что максимальная степень прироста прочности строительного композита на изгиб ($\sigma_{изг}$) достигается при введении 3% волокна от массы гипса в условиях средней (50°ШР) и повышенной (70°ШР) степени его помола. При этом эффект от произведенного армирования оценивается на уровне 83%.

Влияние степени помола влажного льняного волокна на прочность при сжатии ($\sigma_{сж}$) полученных гипсовых композитов с включением 1-3 мас% добавки доступно продемонстрировано на рис. 5.

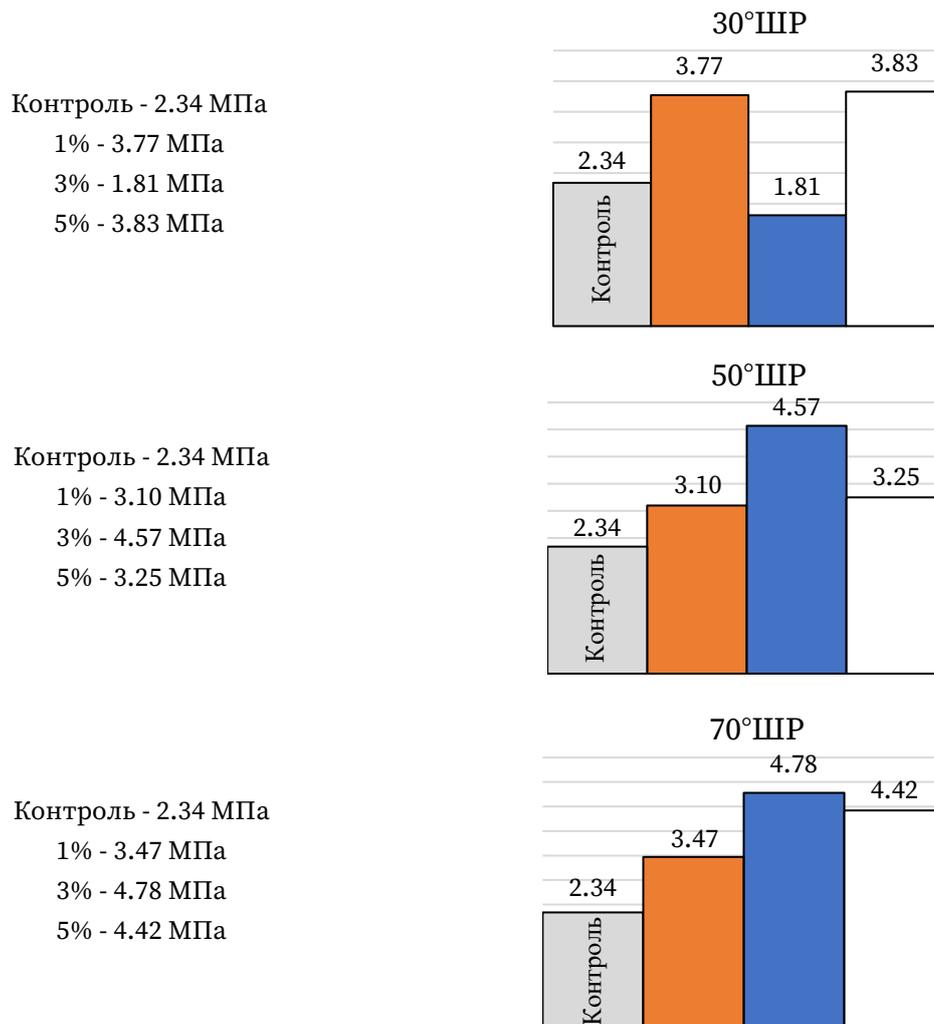
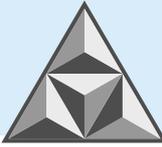


Рис. 5. Прочность гипсовых композитов (марка гипса Г-3) на сжатие с включением 1-5 мас.% влажных льняных волокон со степенью помола 30, 50 и 70°ШР

Fig. 5. Compressive strength of gypsum composites (gypsum grade G-3) with inclusion 1-5 wt% wet linen fibers with a freeness of 30, 50 and 70 degrees Schopper-Riegler

Как видно на рис. 5, зависимость имеет экстремальный характер: наибольшее значение прочности композита на сжатие ($\sigma_{сж}$, 4.78 МПа) достигается при введении 3% льняного волокна от массы гипса; при увеличении количества армирующей добавки до 5% наблюдается снижение указанного показателя на 7.5% (до 4.42 МПа).

В общем и целом отмечается, что добавка 1-3% льняного волокна с влажностью 10% в гипс марки Г3 приводит к наиболее значимому росту прочности на сжатие полученного строительного материала; дальнейшее увеличение концентрации волокна в строительном композите представляется нецелесообразным.



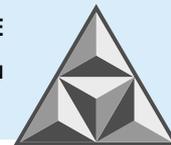
ВЫВОДЫ

Соблюдение регламентированных условий замешивания, формования, выдержки и экспериментальных образцов позволило получить новые достоверные данные о физико-механических свойствах строительных композитов на основе гипса марки ГЗ с включением возобновляемого растительного сырья – отечественного льняного волокна.

Установлено, что введение 1-3 мас% влажных льняных волокон в гипсовую смесь (на примере марки гипса ГЗ) существенно улучшает ее механические свойства; при этом выявлена повышенная эффективность от армирования гипсового вяжущего добавкой волокон льна в количестве 3%, характеризуемой высокой степенью помола (70°ШР). Это позволяет увеличить прочность строительных композитов на изгиб на 83% и прочность их на сжатие более чем вдвое по сравнению с образцами гипса без волокон. Превышать указанную дозировку льняного волокна не рекомендуется, что требует четкого контроля расхода растительного сырья при изготовлении таких строительных материалов на основе гипса.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Barría J.C., Vazquez A., Pereira J.M, Manzanal D.** Effect of bacterial nanocellulose on the fresh and hardened states of oil well cement // *J. Petroleum Sci. Eng.* 2021. Vol. 199. P. 1-12. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108259.
2. **Nishimura T., Shinonaga Y., Nagaishi C., Imataki R., et al.** Effects of powdery cellulose nanofiber addition on the properties of glass ionomer cement. *Materials*. 2019. Vol. 12. № 19. P. 3077. DOI: 10.3390/ma12193077.
3. **Barnat-Hunek D., Szymanska-Chargot M., Jarosz-Hadam M., Łagód G.** Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 223. P. 1-11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.145.
4. **Abdellaoui H., Bouhfid R.** Review of nanocellulose and nanohydrogel matrices for the development of sustainable future materials. In *Sustainable // Nanocellulose and Nanohydrogels from Natural Sources*. 2020. P. 155-176. DOI: 10.1016/B 978-0-12-816789-2.00007-9.
5. **Nakagaito A.N., Yano H.** The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites // *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process.* 2004. Vol. 78. P. 547-552. DOI: 10.1007/s00339-003-2453-5.
6. **Rajendran N., Runge T., Bergman R.D., Nepal P., et al.** Techno-economic analysis and life cycle assessment of cellulose nanocrystals production from wood pulp // *Bioresource Tech.* 2023. Vol. 377. P. 128955. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128955.
7. **Hoyos C.G., Zuluaga R., Ganan P., Pique T.M., et al.** Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive // *J. Clean. Prod.* 2019. Vol. 235. P. 1540-1548. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.292.
8. **Tan T., Santos S.F., Savastano H., Soboyejo W.O.** Fracture and resistance-curve behavior in hybrid natural fiber and polypropylene fiber reinforced composites // *J. Mater. Sci.* 2012. Vol. 47. P. 2864-2874. DOI: 10.1007/s10853-011-6116-1.
9. **Разговоров П.Б., Игнатьев А.А., Абрамов М.А., Нагорнов Р.С.** Переработка алюмосиликатного сырья и отходов строительства метрополитена в композиционные сорбенты для очистки водных и маслосодержащих сред // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 10-24. DOI: 10.52957/27821919_2020_1_1/0
10. **Семенов В.Л., Коротких Д.Н.** Дисперсно-армированные цементные композиты: состояние и перспективы // *Вестник строительной науки*. 2020. № 2. С. 45-52.
11. Пат. 2788603 РФ. Древесно-гипсовый композит / А.В. Ерофеев, Т.И.Горохов, Н.С. Ковалев, С.И. Горохов; опубл. 23.01.2023, бюл. № 3. URL: <https://findpatent.ru/patent/278/2788603.html> (дата обращения 10.11.2025).
12. **Мусорина Т.А., Петриченко М.Р., Заборова Д.Д., Гамаюнова О.С., Куколев М.И.** Улучшение свойств бетонного композита, армированного сухой растительной добавкой // *Строительство и техногенная безопасность*. 2021. № 22 (74). С. 57-65. DOI: 10.37279/2413-1873-2021-22-57-65.



13. Пат. 2771347 РФ. Способ создания бетонного композита, армированного сухой растительной добавкой / М.И. Куколев, Т.А. Мусорина, Д.Д. Заборова; опубл. 29.04.2022, бюл. № 13. URL: <https://findpatent.ru/patent/277/2771347.html> (дата обращения 10.11.2025).
14. **Ильичев В.А., Колчунов В.И., Бакаева Н.В., Кобелева С.А.** Экологическая безопасность использования текстильных волокон в промышленности строительных материалов // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2017. № 1 (367). С. 194-198.
15. **Нагорнов Р.С., Разговоров П.Б., Смирнова Е.А., Разговорова М.П.** Сравнительный анализ действия природных алюмосиликатов в отношении сопутствующих ингредиентов льняного масла // *Изв. вузов. Химия и хим. технология*. 2015. Т. 58. № 8. С. 63-66.
16. **Румянцева В.Е., Коновалова В.С., Румянцев Е.В., Одинцова О.И., Касьяненко Н.С.** Использование отходов текстильной промышленности в производстве строительных композитов // *Изв. вузов. Технология текстильной промышленности*. 2021. № 6 (396). С. 21-29. DOI: 10.47367/0021-3497_2021_6_21.

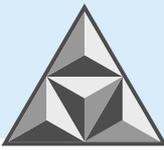
Поступила в редакцию 27.01.2026

Одобрена после рецензирования 18.02.2026

Принята к опубликованию 10.03.2026

REFERENCES

1. **Barría, J.C., Vazquez, A., Pereira, J. and Manzanal, D.** (2021), Effect of bacterial nanocellulose on the fresh and hardened states of oil well cement, *J. Petroleum Sci. Eng.*, vol. 199, pp. 1-12. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.108259.
2. **Nishimura, T., Shinonaga, Y., Nagaishi, C. and Imataki R., et al.** (2019), Effects of powdery cellulose nanofiber addition on the properties of glass ionomer cement, *Materials*, vol. 12, no. 19, p. 3077. DOI: 10.3390/ma12193077.
3. **Barnat-Hunek, D., Szymanska-Chargot, M., Jarosz-Hadam, M. and Łagód, G.** (2019), Effect of cellulose nanofibrils and nanocrystals on physical properties of concrete, *Construction and Building Materials*, vol. 223, pp. 1-11. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.06.145.
4. **Abdellaoui, H. and Bouhfid, R.** (2020), Review of nanocellulose and nanohydrogel matrices for the development of sustainable future materials. In *Sustainable, Nanocellulose and Nanohydrogels from Natural Sources*, pp. 155-176. DOI: 10.1016/B 978-0-12-816789-2.00007-9.
5. **Nakagaito, A.N. and Yano, H.** (2004), The effect of morphological changes from pulp fiber towards nano-scale fibrillated cellulose on the mechanical properties of high-strength plant fiber based composites, *Appl. Phys. A Mater. Sci. Process*, vol. 78, pp. 547-552. DOI: 10.1007/s00339-003-2453-5.
6. **Rajendran, N., Runge, T., Bergman, R.D., and Nepal, P., et al.** (2023), Techno-economic analysis and life cycle assessment of cellulose nanocrystals production from wood pulp, *Bioresource Tech.*, vol. 377, p. 128955. DOI: 10.1016/j.biortech.2023.128955.
7. **Hoynos, C.G., Zuluaga, R., Ganan, P. and Pique, T.M., et al.** (2019), Cellulose nanofibrils extracted from fique fibers as bio-based cement additive, *J. Clean. Prod.*, vol. 235, pp. 1540-1548. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.292.
8. **Tan, T., Santos, S.F., Savastano, H. and Soboyejo, W.O.** (2012), Fracture and resistance-curve behavior in hybrid natural fiber and polypropylene fiber reinforced composites, *J. Mater. Sci.*, vol. 47, pp. 2864-2874. DOI: 10.1007/s10853-011-6116-1.
9. **Razgovorov, P.B., Ignatyev, A.A., Abramov, M.A. and Nagornov, R.S.** (2020), Processing of raw aluminosilicates and subway construction dumps into composite sorbents for purification of water and oil-containing media, *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Constructon]*, vol. 1, no. 1, pp. 10-24 (in Russian). DOI: 10.52957/27821919_2020_1_10
10. **Semenov, V.L. and Korotkikh, D.N.** (2020), Dispersed-reinforced cement composites: state and prospects, *Vestnik stroitel'noj nauki [Construction Science Bulletin]*, no. 2, pp. 45-52 (in Russian) (accessed 10.11.2025).
11. Pat. 2788603 Russian Federation. Wood-gypsum composite / A.V. Erofeev, T.I. Gorokhov, N.S. Kovalev, S.I. Gorokhov; publ. 23.01.2023, Bul. 3. Available at: <https://findpatent.ru/patent/278/2788603.html> (accessed 10.11.2025).



12. **Musorina, T.A., Petrichenko, M.R., Zaborova, D.D., Gamayunova, O.S. and Kukolev, M.I.** (2021), Improving the properties of a concrete composite reinforced with a dry plant additive, *Stroitel'stvo i tekhnosfernaya bezopasnost'* [Construction and man-made safety], vol. 22, no. 74, pp. 57-65 (in Russian).
13. Pat. 2771347 Russian Federation. Method of creating a concrete composite reinforced with dry vegetable supplement / M.I. Kukolev, T.A. Musorina, D.D. Zaborova; publ. 29.04.2022, Bul. 13. Available at: <https://findpatent.ru/patent/277/2771347.html> (accessed 10.11.2025).
14. **Plyichev, V.A., Kolchunov, V.I., Bakaeva, N.V. and Kobeleva, S.A.** (2017), Environmental safety of the use of the textile wastes in the constructions materials industry, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Tekhnol. Tekstil. Prom.*, vol. 1, no. 367, pp. 194-198 (in Russian).
15. **Nagornov, R.S., Razgovorov, P.B., Smirnova, E.A. and Razgovorova, M.P.** (2015), Comparative analysis of natural aluminosilicates action in relation to attendant ingredients of linseed oil, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Khim. Tekhnol.* [ChemChemTech], vol. 58, no. 8, pp. 63-66 (in Russian).
16. **Rumyantseva, V.E., Konovalova, V.S., Rumyantsev, E.V., Odintsova, O.I. and Kasiyanenko, N.S.** (2019), The use of of textile industry waste in the production of building composites, *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Tekhnol. Tekstil. Prom.*, vol. 6, no 396, pp. 21-29 (in Russian). DOI: 10.47367/0021-3497_2021_6_21.

Received 27.01.2026

Approved 18.02.2026

Accepted 10.03.2026



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.175 : 693.632 : 004.9

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-43-55

Снижение материалоемкости изготовления лепного декора с применением информационных технологий

С.В. Федосов, Е.С. Шабанов, А.А. Титунин

Сергей Викторович Федосов¹

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

fedosov-academic53@mail.ru

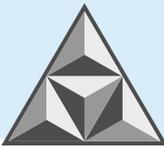
Евгений Сергеевич Шабанов², Андрей Александрович Титунин^{2,3,*}

²Костромская государственная сельскохозяйственная академия, Российская Федерация

onegin181181@gmail.com

³Костромской государственный университет, Кострома, Российская Федерация

*a_titunin@kosgos.ru**



Использование современных аддитивных технологий за счет автоматизации процесса создания форм и изготовления элементов лепного декора позволяет снизить материальные издержки на проведение строительных работ. Однако задача минимизации расхода строительного материала при этом в полной мере не решается. Описана попытка усовершенствовать методы создания форм с помощью параметрического моделирования, фотограмметрии и 3D-печати. Дана классификация и предложен перечень наиболее часто встречающихся элементов лепного декора. Рассмотрены алгоритмы и особенности разработки скриптов для получения цифровых моделей основных видов форм. Для создания эластичных форм сложной конфигурации предложено использовать сферические объекты – метаболлы. На основе параметрических алгоритмов получен результат в виде полигональных моделей, готовых для 3D-печати. Предложенный метод создания форм позволяет более точно прогнозировать расход строительных материалов и существенно облегчает труд исполнителей работ.

Ключевые слова: лепной декор, снижение материалоемкости, аддитивные технологии, 3D-печать, параметрическое моделирование, метаболлы, фотограмметрия

Для цитирования:

Федосов С.В., Шабанов Е.С., Титунин А.А. Снижение материалоемкости изготовления лепного декора с применением информационных технологий // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 2. С. 43-55. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-43-55



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-43-55

Reducing the material consumption of stucco decorations based on information technology

S.V. Fedosov, E.S. Shabanov, A.A. Titunin

Sergey Viktorovich Fedosov¹

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

fedosov-academic53@mail.ru

Evgeniy Sergeevich Shabanov², Andrey Aleksandrovich Titunin^{2,3,*}

²Kostroma State Agricultural Academy, Russian Federation

onegin181181@gmail.com

³Kostroma State University, Kostroma, Russian Federation

*a_titunin@ksgos.ru**



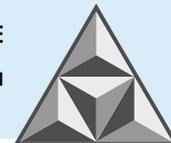
The use of modern additive technologies through the automation of the process of creating moulds and manufacturing moulded decorative elements allows for a reduction in material costs for construction work. However, the task of minimising the consumption of building materials is not fully solved. The paper describes an attempt to improve mould creation methods using parametric modelling, photogrammetry, and 3D printing. The authors provide a classification and list of the most common stucco decoration elements. The paper discusses algorithms and features of script development for obtaining digital models of basic types of moulds. To create flexible forms of complex configuration, the authors suggest using spherical objects – metaballs. Based on parametric algorithms, the result is obtained in the form of polygonal models ready for 3D printing. The proposed method of creating forms allows for more accurate prediction of the consumption of building materials and significantly facilitates the work of contractors.

Keywords: stucco decor, reduction of material consumption, additive technologies, 3D printing, parametric modeling, metaballs, photogrammetry

For citation:

Fedosov S.V., Shabanov E.S., Titunin A.A. Reducing the material consumption of stucco decorations based on information technology // *Smart composites in construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 2. P. 43-55.
URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-43-55



ВВЕДЕНИЕ

Особенностью современного этапа развития строительного комплекса является широкое использование цифровых технологий на всех этапах проектирования, возведения и реставрации зданий. Эти технологии во многом обеспечивают повышение эффективности процессов изготовления строительных материалов, деталей и конструкций, а также позволяют улучшить их качество. Общеизвестно, что в настоящее время без применения информационных технологий практически невозможно на должном уровне выполнить теплотехнические расчеты, определить оптимальный вариант технологических решений в области строительного производства [1]. Аддитивные технологии являются одним из удачных примеров реализации принципов послойного изготовления изделий по трехмерным моделям, разработанным с помощью специализированных программ. В связи с ростом инвестиций технология 3D-печати была реализована в 90-х гг. XX столетия в различных отраслях. Объем капиталовложений за четыре года (с 1992 по 1996 г.) вырос на 1200 % и достиг 421 млн долл. К концу 2000 г. количество выпущенных 3D-принтеров составило 1320 шт., при этом около 45% было изготовлено в Северной Америке, а 28.6 и 24.6% – соответственно в Азии (Тихоокеанский регион) и Европе [2-4]. Использование 3D-печати позволяет изготовить элементы особо сложной формы, а также в связке с 3D-сканированием или фотограмметрией повторить существующие элементы, которые нуждаются в ремонте или замене [5]. Особое значение эта технология имеет при строительстве и ремонте изысканно декорированных общественных зданий, таких как музеи, театры, муниципальные учреждения. Лучшие образцы современных многоквартирных жилых домов также могут служить объектом для применения данной технологии. Специалисты отмечают, что успешная реализация проектов не только в новом строительстве, но и при реставрации зданий во многом зависит как от качества используемых материалов, так и от применения современных технологий [6, 7].

В области создания лепных декоративных элементов 3D-печать, как правило, ранее использовали для создания уникальных единичных изделий, поэтому с ее помощью формировали только модели-прототипы [2]. Однако в случаях, когда требуется создание большого количества повторяющихся элементов, становится возможным осуществлять печать не модели, а непосредственно формы. При этом за счет автоматизации процесса снижаются издержки на проведение строительных и ремонтных работ [8].

При массовом производстве деталей со сложной геометрической формой, создании высокохудожественных архитектурных элементов и реализации уникальных проектов 3D-печать открывает новые возможности. Поэтому не случайно многие специалисты сошлись во мнении, что технология 3D-печати стала одним из инновационных методов производства элементов и деталей зданий из доступных строительных материалов [9-12].

