

На правах рукописи



**БАЛИЦКИЙ ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ**

**БИОМИНЕРАЛИЗУЮЩИЙ СОСТАВ КАК МОДИФИЦИРУЮЩИЙ  
КОМПОНЕНТ РЕМОНТНЫХ СМЕСЕЙ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
**диссертации на соискание ученой степени**  
**кандидата технических наук**

**Белгород – 2024**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
**Строкова Валерия Валерьевна**

Официальные оппоненты: **Чулкова Ирина Львовна**,  
доктор технических наук, профессор,  
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный  
автомобильно-дорожный университет»,  
профессор кафедры «Промышленное  
и гражданское строительство»

**Дергунова Елена Сергеевна**  
кандидат химических наук, доцент,  
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный  
технический университет»,  
доцент кафедры химии

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пензенский государственный  
университет архитектуры и строительства»

Защита состоится «13» декабря 2024 года в 13<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте [https://gos\\_att.bstu.ru/dis/Balitsky](https://gos_att.bstu.ru/dis/Balitsky)

Автореферат разослан «16» октября 2024 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Ремонтные составы на современном строительном рынке представлены широким ассортиментом продукции и предназначены как для устранения дефектов, снижающих архитектурную выразительность зданий, так и для восстановления начальных свойств бетона. Создание новых высокоэффективных составов для ремонта с заданными техническими свойствами и повышение эффективности существующих, базируется на принципах обеспечения прочности структур ремонтного состава и базового материала. При этом длительная эксплуатация бетона приводит к изменению его исходного минерального состава в сторону повышения доли карбонатов, как результат взаимодействия продуктов гидратации цемента с  $\text{CO}_2$  воздуха.

С другой стороны, использование бактериальных культур, способных вызывать индукцию карбоната кальция, является одной из перспективных природоподобных технологий, позволяющих проводить самозалечивание цементобетонной матрицы за счет биокарбонатизации.

С учетом необходимости расширения ассортимента ремонтных составов, возможности участия бактерий в процессах карбонатизации, а также потенциала процессов биокарбонизации в среде цементного камня, задача разработки ремонтной смеси (РС) с использованием биоминерализующего состава как модифицирующего компонента, позволяющего пролонгировать процесс восстановления за счет эффекта самозалечивания дефектов бетонных поверхностей, является весьма актуальной.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках: гранта РФФИ № 18-29-12011 и государственного задания Минобрнауки РФ № FZWN-2023-0006 с использованием оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова.

**Степень разработанности темы.** Исследования, проводимые на протяжении последних десятилетий, как российскими, так и зарубежными авторами, убедительно показывают, что применение микробной карбонатной биоминерализации (МКБ) в ремонтных работах зданий, сооружений и памятников архитектуры приводит к восстановлению материалов за счет упрочнения его структуры, герметизации капиллярно-порового пространства в результате биогенного осаждения кристаллов карбоната кальция. Проводятся исследования по подбору эффективных компонентов биоминерализующего раствора, их рациональных концентраций; разработке способов введения бактериальных культур и прекурсоров с минимизацией их продуцирующих возможностей; изучаются процессы самозалечивания в различных условиях эксплуатации. Однако остаются недостаточно изученными вопросы влияния компонентов биоминерализующих составов на: физико-химические процессы, протекающие как в среде цементного теста, так и твердеющего цементного камня; физико-механические характеристики ремонтных составов.

**Цель работы.** Разработка научно обоснованного технологического решения, обеспечивающего применение биоминерализующего состава как модифицирующего компонента для получения ремонтных смесей.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

– разработка биоминерализующего состава (БС) и исследование характера

влияния его компонентов на свойства цементного раствора и камня;

- исследование влияния БС и его компонентов на физико-механические характеристики цементного раствора и камня в модельных системах «вяжущее – биоминерализующий состав»;

- разработка рецептуры ремонтных смесей с использованием в качестве модифицирующего компонента биоминерализующего состава, а также рециклированного заполнителя (РцЗ);

- обоснование способа использования ремонтных смесей и изучение их свойств;

- подготовка нормативной документации для реализации теоретических и экспериментальных исследований. Апробация работы.

**Научная новизна работы.** Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение ремонтных смесей на цементной основе с эффектом микробной карбонатной биоминерализации за счет использования в качестве модифицирующего компонента биоминерализующего состава (БС), вводимого с водой затворения. Установлены рациональные концентрации биоминерализующего состава в системе «вяжущее – биоминерализующий состав – рециклированный заполнитель», не оказывающие негативного влияния на процессы гидратации цемента и продуцирующую способность бактерий. Показано, что реакции преципитации карбоната кальция, приводящие к улучшению характеристик, как самой ремонтной смеси, так и контактной зоны, обеспечивают сродство структур с насыщенной вторичным кальцитом ремонтной поверхностью и эффект самовосстановления.

Установлены закономерности влияния модифицирующей добавки биоминерализующего состава на свойства и процессы структурообразования ремонтных смесей. Введение БС в диапазоне от 2 до 10 % приводит к: снижению нормальной плотности цементного теста на 3–9 %; замедлению начала схватывания на 16–34 %; снижению среднего значения начальной скорости твердения (при введении 8 % БС) на 9 % и коэффициента торможения гидратации на 2 %; повышению прочности на сжатие цементного камня при оптимальной концентрации БС на 8 %. Рециклированный заполнитель, как дополнительный источник карбоната кальция, в зависимости от его содержания, обеспечивает повышение прочности на сжатие на 6–27 %. С уменьшением крупности РцЗ прослеживается тенденция увеличения содержания кальцита в биоминерализованной цементной матрице от 13 до 24 %. Смывы из разломов по закрытым трещинам показали увеличение количественного содержания штаммов *Vacillus pumilus* на 35 % по сравнению с образцами с БС без РцЗ. Рациональные составы модифицированной РС, характеризуются увеличением прочности на сжатие на 4–12 %, адгезии к ремонтируемой поверхности на 36–69 % по сравнению с составом без БС.

Предложена феноменологическая модель структурообразования ремонтной смеси в системе «вяжущее – биоминерализующий состав – рециклированный заполнитель», при применении технологии МКБ. Поверхность карбонизованного рециклированного заполнителя ремонтного состава, а также

вторичные карбонаты ремонтируемой поверхности (РП), выступают подложкой для роста биокарбонатов, являясь дополнительным источником ионов кальция. Тем самым, контактная зона между РС и РП, помимо продуктов гидратации, включает биогенные кристаллические новообразования, кольтатирующие контракционные и капиллярные поры в процессе продуцирующей деятельности бактерий, пролонгируя процессы структурообразования в эксплуатационный период.

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Дополнены теоретические представления о процессах микробной карбонатной биоминерализации при использовании биоминерализующего состава в качестве модифицирующего компонента ремонтных смесей. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что введение биоминерализующего раствора в ремонтный состав на цементной основе приводит к продуцированию кристаллов карбоната кальция бактериальной культурой *Bacillus pumilus* с последующим упрочнением контактной зоны между РС и реликтовой бетонной поверхностью.

Разработаны ремонтные смеси, содержащие (по массе вяжущего): 8 % БС (D-глюкоза – 10 г/л, пептон – 30 г/л,  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  – 20 г/л,  $\text{CaCl}_2$  – 20 г/л, бактериальный инокулят  $5 \times 10^6$  кл/мл), 5 %, 10 %, 20 % РцЗ, вода затворения – 24 %. Для инъектирования трещин использован наполнитель фракций 0,16–0,315, 0,315–0,63 в соотношении 47/53; для заполнения полостей – 0,16–0,315, 0,315–0,63, 0,63–1,25, 1,25–2,5 в соотношении 19/21/26/34 соответственно. Разработанные составы обеспечивают получение ремонтных растворов с прочностью на сжатие 52–60 МПа; прочностью сцепления с основанием 1,4–2,2 МПа; сохранением продуцирующей способности штаммов *Bacillus pumilus*.

Предложена технология получения ремонтных смесей, включающая приготовление биоминерализующего состава, вводимого с водой затворения не ранее 36 часов и не позднее 72 часов с момента его приготовления, непосредственно перед затворением ремонтных составов.