Рассматривая преимущества аддитивных технологий, можно отметить, что 3D-печать является эффективным инструментом при создании форм для серийных деталей [13]. Однако осталась не вполне решенной задача снижения суммарных затрат на изготовление декоративных элементов зданий и самих форм для отливки. Возможным вариантом является сокращение временных затрат на создание цифровой модели формы и минимизация расхода материала при 3D-печати форм за счет определения оптимальной толщины слоев.

Цель настоящего исследования заключается в усовершенствовании метода создания форм с помощью аддитивных технологий на примере элементов лепного декора, так как именно на них распределяется значительный объем строительных материалов и времени. Принятая классификация по типу, с учетом степени сложности кусковых и черновых форм для отливки изделий, приведена на рис. 1.

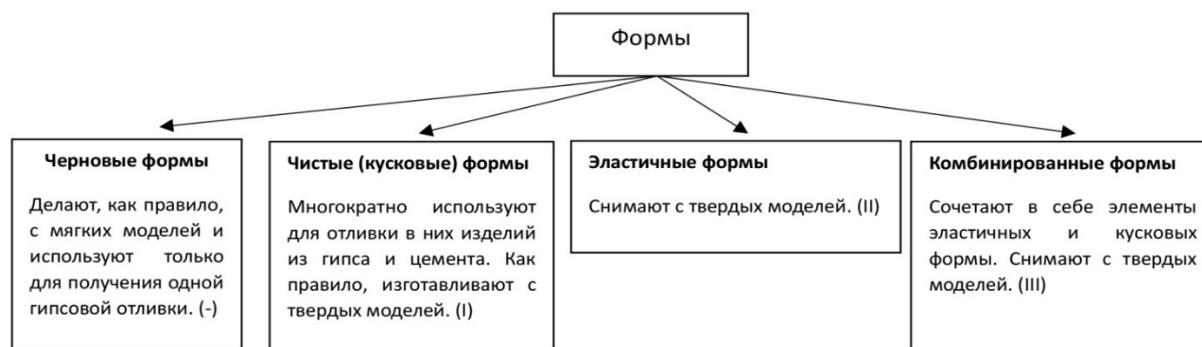
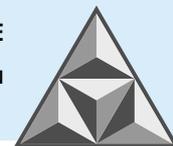


Рис. 1. Классификация форм по типу

Fig. 1. Classification of forms by type

Она включает:

- *простые формы* – состоят из одной части (раковины); снимают с плоских моделей;
- *формы средней сложности* – состоят из нескольких частей (раковин); их снимают с объемных гладких моделей;
- *формы высокой сложности* – состоят из нескольких отъемных и отдельно оформленных частей (раковин) с большим числом кусков; такие формы снимают с орнаментированных моделей.

Классификация эластичных форм:

- *открытые* – предполагают изготовление барьера по периметру формы;
- *закрытые* – предполагают изготовление закрытой формы, покрывающей модель.

Изготовление черновых форм путем 3D-печати не имеет смысла, так как они создаются с мягких моделей; данный тип исключается из последующего процесса автоматизации алгоритмов. Гипотеза исследований заключается в том, что некоторые из этапов создания форм могут быть заменены или усовершенствованы путем применения средств 3D-печати и компьютерного моделирования. Этап обмеров и оценки повреждений для последующего ремонта элемента может быть заменен этапом создания цифровой 3D-модели с помощью фотограмметрии или лазерного сканирования, этап работы с цифровой моделью может быть автоматизирован с помощью скриптов 3D-редакторов, а последний этап (3D-печать) существенно экономит ресурсы на создание форм вручную. Второй этап (подбор и создание формы по цифровой копии модели, полученной в результате сканирования на объекте) в дальнейшем рассматривается более подробно.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для подготовки параметрических алгоритмов необходимо собрать и классифицировать базу 3D-моделей элементов лепного декора. Чтобы определить лепные элементы в выборке, принято решение составить список с помощью таблиц федеральных единичных расценок на строительные и специальные строительные работы ФЕРр-81-02-64-2001 [14]. Здесь содержится совокупность показателей строительных ресурсов (материалов, изделий и конструкций, затрат труда рабочих в строительстве, времени эксплуатации машин и механизмов), установленных на принятый измеритель. Согласно [14], составлен следующий перечень декоративных элементов: 1. Балясина; 2. Ваза; 3. Розетка; 4. Герб; 5. Фриз; 6. Гирлянда; 7. Эмблема; 8. Капитель; 9. Картуш; 10. Кронштейн; 11. Маскарон; 12. Модульон (см. рис. 2).

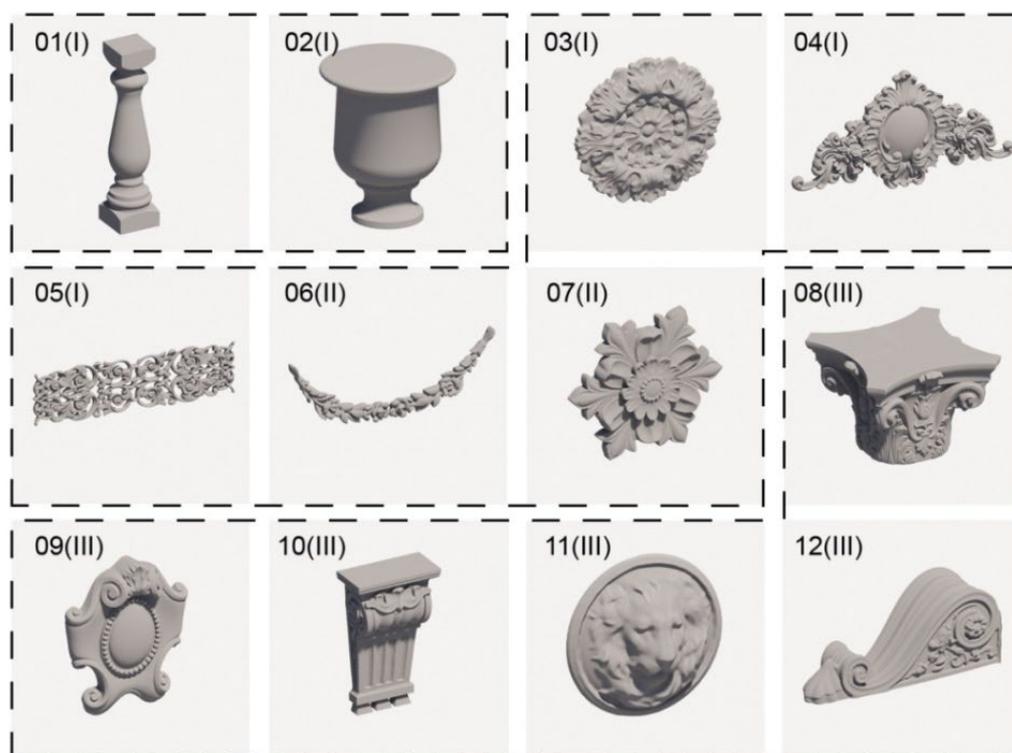
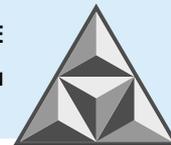


Рис. 2. Полигональные модели лепных элементов

Fig. 2. Polygonal models of molded elements

Далее путем фотограмметрии были получены 12 цифровых моделей объектов из представленного перечня. Каждую из полигональных моделей строили по облаку точек в программе *Reality Capture* из 50 фотоснимков и импортировали в 3D-редактор в формате *FBX*.

Одним из важных моментов для подготовки параметрических алгоритмов является выбор 3D-редактора для решения поставленной задачи [15, 16]. Для каждого из трех типов форм (кусковые – *I*, эластичные – *II*, комбинированные – *III*) разработали варианты алгоритмов, а затем протестировали их работу на представленных цифровых моделях лепного декора. Для решения этих задач использовали язык визуального программирования *Grasshopper*, который работает в рамках приложения *Rhinoceros 3D* для автоматизированного проектирования (*CAD*) [15,16].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Так как различные виды декора требуют неодинаковых подходов к созданию форм, нами выделены три основных вида форм, для которых производили разработку скриптов. Первый вид – кусковые формы. Как правило, кусковые формы производятся для тел вращения или же объемных объектов с несколькими осями симметрии (симметричными в нескольких направлениях). У таких элементов все три габаритных размера (длина, ширина, высота) соизмеримы, что позволяет удачно разместить элемент на печатном столе 3D-принтера. Основной принцип работы скрипта (*I*) заключается в том, что исходная геометрия модели (*mesh A*, рис. 3) разделяется секущими плоскостями (*plane*) по всей высоте объекта, количество и шаг плоскостей регулируется с помощью числовых параметров (*number*). Далее в сечении объекта на каждой отдельной плоскости получают кривую (*curve A*), которую смещают относительно текущей геометрии в сторону от объекта.

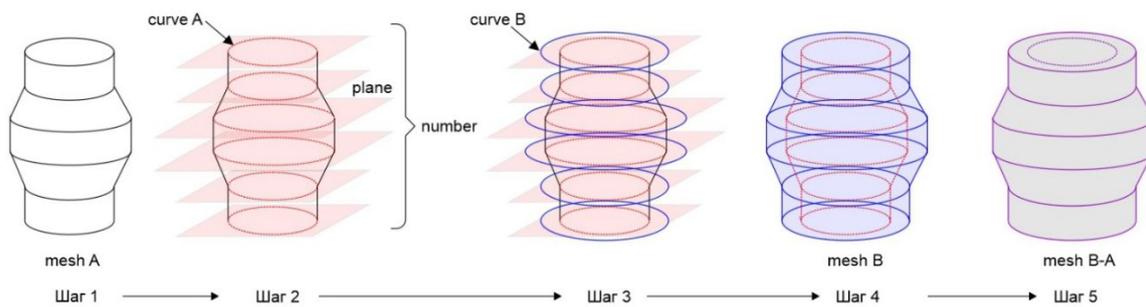
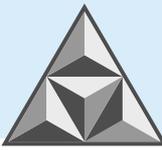


Рис. 3. Схема формообразования скрипта для создания кусковых форм (I)

Fig. 3. Schematic diagram of the script for creating piece forms (I)

Вновь получившиеся кривые (*curve B*) объединяют между собой в единую сетку с помощью выдавливания, и уже из заново построенной геометрии (*mesh B*) вычитают геометрию самой модели (*mesh A*). В результате расчета получают пустотелый кожух с заданной минимальной толщиной стенки (*mesh B-A*), регулируемым количеством плоскостей и их шагом.

В общем виде в редакторе *Grasshopper* скрипт представлен на рис. 4.

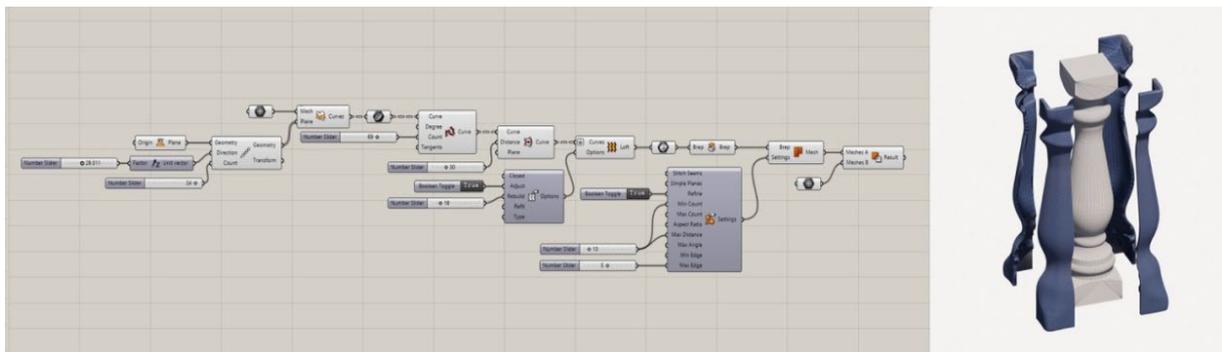
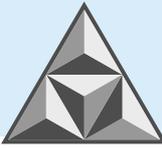


Рис. 4. Скрипт (I) в редакторе *Grasshopper* и итоговый результат моделирования

Fig. 4. Script (I) in *Grasshopper* and the final result of simulation

Далее получившуюся форму разделяют на необходимое количество частей и отправляют на печать. Алгоритм предусматривает снятие формы только с моделей, имеющих простую поверхность, то есть без западающих и нависающих частей. Сдвиг кривой по периметру сечения с западающей геометрией может привести к коллизии, сбоям в печати и невозможности съема формы с отливки, что приведет к образованию брака и удорожанию процесса изготовления лепных деталей.

Для работы со сложными сечениями, а также создания эластичных форм применяют скрипт (II). Для обеспечения эластичности требуется наличие ограждающего модель борта, который позволит создать данную форму с наименьшими потерями материала. Чтобы подробно разобрать работу скрипта (II), необходимо познакомиться с понятием *метаболов* (*метасфер*). Метаболл – n -мерный объект в компьютерной графике, представляющий собой замкнутую сглаженную поверхность. Принцип работы метаболов заключается в том, что в пространстве задают множество управляющих точек или частиц, обладающих потенциалом, и функции зависимости потенциала от расстояния. Зная потенциал поля, можно построить сглаженные изоповерхности сложной формы. Каждый метаболл определяется как функция в n измерениях; например, для трех измерений – это $f(x, y, z)$. Также выбирается пороговое значение для определения сплошного объема. Затем в определенной точке проверяют,



заполнен ли объем, заключенный в поверхность, образованную метаболлами [17]. Другими словами, метаболлы – это сферические объекты, которые при приближении друг к другу образуют общую гладкую поверхность. При генерации таких сфер по периметру модели объекта их общая поверхность сможет нивелировать западающие части и сложную текстуру, не создавая коллизий. Поэтому основная идея работы скрипта (II) строится на применении 2D-метаболлов: сначала упрощают исходную геометрию, чтобы понизить количество точек сечения модели (mesh A, рис. 5).

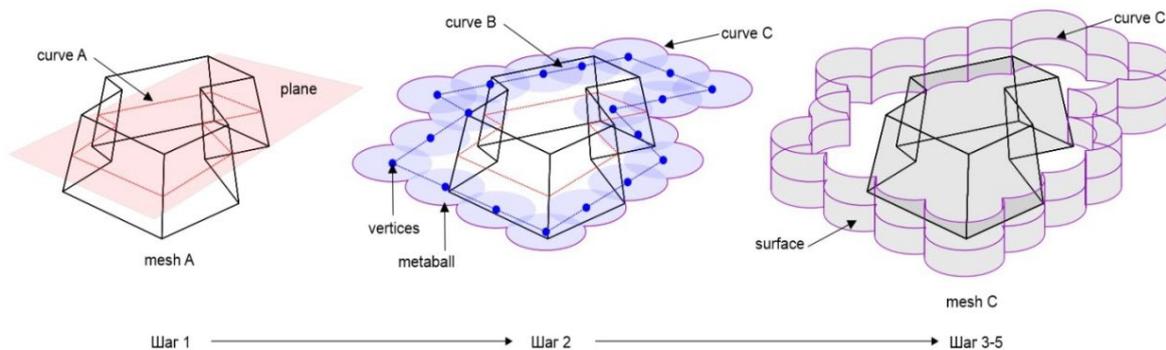


Рис. 5. Схема формообразования скрипта для создания эластичных форм (II)

Fig. 5. Schematic diagram of the script for creating elastic forms (II)

Первым шагом создается плоскость сечения (plane), которая при пересечении с объектом дает кривую (curve A). Вторым шагом кривая смещается от объекта, образуя новую кривую (curve B), и разбивается на точки (vertices), которые становятся центрами метаболлов (metaball). В последующих шагах общий контур метаболлов дублируется со смещением, чтобы образовать толщину стенки формы. Из двух кривых путем выдавливания создаются поверхности (surface). После взаимного вычитания получают ломаный объем борта формы (mesh C) с регулируемым положением сечения, отступом от модели, толщиной и высотой стенки.

Скрипт (II) в среде редактора *Grasshopper* и результат моделирования представлен на рис. 6.

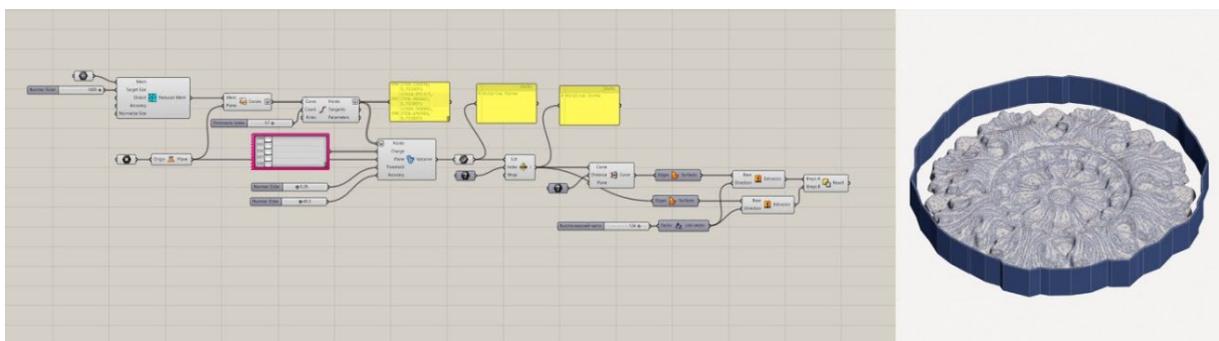
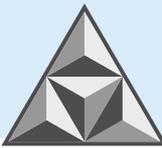


Рис. 6. Скрипт (II) в редакторе *Grasshopper* и итоговый результат моделирования

Fig. 6. Script (II) in *Grasshopper* and the final result of simulation

Комбинированные формы представляют собой наружный жесткий кожух с литниками и эластичную внутреннюю часть формы из силикона или другого клеевого раствора. Для создания наружной части вновь используют функции метаболлов. Геометрия исходной модели (mesh A) разделяется на составные части. Каждый вертекс (vertices) становится центром размещения 3D-метаболла; при этом, сливаясь вместе, они образуют новую единую



поверхность (surface). Для удобства печати она сглаживается, нижняя часть пересечения со столом (plane) удаляется, а затем ей придается толщина путем смещения полигональной сетки (рис. 7).

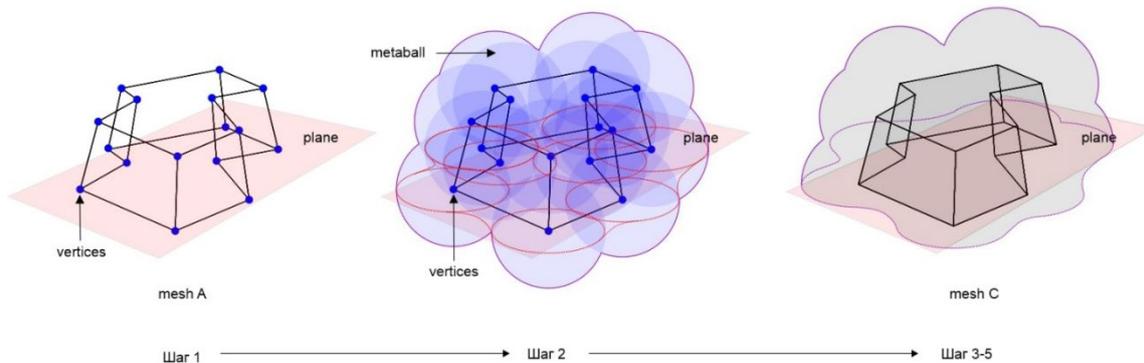


Рис. 7. Схема формообразования скрипта для создания комбинированных форм (III)

Fig. 7. Scheme of script formation for creating combined forms (III)

Так получается единая куполообразная форма (mesh C), полностью закрывающая исходный объект (mesh A). Далее следует подготовка к печати, установка литника и разделение формы на необходимое количество частей для удобного извлечения отливок. Данный скрипт (см. рис. 8) также обладает настраиваемыми параметрами толщины стенки и расстояния от модели до кожуха.

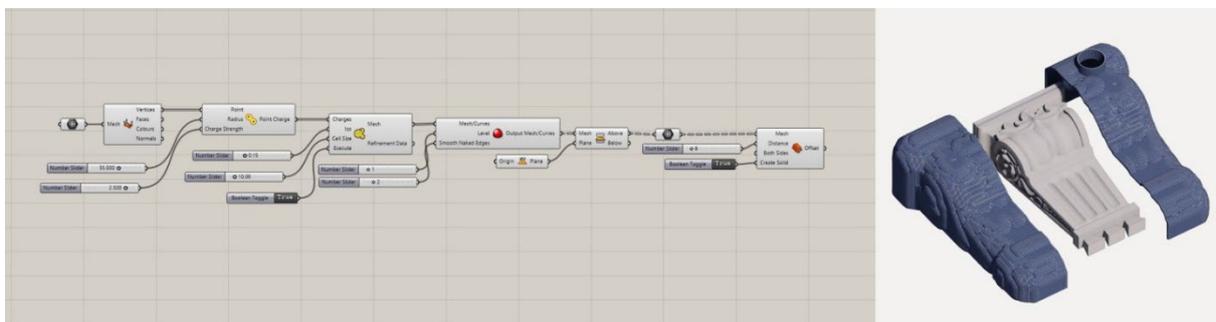


Рис. 8. Скрипт (III) в редакторе *Grasshopper* и итоговый результат моделирования

Fig. 8. Script (III) in *Grasshopper* and the final result of simulation

На следующем этапе необходимо создать свою форму для каждой модели полигональных объектов, а также визуально проверить возможность осуществления последующей 3D-печати. Каждый из двенадцати объектов (рис. 2) был загружен в *Rhinoceros Grasshopper*, классифицирован по типу и обработан соответствующим типом скрипта. В моделях 01-03 использовался скрипт (I) для кусковых форм, в моделях 03-07 – скрипт (II) для эластичных форм, а в моделях 08-12 – скрипт (III) для комбинированных форм. В результате получены 12 форм, которые также были собраны в модуль с порядковыми номерами, соответствующими исходной модели (рис. 9).

Параметры формы допускается изменять и дорабатывать в самом процессе, то есть для удобства 3D-печати имеется возможность варьирования вариантов. По итогам проведенного эксперимента нами выявлено, что автоматически почти для всего многообразия лепного декора может быть создана форма, которая впоследствии будет отправлена на 3D-печать. Таким образом, методы параметрического моделирования довольно успешно применяются при совершенствовании процессов, связанных с изготовлением форм.

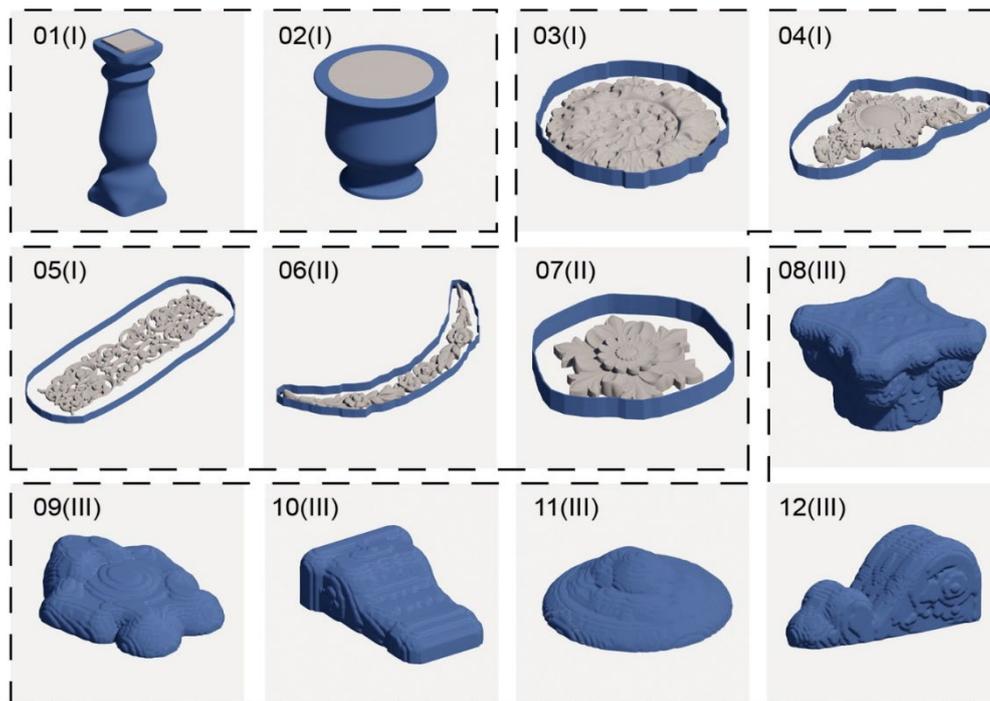
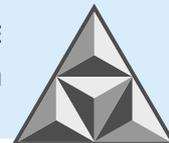


Рис. 9. Вид полигональных моделей форм для лепных элементов, полученных в результате работы скриптов I, II и III

Fig. 9. Renders of mold polygonal models obtained as a result of running scripts I, II, and III

При всем многообразии элементов они позволяют найти способ автоматизировать поиск оптимального решения для получения качественного изделия лепного декора при минимальном расходе строительного материала.

ВЫВОДЫ

Скрипты справились с задачей: для двенадцати типовых моделей автоматически создана форма, практически не требующая участия человека и готовая к 3D-печати, что минимизирует временные и материальные затраты на изготовление лепных элементов декора жилых и общественных зданий. Работа с моделями в цифровом пространстве помогает упростить работу по докомпоновке фрагментов. Частичная автоматизация с помощью параметрических алгоритмов позволяет точно прогнозировать расход материалов при создании форм и моделей, а также существенно облегчает работу исполнителей.

Применение информационных технологий при работе в 3D-редакторах также дает возможность оценить извлечение отливок из формы и заранее прогнозировать результат работ. Кроме этого, хранение цифровых копий моделей и форм позволит изготовить утраченные элементы лепного декора, что имеет огромную ценность при проведении реставрационных работ.

Массовое производство деталей с помощью 3D-печатных форм в перспективе обогатит массовую архитектуру общественных зданий и многоквартирных жилых домов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Федосов С.В., Федосеев В.Н., Зайцев И.С., Зайцева И.А.** Особенности использования отечественного и зарубежного инструментария имитационного моделирования строительных конструкций зданий

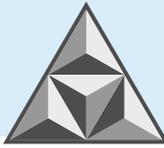


- и сооружений // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4. Вып. 2. С. 18-31. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5046/view> (дата обращения 20.12.2025).
2. **Иноземцев А.С., Королев Е.В., Зыонг Т.К.** Анализ существующих технологических решений 3D-печати в строительстве // *Вестник МГСУ*. 2018. Т. 13. №. 7 (118). С. 863-876.
 3. Rapid prototyping report // *Business New*. 1997. Vol. 008. No. 2. URL: <http://www.cadcamnet.com> (дата обращения 20.12.2025).
 4. **Kim D.M.** Contour crafting: a future method of building. 2013. URL: <http://illuminate.usc.edu/assets/submissions/755/Contour20Crafting20revision.pdf> (дата обращения 20.12.2025).
 5. **Парфенов В.А.** Лазерное 3D-сканирование в оцифровке, реконструкции и копировании скульптурных памятников // *Историческая информатика*. 2023. № 1 (43). С. 114-124.
 6. **Perevozchikova S.V., Belov V.V.** Dry mix mortar for restoration of buildings // *Smart Composite in Construction*. 2021. Vol. 2. No. 1. P. 14-19. DOI 10.52957/27821919_2021_1_14.
 7. **Гасанов П.Г., Смирнов Ю.В., Чусов А.Н., Политаева Н.А.** Мониторинг аварийности фасадов зданий с применением технологий 3D-сканирования (на примере Санкт-Петербурга) // *Умные композиты в строительстве*. 2023. Т. 4, вып. 3. С. 84-94. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5047/view>. DOI: 10.52957/2782-1919-2024-4-3-84-94
 8. **Лесовик В.С., Чернышева Н.В., Глаголев Е.С.** 3D-аддитивные технологии в сфере строительства // *Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства*. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. С. 157-167.
 9. Будущее строительства и стройматериалов: тренды 2025 года // Фонд Росконгресс: сайт. URL: <https://roscongress.org/> (дата обращения 20.12.2025).
 10. **Адамцевич А.О., Пустовгар А.П., Адамцевич Л.А., Крамеров Д.В., Воробьев Р.Ю.** Исследование особенностей работы бетонных конструкций, изготовленных с применением технологии аддитивного строительного производства // *Строительные материалы*. 2023. № 12. С. 38-46. DOI 10.31659/0585-430X-2023-820-12-38-46.
 11. **Амирханян Т.А., Иевлева О.Т.** Аддитивные технологии в архитектуре: новые горизонты // *Инженерный вестник Дона*. 2024. № 9 (117). С. 98-111.
 12. **Алексанин А.В., Маркевич А.И.** Использование аддитивных технологий при возведении зданий // *Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова*. 2017. № 6. С. 62-65. DOI 10.12737/article_5926a0596fbac2.77621545.
 13. **Пухаренко Ю.В., Шангина Н.Н., Харитонов А.М., Сизов Д.С.** Проблемы и перспективы развития информационного моделирования для реставрации объектов культурного наследия // *Academia. Архитектура и строительство*. 2024. № 3. С. 171-175. DOI 10.22337/2077-9038-2024-3-171-175.
 14. Федеральные единичные расценки на ремонтно-строительные работы. ФЕРр 81-02-64-2001. Сборник 64. Лепные работы (приложение № 113 к приказу Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 26 декабря 2019 г. N 876/пр). URL: <https://base.garant.ru/73453011/> (дата обращения 20.12.2025).
 15. **Стерликова А.А., Булгаков П.А.** Применение информационных технологий в строительстве // *Современная наука: актуальные вопросы и перспективы развития*. София, Болгария: Науч.-изд. центр "Мир науки". 2017. С. 153-158.
 16. **Свирская Т.А.** Пути использования компьютерных технологий при реставрации памятников архитектуры // *Вестник Полоцкого государственного университета. Сер. F. Строительство. Прикладные науки*. 2007. № 12. С. 17-24.
 17. **Zhang P.** Metaball based discrete element method for general shaped particles with round features // *Computational Mechanics*. 2021. Vol. 67. No. 4. P. 1243-1254.

Поступила в редакцию 12.01.2026

Одобрена после рецензирования 06.02.2026

Принята к опубликованию 05.03.2026



REFERENCES

1. **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, *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 4, no. 2, pp. 18-31 (in Russian). Available at: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/5046/view> (accessed 20.12.2025).
2. **Inozemtcev, A.S., Korolev, E.V. and Duong, Thanh Qui** (2018), Analysis of existing technological solutions of 3D-printing in construction, *Vestnik MGSU*, vol. 13, no. 7 (118), pp. 863-876 (in Russian). DOI: 10.22227/1997-0935.2018.7.863-876.
3. Rapid prototyping report, *Business New*, 1997, vol. 008, no. 2 [online]. Available at: <http://www.cadcamnet.com> (accessed 20.12.2025).
4. **Kim, D.M.** (2013), Contour crafting: a future method of building. Available at: <http://illuminate.usc.edu/assets/submissions/755/Contour20Crafting20revision.pdf> (accessed 20.12.2025).
5. **Parfenov, V.A.** (2023), Laser 3D scanning in digitization, reconstruction and copying of sculptural monuments, *Historical informatics*, vol. 1, no. 43, pp. 114-124 (in Russian).
6. **Perevozchikova, S.V. and Belov, V.V.** (2021), Dry mix mortar for restoration of buildings, *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 2, no. 1, pp. 14-19. DOI 10.52957/27821919_2021_1_14.
7. **Gasarov, P.G., Smirnov, Yu.V., Chusov, A.N. and Politaeva, N.A.** (2023), Monitoring of the facades of buildings accident rate in St. Petersburg using 3D scanning technologies, *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 4, no. 3, pp. 84-94 (in Russian) [online]. Available at: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/5047/view> (accessed 20.12.2025).
8. **Lesovik, V.S., Chernysheva, N.V. and Glagolev, E.S.** 3D additive technologies in construction, *Intelligent building composites for green construction*, Belgorod: Publishing house of BSTU named after V.G. Shukhov: 2016, pp. 157-167 (in Russian).
9. The Future of Construction and Building Materials: Trends for 2025, Roscongress Foundation: website [online]. Available at: <https://roscongress.org/> (accessed 20.12.2025).
10. **Adamtsevich, A.O., Pustovgar, A.P., Adamtsevich, L.A., Kramerov, D.V. and Vorobiev, P.Yu.** (2023), Investigation of the working features of concrete structures manufactured using technologies of additive building manufacturing, *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*, no. 12, pp. 38-46 (in Russian). DOI 10.31659/0585-430X-2023-820-12-38-46.
11. **Amirkhanian, T.A.1 and Ievleva, O.T.** (2024), Additive technologies in architecture: New horizons, *Inzhenernyj vestnik Dona*, vol. 9, no. 117, pp. 98-111 (in Russian).
12. **Aleksanin, A.V. and Markevich, A.I.** (2017), The use of additive technologies in the construction of buildings, *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, no. 6, pp. 62-65 (in Russian). DOI 10.12737/article_5926a0596fbac2.77621545.
13. **Pukharensko, Yu.V. Shangina, N.N., Kharitonov, A.M. and Sizov, D.S.** (2024), Problems and prospects for the development of information modeling for the restoration of cultural heritage sites, *Academia. Architecture and Construction*, no. 3, pp. 171-175 (in Russian). DOI 10.22337/2077-9038-2024-3-171-175.
14. Federal unit prices for repair and construction work. Collection 64. FERr-2001-64: prices for electrical installation work / Ministry of Construction of the Russian Federation. M.: Profizdat, 2001. (Federal unit prices for repair and construction work) [online]. Available at: <https://base.garant.ru/73453011> (accessed 20.12.2025).
15. **Sterlikova, A.A. and Bulgakov, P.A.** (2017), Application of information technologies in construction, *Modern sci.: current issues and development prospects*, pp. 153-158.
16. **Svirskaya, T.A.** (2007), Ways of using computer technologies in the restoration of architectural monuments. *Bul. Polotsk State Univer. Ser. F. Construction. Appl. Sci.*, no. 12, pp. 17-24 (in Russian).
17. **Zhang, P.** (2021), Metaball based discrete element method for general shaped particles with round features, *Computational Mechanics*, vol. 67, no. 4, pp. 1243-1254.

Received 12.01.2026

Approved 06.02.2026

Accepted 05.03.2026



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.335:666.9-1

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-56-70

Оптимизации состава вяжущего для бетонов специального назначения с использованием активного эксперимента

В.Е. Румянцева, А.А. Овчинников, Д.В. Обручев, М.Г. Есина

Варвара Евгеньевна Румянцева^{1,2}, Дмитрий Витальевич Обручев¹

¹Ивановский государственный политехнический университет, Иваново, Российская Федерация
varyym@gmail.com, d.v.obruchev@i-meb.ru

Александр Александрович Овчинников^{2,*}, Есина Марина Геннадьевна²

²Ивановская пожарно-спасательная академия государственной пожарной службы МЧС России,
Иваново, Российская Федерация
*nisigasa@mail.ru**, *mail@edufire37.ru*



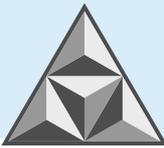
Рассмотрены результаты экспериментальных исследований вяжущей композиции «феррохромовый шлак – жидкое стекло» с целью оптимизации состава и изучения влияния на него различных качественных и количественных факторов. Представлены результаты математического планирования, а также данные натурного эксперимента и оценки адекватности математической модели. Приведены расчеты экстремума полученной математической функции в пятимерном факторном пространстве и определены значения варьируемых факторов, соответствующих максимальной прочности системы «феррохромовый шлак – жидкое стекло».

Ключевые слова: композиты специального назначения, шлакощелочное вяжущие, экспериментальные исследования, математическое моделирование, оптимизация

Для цитирования:

Румянцева В.Е., Овчинников А.А., Обручев Д.В., Есина М.Г. Оптимизации состава вяжущего для бетонов специального назначения с использованием активного эксперимента // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 1. С. 56-70.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-56-70



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-56-70

Optimization of binder composition for special-purpose concrete using active experimentation

V.E. Rumyantseva, A.A. Ovchinnikov, D.V. Obruchev, M.G. Esina

Varvara Evgenievna Rumyantseva^{1,2}, Dmitriy Vitalievich Obruchev¹

¹Ivanovo State Polytechnic University, Ivanovo, Russian Federation

varrym@gmail.com, d.v.obruchev@i-meb.ru

Aleksandr Aleksandrovich Овчинников^{2,*}, Marina Gennadievna Esina²

²Ivanovo Fire and Rescue Academy of the State Fire Service of the Ministry of Emergency Situations of Russia,
Ivanovo, Russian Federation

nisigasa@mail.ru, mail@edufire37.ru*



The paper discusses the results of experimental studies on the 'ferrochrome slag – liquid glass' binder composition. The purpose of the study is to optimise the composition and to investigate the impact of various qualitative and quantitative factors on it. The paper presents the results of mathematical planning, data from full-scale experiments, and an assessment of the adequacy of the mathematical model. The authors present calculations of the extremum of the resulting mathematical function in a five-dimensional factorial space and determine the values of the variable factors corresponding to the maximum strength of the 'ferrochrome slag – liquid glass' system.

Keywords: special purpose composites, slag-alkaline binders, experimental research, mathematical modeling, optimization

For citation:

Rumyantseva V.E., Ovchinnikov A.A., Obruchev D.V., Esina M.G. Optimization of binder composition for special-purpose concrete using active experimentation // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 1. P. 56-70. URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-56-70



ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных материалов для получения бетонов специального назначения являются шлакощелочные вяжущие. Бетон на основе таких вяжущих характеризуется экономичностью и может обладать улучшенными физико-механическими свойствами. При этом в состав вяжущих обычно входят шлаки (аморфная фаза) и минералы пониженной гидравлической активности, которые способны к гидратации и твердению при правильном выборе способа активации. Так, щелочная активация позволяет максимально использовать гидравлические свойства шлаков; действующим компонентом выступает раствор щелочей или солей щелочных металлов [1].

Хорошо зарекомендовали себя и достаточно глубоко изучены системы, в которые входят доменные шлаки черной металлургии, содержащие силикаты кальция и водный раствор силиката натрия – жидкого стекла. Одним из перспективных отвердителей жидкого стекла является саморассыпающийся феррохромовый шлак – активированный за счет полиморфного превращения и распада скрыто-гидравлический материал с преобладающей кристаллической и вместе с тем высокодефектной структурой. Его успешное применение в шлакощелочных вяжущих связано с высокой удельной поверхностью и легкостью разложения кристаллических силикатов кальция и магния, что позволяет считать его уникальным сырьем в линейке техногенных продуктов для строительной индустрии.

Феррохромовый шлак является побочным продуктом выплавки феррохрома в рудно-термических печах. Основные сырьевые компоненты – хромитовая руда (FeCr_2O_4), восстановитель (кокс) и флюсы (известняк, доломит). Механизм саморассыпания заключается в том, что при медленном охлаждении расплава (на воздухе в отвалах) доминирующая фаза – белит ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, C_2S) при $675\text{-}525^\circ\text{C}$ существует в высокотемпературных β - и α' -модификациях, стабилизированных ионами Cr, Al, Fe. При охлаждении ниже температуры 525°C происходит полиморфное превращение $\beta\text{-C}_2\text{S} \rightarrow \gamma\text{-C}_2\text{S}$ (ларинит), который имеет значительно меньшую плотность (3.0 против $3.3 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$ у $\beta\text{-C}_2\text{S}$). Удельный объем возрастает на 12% , что создает в монолитном куске шлака внутренние напряжения и приводит к его самопроизвольному растрескиванию и распаду на мелкодисперсный порошок в течение нескольких часов или дней. Этот порошок после распада имеет широкий фракционный состав; без дополнительного помола удельная поверхность по Блейну составляет $250\text{-}450 \text{ м}^2\cdot\text{кг}^{-1}$. Истинная плотность шлака составляет $3.1\text{-}3.4 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$, что выше, чем у портландцемента ($3.1 \text{ г}\cdot\text{см}^{-3}$) из-за содержания тяжелых оксидов Mg, Cr, Fe. Насыпная плотность – $1000\text{-}1400 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; гидратационная активность – крайне низкая. Он проявляет высокую пуццолановую и скрыто-гидравлическую активность только при активации щелочами (NaOH, жидкое стекло) или сульфатами (гипс) [2].

Отверждение феррохромового шлака может происходить за счет щелочной активации. Например, при использовании жидкого стекла за счет высоких значений pH среды наблюдается разрушение стекловидной фазы шлака. При этом высвобождаются свободные ионы Ca, Si, Al с последующей поликонденсацией и образованием низкоосновных гидросиликатов и гидроалюмосиликатов натрия по типу N-A-S-H-гелей и CSH-геля. Рентгенофазовый анализ (РФА) показывает, что исходными фазами шлака являются минералы мелилита (геленита), монтичеллита, форстерита, периклаза (MgO), остаточного хромита (FeCr_2O_4). Саморассыпаемость подтверждается проявлением пика $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ (ларинита) при температуре 29°C ($d = 3.03 \text{ \AA}$) вместо β -модификации. Продукты гидратации представлены аморфной фазой: гало – широкая размытая область в интервале $25\text{-}35^\circ\text{C}$, что свидетельствует о формировании аморфных или нанокристаллических гелей C-A-S-H, N-A-S-H. Также РФА указывает на наличие гидрогранатов: на дифрактограмме присутствуют пики



гидрогранатового ряда (гидрогроссуляра) типа C_3AH_6 (кубический) или его замещенных форм (с Si, Fe). Установлено присутствие карбонатной фазы – кальцит ($CaCO_3$), натрит (Na_2CO_3) или смешанных фаз (типа пирсонита). Их наличие свидетельствует о неполной растворимости исходного шлака в щелочи [3, 4].