**Методология и методы исследования.** Методологическая основа работы базируется на системном подходе, основанном на комплексном анализе теоретических и экспериментальных результатов, включающих лабораторные и натурные исследования системы «вяжущее – биоминерализующий состав – рециклированный наполнитель». Для определения рационального состава биоминерализующей среды и дозровок прекурсоров проанализирована жизнеспособность бактерий с помощью оптической микроскопии и камеры Горяева. Оценка продуцирующей способности бактерий производилась по изменению уровня pH в среде и уреазаемому тесту с использованием агара Кристенсена.

Изучение физико-механических свойств модифицированной биоминерализующим составом и ее компонентами цементной матрицы осуществлялось по стандартным методикам и включало оценку сроков схватывания, нормальную густоту и прочностные характеристики материала. Прогнозирование прочности исследуемых составов производилось по методике рас-

чета на основе теории переноса, разработанной Рахимбаевым Ш.М.

Для установления характера влияния рециклированного заполнителя и биоминерализующего состава на формирование структуры цементной матрицы были проведены исследования внутренней поверхности разрушенных образцов с помощью оптической и растровой микроскопии. Фазовый состав новообразований оценивали с помощью РФА. Свойства ремонтных смесей оценивали согласно ГОСТ 33762–2016 и ГОСТ Р 56378–2015.

**Положения, выносимые на защиту:**

- обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение ремонтных смесей на цементной основе с эффектом микробной карбонатной биоминерализации за счет использования в качестве модифицирующего компонента биоминерализующего состава, вводимого с водой затворения;

- характер влияния биоминерализующего состава и его компонентов, в количествах, необходимых для преципитации биокарбонатов, на процессы структурообразования цементной системы;

- закономерности влияния модифицирующей добавки с биоминерализующим эффектом и рециклированного заполнителя на свойства и процессы структурообразования ремонтных смесей;

- состав и технология получения ремонтных смесей с биоминерализующим компонентом;

- технологическая схема и рекомендации по производству ремонтных смесей с биоминерализующим эффектом.

**Степень достоверности полученных результатов** обеспечивается: комплексом экспериментальных исследований с учетом требований методик и методов, регламентированных нормативными документами, при использовании современного высокотехнологичного оборудования и сопоставлением результатов, полученных другими авторами.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения диссертационной работы были представлены на: X, XII Международном молодежном форуме с международным участием «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2018, 2020); XV Международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2018); Наука и инновации в XXI веке: актуальные вопросы, открытия и достижения (Пенза, 2019); Международной конференции «Высокие технологии и инновации в исследованиях и производстве (HIRM-2020)» (Красноярск, 2020); Современные проблемы теоретической, экспериментальной и прикладной минералогии (Юшкинские чтения) (Сыктывкар, 2020); Международной научной конференции «Строительство и архитектура: теория и практика инновационного развития» (САТРИД-2020) (Нальчик, 2020); VII Международном симпозиуме «Биокосные взаимодействия в природных и антропогенных системах» (Санкт-Петербург, 2022); Всероссийской (национальной) научно-практической конференции Высшей школы САФУ (Архангельск, 2019, 2024).

**Внедрение результатов исследований.** С целью внедрения результатов работы разработаны стандарты организации на биоминерализующий состав

для модификации ремонтных смесей и ремонтные смеси с биоминерализующим компонентом. Апробация в натуральных условиях осуществлялась при проведении ремонтных работ на объектах в зоне малоэтажной застройки Белгородского района.

Теоретические и экспериментальные положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Строительство» и «Материаловедение и технологии материалов».

**Публикации.** Основные положения работы изложены в 16 публикациях, в том числе: 6 статей в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 4 работы в изданиях, индексированных в базе данных Scopus.