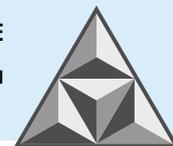
При анализе данных РФА видно, что пики исходных минералов шлака со временем уменьшаются, а аморфный гало нарастает. Кристаллические гидросиликаты (типа тоберморита), характерные для портландцемента, проявляются слабо. Фазовая картина – «аморфный фон», остатки непрореагировавших кристаллов шлака и возможные гидрогранаты/карбонаты [5, 6].

Дифференциальная сканирующая калориметрия и термогравиметрический анализ (ТГА) (фазовые переходы и потери массы при нагревании) указывают на разложение неустойчивых гидратных фаз. Эндотермический эффект при температурах от 80 до 150°C связан с удалением физически и химически связанной воды из гелевых фаз (C-A-S-H, N-A-S-H). Ширина пика коррелирует со степенью полимеризации геля. Эндотермический эффект при 150-300°C свидетельствует о дегидратации более упорядоченных слоистых структур (аналогичных алюминатной части тоберморита) или гидрогранатов. Резкий экзотермический эффект в области 800-900°C связан с кристаллизацией из аморфного геля новых силикатных фаз (например, волластонита). Потеря массы на кривой, полученной при ТГА, количественно определяет общее содержание гидратных фаз. Для хорошо прореагировавшей системы потери массы вблизи 1000°C могут достигать 12-18%. Можно идентифицировать также разложение кальцита (600-750°C) и натрита/термонатрита (400-500°C) [7, 8].

По данным электронной микроскопии, на ранних стадиях твердения (часы/дни) видны непрореагировавшие гладкие зерна шлака, окруженные рыхлыми чешуйчатыми или игольчатыми гелевыми образованиями. Зрелая структура (28 сут. и более) характеризуется плотной однородной гелевой матрицей с включением остаточных зерен шлака. Эта матрица имеет глазуреподобный или плотно-чешуйчатый вид, что сильно отличает ее от игольчато-фибрилярного CSH-геля, характерного для портландцемента. По данным энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС), химический состав системы в микрозоне типичен для геля с переменным составом: наблюдается высокое содержание Si, Al, Ca, Na, присутствие Mg, иногда следы Cr. При этом соотношение Ca/Si (0.5-1.2) обычно ниже, чем в портландцементном CSH (> 1,5), а соотношение (Na+K)/Si, напротив, существенно выше. Это подтверждает формирование гибридного C-N-A-S-H-геля или смеси CSH-подобных и N-A-S-H-фаз [9].

Основными факторами, влияющими на прочностные свойства шлакощелочного вяжущего с отвердителем феррохромовым шлаком, являются свойства жидкого стекла (плотность и силикатный модуль), а также минералогический состав и удельная поверхность шлака. Кроме того, протекание реакции между шлаком и жидким стеклом определяет температура: от нее зависит скорость схватывания и твердения, а также фазовый состав продуктов гидратации.

Низкая плотность жидкого стекла (< 1.30 г·см⁻³) приводит к недостатку щелочи; как следствие, происходит медленный набор прочности материала и образование рыхлой структуры. При оптимальной плотности (1.25-1.45 г·см⁻³) обеспечивается баланс между количеством щелочи, необходимым для разрушения шлака, и количеством кремнезема, достаточным для формирования прочных гелей. В свою очередь, высокая плотность жидкого стекла (> 1.5 г·см⁻³) резко увеличивает вязкость смеси, создает проблемы с удобоукладываемостью, приводит к быстрому схватыванию и риску образования высолов в строительном материале из-за избытка натрия.



Силикатный модуль жидкого стекла ($M = \text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$) – ключевой параметр, определяющий соотношение между кремнеземистым и щелочным компонентами. При низком модуле ($M < 2.0$) активирующая способность жидкого стекла очень сильная, схватывание происходит быстро, но прочность может быть невысокой вследствие формирования слабо полимеризованных силикатных структур, не связанных в гель, и избытка щелочи. Оптимальный модуль вяжущего (2.5-3.2) отвечает балансу между щелочью, необходимой для активации, и кремнеземом для полимеризации. Такое значение способствует образованию плотных высокополимеризованных N-A-S-H- и CSH-гелей, что в итоге обеспечивает максимальную прочность строительного материала. Высокий модуль жидкого стекла ($M > 3.5$) приводит к недостатку щелочи и, как следствие, медленному развитию прочности, хотя конечная микроструктура может быть плотной. При этом смесь часто бывает слишком вязкой [10].

Саморассыпавшийся феррохромовый шлак уже имеет высокую дисперсность и удельную поверхность (до $450 \text{ м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$), а дополнительный помол ее только увеличивает. Повышение удельной поверхности резко влияет на реакционную способность шлака: открываются большие возможности для щелочного воздействия. Это ускоряет процессы растворения и гидратации, способствует быстрому набору прочности на ранних стадиях и формированию более однородной и плотной микроструктуры. В то же время чрезмерно высокая удельная поверхность может привести к неоправданному увеличению водопотребности композиции и количества добавки активатора. Для саморассыпавшегося шлака часто существует оптимальная степень помола, при превышении которой прирост прочности становится незначительным.

Температура твердения также существенно влияет на скорость протекающих процессов. Повышенная температура ($40-95^\circ\text{C}$) при тепловлажностной обработке значительно ускоряет химические реакции активации и полимеризации, что позволяет за короткое время достигать высокой прочности. Твердение в нормальных условиях при температуре $20-25^\circ\text{C}$ идет медленнее, но при достаточной активности шлака и оптимальном составе композиции конечная прочность может быть сопоставима или даже выше, чем при тепловой обработке, ввиду формирования более равновесной и плотной микроструктуры [11].

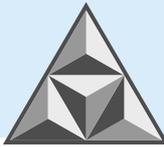
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

При исследовании свойств вяжущей композиции «феррохромовый шлак – жидкое стекло» в качестве критерия оптимизации нами выбрана механическая прочность как наиболее показательная физико-механическая характеристика цементного камня. В качестве контролируемой величины был принят предел прочности на сжатие после твердения в течение 1 сут.

При создании математической модели выбран ротатабельный план Бокса- Хантера [12, 13]. За независимые переменные принимали: X_1 – силикатный модуль жидкого стекла; X_2 – плотность раствора жидкого стекла, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; X_3 – содержание жидкого стекла в смеси, % от массы шлака; X_4 – удельная поверхность порошка феррохромового шлака (по методу воздухопроницаемости), $\text{м}^2 \cdot \text{кг}^{-1}$; X_5 – температура среды, $^\circ\text{C}$. Химический состав шлака: SiO_2 – 28.30%, Al_2O_3 – 7.10%, Fe_2O_3 – 0.25%, CaO – 51.80%, MgO – 7.52%, Cr_2O_3 – 3.50%, процент при прокаливании – 0.89. По результатам обработки данных составлен полином (1):

$$Y_i = B_0 + \sum B_i X_i + \sum B_{ij} X_i X_j + \sum B_{ii} X_i^2 + \dots + \sum \sum B_{ii} X_i^{m_i}. \quad (1)$$

Границы областей исследования представлены в неявной и явной формах; интервалы варьирования независимых переменных и основные уровни приведены в табл. 1, 2.

**Таблица 1.** Показатели независимых переменных в неявной форме**Table 1.** Implicit measures of implicit variables

Независимые переменные	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅
Основной уровень	0	0	0	0	0
Граничные области	+2	+2	+2	+2	+2
	+1	+1	+1	+1	+1
	-1	-1	-1	-1	-1
	-2	-2	-2	-2	-2

Таблица 2. Показатели независимых переменных в явной форме**Table 2.** Explicit measures of independent variables

Независимые переменные	Z ₁	Z ₂	Z ₃	Z ₄	Z ₅
Основной уровень	3.00	1350	60	300	20
Интервал варьирования	0.25	50	20	75	5
Граничные области	3.50	1450	100	450	30
	3.25	1400	80	375	25
	2.75	1300	40	225	15
	2.50	1250	20	150	10

Функция отклика – это предел прочности при сжатии кубиков 100×100×100 мм, полученных при смешивании жидкого натриевого стекла с феррохромовым шлаком и затвердевших в течение 1 сут. на решетке ванны с гидравлическим затвором.

Коэффициенты уравнения регрессии (1) вычисляли:

$$B_0 = 0.1591 \sum y_i - 0.0341 \sum x_i \cdot y_i; \quad (2)$$

$$B_i = 0.047 \sum x_i \cdot y_i; \quad (3)$$

$$B_{ij} = 0.0625 \sum x_i \cdot x_j \cdot y_i; \quad (4)$$

$$B_{ii} = 0.0312 \sum x_i \cdot y_i + 0.0028 \sum x_i \cdot y_i - 0.0341 \sum y_i. \quad (5)$$

По результатам обработки данных (табл. 3) составлен полином в неявной форме:

$$\begin{aligned} \hat{Y} = & 14.59 + 10.04 X_1 + 3.5 X_2 + 4.74 X_3 + 0.74 X_4 + 0.69 X_5 + 1.48 X_1 X_2 + 2.97 X_1 X_3 + \\ & + 0.28 X_1 X_4 - 0.19 X_1 X_5 - 0.72 X_2 X_3 - 0.26 X_2 X_4 + 0.39 X_2 X_5 + 0.48 X_3 X_4 - 0.18 X_3 X_5 - \\ & - 0.78 X_4 X_5 + 3.62 X_1 - 0.74 X_2 - 1.46 X_3 + 1.48 X_4 + 0.58 X_5. \end{aligned} \quad (6)$$

Оценку адекватности полинома выполняли, базируясь на значениях величин дисперсии воспроизводимости ($S^2_{\text{воспр.}}$) и остаточной дисперсии ($S^2_{\text{ост.}}$):

$$S^2_{\text{воспр.}} = (\sum (y_i - \bar{y})^2) / (n_0 - 1) = 1.6150 / (6 - 1) = 0.323; \quad (7)$$

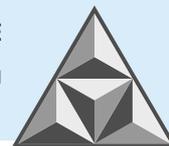
$$S^2_{\text{ост.}} = (\sum (y_i - \hat{y}_i)^2) / (N - 1) = 190.2642 / (32 - 21) = 17.2968. \quad (8)$$

Для проверки адекватности полинома сравнивали расчетный критерий Фишера ($F_{\text{расчет}}$) с табличным значением квантиля распределения Фишера (F_{1-p}) для уровня значимости $p = 0.05$. При $f_1 = 6$ и $f_2 = 5$ имеем $F_{1-p} = 5$. Расчетное значение критерия Фишера находят из отношения остаточной дисперсии к дисперсии адекватности ($S^2_{\text{ад.}}$).

Находим дисперсию адекватности:

$$S^2_{\text{ад.}} = (S^2_{\text{ост.}} \cdot f_{\text{ост.}} - S^2_{\text{воспр.}} \cdot f_{\text{воспр.}}) / f_{\text{ад.}} = (17.2968 \cdot 11 - 0.323 \cdot 5) / [32 - 21 - (6 - 1)] = 31.4415.$$

Значение $F_{\text{расчет.}} = 17.2968/31.4415$ меньше $F_{1-p} = 6$, что указывает на адекватность полинома.

**Таблица 3.** Опытные данные и результаты их обработки**Table 3.** Experimental data and results of their processing

Опыт	y_i	\hat{Y}_i	$(y_i - \hat{Y}_i)$	$(y_i - \hat{Y}_i)^2$	\hat{Y}_i	$(y_i - \hat{Y}_i)$	$(y_i - \hat{Y}_i)^2$
1	43.5	46.74	3.24	10.4976			
2	13.6	17.02	3.42	11.6964			
3	36.5	39.64	3.14	9.8596			
4	12.5	14.70	2.20	4.8400			
5	29.6	31.58	1.98	3.9204			
6	10.5	14.88	4.38	19.1844			
7	16.3	20.48	4.18	17.4724			
8	8.4	9.34	0.94	0.8836			
9	39.0	38.89	0.11	0.0121			
10	11.7	13.79	2.09	4.3681			
11	30.1	31.98	1.88	3.5344			
12	8.9	10.94	2.04	4.1616			
13	28.3	29.16	0.86	0.7396			
14	7.7	8.54	0.84	0.7056			
15	13.7	14.30	0.60	0.3600			
16	6.4	6.22	0.18	0.0324			
17	9.6	8.99	0.61	0.3721			
18	37.8	42.57	4.77	22.7529			
19	5.7	4.61	1.09	1.1881			
20	17.6	18.65	1.05	1.1025			
21	4.4	0.73	3.67	13.4689			
22	14.9	18.23	3.33	11.0889			
23	9.4	15.03	5.63	31.6969			
24	26.2	25.90	0.21	0.0441			
25	12.1	15.53	3.43	11.7649			
26	18.5	18.29	0.21	0.0441			
27	15.2	14.59	0.61	0.3721	15.35	0.15	0.0225
28	14.6	14.59	0.01	0.0001	15.35	0.75	0.5625
29	14.9	14.59	0.31	0.0961	15.35	0.45	0.2025
30	16.1	14.59	1.51	2.2801	15.35	0.75	0.5625
31	15.8	14.59	1.21	1.4641	15.35	0.45	0.2025
32	15.1	14.59	0.51	0.2601	15.35	0.25	0.0625
	365.0			190.2642	92.10		1.6150

Оценку погрешностей коэффициентов полинома (1) находили из выражений:

$$S_B = \sqrt{0.159110 \cdot S_{\text{воспр.}}^2} = 0.23;$$

$$S_B = \sqrt{0.0417 \cdot S_{\text{воспр.}}^2} = 0.12;$$

$$S_B = \sqrt{0.0625 \cdot S_{\text{воспр.}}^2} = 0.14;$$

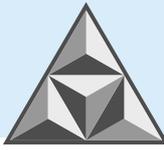
$$S_B = \sqrt{(0.0312 + 0.0028) \cdot S_{\text{воспр.}}^2} = 0.10.$$

Значимость коэффициентов полинома (1) проверяли по критерию Стьюдента с применением формул:

$$t_i = B_i / S_B; \quad (9)$$

$$t_{ij} = B_{ij} / S_B; \quad (10)$$

$$t_{ii} = B_{ii} / S_B. \quad (11)$$



Для экспериментальных данных имеем:

$$\begin{aligned}
 t_0 &= 14.59 / 0.23 = 63.43; & t_{12} &= 1.48 / 0.14 = 10.57; \\
 t_1 &= 10.04 / 0.12 = 83.67; & t_{13} &= 2.97 / 0.14 = 21.21; \\
 t_2 &= 3.51 / 0.12 = 29.25; & t_{14} &= 0.28 / 0.14 = 2.00; \\
 t_3 &= 4.74 / 0.12 = 39.50; & t_{15} &= 0.19 / 0.14 = 1.36; \\
 t_4 &= 2.74 / 0.12 = 22.83; & t_{23} &= 0.72 / 0.14 = 5.14; \\
 t_5 &= 0.69 / 0.12 = 5.75; & t_{24} &= 0.26 / 0.14 = 1.86; \\
 t_{11} &= 3.62 / 0.10 = 36.20; & t_{25} &= 0.39 / 0.14 = 2.79; \\
 t_{22} &= 0.74 / 0.10 = 7.40; & t_{34} &= 0.48 / 0.14 = 3.43; \\
 t_{33} &= 1.46 / 0.10 = 14.60; & t_{35} &= 0.18 / 0.14 = 1.29; \\
 t_{44} &= 14.48 / 0.10 = 14.80; & t_{45} &= 0.78 / 0.14 = 5.57; \\
 t_{55} &= 0.58 / 0.10 = 5.80.
 \end{aligned}$$

При табличном квантиле распределения Стьюдента $t = 5.60$ к незначимым коэффициентам полинома (1) относят коэффициенты последовательно от B_{14} до B_{45} .

Переход от безразмерных переменных к натуральным осуществляют с применением выражений:

$$X_i = (Z_i - Z_i^0) / Z_i; \text{ где } i = 1, 2, \dots, R; \quad (12)$$

$$Z_i^0 = (Z_i^{\max} + Z_i^{\min}) / 2; \quad (13)$$

$$Z_i = (Z_i^{\max} - Z_i^{\min}) / 2. \quad (14)$$

После преобразования полинома (1) получаем расчетное уравнение:

$$\begin{aligned}
 Y &= 45.77 - 116.30 Z_1 + 0.15 Z_2 - 0.22 Z_3 - 0.02 Z_4 - 0.17 Z_5 + 0.03 Z_1 Z_2 + 0.15 Z_1 Z_3 + \\
 &+ 14.48 Z_1^2 - 0.00008 Z_2^2 - 0.0009 Z_3^2 + 0.00007 Z_4^2 + 0.006 Z_5^2.
 \end{aligned} \quad (15)$$

Таким образом, при выборе номинального состава вяжущего использовали формализованное сочетание независимых переменных расчетной модели (15), которая показала максимально высокое значение приоритетного свойства оптимизации – механической прочности цементного камня при твердении в нормальных условиях в течение 1 сут.

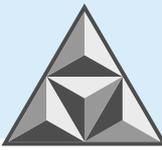
ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученное расчетное уравнение позволяет продолжить исследовательскую работу по оптимизации состава вяжущей композиции «феррохромовый шлак – жидкое стекло» (перенесение модели на реальный объект). Анализируя знаки при квадратичных членах, можно утверждать, что в пятифакторном пространстве лежит минимакс, то есть истинный максимум целевой функции уходит за границы варьирования (соответственно, глобального максимума нет). Поэтому оптимальный состав нужно искать на границах факторного пространства (данные табл. 2).

Полученный при обработке результатов эксперимента полином (15) будет иметь ограничения: $2.5 \leq Z_1 \leq 3.5$; $1250 \leq Z_2 \leq 1450$; $20 \leq Z_3 \leq 100$; $150 \leq Z_4 \leq 450$; $10 \leq Z_5 \leq 30$.

Квадратичная функция (выпуклая/вогнутая) по разным переменным:

по Z_1 коэффициент $14.48 > 0 + 14.48 > 0 \Rightarrow$ выпуклая \Rightarrow на отрезке максимум на одном из концов;



по Z_2 коэффициент $-0.00008 < 0 - 0.00008 < 0 \Rightarrow$ вогнутая \Rightarrow максимум внутри или на границе, но так как линейный член $+0,15 Z_2$ мал, а квадрат мал по модулю, максимум по Z_2 будет на верхней границе $Z_2 = 1450$ (проверим позже);

по Z_3 коэффициент $-0.0009 < 0 - 0.0009 < 0 \Rightarrow$ вогнутая;

по Z_4 коэффициент $+0.00007 > 0 + 0.00007 > 0 \Rightarrow$ выпуклая \Rightarrow максимум на концах отрезка;

по Z_5 коэффициент $+0.006 > 0 + 0.006 > 0 \Rightarrow$ выпуклая \Rightarrow максимум на концах.

Значит, кандидаты на максимум – вершины прямоугольной области ($2^5 = 32$ точки).

Из-за вогнутости по Z_2 и Z_3 максимум может быть не в вершине, а на границе по Z_2 или Z_3 где-то внутри.

Функция сепарабельна по Z_4 и Z_5 , в том смысле, что они не взаимодействуют с другими переменными, кроме своих квадратов и линейных членов. Таким образом, уравнение (15) будет выглядеть следующим образом (16):

$$Y = [14.48 Z_1^2 - 116.30 Z_1 + 0.03 Z_1 Z_2^2 + 0.15 Z_1 Z_3] + [0.15 Z_2 - 0.00008 Z_2^2] + [-0.22 Z_3 - 0.0009 Z_3^2] + \quad (16) \\ + [-0.02 Z_4 + 0.00007 Z_4^2] + [-0.17 Z_5 + 0.006 Z_5^2] + 45.77.$$

Рассмотрим каждую часть:

а) по Z_4

$f_4(Z_4) = -0.02 Z_4 + 0.00007 Z_4^2$, выпуклая, ее производная:

$f_4' = -0.02 + 0.00014 Z_4 = 0 \Rightarrow Z_4 = 142.857$ – минимум (так как функция выпуклая). Значит, максимум на отрезке $150 \leq Z_4 \leq 450$ будет на правом конце: $Z_4 = 450$. Чем больше Z_4 , тем больше f_4 при таких малых коэффициентах.

Проверим значения:

$$f_4(150) \approx -0.02 \times 150 + 0.00007 \times 22500 = -3 + 1.575 = -1.425.$$

$$f_4(450) \approx -9 + 0.00007 \times 202500 = -9 + 14.175 = 5.175.$$

Да, правая граница больше. Итак, $Z_4^* = 450$.