**Личный вклад.** Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение ремонтного состава с биоминерализующим эффектом для восстановления повреждений бетона. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, последующая обработка и анализ полученных результатов. Принято участие в апробации результатов работы.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 171 странице машинописного текста, включающего 36 таблиц, 45 рисунков, список литературы из 153 источников, 4 приложения.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Согласно закону сродства структур, для повышения долговечности и обеспечения архитектурного соответствия ремонтного раствора ремонтируемой поверхности, необходимо использование материала, наиболее соответствующего по составу и свойствам базовому композиту. Исходя из того, что в бетонах, подвергнутых длительной эксплуатации, имеющих дефекты структуры и требующие ремонта, в силу естественной карбонизации минеральный состав изменен в сторону повышения доли карбонатов кальция, логичным является необходимость введения в ремонтные составы компонентов, обеспечивающих фазово-структурное сродство в системе «реликтовый композит – ремонтный раствор».

В этой связи *рабочей гипотезой* исследования стало предположение о том, что использование биоминерализующего состава в качестве модифицирующего компонента ремонтных смесей, обеспечивающего протекание процессов биокарбонизации, в совокупности с добавкой рециклированного заполнителя, будет способствовать уплотнению растворной части, герметизации мест заделки повреждений, предупреждению отслаивания, и пролонгации процессов за счет самозалечивания микродефектов. Идея встраивания процессов микробной карбонатной биоминерализации при проектировании ремонтных смесей согласуется с основными положениями закона сродства структур.

**Сырьевые материалы.** Для биогенного минералообразования в рамках данной работы исследованы бактерии: *Lysinibacillus sphaericus* (ВКМ В-509),

*Bacillus megaterium* (ВКМ В-40), *Bacillus pumilus* (ВКМ В-23), *Sporosarcina pasteurii* (ВКМ В-513), полученные из Всероссийской коллекции микроорганизмов (ВКМ) Института биохимии и физиологии микроорганизмов им. Г.К. Скрыбина (ИБФМ РАН). Для выращивания культур использовалась среда с пептоном производства ООО НИЦФ и D-глюкозой производства ЗАО «Вектон». Оценка способности штаммов продуцировать уреазу и, как следствие, кристаллы карбоната кальция, проводилась с добавлением в качестве прекурсоров  $\text{CaCl}_2$  «ЧДА» производства ЗАО «Вектон»,  $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$  «ЧДА» производства ООО ПО «УфаХИМПроект».

В качестве вяжущего в исследованиях применялся портландцемент типа ЦЕМ I 42,5 Н, производства АО «Себряковцемент».

В качестве мелкого заполнителя использовали рециклированный песок, полученный из некондиционных изделий типа стеновой камень цементный (СКЦ), которые хранились 5–8 лет, в результате измельчения до получения зерна крупностью не более 5 мм. В исследованиях применялись следующие фракции рециклированного заполнителя (Рц3), мм: 0,16–0,315; 0,315–0,63; 0,63–1,25; 1,25–2,5.

На первоначальном этапе была произведена оценка **продуцирующей способности микроорганизмов рода *Bacillus* в системе «бактериальная культура – питательный раствор» и разработан биоминерализующий состав**. Для поддержания жизнеспособности клеткок при недостаточности собственных ресурсов в качестве питательной среды использованы D-глюкоза и пептон. Выявлены рациональные виды прекурсоров, приводящие к активизации ферментативной активности бактерий. Бактериальные культуры проранжированы в порядке возрастания значения результативного признака:

– накопление биомассы в течение периода культивации: *S. pasteurii* (ВКМ В-513) → *L. sphaericus* (ВКМ В-509) → *B. megaterium* (ВКМ В-40) → *B. pumilus* (ВКМ В-23);

– прирост биомассы по отношению к начальному значению при добавлении D-глюкозы: *S. pasteurii* (ВКМ В-513) → *B. megaterium* (ВКМ В-40) → *L. sphaericus* (ВКМ В-509) → *B. pumilus* (ВКМ В-23);

– увеличение рН кристаллизационной среды с учетом модификации условий культивирования – добавления прекурсоров: *L. sphaericus* (ВКМ В-509) (при концентрации инокулята  $3 \times 10^6$  кл/мл с добавлением  $\text{CaCl}_2$  5 г/л;  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  20 г/л) = *L. sphaericus* (ВКМ В-509) (при концентрации инокулята  $3 \times 10^6$  кл/мл с добавлением  $\text{CaCl}_2$  10 г/л;  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  30 г/л) = *L. sphaericus* (ВКМ В-509) (при концентрации инокулята  $5 \times 10^6$  кл/мл с добавлением  $\text{CaCl}_2$  5 г/л;  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  20 г/л) = *L. sphaericus* (ВКМ В-509) (при концентрации инокулята  $5 \times 10^6$  кл/мл с добавлением  $\text{CaCl}_2$  10 г/л;  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  30 г/л) → *S. pasteurii* (ВКМ В-513) (при концентрации инокулята  $3 \times 10^6$  кл/мл с добавлением  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  30 г/л,  $\text{CaCl}_2$  10 г/л) → *B. pumilus* (ВКМ В-23) (при концентрации инокулята  $3 \times 10^6$  кл/мл с добавлением  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  20 г/л,  $\text{CaCl}_2$  5 г/л) → *B. megaterium* (ВКМ В-40) (при концентрации инокулята  $5 \times 10^6$  кл/мл с добавлением  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  20 г/л,  $\text{CaCl}_2$  5 г/л).

По результатам исследований в дальнейших опытах использовался

наиболее технологичный штамм *B. pumilus*. Принимая во внимание результаты исследований продуцирующей способности микроорганизмов рода *Vacillus* в системе «бактериальная культура – питательный раствор» приняты следующие концентрации прекурсоров и питательных компонентов: D-глюкоза – 10 г/л, пептон – 30 г/л,  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  – 20 г/л,  $\text{CaCl}_2$  – 20 г/л, при концентрации инокулята  $5 \times 10^6$  кл/мл. Данный биоминерализующий состав принят как модифицирующий компонент для МКБ.

**Оценка влияния биоминерализующего состава на свойства цементного теста.** Одним из важных вопросов применения биоминерализующих составов в цементных композитах является оценка влияния питательного раствора на ход гидратационных процессов. Было установлено, что при увеличении концентрации биоминерализующего раствора от 2 % до 10 % происходит увеличение времени наступления начала схватывания на 16–34 %. Динамика изменения конца схватывания носит волнообразный характер, процесс твердения начинается быстрее при введении 2 %, 4 % и 6 % БС на 17 %, 9 % и 4 % по сравнению с контрольным образцом соответственно (рис. 1). Совокупность протекающих процессов обусловлена длинным начальным периодом накопления биомассы *B. pumilus*, влияющим на скорость биохимической активности бактерий и гидролиза мочевины.

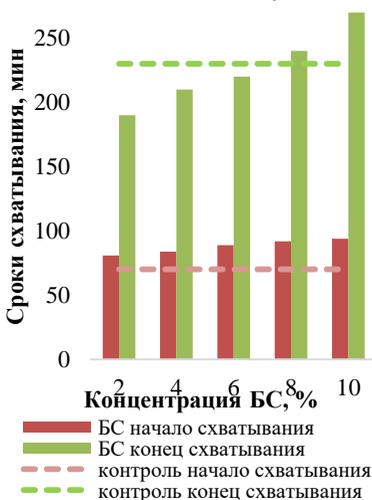


Рис. 1. Сроки схватывания цементного теста в зависимости от концентрации БС

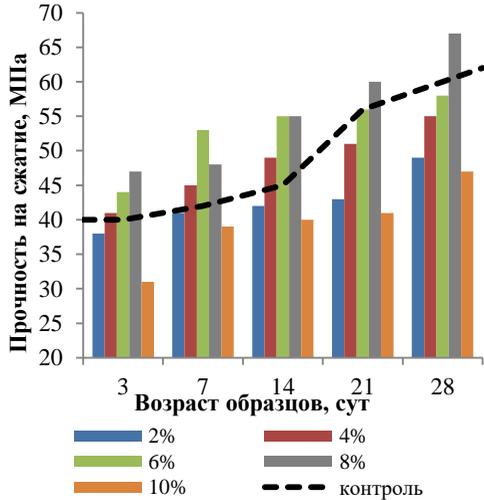


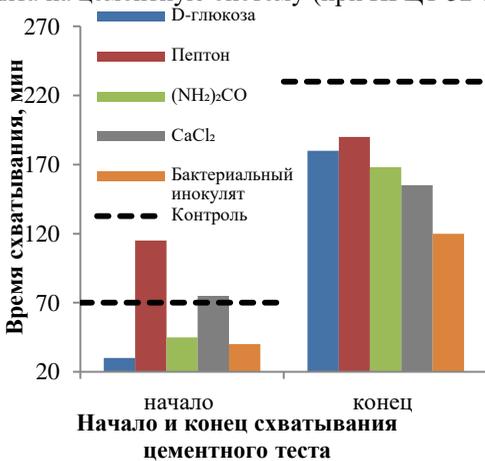
Рис. 2. Зависимость изменения прочности на сжатие цементного камня от содержания БС