б) по Z_5

$f_5(Z_5) = -0.17 Z_5 + 0.006 Z_5^2$, выпуклая, ее производная

$f_5' = -0.17 + 0.012 Z_5 = 0 \Rightarrow Z_5 = 14.1667$, минимум внутри отрезка $[10, 30]$. Максимум на концах:

$$f_5(10) = -1.7 + 0.006 \times 100 = -1.7 + 0.6 = -1.1.$$

$$f_5(30) = -5.1 + 0.006 \times 900 = -5.1 + 5.4 = 0.3.$$

$0.3 > -1.1$, максимум в $Z_5 = 30$.

Итак, $Z_5^* = 30$.

По Z_2, Z_3, Z_1 взаимосвязаны.

Оставшаяся часть:

$$G(Z_1, Z_2, Z_3) = 14.48 Z_1^2 - 116.30 Z_1 + 0.03 Z_1 Z_2 + 0.15 Z_1 Z_3 + 0.15 Z_2 - 0.00008 Z_2^2 - 0.22 Z_3 - 0.0009 Z_3^2.$$

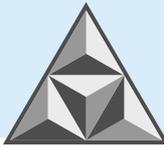
Плюс константа и уже выбранные $Z_4 = 450$ и $Z_5 = 30$.

По Z_2 внутри функции G :

$$\partial G / \partial Z_2 = 0.03 Z_1 + 0.15 - 0.00016 Z_2 = 0 \Rightarrow Z_2 = (0.03 Z_1 + 0.15) / 0.00016.$$

По Z_3 :

$$\partial G / \partial Z_3 = 0.15 Z_1 - 0.22 - 0.0018 Z_3 = 0 \Rightarrow Z_3 = (0.15 Z_1 - 0.22) / 0.0018.$$



Оба эти выражения для Z_2 , Z_3 могут дать внутренний максимум G при фиксированном Z_1 , но они должны лежать в пределах своих отрезков.

Поскольку $Z_1 \in [2.5, 3.5]$:

при $Z_1 = 2.5$ $Z_2 = (0.075 + 0.15)/0.00016 = 0.225/0.00016 = 1406.25$ внутри отрезка $[1250, 1450]$,

при $Z_1 = 3.5$ $Z_2 = (0.105 + 0.15)/0.00016 = 0.255/0.00016 = 1593.75$ (больше 1450).

То есть при росте Z_1 оптимальное Z_2 растет и быстро выходит за правую границу 1450. Значит, для Z_1 от 2.5 до некоторого $Z_{1\max}$ можем брать внутренний оптимум по Z_2 , а далее Z_2 надо фиксировать на 1450.

Аналогично для Z_3 . При $Z_1 = 2.5$

$Z_3 = (0.375 - 0.22)/0.0018 = 0.155/0.0018 \approx 86.111$ внутри отрезка $[20, 100]$.

При $Z_1 = 3.5$, $Z_3 = (0.525 - 0.22)/0.0018 = 0.305/0.0018 \approx 169.444$ (больше 100).

То есть при росте Z_1 оптимальное Z_3 тоже растет и выходит за границу 100.

Разобьем на случаи.

Случай 1:

Z_2 и Z_3 внутренние (удовлетворяют градиентным условиям).

Это будет при таких Z_1 , что:

$$Z_2^* \leq 1450.$$

$$(0.03Z_1 + 0.15)/0.00016 \leq 1450.$$

$$0.03 Z_1 + 0.15 \leq 0.232.$$

$$0.03 Z_1 \leq 0.082.$$

$$Z_1 \leq 2.7333\dots$$

$$Z_3^* \leq 100.$$

$$(0.15 Z_1 - 0.22)/0.0018 \leq 100.$$

$$0.15 Z_1 - 0.22 \leq 0.18.$$

$$0.15 Z_1 \leq 0.40.$$

$$Z_1 \leq 2.666\dots$$

Более жесткое ограничение: $Z_1 \leq 2.666$.

При этом $Z_1 \geq 2.500$ (по условию), так что $Z_1 \in [2.500, 2.666\dots]$.

В этом диапазоне Z_2^* , Z_3^* будут внутри своих границ.

Тогда G при подстановке $Z_2^*(Z_1)$, $Z_3^*(Z_1)$ становится функцией только от Z_1 .

Мы уже изначально считали стационарную точку всех переменных одновременно, которая дала $Z_1 = 2.261$ (но точка не в области). Теперь мы ищем максимум на отрезке $Z_1 \in [2.500, 2.666]$.

Поскольку функция G квадратичная по Z_1 после подстановки Z_2^* , Z_3^* , лучше проверить значение Y в вершине и на концах этого малого диапазона.

Можно заметить: в стационарной точке всех 5 переменных Z_1 было 2.261, что меньше 2.500, и функция там имела некоторое значение. При сдвиге Z_1 вправо до 2.500, возможно, Y растет (так как выпуклая по Z_1 с положительным коэффициентом 14.48 \Rightarrow минимум в $Z_1 \approx 2.261$, а правая ветвь растет). Значит, на отрезке $Z_1 \in [2.500, 2.666]$ максимум будет на правом конце $Z_1 = 2.666$.

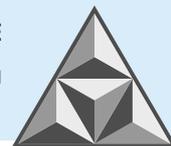
Случай 2:

$$Z_1 > 2.666.$$

Тогда $Z_3^* > 100$; Z_3 надо фиксировать на 100 (максимум по Z_3 на отрезке будет на границе, так как вогнутая). Для вогнутой $f_3(Z_3) = 0.15 Z_1 Z_3 - 0.22 Z_3 - 0.0009 Z_3^2$ (в рамках G , остальные члены не зависят от Z_3). Это квадратичная от Z_3 с коэффициентом $-0.0009 < 0$, значит, вершина – максимум. Если вершина за пределами справа, максимум на правой границе $Z_3 = 100$, если она слева – максимум на левой границе.

Вершина: производная

$$0.15 Z_1 - 0.22 - 0.0018 Z_3 = 0 \Rightarrow Z_3 = (0.15 Z_1 - 0.22) / 0.0018.$$



При $Z_1 > 2.666$ вершина > 100 , максимум по Z_3 будет при $Z_3 = 100$ (так как функция вогнутая, если вершина справа от отрезка, на этом отрезке максимум на правом конце).

Итак, при $Z_1 > 2.666$ берем $Z_3 = 100$.

Аналогично для Z_2 – вогнутая, вершина $Z_2 = (0.03 Z_1 + 0.15) / 0.00016$.

При $Z_1 > 2.733$ вершина > 1450 , значит, максимум на правом конце $Z_2 = 1450$.

При Z_1 между 2.666 и 2.733 вершина Z_2 внутри, можно брать внутренний оптимум Z_2^* .

Но проще перебрать граничные случаи, так как область небольшая.

Мы знаем, что $Z_4 = 450$, $Z_5 = 30$ дают максимум по ним. Проще вычислить Y в нескольких ключевых точках.

Точка А.

$Z_1 = 2.666$, $Z_2 = (0.03 \cdot 2.666 + 0.15) / 0.00016 = 1437.375$ – внутри.

$Z_3 = (0.15 \cdot 2.666 - 0.220) / 0.0018 = 99.944$ (почти 100).

Пусть $Z_3 = 100$.

Тогда подставим $Z_1 = 2.666$, $Z_2 = 1437.375$, $Z_3 = 100$, $Z_4 = 450$, $Z_5 = 30$.

Подставляем значения Z в (16) получаем $Y = 17.280$ МПа.

Надо проверить, возможно, большее значение будет при $Z_1 = 3.5$ (максимальном), $Z_2 = 1450$, $Z_3 = 100$, $Z_4 = 450$, $Z_5 = 30$.

Точка В.

Подставляем в (16) значения $Z_1 = 3.5$, $Z_2 = 1450$, $Z_3 = 100$, $Z_4 = 450$, $Z_5 = 30$. Значение $Y = 44.625$ МПа. $44.625 > 17.280$, следовательно, точка В является предпочтительной.

ВЫВОДЫ

Показано, что максимальная прочность шлакощелочного вяжущего $Y = 44.625$ МПа достигается при следующих факторах:

- силикатный модуль $Z_1 = 3.5$;
- плотность жидкого стекла $Z_2 = 1450$ кг·м⁻³;
- расход жидкого стекла по массе шлака $Z_3 = 100\%$;
- удельная поверхность шлака $Z_4 = 450$ м²·кг⁻¹;
- температура $Z_5 = 30^\circ\text{C}$.

Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными. Значения прочности экспериментальных образцов близки к максимальным для представленного табличного перечня параметров исходного состава шлакожидкостекляного вяжущего.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Гергишан С.В., Овчинников А.А., Ходова И.А.** Моделирование процесса прогрева строительной конструкции с защитным огнестойким покрытием // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6. Вып. 1. С. 21-30. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view> (дата обращения 20.12.2025).
2. Атлас шлаков. Справочник. М.: Металлургия, 1985. 208 с.
3. **Ковалев А.В., Дроженко К.В.** Бетоны на шлакощелочных вяжущих // *Технологии бетонов*. 2025. № 4 (201). С. 25-29.
4. **Ананенко А.А., Банул А.В.** Получение высокопрочных бетонов на шлакощелочных вяжущих // *Иzv. высш. учеб. заведений. Строительство*. 2007. № 10 (586). С. 17-19.
5. **Глуховский В.Д., Кривенко П.В., Румына Г.В., Герасимчук В.Л.** Производство бетонов и конструкций на основе шлакощелочных вяжущих. Киев: Будівельник, 1988. 143 с.



6. **Петровская А.А., Каптюшина А.Г.** Исследование свойств шлакощелочных вяжущих и бетонов на их основе // *Строительные материалы*. 2021. № 10. С. 21-24.
7. **Федосов С.В., Серегин Г.В., Овчинников А.А.** Жаростойкий бетон для футеровки вагонеток и печей керамической промышленности // *Строительные материалы*. 2006. № 9. С. 9-11.
8. **Овчинников А.А.** Модифицированные шлакощелочные бетоны // *Ученые записки инж.-строит. фак-та*. Иваново, 2006. Вып. 3. С. 40-41.
9. **Provis J.L.** Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? // *Materials and Structures*. 2013. Vol. 47. P. 11-25.
10. **Glukhovskiy V.D., Rostovskaya G.S., Rumyna G.V.** High-Strength Slag-Alkaline Cements // *7th Inter. Congress on the Chemistry of Cement*. Paris, 1980. Vol. III. P. 164-168.
11. **Салония Л.Г., Самченко С.В., Скальный В.В.** Феррохромовые шлаки в строительных композициях // *Вестник МГСУ*. 2016. № 10. С. 104-115.
12. **Ординарцева Н.П.** Математическая модель измерительной задачи // *Известия ЮТУ. Техн. науки. Тем. вып. «Компьютерные и информационные технологии в науке, инженерии и управлении»*. Таганрог: изд-во ТГИ ЮТУ. 2012. № 5 (130). С. 90.
13. **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> (дата обращения 20.12.2025).

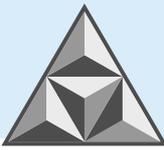
Поступила в редакцию 07.02.2026

Одобрена после рецензирования 28.02.2026

Принята к опубликованию 06.03.2026

REFERENCES

1. **Gergishan, S.V., Ovchinnikov, A.A. and Khodova, I.A.** (2025), Modelling of the heating process of a building structure with a protective fire-resistant coating, *Umyne kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 6, no. 1, pp. 21-30 (in Russian). Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5863/view> (accessed 20.12.2025).
2. Slag atlas (1985), Handbook. Metallurgy, Moscow, 208 p. (in Russian).
3. **Kovalev, A.V. and Drozhenko, K.V.** (2025), Concrete on slag-alkaline binders, *Tekhnologii betonov [Concrete technologies]*, vol. 4, no. 201, pp. 25-29 (in Russian).
4. **Ananenkov, A.A. and Banul, A.V.** (2007), Obtaining high-strength concrete on slag-alkaline binders, *Izv. vyssh. ucheb. zavedenii. Stroitel'stvo [Proceedings of higher educational institutions. Construction]*, no. 10 (586), pp. 17-19 (in Russian).
5. **Glukhovskiy, V.D., Krivenko, P.V., Rumyna, G.V. and Gerasimchuk, V.L.** (1988), Production of concrete and structures based on slag-alkaline binders. Kyiv: Budivelnik, 143 p. (in Russian).
6. **Petrovskaya, A.A. and Kaptyushina, A.G.** (2021), Study of the properties of slag-alkaline binders and concretes based on them, *Stroitel'nye materialy [Construction materials]*, no. 10, pp. 21-24 (in Russian).
7. **Fedosov, S.V., Seryogin, G.V. and Ovchinnikov, A.A.** (2006), Heat-resistant concrete for lining trolleys and furnaces of the ceramic industry, *Stroitel'nye materialy [Construction materials]*, no. 9, pp. 9-11 (in Russian).
8. **Ovchinnikov, A.A.** (2006), Modified slag-alkaline concretes, *Uchenye zapiski inzh.-stroit. fak-ta [Scientific notes of the Faculty of Civil Engineering]*, Ivanovo, iss. 3, pp. 40-41 (in Russian).
9. **Provis, J.L.** (2013), Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what?, *Materials and Structures*, vol. 47, pp. 11-25.
10. **Glukhovskiy, V.D., Rostovskaya, G.S. and Rumyna, G.V.** (1980), High-Strength Slag-Alkaline Cements, *7th Inter. Congress on the Chemistry of Cement*, Paris, vol. III, pp. 164-168.
11. **Saloniya, L.G., Samchenko, S.V. and Skal'nyj, V.V.** (2016), Ferrochromic slags in building compositions, *Bulletin of MGSU*, no. 10, pp. 104-115 (in Russian).



12. **Ordinartseva, N.P.** (2012), Mathematical model of the measurement problem, *Izvestiya YuTU. Tekhn. nauki. Tem. vyp. «Komp'yuternye i informatsionnye tekhnologii v nauke, inzhenerii i upravlenii» [Izv. YuTU. Tech. sci. Thematic iss. "Computer and information technologies in science, engineering and management"]*, Taganrog: Publ. house TGI YuTU, vol. 5, no. 130, p. 90 (in Russian).
13. **Fedosov, S.V., Bakanov, M.O., Aleksandrova, O.V., Razgovorov, P.B. and Kuznetsov, I.A.** (2025), Comprehensive mathematical modelling in the management of physical and chemical processes during the transportation of concrete mixtures, *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 6, no. 4, pp. 23-42 (in Russian). Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/6779/view> (accessed 20.12.2025).

Received 07.02.2026

Approved 28.02.2026

Accepted 06.03.2026



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 625.7/8

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-71-83

Полуфабрикаты и технологические переделы: введение в предметную область стандартизации нового класса дорожно-строительных материалов

А.А. Игнатъев, А.Б. Бондарев, Д.А. Кочетков

Алексей Александрович Игнатъев^{1,*}, Дмитрий Андреевич Кочетков¹

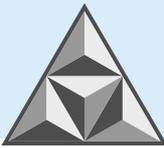
¹Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва, Российская Федерация

*a.ignatyev@madi.ru**, *kdasoni@mail.ru*

Александр Борисович Бондарев²

²Липецкий государственный технический университет, Липецк, Российская Федерация

ialex-86@mail.ru



Представлены материалы исследований, соответствующие паспорту научной специальности «Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей». Изучены вопросы организации производства, механизации и автоматизации технологических процессов производственных предприятий, обеспечивающих строительство, реконструкцию и эксплуатацию транспортных сооружений материалами, полуфабрикатами и изделиями, и описывающие особенности получения функционально устойчивых дорожных переделов и полуфабрикатов длительного хранения. Показано, что композиционные дорожные переделы и полуфабрикаты длительного хранения открывают широкие возможности для развития нового класса материалов, способных обеспечить повышение срока их службы. Данный класс материалов не подпадает под действие технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог». Приведены примеры таких композиционных переделов и полуфабрикатов. Введено новое понятие – триггерный материал, имеющий два и более фазовых состояния устойчивого равновесия и способный переходить из одного в другое при соответствующем воздействии бинарного характера (триггера).

Ключевые слова: дорожно-строительные материалы, полуфабрикаты, технологические переделы, триггерный материал, стандартизация, техническое регулирование, проверка соответствия

Для цитирования:

Игнатъев А.А., Бондарев А.Б., Кочетков Д.А. Полуфабрикаты и технологические переделы: введение в предметную область стандартизации нового класса дорожно-строительных материалов // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 1. С. 71-83. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-71-83



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-71-83

Semi-finished products and processing stages: an introduction to the standardisation scope for a new class of road construction materials

A.A. Ignatyev, A.B. Bondarev, D.A. Kochetkov

Aleksey Alexandrovich Ignatyev^{1,*}, Dmitriy Andreevich Kochetkov¹

¹Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow, Russian Federation

*a.ignatyev@madi.ru**, *kdasoni@mail.ru*

Aleksandr Borisovich Bondarev²

²Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russian Federation

ialex-86@mail.ru



The paper presents research data corresponding to the curriculum for the academic program 'Design and Construction of Roads, Underground Railways, Aerodromes, Bridges and Transport Tunnels'. The authors have examined issues relating to the organisation of production, mechanisation and automation of technological processes at manufacturing enterprises that supply materials, semi-finished products and finished goods for the construction, reconstruction and operation of transport infrastructure, and describe the specific features of producing functionally stable road pavements and semi-finished products suitable for long-term storage. The paper demonstrates that composite road mixes and semi-finished products suitable for long-term storage open up broad opportunities for the development of a new class of materials capable of ensuring a longer service life. This class of materials does not apply to the technical regulations of the Customs Union 'Road Safety'. The paper provides examples of such composite road pavements and semi-finished products. The authors introduce a new concept – trigger material, i.e. a material possessing two or more phase states of stable equilibrium and capable of transitioning from one state to another upon the application of a corresponding binary stimulus (trigger).

Keywords: road construction materials, semi-finished products, processing stage, trigger material, standardization, technical regulation, compliance check

For citation:

Ignatyev A.A., Bondarev A.B., Kochetkov D.A. Semi-finished products and processing stages: an introduction to the standardisation scope for a new class of road construction materials // *Smart Composite in Construction*. 2026. Vol. 7, Iss. 1. P. 71-83. URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-71-83



ВВЕДЕНИЕ

Нехватка научных знаний о методах получения технологических переделов и полуфабрикатов для дорожного строительства формирует запрос на более широкое изучение специфики их получения. Существующий уровень научных знаний в полной мере не обеспечивает выполнение постоянно растущих требований к качеству материалов и результатов дорожных работ. Потребность в новых материалах и конструктивных решениях для дорожных одежд, а также новых методах расчета конструкций, учитывающих реальное поведение материалов при различных погодных (температурно-влажностных) условиях, транспортных нагрузках и фазовых состояниях, может быть удовлетворена за счет разработки технологии получения композиционных полуфабрикатов длительного хранения. Такой подход открывает возможности для круглогодичного дорожного строительства, широкого использования местного и вторичного сырья, повышения качества устройства и срока эксплуатации дорожных покрытий без потери их эксплуатационных свойств. В [1-5] авторами представлен научный задел по созданию и применению гранулированных дорожных смесей длительного хранения, которые в ходе дальнейшего развития темы стали называть «технологическими переделами». Результаты основаны на морфологическом и феноменологическом анализе, а также системном подходе к межфазным взаимодействиям в материалах для строительства дорог. В частности, были предложены и исследованы функционально устойчивые дорожные смеси длительного хранения и разработаны гранулированные асфальтовые вяжущие на основе фосфогипса, гранулированные смеси на основе переработанного асфальтобетона, а также композиционные материалы для сорбции и переработки алюмосиликатного сырья. Экспериментальные работы [6,7] сопровождалось математическим моделированием межфазных контактов в системе «жидкость – твердое тело» и исследованием влияния структурирования на свойства композитов для дорожных покрытий.

Параллельно в отечественной [8-11] и мировой литературе [11-16] были представлены результаты исследований с использованием в составе таких сложных систем вторичных ресурсов и отходов промышленности [17-20], полимеров [21], а также свойства битумных эмульсий и суспензий [22-24], холодных асфальтобетонных смесей с диспергированным битумом, структурированных асфальтобетонов и связанные с ними технологические аспекты. Они подчеркивают высокую актуальность применения ресурсосберегающих и функционально ориентированных подходов. Однако при этом, как правило, материалы рассматривают в рамках действующей нормативной парадигмы, не выделяя полуфабрикаты и технологические переделы как самостоятельный объект стандартизации. Публикации [1-7] в целом отражают достигнутый научно-технический уровень разработки данной темы и являются подтверждением идеи авторов настоящей работы о необходимости организации нового класса дорожно-строительных материалов (и нового научного направления), в основе которого лежат полуфабрикаты и технологические переделы. При этом их функциональные свойства формируются на месте производства дорожных работ или по месту применения в качестве конструктивных элементов.

РЕЗУЛЬТАТЫ АВТОРСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В [1] представлены результаты теоретических и экспериментальных исследований, направленные на изучение особенностей применения полуфабрикатов длительного хранения



на автомобильных дорогах общего пользования. Характерно, что новый материал получают с применением технологической операции гранулирования окатыванием. При этом автором [1] изучены специфические свойства и характеристики вторичных материалов (фосфогипс, полиэтилентерефталат, соледержащие и гипсосодержащие отходы, гранулят старого асфальтобетона), допускающие возможность их включения в состав гранулированных смесей. Итоги математического моделирования, описывающего процессы на уровне межфазного взаимодействия в системе «жидкость – твердое», коррелируются с результатами апробации на реальных объектах автомобильных дорог.