На 28 сутки твердения максимальная прочность на сжатие фиксируется при добавлении 8 % БС от массы цемента и составляет 67 МПа, что на 8 % выше прочности контрольного образца. Снижение концентрации БС в цементной системе приводит к ухудшению прочностных характеристик на 7–2 % (рис. 2).

Минимальное значение прочности на сжатие установлено в образцах с

10 % содержанием БС, в связи с чем, дальнейшее увеличение концентрации биоминерализующего раствора не рационально. Варьирование концентрации биоминерализующего состава от массы цемента позволило ранжировать составы по увеличению прочности на сжатие: ПЦ+БС 10 % → ПЦ+БС 2 % → ПЦ+БС 4 % → ПЦ+БС 6 % → ПЦ (контроль) → ПЦ+БС 8 %. По результатам исследований обоснована рациональная концентрация БС 8 %, обеспечивающая максимальную эффективность МКБ в системе «вяжущее – биоминерализующий состав». При этом, варьируя количественное содержание модифицирующей добавки, возможно регулировать процесс жизнеспособности ремонтных смесей в зависимости от производственных условий и потребностей без применения иных добавок.

**Оценка влияния прекурсоров и питательной среды, вводимых с водой затворения, на свойства цементного теста.** Несмотря на то, что характер влияния D-глюкозы,  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ,  $\text{CaCl}_2$ , используемых в качестве прекурсоров, на процессы гидратации цемента хорошо известен, для выявления особенностей их влияния в составе биоминерализующего раствора и в концентрациях, необходимых для продуцирования биокарбонатов, было изучено влияние данных компонентов, а также пептона и бактериального инокулята на цементную систему (при НГЦТ 32 %).



**Рис. 3.** Влияние компонентов БС на сроки схватывания вяжущего

Введение мочевины, бактерий и D-глюкозы приводит к ускорению сроков схватывания на 36 %, 43 % и 57 % соответственно по сравнению с контрольным образцом (рис. 3). Добавление пептона приводит к значительному замедлению начала схватывания на 64 %. При этом все компоненты БС способствуют сокращению сроков конца схватывания от 17 % до 48 %. При оценке длительности схватывания результаты показывают, что введение пептона сокращает время на 82 % по сравнению с контрольным

образцом, в виду его химического состава, представляющего собой продукты гидролиза, приводящие к интенсификации процессов твердения. Такой же эффект оказывают бактерии, которые сокращают время потери пластичности на 5 % в сравнении с контролем.  $\text{CaCl}_2$  ускоряет процесс гидратации на 40 %. Мочевина и глюкоза приводят к замедлению процессов коагуляционного структурообразования на 9 % и 35 % соответственно по сравнению с образцом без добавок.

При сопоставлении сроков схватывания произведено ранжирование компонентов БС в порядке возрастания значений начала схватывания: D-

глюкоза → бактериальный инокулят →  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  → контроль →  $\text{CaCl}_2$  → пептон; конца схватывания: бактериальный инокулят →  $\text{CaCl}_2$  →  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  → D-глюкоза → пептон → контроль; длительности схватывания: пептон (75 мин) →  $\text{CaCl}_2$  / бактериальный инокулят (80 мин) →  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  (123 мин) → D-глюкоза (150 мин) → контроль (160 мин).

С целью установления *влияния концентрации биоминерализующего состава и его отдельных компонентов на свойства цементного камня* была проанализирована кинетика твердения вяжущего с учетом варьирования количества рассматриваемых компонентов. Введение в состав цементного камня D-глюкозы приводит к снижению прочности при сжатии, по сравнению с контрольным образцом на 44 % (рис. 4), что обусловлено способностью сахаров связывать кальций и препятствовать образованию геля C-S-H.