На основе проведенных экспериментальных исследований были сформированы и испытаны более 200 составов гранулированных материалов, содержащие переработанное промышленное сырье, в том числе – вторичные продукты фосфатного производства, твердые солевые и гипсовые осадки, крошка асфальтобетона. Ключевой характеристикой разработанных составов является достижение стабильных свойств дорожного материала при организации продолжительного хранения подготовленных систем.

В ходе исследований было установлено, что процесс уплотнения гранулированных смесей целесообразно осуществлять в интервале 20-120°C, при котором достигаются улучшенные механические показатели, включая повышенную устойчивость к воздействию влаги. При этом оптимальные результаты получены при 80-100°C в процессе уплотнения, что позволяет существенно (на 40°C) снизить энергозатратность технологической операции. Такое снижение становится возможным благодаря специфике конструирования и способу формирования полуфабрикатов.

На практике были также апробированы и внедрены составы гранулированных материалов (технологических переделов) для проведения ремонтно-восстановительных операций на автомобильных дорогах, с учетом использования традиционной техники, машин и оборудования. Разработаны технологические регламенты для внедрения полученных результатов, ориентированные на производство гранулированных смесей (технологических переделов) с расширенным сроком хранения и применение их в качестве восстановительных составов в работах с асфальтобетонными покрытиями.

Предложенная технология гранулирования путем окатывания обеспечила получение компактных систем (технологических переделов) со стабильными характеристиками при их хранении, что гарантирует достижение организованного строения дисперсного компонента (без пустот и дефектных зон). Получаемые гранулированные системы представляют собой завершённый полупродукт технологического цикла (полуфабрикат).

Данное направление исследований сопоставимо с исследованием близких аналогов – битумных суспензий и холодных складированных асфальтобетонных смесей на основе вязкого диспергированного битума [21-24].

Суспензии относятся к категории грубодисперсных коллоидных систем, отличаясь от связанных дисперсных материалов (например, паст) отсутствием прочной структурной сетки. В суспензионных системах частицы дисперсной фазы способны беспрепятственно передвигаться под влиянием гравитационного поля, что определяет их термодинамическую нестабильность.

Когда дисперсность материала возрастает, увеличивается свободная энергия поверхности раздела между фазами. Повышенная поверхностная энергия обеспечивает естественное стремление системы к изменению дисперсности путем объединения мелких частиц в более крупные образования. Если процесс диспергирования вязкого вещества (например, битума)



осуществляется непосредственно в водной среде, на межфазной границе начинают развиваться процессы, направленные на минимизацию поверхностной энергии. Эти процессы приводят к укрупнению частиц дисперсной фазы, что неизбежно снижает качественные характеристики композиции для дорожных работ.

Следовательно, при создании устойчивых композиций для дорожного строительства, способных сохранять свойства в течение длительного периода, необходимо не только обеспечить необходимую степень дисперсности, но и гарантировать условия, при которых дисперсность будет надежно закреплена.

В наших композициях на основе вязких органических компонентов высокая дисперсность и структурная однородность достигается благодаря применению особого способа стабилизации. Сущность этого способа состоит в распределении капель вязкого дорожного материала, находящегося в пластичном состоянии, в среде тонко измельченных минеральных частиц. Каждая капля покрывается защитной оболочкой из этого минерального материала.

Стабилизирующий эффект достигается за счет предотвращения слияния капель между собой. Это становится возможным благодаря тому, что контактирующие элементы дисперсной системы (минеральные зерна и покрытые оболочкой капли) химически идентичны. Подобная конструкция исключает прямой контакт вязких капель, препятствуя их агломерации и сохраняя высокий уровень дисперсности во всем объеме материала.

Технологический процесс получения такой композиции предусматривает введение нагретого вязкого материала в активно перемешиваемую водную суспензию, содержащую минеральные частицы, при температуре окружающей среды. Интенсивное перемешивание обеспечивает непрерывное разделение вязкого материала на более мелкие фрагменты, одновременно покрывая каждый из них защитным слоем минеральных частиц.

Данный механизм реализуется за счет действия межмолекулярных взаимодействий на границах раздела трехфазной системы: «органический материал – водная среда – минеральные частицы». При попадании горячего вязкого материала в суспензию образуется паровоздушная смесь. Газовая прослойка замедляет теплообмен между взаимодействующими средами, способствуя растяжению и истончению струйки вязкого материала. Мельчайшие капельки почти мгновенно обволакиваются защитным слоем минеральных частиц.

Образование мелких капельных частиц существенно усиливает адгезионные взаимодействия между органическим материалом и твердыми минеральными компонентами. Процесс перемешивания при окружающей температуре обеспечивает сохранение пластичного состояния внутри защитной оболочки как при хранении, так и последующей транспортировке.

Электростатические взаимодействия также играют роль в стабилизации. Минеральные частицы и сформировавшиеся оболочки капель имеют одноименный электрический заряд, что исключает их электростатическое притяжение и предотвращает формирование крупных агрегатов.

Минеральные частицы играют роль структурно-механического стабилизатора, создавая физический барьер между вязкими каплями. Этот барьер препятствует их сближению и объединению в крупные образования, тем самым сохраняя и поддерживая достигнутую степень дисперсности и структурную однородность системы.

Когда вокруг охлажденных до пластичного состояния капель образуется двухфазная оболочка, содержащая воду и минеральные компоненты, это обеспечивает композиции антифризные свойства. Во время процесса диспергирования органического материала в



увлажненной минеральной среде происходит насыщение водной фазы органическими и минеральными компонентами. Растворенные вещества изменяют физико-химические свойства воды, снижая температуру ее замерзания. При правильном подборе состава выделяемая вода остается подвижной при довольно низких температурах, вплоть до -15°C .

Сохранение органического материала в пластичном состоянии внутри защитной оболочки значительно упрощает применение композиции при осуществлении дорожных работ.

Использование полученной композиции требует лишь добавления воды, а также минеральной крошки (различные фракции), песка и других компонентов в соответствии с рецептурой, определяемой назначением смеси. После перемешивания материал становится готовым к распределению и уплотнению.

При уплотнении рабочей смеси содержащаяся в ней влага выходит на поверхность и испаряется. Капли органического материала, находящиеся в минеральной оболочке, разрушаются и образуют однородное поверхностное покрытие, близкое по свойствам к традиционным мастичным и асфальтобетонным покрытиям.

Модернизация производственных установок для получения таких композиций не требуется. Процесс может быть реализован путем введения необходимых технологических операций в программное управление существующим оборудованием либо посредством корректировки рецептурных параметров в заводских программах.

Исключение нагрева композиции перед нанесением на рабочую поверхность существенно сокращает трудовые и энергетические затраты на ее применение, способствует повышению экономичности процесса.

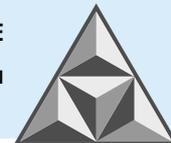
На микрофотографии (рис. 1, *a*) полученной композиции, разбавленной водой, подавляющее большинство капель органического материала имеют размеры, сопоставимые или даже меньшие, чем диаметр человеческого волоса, использованного в качестве эталона для масштабирования.



Рис. 1. Битумная суспензия: фото под микроскопом (*a*), буртование (*b*) и упаковка в мешки на склад битумной суспензии и холодной асфальтобетонной смеси с диспергированным битумом типа Б2 (*в*)
Fig. 1. Bituminous suspension: microscopic image (*a*), stockpiling (*b*) and bagging of bituminous suspension and cold asphalt concrete mixture with dispersed bitumen type B2 (*c*)

Отдельные волокна дополнительных укрепляющих добавок хорошо просматриваются в центральной части образца. Также наглядно демонстрируется возможность складирования и упаковки полученного материала в стандартную тару без ущерба для его свойств.

На рис. 1, *б* и *в* представлены соответственно буртование и упаковка в мешки битумной суспензии и холодной асфальтобетонной смеси с диспергированным битумом типа Б2.



ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ДИСКУССИЯ

Автомобильные дороги в ходе эксплуатации непрерывно подвергаются воздействию различных факторов, которые постоянно меняются. В этом заключается главное их отличие от объектов, работающих в постоянных условиях и со стабильными свойствами. Любая дорога – сложная система с переменными фазовыми состояниями и уникальными характеристиками. В традиционном подходе проектирования автомобильных дорог принято рассматривать дорогу в виде комплекса отдельных элементов, обладающих различными свойствами и объединенных в единую систему, которая должна обеспечить требуемую долговечность и транспортно-эксплуатационные показатели в условиях непрерывно происходящих изменений. Если рассмотреть отдельный участок дороги и особенности его взаимодействия с окружающей средой в течение годового цикла работы, то в процессе его службы отдельные конструктивные элементы будут непрерывно испытывать воздействие переменных температур, влажности, транспортных нагрузок и других факторов в различных фазовых состояниях.

Данное обстоятельство сформировало требование к разработке дорожно-строительных материалов, которые должны применяться в этих условиях. Обратимся к техническому регламенту Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (ТР ТС 014/2011) Согласно п. 14.2. «Производство, транспортирование, хранение и применение дорожно-строительных материалов и изделий», надежность их работы в различных конструктивных элементах автомобильной дороги и инженерных сооружений на ней должна обеспечиваться «в течение жизненного цикла под воздействием транспортных нагрузок, климатических и иных факторов в условиях, исключающих следующие последствия:

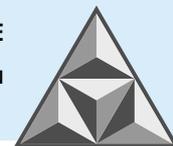
- а) разрушение автомобильной дороги или сооружений, или их участков (частей);
- б) необратимые деформации дорожных конструкций;
- в) недопустимое снижение основных транспортно-эксплуатационных характеристик автомобильной дороги или сооружений на ней». Пункт 14.3. устанавливает, что дорожно-строительные материалы и изделия в течение всего срока службы автомобильной дороги и дорожных сооружений на них должны быть устойчивы к воздействию транспортных, природных и иных факторов».

А в п. 14.4 указано:

«физико-механические свойства дорожно-строительных материалов должны обеспечивать расчетную устойчивость конструктивных элементов автомобильной дороги при совместном воздействии транспортной нагрузки и природных факторов».

Отметим, что в п. 14.3 содержится требование устойчивости дорожно-строительных материалов и изделий в течение всего срока службы автомобильной дороги. Такое требование, вероятно, является избыточным. В формате установившейся практики обычно применяют критерий гарантийного срока для результатов выполненных работ.

Проверка соответствия по пункту 14.3 ТР ТС 014/2011 приводит к необходимости применения ст. 238 УК РФ «Производство, хранение, перевозка либо сбыт товаров и продукции, выполнение работ или оказание услуг, не отвечающих требованиям безопасности». Согласно этой статье, неправомерная выдача или использование официального документа, удостоверяющего соответствие указанных товаров, работ или услуг требованиям безопасности, наказываются штрафом в размере до 300 тыс. руб. или в размере заработной платы, или иного дохода осужденного за период до двух лет, либо обязательными работами на



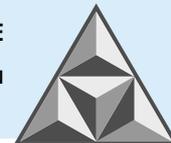
срок до 360 ч, либо ограничением свободы на срок до двух лет, либо принудительными работами на срок до двух лет, либо лишением свободы на тот же срок.

С учетом результатов исследований, созданные полуфабрикаты и переделы длительного хранения открывают возможности для развития нового класса материалов с большим сроком службы и обеспечения функциональной и деформационной устойчивости. При этом они не подпадают под действие п. 14.3 ТР ТС 014/2011, что, соответственно, исключает возможность применения ст. 238 УК РФ.

В чем же заключается преимущество переделов и полуфабрикатов материалов для дорожного строительства, по сравнению с традиционными? Переделы и полуфабрикаты призваны улучшить качество дорожных одежд. Применение инновационных композиционных материалов открывает перспективы для повышения показателей покрытий дорожных конструкций и увеличения срока безотказной их работы. Достижение этих целей становится возможным благодаря внедрению технологий ускоренного восстановления поверхностных слоев и упрощению процедур конструирования новых составов. При использовании ресурсосберегающих подходов, включающих местные и повторно переработанные компоненты, появляется возможность расширить временные рамки строительно-монтажных работ. Однако внедрение таких решений на практике сталкивается с рядом трудностей. Прежде всего, требуется заранее определить целевые функции и технико-функциональные характеристики разрабатываемого материала, а также установить соответствующие производственные процессы. Кроме того, необходимо проведение комплексного исследования закономерностей функционирования дорожного материала с учетом специфики составляющих компонентов и их влияния друг на друга.

Проектирование подобных материалов предполагает применение комплексного подхода, при котором концептуальное обоснование неразрывно связывается с их эксплуатационными параметрами и возможностью адаптации свойств под конкретные условия. Следует отметить, что технологические полуфабрикаты и композиционные переделы давно зарекомендовали себя в авиационной, машиностроительной и химической промышленности. Накопленный в этих секторах экономики практический опыт разработки, производства и применения переделов может быть адаптирован и использован для создания дорожно-строительных композиционных систем, особенно в контексте оптимизации технологий и повышения их гибкости. Передел, как процесс переработки или трансформации, имеет несколько достоинств. Во-первых, он позволяет получить более ценные продукты из исходного сырья, что положительно влияет на прибыль и конкурентоспособность. Во-вторых, в переделах могут быть успешно использованы вторичные ресурсы, что позволит вовлечь значительные объемы отходов и снизить нагрузку на окружающую среду. В-третьих, переделы способствуют решению проблемы получения продуктов с новыми свойствами. Они позволяют проектировать изменение поведения материала (в том числе – во времени) или сырья, из которого этот материал изготовлен, таким образом, чтобы получить продукт, отличающийся от исходного по нескольким требуемым параметрам. В-четвертых, переделы могут кардинальным образом улучшить качество выпускаемой строительной продукции.

В соответствии с обозначенными критериями представляется рациональным ввести новый термин «триггерные материалы» для обозначения композиций, имеющих не менее двух фазовых состояний устойчивого равновесия и способных переходить из одного состояния в другое при воздействиях бинарного характера (триггера).



Таким образом, проведенные исследования позволили сформировать направления будущих перспективных исследований в части получения строительных полуфабрикатов:

- разработка методов использования местного сырья и отходов промышленности в производстве композиционных полуфабрикатов;
- разработка методов испытаний полуфабрикатов в виде гранулированных переделов;
- разработка рецептур композиционных полуфабрикатов на основе гранулированных переделов под конкретные условия эксплуатации;
- совершенствование технологии производства композиционных полуфабрикатов в виде гранулированных переделов для получения и устройства дорожных покрытий;
- совершенствование технологии уплотнения полуфабрикатов в виде гранулированных переделов с формированием требуемого каркаса;
- определение температурных режимов укладки полуфабрикатов в виде гранулированных переделов в различном сочетании.

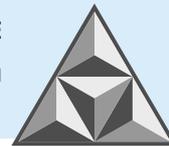
ВЫВОДЫ

1. Предлагается введение в предметную область стандартизации нового класса дорожно-строительных материалов – полуфабрикатов и технологических переделов. Также предлагается использовать новый технический термин – «триггерные материалы». Такие материалы имеют два и более фазовых состояния устойчивого равновесия и способны переходить из одного состояния в другое при воздействиях бинарного характера (триггера).

2. Разработаны и апробированы рецептуры гранулированных переделов с включением вторичных материалов, рекомендуемые к использованию в качестве ремонтных смесей, отличительной особенностью которых является возможность длительного хранения и укладки в холодном состоянии.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Игнатъев А.А.** Функционально устойчивые дорожные гранулированные смеси (переделы) длительного хранения: автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: спец. 2.1.8. Москва, 2024. DOI: 10.18720/SPBPU/2/r24-18.
2. **Ignatyev A.A.** Formation of the pavement frame from granular redesign by compaction // *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2024. Vol. 110. No. 11002. DOI: 10.4123/CUBS.110.2.
3. **Ignatyev A.A., Gotovtsev V.M., Gerasimov D.V., Razgovorov P.B.** The modeling of interfacial contacts in composites using the sitting drop-solid body system as an example // *Key Engineering Materials*. 2020. Vol. 869. P. 400-407. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.869.400.
4. **Ignatyev Aleksey A., Razgovorov Pavel B., Nagornov Roman S., Politaeva Natalya A, Mukhametova Liliya R., Pyashenko Svetlana B.** Composite Aluminosilicate Materials for Sorption Extraction of Impurity Substances of Vegetable Oils // *Resources*. 2022. Vol. 11. No. 9. DOI: 10.3390/resources11020009.
5. **Ignatyev A., Gerasimov D., Golikov I., Gotovtsev V.** Granulated asphalt mix based on industrial and domestic waste // *MATEC Web of Conferences : мат. конф. (Москва, 14–16 ноября 2018)*. Moscow: EDP Sciences, 2018. Vol. 251. № 01028. DOI: 10.1051/mateconf/201825101028.
6. **Ignatyev A.A., Gotovtsev V.M., Slepnev P.A.** Cold pelletized asphalt concrete mixture from reclaimed asphalt // *E3S Web Conferences*. 2023. Vol. 457.
7. Пат. 2701007 РФ. Способ получения гранулированного асфальтовяжущего на основе фосфогипса / **А.А. Игнатъев**; опубл. 24.09.2019, бюл. № 27.
8. **Прокофьев В.Ю., Разговоров П.Б., Ильин А.А.** Основы физико-химической механики экструдированных катализаторов и сорбентов. М.: КРАСАНД, 2012. 314 с.
9. **Тадмор З., Гогос К.** Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия, 1984. 632 с.



10. **Ребиндер П.А.** Избранные труды. Поверхностные явления в дисперсных системах. Ч. 2. Физико-химическая механика. М.: Наука, 1979. 469 с.
11. **Румянцев А.Н., Наненков А.А., Ломов А.А., Готовцев В.М., Сухов В.Д.** Структурированный асфальтобетон – новое дорожное покрытие // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика: мат. конф.* Воронеж: Воронеж. гос. лесотехн. ун-т, 2013. С. 23-25.
12. **Al-Mulla J., Makky S.** Preparation of sustainable asphalt pavements using polyethylene terephthalate waste as a modifier // *Zashchita Materiala*. 2017. Vol. 58. No. 3. P. 394-399.
13. **Khan I.M., Kabir S, Alhussain M.A., Almansoor F.F.** Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction // *Proc. Eng.* 2016. Vol. 145. P. 1557-1564.
14. **Hassani A., Ganjidoust H., Maghanaki A.A.** Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement // *Waste Management & Research*. 2005. Vol. 23. No. 4. P. 322-327.
15. **Modarres A., Hamed H.** Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET) // *Construction and Building Materials*. 2014. Vol. 68. P. 259-267.
16. **Leng Z. Padhan R.K., Sreeram A.** Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt // *Journal of Cleaner Production*. 2018. Vol. 180. P. 682-688.
17. **Худякова Т.С., Масюк А.Ф., Калинин В.Н.** Особенности структуры и свойств битумов, модифицированных полимерами // *Дорожная техника и технологии*. 2003. № 4. С. 174-181.
18. **Герасимов Д.В., Игнатьев А.А., Готовцев В.М., Голиков И.В.** Перспективы использования фосфогипса в производстве асфальтобетона // *Дороги и мосты*. 2018. № 40. С. 304-315.
19. **Gotovtsev V.M., Ignat'yev A.A.** The effect of structuring composite building materials // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Vol. 666. No. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012079.
20. **Разговоров П.Б., Игнатьев А.А., Абрамов М.А., Нагорнов Р.С.** Переработка алюмосиликатного сырья и отходов строительства метрополитена в композиционные сорбенты для очистки водных и маслосодержащих сред // *Умные композиты в строительстве*. 2020. Т. 1. Вып. 1. С. 10-26. URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5036/view> (дата обращения: 17.11.2025).
21. **Кочетков А.В., Леонтьев В.Ю.** Применение вяжущего материала на основе полиуретана для укрепления и ремонта защитных покрытий транспортных сооружений // *Транспортное строительство*. 2016. № 1. С. 7-10.
22. Пат. 2662493 РФ. *Битумная эмульсия и способ ее получения* / А.В. Кочетков; опубл. 26.07.2018, бюл. № 21.
23. **Кочетков А.В.** Битумная суспензия на твердом эмульгаторе // *Транспортные сооружения*. 2018. № 4. DOI 10.15862/15SATS418 [Электронный ресурс]. URL: <https://t-s.today/PDF/15SATS418.pdf> (дата обращения: 17.11.2025).
24. **Кочетков А.В., Андронов С.Ю., Иванов А.Ф. [и др.].** Битумная суспензия: под ред. Ю.Э. Васильева, Н.Е. Кокодовой. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2019. 192 с.

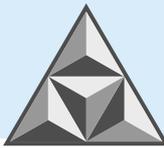
Поступила в редакцию 15.01.2026

Одобрена после рецензирования 13.02.2026

Принята к опубликованию 06.03.2026

REFERENCES

1. **Ignatyev, A.A.** Functionally stable road granulated mixtures (redesigns) for long-term storage: Abstract of D. Sc. dissertation: specialty 2.1.8. Moscow, 2024. DOI: 10.18720/SPBPU/2/r24-18 (in Russian).
2. **Ignatyev, A.A.** (2024), Formation of the pavement frame from granular redesign by compaction, *Construction of Unique Buildings and Structures*, vol. 110, no. 11002. DOI 10.4123/CUBS.110.2.
3. **Ignatiev, A.A., Gotovtsev, V.M., Gerasimov, D.V. and Razgovorov, P.B.** (2020), The modeling of interfacial contacts in composites using the sitting drop-solid body system as an example, *Key Engineering Materials*, vol. 869, pp. 400-407. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.869.400.
4. **Ignatyev, Aleksey A., Razgovorov, Pavel B., Nagornov, Roman S., Politaeva, Natalya A, Mukhametova, Liliya R. and Pyashenko, Svetlana B.** (2022), Composite Aluminosilicate Materials for Sorption Extraction of Impurity Substances of Vegetable Oils, *Resources*, vol. 11, no. 9. DOI: 10.3390/resources11020009.

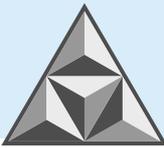


5. **Ignatyev, A. Gerasimov, D., Golikov, I. and Gotovtsev, V.** (2018), Granulated asphalt mix based on industrial and domestic waste, *MATEC Web of Conferences: conf. proc. (November 14–16, 2018)*, Moscow: EDP Sciences, vol. 251, no. 01028. DOI: 10.1051/mateconf/201825101028.
6. **Ignatyev, A.A., Gotovtsev, V.M. and Slepnev, P.A.** (2023), Cold pelletized asphalt concrete mixture from reclaimed asphalt, *E3S Web Conferences*, vol. 457.
7. Pat. 2701007 Russian Federation. *Method for producing granulated asphalt binder based on phosphogypsum / A.A Ignatyev*; publ. 24.09.2019, Bull. 27 (in Russian).
8. **Prokofiev, V.Yu., Razgovorov, P.B. and Ilyin, A.A.** (2012), Fundamentals of physico-chemical mechanics of extruded catalysts and sorbents. Moscow: KRASAND, 314 p. (in Russian).
9. **Tadmor, Z. and Gogos, K.** (1984), Theoretical foundations of polymer processing. Moscow: Chemistry, 632 p. (in Russian).
10. **Rebinder, P.A.** (1979), Selected works. Surface phenomena in disperse systems. Pt. 2. Physico-chemical mechanics. Moscow: Nauka, 469 p. (in Russian).
11. **Rumyantsev, A.N., Nanenkov, A.A., Lomov, A.A., Gotovtsev, V.M. and Sukhov, V.D.** (2013), Structured asphalt concrete – a new road surface, *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika: mat. konf. [Current directions of scientific research of the XXI century: theory and practice: conference proceedings]*, Voronezh: Voronezh State Forestry Engineering Univer., pp. 23-25 (in Russian).
12. **Al-Mulla, J. and Makky, S.** (2017), Preparation of sustainable asphalt pavements using polyethylene terephthalate waste as a modifier, *Zashchita Materiala*, vol. 58, no. 3, pp. 394-399.
13. **Khan, I.M. Kabir, S, Alhussain, M.A. and Almansoor, F.F.** (2016), Asphalt Design Using Recycled Plastic and Crumb-rubber Waste for Sustainable Pavement Construction, *Proc. Eng.*, vol. 145, pp. 1557-1564.
14. **Hassani, A., Ganjidoust, H. and Maghanaki, A.A.** (2005), Use of plastic waste (poly-ethylene terephthalate) in asphalt concrete mixture as aggregate replacement, *Waste Management & Research*, vol. 23, no. 4, pp. 322-327.
15. **Modarres, A. and Hamed, H.** (2014), Developing laboratory fatigue and resilient modulus models for modified asphalt mixes with waste plastic bottles (PET), *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 259-267.
16. **Leng, Z., Padhan, R.K. and Sreeram, A.** (2018), Production of a sustainable paving material through chemical recycling of waste PET into crumb rubber modified asphalt, *J. Clean. Prod.*, vol. 180, pp. 682-688.
17. **Khudyakova, T.S., Masyuk, A.F. and Kalinin, V.N.** (2003), Features of the structure and properties of bitumens modified with polymers, *Dorozhnaya tekhnika i tekhnologii [Road Technology and Equipment]*, no. 4, pp. 174-181 (in Russian).
18. **Gerasimov, D.V., Ignatyev, A.A. Gotovtsev, V.M. and Golikov, I.V.** (2018), Prospects for the use of phosphogypsum in asphalt concrete production, *Roads and Bridges*, no. 40, pp. 304-315 (in Russian).
19. **Gotovtsev, V.M. and Ignat'yev, A.A.** (2019), The effect of structuring composite building materials, *IOP Conference Ser.: Mat. Sci. Eng.*, vol. 666, no. 1. DOI: 10.1088/1757-899X/666/1/012079 (in Russian).
20. **Razgovorov, P.B., Ignatyev, A.A., Abramov, M.A. and Nagornov, R.S.** (2020), Processing of aluminosilicate raw materials and metro construction dumps into composite sorbents for cleaning water and oil-containing media, *Umnye kompozity v stroitel'stve [Smart Composite in Construction]*, vol. 1, no. 1, pp. 10-26. Available at: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/5036/view> (accessed: 17.11.2025) (in Russian).
21. **Kochetkov, A.V. and Leontiev, V.Yu** (2016), Application of polyurethane-based binder for strengthening and repairing protective coatings of transport structures, *Transportnoe stroitel'stvo [Transport Construction]*, no. 1, pp. 7-10 (in Russian)
22. Pat. 2662493 Russian Federation. *Bitumen emulsion and method of its production / A.V. Kochetkov*; publ. 26.07.2018, Bull. 21 (in Russian).
23. **Kochetkov, A.V.** (2018), Bitumen suspension on solid emulsifier, *Transport Structures*, no. 4. DOI: 10.15862/15SATS418. Available at: <https://t-s.today/PDF/15SATS418.pdf> (accessed: 17.11.2025) (in Russian).
24. **Kochetkov, A.V., Andronov, S.Yu. and Ivanov, A.F. [et al.]** (2019), Bitumen suspension: monograph; ed. By Yu.E. Vasiliev, N.E. Kokodeeva. Saratov: Saratov State Technical Univer. 192 p. (in Russian)

Received 15.01.2026

Approved 13.02.2026

Accepted 06.03.2026



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 167:316.72

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-84-96

Архитектурные мегапроекты императора Цинь Шихуанди

Н.А. Личак, Д.А. Личак, Н.Е. Ушакова

Наталья Алексеевна Личак^{1,*}, Наталья Евгеньевна Ушакова¹

¹Ярославский государственный технический университет, Ярославль, Российская Федерация
*lichakna@ystu.ru**, *ushakovane@ystu.ru*

Дмитрий Алексеевич Личак²

²Ярославский государственный педагогический университет им. К.Д. Ушинского, Ярославль, Российская Федерация
d_lichak@mail.ru



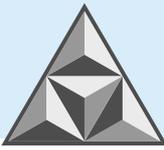
Рассмотрены историко-культурные особенности создания и сохранения трех строительных мегапроектов Цинь Шихуанди. Великая Китайская стена, дворцовый комплекс Эпандун и терракотовая армия должны были стать охраняемыми объектами и жилищами императора при жизни и после смерти. Указанные образцы культурного наследия различаются по основной идее создания, тематике, стилистике, однако их объединяющим свойством является оригинальность и сохранение памяти о Великом императоре. Цель работы – исследование историко-архитектурного содержания объектов китайской эпохи Цинь. В основе лежат наблюдения авторов и их оценка сохранности исследуемых объектов. Эксперты ЮНЕСКО официально зафиксировали ценность, оригинальность и сложность конструкций, характерных для этих крупнейших архитектурных проектов. Инициативы императора продолжают формировать китайскую идеологию и на современном этапе. Благополучие жителей страны во многом определяется особенностями среды, в которой динамично развивающееся пространство соседствует с уникальными памятниками архитектуры и культуры.

Ключевые слова: архитектура и строительство, культурные проекты, Цинь Шихуанди, Великая Китайская стена, терракотовая армия, дворцовый комплекс Эпандун

Для цитирования:

Личак Н.А., Личак Д.А., Ушакова Н.Е. Архитектурные мегапроекты императора Цинь Шихуанди // *Умные композиты в строительстве*. 2026. Т. 7, вып. 1. С. 84-96.
URL: <https://comincon.ru/ru/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-84-96



SCIENTIFIC ARTICLE

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-84-96

Architectural megaprojects of emperor Qin Shi Huang

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

¹Nataliya Alekseevna Lichak^{1,*}, Natalia Evgnievna Ushakova¹

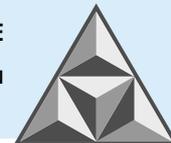
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russian Federation

*lichakna@ystu.ru**, *ushakovane@ystu.ru*

Dmitriy Alekseevich Lichak²

²Yaroslavl State Pedagogical University named after K.D. Ushinsky, Yaroslavl, Russian Federation

d_lichak@mail.ru



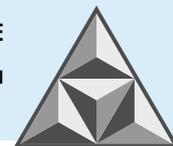
The paper examines the historical and cultural aspects of the creation and preservation of three of Qin Shi Huang's major construction projects. The Great Wall of China, the Epondong Palace Complex and the Terracotta Army were intended to serve as protective structures and residences for the emperor both during his lifetime and after his death. These examples of cultural heritage differ in their underlying concept, theme and style, yet their unifying feature is their originality, as well as the preservation of the memory of the Great Emperor. The purpose of this study is to examine the historical and architectural significance of sites from China's Qin Dynasty. It is based on the authors' observations and their assessment of the state of preservation of the objects under study. UNESCO experts have officially recognised the value, originality and complexity of the structures characteristic of these major architectural projects. The Emperor's initiatives continue to shape Chinese ideology even today. The well-being of the country's inhabitants is largely determined by the characteristics of an environment in which a dynamically developing urban landscape coexists with unique architectural and cultural monuments.

Keywords: architecture and construction, cultural projects, Qin Shi Huang, Great Wall of China, terracotta army, Epangun Palace Complex

For citation:

Lichak N.A., Lichak D.A., Ushakova N.E. Architectural megaprojects of emperor Qin Shi Huang // Smart Composite in Construction. 2026. Vol. 7, Iss. 1. P. 84-96.
URL: <https://comincon.ru/en/nauka/issue/7081/view>

DOI: 10.52957/2782-1919-2026-7-1-84-96



ВВЕДЕНИЕ

Несмотря на короткий период, правление династии Цинь стало одним из самых ярких в истории Китая. На современном этапе исследователи, изучая историю Китая и археологические находки эпохи династии Цинь, задают все больше вопросов об этом времени. Актуальность данной темы определяется уникальностью периода развития страны. До начала III в. до н.э. на территории Поднебесной находились несколько разрозненных воюющих сообществ. В 221 г. до н.э. Цинь Шихуанди объединил Китай и стал первым единовластным императором.

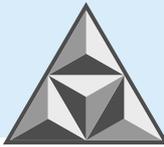
Цинь Шихуанди был великим реформатором. В период его правления введены стандарты мер и весов, письменности и денег, построены тысячи километров дорог, водные каналы, начато строительство Великой Китайской стены, сформировано законодательство и регулярные войска. Система государственного управления, введенная императором, сохранялась в течение сотен лет.

Имя Цинь Шихуанди, которое взял Ин Чжэн, переводится как «Первый император династии Цинь» (Цинь – название царства и ханьской народности, которым ранее правил этот человек; Ши – первый; Хуан – желтый, имя легендарного императора, который по легенде основал Китай; Ди – император) [1].

Прошли десятилетия, пока Китай не стал единым под эгидой императора. Но подчинить – не значит объединить [2]. Ему потребовалось изменить сознание граждан, их ценности, построить новое общество, в котором былые достижения местной элиты не имели значения. Первый император объединенного Китая поставил перед собой цели, которые включали проведение реформ с целью создания прочной основы единого государства и развития инфраструктуры, включающей строительство новых архитектурных комплексов. Цинь Шихуанди предпринял ряд управленческих и градостроительных мер, поделил страну на 36 новых провинций, ввел более жесткую иерархию городов по административному признаку и поддерживал крупные ирригационные работы по расширению сети каналов. Данную трансформацию предполагалось провести через строгое планирование хозяйственной деятельности, а также за счет целенаправленного использования всех имеющихся ресурсов [1]. Император направил общие усилия на реализацию важных, с его точки зрения, «мегапроектов».

Методы и результаты исследования истории архитектурных памятников Китая императорской династии Цинь

Изучение основ строительства в Китае в III в. до н.э. (как историко-архитектурного и градостроительного феномена) позволило применить различные методы научного исследования. При подготовке настоящей работы авторами были использованы классические общенаучные методы – наблюдение, синтез, дедукция, сравнение. Они помогли познать направления развития культурной политики китайского руководства. Наблюдение (как метод сбора информации) был применен при непосредственном контакте ученых и анализе объектов исследования, сохранившихся до наших дней. В ходе музейного посещения изучены особенности сохранения памятников китайской культуры, выявлены их основные элементы и признаки, определены структурные части. Использование синтеза подразумевало восстановление этапов конкретного события, а индукции – перевода от частного к общему положению (зачастую – вероятностному). В условиях использования анализа (как общенаучного метода) это позволяло двигаться от сложного к простому. Метод дедукции был



использован с целью выведения из гипотезы следствий для развития ее содержания и объяснения наблюдаемых явлений.

Великая Китайская стена – символ развития китайской архитектуры

Такой важнейший памятник в истории человечества, как Великая Китайская стена, является образцом древней уникальной архитектуры. Оборонительная функция данного объекта остается красноречивым свидетельством величия китайской культуры [3].

Район Великого китайского «щита» являлся перекрестком, на котором пересекались различные культурные традиции. Подобная многофункциональность не была китайским изобретением. Оборонительные валы и стены строились и в Римской империи. На Востоке были возведены как минимум три «вала Чингисхана». И в нашем молодом государстве появлялись сооружения, похожие на сооружения Поднебесной – Китайгородская стена, Заволжский исторический вал, Приморская стена. Функциональность сооружений была связана с тем, что валы, в первую очередь, защищали границы миров, а затем становились площадью культурного обмена для различных народов [4].

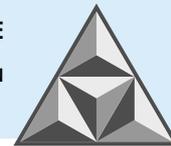
Китайская цивилизация долгие годы была под надежной защитой: стена спасала жителей от врагов с древнейших времен до позднего средневековья [5]. Кочевники разрушали Китайскую стену, а правители неоднократно ее восстанавливали. Чем больше подступали чужие земли (например, монгольские) к стене, тем меньше нуждался народ в таком сооружении. Только качественные строительные материалы – камень, песок и кирпич – спасали мощную строительную конструкцию от полного разрушения.

Символ единства на современном этапе можно увидеть на участках Шаньхайгуань, Чжэнбэйтай, Чжэнбэйтай, Цзяюйгуань, Цзиньшаньлин, Бадалин, Хуанъягуань, Дацзинмэнь, Цзяошань, Циншаньгуань, Мутяньюй (рис. 1), Симатай, Губейкоу, Цзянькоу, Хушан, Юмэнькоу, Датун, Цзюйонгуан, Яньмэньгуань.



Рис. 1. Участок Великой Китайской стены Мутяньюй (фото автора)

Fig. 1. Section of the Great Wall of China Mutianyu (author's photo)



Символизм архитектурного строения проявляется и в этимологии. Великая Китайская стена в переводе означает «непреодолимый барьер; негибкое, могучее препятствие» [5] или «стена длиной 10000 ли» [6]. Большое число людей, участвовавших в возведении стены, подтверждало способность населения мобилизоваться в случае вражеского нападения. Исследователи отмечают, что в процессе возведения определенных участков стены в некоторые годы участвовало до 2 млн. жителей [7]. В целом сам факт построения такого строительного сооружения работал на имидж страны, так как способность осуществить проект уже явилась прямым предупреждением для недоброжелателей.

Великая Китайская стена играла решающую роль в развитии этнической ассимиляции на протяжении всей истории государства. Построенная как защитное сооружение, она способствовала культурному обмену и развитию между соседями. Императоры поводили политику по культурной ассимиляции некитайских этносов (тюрков, кочевников и др.). Пустующие территории силами жителей превращались в процветающие поселения. Торговая политика страны (например, конные ярмарки) стимулировала развитие «монгольских» отношений [8]. Решение торговых вопросов, формируясь на всемирно известном Шелковом пути, частично выстраивалось «вдоль стены», что укрепляло дипломатический и культурный обмен Китая. О новых достижениях поэты слагали поэмы, художники писали картины, а музыканты создавали свои произведения.

Великая Китайская стена на протяжении нескольких последних десятилетий находится под государственной защитой. В 1961 г. на учет были взяты участки Бадалин, Шанхайгуань и Цзяюйгуань. В последующие годы добавились и другие охраняемые объекты, включая Цзиньшаньлин и Юймэньгуань. Усилия по их сохранению на сегодняшний день закреплены в Китайской Народной Республике законодательно. В 1987 г. в список ЮНЕСКО включен весь комплекс стены, который стал объектом Всемирного культурного наследия.

В 2021 г. Великая китайская стена была признана образцом защиты всемирного наследия, а в 2024 г. нормативную поддержку получили общественные инициативы в части сохранения культурного опыта. Эти усилия подтверждают, что объект китайского архитектурного творчества останется оберегаемым и для будущих поколений.

В 2006 г. был принят Указ о защите Великой китайской стены, устанавливающий правовые рамки ее сохранения. Правовые инициативы последних лет определяют меры по резервации, реставрации, археологическим раскопкам и цифровым проектам.

Дворцовый комплекс Эпангун – архитектурный объект эпохи Цинь Шихуанди

Дворец Эпангун (Эпан, Эр-пан, Апан, Афан) является еще одним масштабным сооружением указанного императора. Задуманный как комплекс строений для собственного возвеличивания еще при жизни Цинь Шихуанди, он продолжал и после его смерти обеспечивать влияние ванов Поднебесной на территориальных соседей.

Комплекс Эпангун до сих пор называют «величайшим сооружением Китая». Дворец был построен на восьмиметровой платформе, а общая композиция зданий воссоздавала расположение звезд на небосводе. Дворцовый ансамбль мог одновременно вмещать 10 тыс. гостей. К сожалению, в конце правления династии Цинь он сгорел в результате действий повстанческих армий.

Карта реставрации Главного зала дворца Эпангун представлена на рис. 2.



Рис. 2. Карта реставрации Главного зала дворца Эпангун [9]

Fig. 2. Epangun Palace Main Hall Restoration Map [9]

Описания комплекса Эпангун встречаются в «Исторических записках» Сыма Цяня и других письменных источниках. Возведение данного объекта как резиденции и символа власти императора Цинь Шихуанди было начато недалеко от Сианя в 212 до н.э., однако прекратилось из-за его гибели в 207 до н.э. При династиях Суй и Тан (581 – 907 гг.) на территории комплекса существовало военное поселение Эчэн. Восприятие Эпан поэтом Ду Му приведено в оде «Эпангун фу»: «горы Шу облысели» (лес срубили для стройки) – «появился Эпан», где хранится много драгоценностей [10]. Находившийся на слиянии рек Вэйхэ и Цзаохэ, дворец Эпангун был описан путешественниками в более поздний период. На протяжении последних семи десятков лет ведутся раскопки, в ходе которых обнаружены фрагменты трех защитных стен из осадочной горной породы, водовод в одной из стен и платформа (из утрамбованной земли) для переднего зала дворца. Отсутствие завалов кирпича и черепицы объясняется тем, что дворец не был достроен, а в описания, возможно, были включены планы строительства.

Реконструкция дворца Эпангун, проводимая в XX столетии, на современном этапе законсервирована. В ходе первого обследования (1956 г.) руины Эпана были внесены в реестр охраняемых памятников провинциальной культуры, а в 1961 г. их статус повысили до всекитайского. На месте раскопок открыт археологический парк, где все постройки, предназначенные для реконструкции, возведены по результатам раскопок. По мнению ученых, на площади более 10 км² располагались залы, одним из которых был Главный зал, наиболее значимый по размерам и богатству; его территория равнялась 136 футбольным полям. Китайский император славился не только своими подвигами, но и расточительным образом жизни.

В 1991 г. изучение этого места организовано совместно с экспертами ЮНЕСКО, которые в итоговом заключении официально зафиксировали, что фундамент Эпан представляет собой образец самого большого дворцового комплекса в мире.

Строительство мавзолея – архитектурный мегапроект

Третьей целью императора Цинь Шихуанди явилось строительство собственного мавзолея, причем циклопического размера. Случайная находка в 1970-х гг. (в тридцати километрах от Сианя) возвела гробницу императора в ранг одной из самых известных в мире.

Местные жители деревни Янгин-запад при рытье колодца в высокой насыпи нашли терракотовые статуи воинов. Территория была настолько большая, что внутри свободно разместился огромный дворцовый комплекс, построенный в нескольких уровнях. Каждый уровень имел свое ограждение.



В ходе раскопок в Яме 1 найдена настоящая армия, состоявшая из 1087 воинов. Пехотный и кавалерийский корпуса стояли в боевом порядке, а лучники защищали фланги. Согласно современным оценкам, только в этой яме с напольными галереями длиной 230 м находится около 6000 статуй воинов и лошадей. Сейчас они полностью включены в состав экспонатов музея, открытого в октябре 1979 г. К северу от раскопа были обнаружены две другие ямы, в которых найдены аналогичные предметы (1500 воинов, повозки и лошади – в Яме 2; 68 офицеров и сановников, повозка с четырьмя лошадьми – в Яме 3). Эти ямы были временно засыпаны, а извлеченные из них предметы разместили в выставочных залах, примыкающих к северному и южному концам большого зала местного музея. Остальные находки сделаны на западном склоне кургана; среди них оказались, в частности, две вагонетки в натуральную величину, изготовленные из литой бронзы. По текущим оценкам, статуи армии мавзолея Цинь Шихуанди, наиболее вероятно, должны были представлять точную численность императорской гвардии [11].

И. Шен отмечает: когда зрители впервые попадают в галереи «Эпоха империй: китайское искусство династий Цинь и Хань (221 – 220 гг. до н.э.)», они сталкиваются лицом к лицу с фигурами четырех воинов (из керамики, в натуральную величину) в характерных позах (рис. 3).

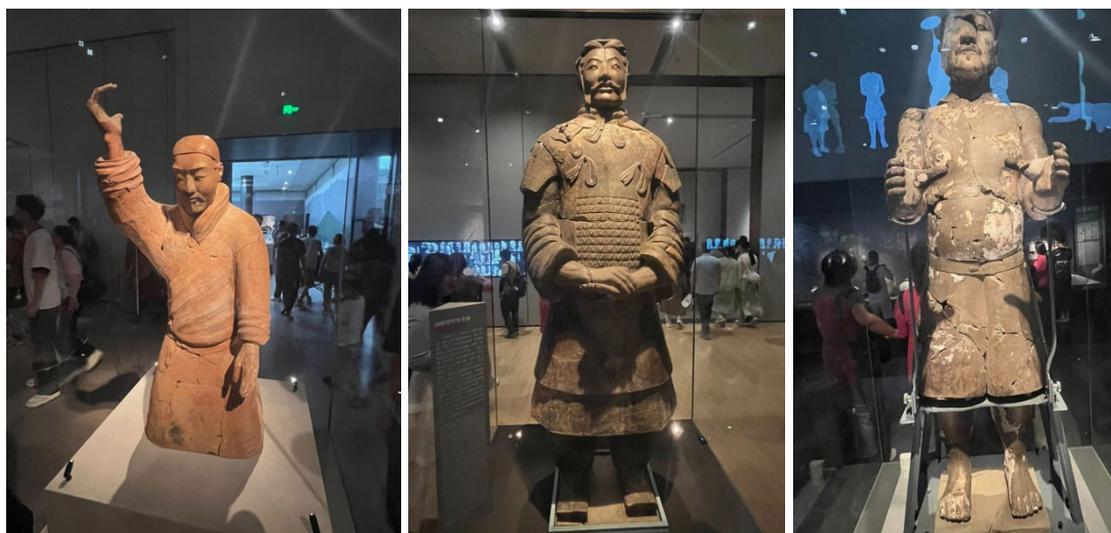


Рис. 3. Керамические фигуры воинов в натуральную величину (фото автора)

Fig. 3. Life-size ceramic figures of warriors (author's photo)

Помимо статуй, можно увидеть силуэты фигур воинов в доспехах, уходящих на темном фоне; тем самым зрителю предлагается представить армию, состоящую из тысяч таких скульптур. При этом некоторые фигуры воинов кажутся безголовыми (имитация того, что было найдено в ямах Первого императора Цинь в Сиане) [12].

Описывая достижения китайской архитектуры III в. до н.э., можно с уверенностью говорить об уникальности терракотовых воинов. Их количество и мастерство создания не имело аналогов ни до, ни после правления Первого императора Цинь. В качестве основного материала для их изготовления была использована глина, однако при создании реализована интеграция двух художественных техник – лепки и штамповки, которые использовали для декорирования бронзовых предметов быта и украшений. Это сочетание для изготовления «трехмерных артефактов» позволило создать уникальный вид совершенно нового, не известного донныне искусства [13].

Важно отметить, что особенности организации таких масштабных работ, использование тех или иных материалов, а также источники финансирования проекта до сих пор не являются



до конца изученными. Например, специалисты по терракотовым фигурам считают, что строительство императорской гробницы Первого императора Цинь было весьма качественно организовано и спланировано. Только отбор и подготовка глины для производства терракотовой армии, несомненно, были крупномасштабными. Возможно, глина централизованно подвозилась и складировалась, а затем распределялась среди ремесленников. В ходе выполнения работ каждый мастер и его бригада выбирали различные смеси и использовали способ производства в соответствии с изготавливаемыми фигурами.

Допускается, что такой систематический государственный проект потребовал добычи большого количества глины в районе Сяньян (столица Цинь) или в большем по размеру регионе, или путем создания нескольких центров в стране [14].

Кроме того, остается невыясненным вопрос, касающийся изображения воинов. А. Наческу предполагает, что некоторые из первых ученых, писавших о терракотовых воинах, представляют их как портреты солдат армии Первого императора, которых великий государственный деятель III в. до н.э. Цинь Шихуанди когда-либо видел в свои владениях [11].

Безусловно, огромные ресурсы и ручной труд, необходимые 2200 лет назад для изготовления такой армии, способствовали созданию мирового символа военных и художественных достижений династии Цинь. Впрочем, и о размахе строительства до сих пор имеются весьма скудные сведения; к настоящему времени исследовано содержимое лишь четырех ям. В первом раскопе обнаружена пехота, во втором – лучники, колесницы, пехота и кавалерия. В Яме 3, меньшего размера, обнаружены фигуры высокопоставленных чиновников, а четвертый раскоп оказался пуст.

Археологи подозревают, что многое еще остается неоткрытым. Когда-то раскрашенные в яркие цвета, фигуры представляли многочисленные военные занятия и звания [11]. Характерно, что каждого участника отличали индивидуальные черты лица и все они имели настоящее оружие (рис 4).

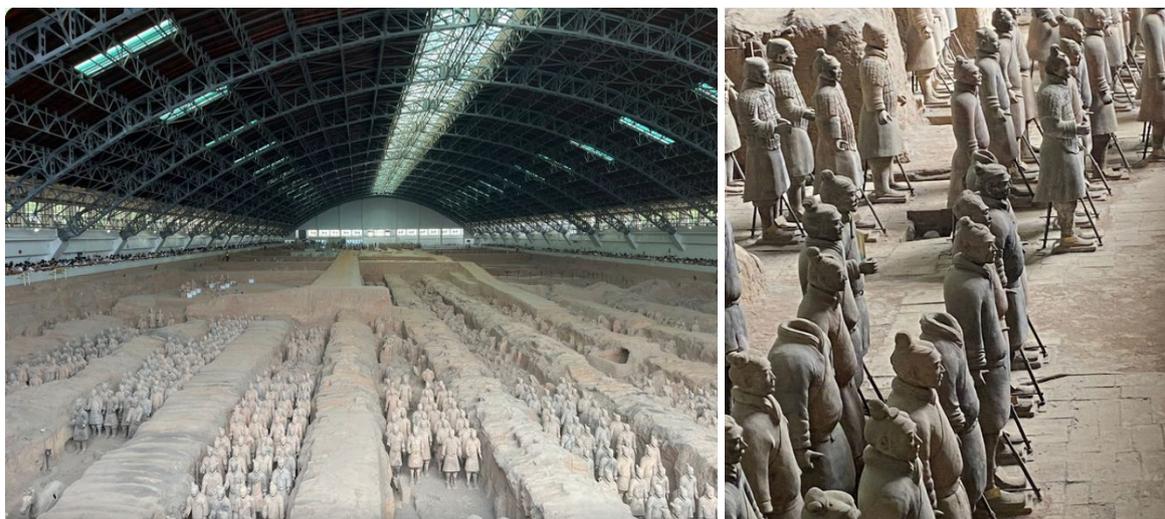


Рис. 4. Терракотовая армия в г. Сяньян (фото автора)

Fig. 4. Terracotta Army in Siyan (author's photo)

Военный комплекс на сегодняшний день включает статуи колесниц, лошадей, чиновников, акробатов и музыкантов и является частью целого некрополя из помещений, конюшен и залов в непосредственном окружении мавзолея Цинь Шихуанди, расположенного под огромным могильным холмом. Вместе с армией было найдено более тысячи единиц



различных видов оружия. Для ученых остался загадкой тот факт, что оно не покрылось ржавчиной; даже спустя 2000 лет оружие находится в рабочем состоянии.

Ученые установили, что воины и лошади были изготовлены в разных местах. Масса лошадей составляла около 200 кг, а статуй воинов – 135 кг. Вместе с глиняными статуями воинов и лошадей также обнаружены статуи гражданских лиц (чиновники, музыканты и акробаты). Также найдено около сотни боевых бронзовых колесниц с элементами из меди и золота. На вооружении у китайской армии состояли и деревянные колесницы, но они не сохранились [15, 16]. Перед исследователями поставлены многочисленные вопросы, но общепризнанным является факт, что и внутреннее убранство мавзолея, и использованные строительные материалы подчеркивают намерение окружить императора тем, что ему, как считалось, потребуется в загробной жизни. Создание такого мегапроекта служило цели укрепления власти правителя при его жизни, а также демонстрации превосходства Цинь Ши Хуанди, способного мобилизовать материальные и рабочие ресурсы, и знания, необходимые для создания чего-то беспрецедентного масштаба и великолепия.

Техника и мастерство исполнения фигур воинов свидетельствуют о высочайшем уровне развития китайского художественного искусства в III в. до н.э. До обнаружения терракотовой армии эпохой расцвета китайского искусства считалось время династии Тан (правила в Китае на несколько веков позже). Ученые продолжают делать сенсационные открытия на месте раскопок, но к исследованию гробницы приступить пока не решаются.

С 1981 г. данная территория внесена в список наиболее охраняемых культурных объектов Китая.

ВЫВОДЫ

Политика, проекты и философия первого императора Китая Цинь Шихуанди оказали большое влияние на китайское общество, политику и архитектуру. Жизнь крупнейшего государственного деятеля отмечена выдающимися достижениями, достигнутыми немалой ценой. Однако наследие императора продолжает вдохновлять исследователей и радовать архитекторов и туристов.

Самые ранние участки Великой Китайской стены были построены гражданами стран с целью сдержать захватчиков. После периода Воюющих царств (475 – 221 гг. до н.э.) первый император Китая, уничтоживший шесть государств и основавший династию Цинь (221 – 206 гг. до н. э.), приказал укрепить и расширить Великую стену, чтобы защитить территорию от заклятого врага – кочевого племени хунну.

Особенности строительства и скульптуры, выбор материалов и инструментов для реализации архитектурных мегапроектов Цинь Шихуанди обеспечили им высокое качество и сохранность, что ныне дает возможность изучать их не только археологам, но и антропологам, искусствоведам, строителям. Рассуждая о технике возведения каждого из трех рассмотренных нами объектов, исследователи отмечают уникальность, точность исполнения деталей и их функциональную неповторимость. Указанные объекты династии Цинь – Великая Китайская стена, дворец Эпангун и терракотовая гробница – по праву составили большую архитектурную триаду, известную во всем мире.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Лучкова В.И., Задвернюк Л. В.** Градостроительство древнего и средневекового Китая : учеб. пособие / В. И. Лучкова, Л. В. Задвернюк. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2012. 140 с.



2. **Цзин М.** Основные этапы формирования традиционной китайской культуры // *Социология*. 2024. № 1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-etapy-formirovaniya-traditsionnoy-kitayskoy-kultury> (дата обращения: 09.11.2025).
3. **Личак Н.А., Ушакова Н.Е., Малышев И.Д.** Тенденции развития креативных пространств: ярославский опыт // *Умные композиты в строительстве*. 2025. Т. 6, вып. 1. С. 73-83.
4. **Ян Ян, Хуэйтин Юань.** Великая Китайская стена символизирует культурное наследие страны // <https://rg.ru/2022/10/31/strojka-skvoz-tysiacheletia.html?ysclid=me4nr76хуб427689250> (дата обращения: 14.11.2025).
5. **Останин В.А.** От великой китайской стены к идее единой судьбы человечества Си Цзиньпина // *Российско-китайские исследования*. 2020. Т. 4. № 4. С. 275-287.
6. **У Сяолинь.** Изображение Великой Китайской стены (Чанчэн), как новый жанр искусства современного Китая // *Вестник Челябинского государственного университета*. 2021. № 9. С. 200-215.
7. **Нефедов С.А.** О демографических циклах в истории Китая // *Всемирная история. Институт истории и археологии УрО РАН*. URL: <http://book.uraic.ru/elib/authors/NEFEDOV/Science/China/China1.htm> (дата обращения: 14.07.2025).
8. Великая Китайская стена // URL: <https://www.thechinajourney.com/ru/> (дата обращения: 09.10.2025).
9. Chinese Palace – Ultimate Introduction to Imperial Palaces in the history of China. URL: <https://www.chinafetching.com/palaces-in-china> (дата обращения: 14.11.2025).
10. **Комиссаров С.А., Соловьев А.И.** Дворец, который мог бы стать самым большим в мире // *Вестник Новосибирского гос. ун-та. Сер.: История, филология*. 2019. № 18 (10). С. 16-23.
11. **Сюй С.** Пластическая система и художественные характеристики терракотовых воинов династии Цинь в Китае // *Bulletin of the International Centre of Art and Education*. 2023. № 1. С. 148-158.
12. Терракотовая армия первого императора Китая Династия Цинь. III век до н. э.: буклет / Мин-во культуры и массовых коммуникаций Российской Федерации, Фед. агентство по культуре и кинематографии, Гос. ист. музей, Гос. департ. сохранения культурного наследия Китайской Нар. Респ. [и др.]. М.: Гос. ист. музей, 2006.
13. **Лю Т.** Художественные особенности и скульптурная техника терракотовой армии // *Рефлексия*. 2024. № 3. С. 60-64.
14. Искусство керамики: стрельба из терракотовой армии в династии Цинь // URL: <https://www.teasenz.com/chinese-tea/the-firing-of-terracotta-figures-of-the-qin-dynasty.html> (дата обращения: 14.10.2025).
15. **Кащеева А.Б.** Терракотовая армия Цинь Шихунади как достижение культуры мира // VIII Машеровские чт.: Мат. Межд. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и мол. ученых, 16-17 октября 2014 г. / Витебск: Витебский гос. ун-т им. П.М. Машерова, 2014. С. 97.
16. **Jianen C., Jinsong S.** 21st-Century Archaeological Discoveries of the Early Nomadic Cultural Remains – Centered in the Middle Section of the Great Wall Area in Inner Mongolia Autonomous Region // *Journal of Siberian Fed. Univer. Human. Soc. Sci.* 2021. Vol. 14. № 8. P. 1121-1138.

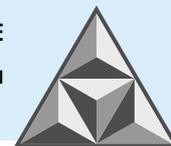
Поступила в редакцию 15.12.2025

Одобрена после рецензирования 15.01.2026

Принята к опубликованию 18.02.2026

REFERENCES

1. **Luchkova, V.I. and Zadvernyuk, L.V.** (2012), *Urban Planning in Ancient and Medieval China: Textbook* / V.I. Luchkova, L.V. Zadvernyuk, Khabarovsk: Izd-vo Tikhookoan. gos. un-ta, 140 p. (in Russian).
2. **Czin, M.** (2024), The main stages in the development of traditional Chinese culture, *Sociologiya [Sociology]*, no. 1 (in Russian). Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/osnovnye-etapy-formirovaniya-traditsionnoy-kitayskoy-kultury> (accessed: 09.11.2025).
3. **Lichak, N.A., Ushakova, N.E. and Malyshev, I.D.** (2025), Trends in the development of creative spaces: the experience of Yaroslavl, *Smart Composite in Construction*, vol. 6, iss. 1, pp. 73-83 (in Russian).

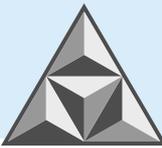


4. **Yan, Yan and Xue`jtin, Yuan`** (2022), The Great Wall of China symbolises the country's cultural heritage, Available at: <https://rg.ru/2022/10/31/strojka-skvoz-tysiacheletia.html> (in Russian) (accessed: 14.11.2025).
5. **Ostanin, V.A.** (2020), From the Great Wall of China to Xi Jinping's vision of a shared future for mankind, *Rossijsko-kitajskie issledovaniya [Russian-Chinese studies]*, vol. 4, no 4, pp. 275-287 (in Russian).
6. **Syaolin', U.** (2021), Representations of the Great Wall of China (Changcheng) as a new genre in contemporary Chinese art, *Vestnik Chelyabinskogo gosudarstvennogo universiteta [Bulletin of Chelyabinsk State University]*, no. 9, pp. 200-215 (in Russian)
7. **Nefedov, S.A.** (2025), On Demographic Cycles in Chinese History, *Vsemirnaya istoriya. Institut istorii i arkhologii UrO RAN [World History. Institute of History and Archaeology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences]*. Available at: <http://book.uraic.ru/elib/authors/NEFEDOV/Science/China/China1.htm> (accessed: 14.07.2025) (in Russian).
8. The Great Wall of China (2025), Available at: <https://www.thechinajourney.com/ru/> (accessed: 14.07.2025) (in Russian).
9. Chinese Palace – Ultimate Introduction to Imperial Palaces in the history of China (2025), Available at: <https://www.chinafetching.com/palaces-in-china> (accessed: 14.11.2025).
10. **Komissarov, S.A. and Soloviev, A.I.** (2019), A palace that could have become the largest in the world, *Vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta. Ser.: Istoriya, filologiya [Bulletin of Novosibirsk State University. Ser.: History, Philology]*, vol. 18, no. 10, pp. 16-23 (in Russian).
11. **Syuj, S.** (2023), The sculptural style and artistic characteristics of the terracotta warriors of the Qin Dynasty in China, *Bulletin of the International Centre of Art and Education*, no. 1, pp. 148-158 (in Russian).
12. The Terracotta Army of China's First Emperor: The Qin Dynasty, 3rd century BC: booklet (2006), Ministry of Culture and Mass Communications of the Russian Federation, Federal Agency for Culture and Cinematography, State Historical Museum, State Department for the Preservation of Cultural Heritage of the People's Republic of China [et al.]. Moscow: State Historical Museum (in Russian).
13. **Lyu, T.** (2024), Artistic features and sculptural techniques of the Terracotta Army, *Refleksiya*, no. 3, pp. 60-64 (in Russian).
14. The Art of Ceramics: The Terracotta Army of the Qin Dynasty (2025), Available at: <https://www.teasenz.com/chinese-tea/the-firing-of-terracotta-figures-of-the-qin-dynasty.html> (in Russian) (accessed: 14.11.2025).
15. **Kashheeva, A.B.** (2014), Qin Shi Huangdi's Terracotta Army as a Cultural Achievement of the World, *VIII Masherovskie chteniya [8th Masherov Readings: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference for Undergraduates, Postgraduates and Young Researchers]*, Vitebsk, p. 97 (in Russian).
16. **Jianen, C. and Jinsong, S.** (2021), 21st-Century Archaeological Discoveries of the Early Nomadic Cultural Remains – Centered in the Middle Section of the Great Wall Area in Inner Mongolia Autonomous Region, *J. Siber. Fed. Univer. Human. Soc. Sci.*, vol. 14, no. 8, pp. 1121-1138.

Received 15.12.2025

Approved 15.01.2026

Accepted 18.02.2026



ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция строго придерживается норм и правил международной публикационной этики.

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

Представление статьи в журнал подразумевает следующее:

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

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

Авторские права

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

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

Приватность

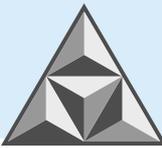
Имена и адреса электронной почты, введенные на сайте данного журнала, используются исключительно для достижения целей, совпадающих с миссией журнала; доступ к ним иных лиц и организаций для других целей не предоставляется.

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

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

Рубрики журнала

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



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

Статьи, направляемые в журнал, должны удовлетворять следующим требованиям:

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

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

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

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

Структура статьи

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



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

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

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

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

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

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

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

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



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

Формат

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

Оформление литературных ссылок

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

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

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

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

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

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

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

Поступила в редакцию

Одобрена после рецензирования

Принята к опубликованию



REFERENCES

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

Received

Approved

Accepted

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



ТОМ 7, ВЫПУСК 1, 2026 | VOL. 7, ISS. 1, 2026