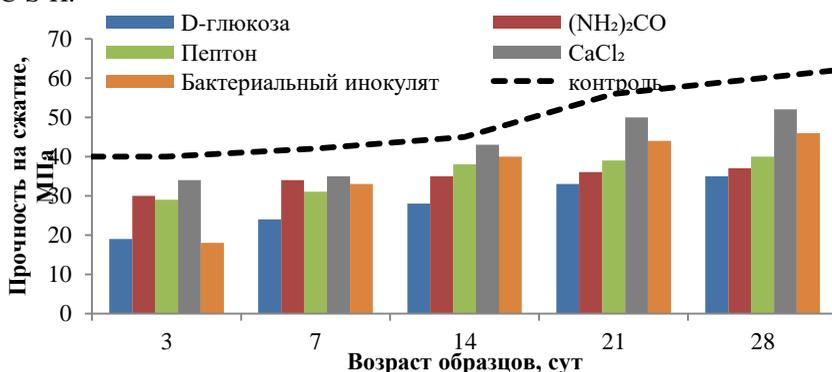


Рис. 4. Зависимость изменения прочности на сжатие цементного камня от вида компонента БС

Добавление мочевины приводит к незначительному увеличению прочности на сжатие по сравнению с образцами, содержащими глюкозу на 6 %, но при этом показатель ниже значения прочности контрольного образца на 40 %. Образцы с пептоном в составе, демонстрируют более высокие показатели по сравнению с образцами с глюкозой и мочевиной (на 14 % и 8 % соответственно), но при этом меньше на 36 % по отношению к показателю прочности на сжатие у контрольных образцов. Бактериальный инокулят снижает прочность на 26 %. Более высокие значения прочности получены при введении  $\text{CaCl}_2$ , по сравнению с образцами, содержащими другие компоненты биоминерализующего состава, но ниже на 16 % по сравнению с контрольным образцом.

Компоненты по влиянию на прочность на сжатие на 28 сутки твердения проранжированы в порядке увеличения: D-глюкоза →  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  → пептон → бактериальный инокулят →  $\text{CaCl}_2$  → ПЦ (контроль).

Несмотря на то, что отдельное введение прекурсоров, питательных компонентов и бактерий в концентрациях, вводимых в БС, не всегда положительно влияет на сроки схватывания и прочность на сжатие, совместное введение данных веществ в виде БС в количестве 8 % позволяет нивелиро-

вать негативное влияние отдельных компонентов. Данный факт объясняется видоспецифичными механизмами регуляции ферментативной активности бактерий *B. pumilus*, которые активизируются, когда инокулят (включающий бактерии, пептон и глюкозу) вступает в контакт с раствором прекурсоров, влияя на химию процессов твердения цемента.

**Исследование влияния биоминерализующего состава на физико-механические характеристики цементного композита в системе «вяжущее – биоминерализующий состав – рециклированный заполнитель»** включало в себя оценку реотехнологических свойств смеси, водопоглощения, прочностных характеристик. В результате оценки реотехнологических свойств установлено, что применение РцЗ фракции 0,16–0,315 оказывает наибольшее положительное влияние на реологию раствора, позволяет достичь максимального значения расплывана 13 % превышающее показатели состава с РцЗ фракции 1,25–2,5.

Оценка прочностных характеристик на сжатие образцов цементного камня при варьировании количества и фракции РцЗ позволила произвести ранжирование составов по увеличению прочности на сжатие в возрасте 28 суток твердения:

– при добавлении 5 % РцЗ от массы портландцемента: ПЦ+РцЗ (1,25–2,5) → ПЦ+РцЗ (0,63–1,25) → ПЦ+РцЗ (0,315–0,63) → ПЦ+РцЗ (0,16–0,315) → ПЦ+БС+РцЗ (1,25–2,5) → ПЦ+БС+РцЗ (0,63–1,25) / ПЦ+БС+РцЗ (0,315–0,63) → ПЦ+РцЗ (0,16–0,315);

– при добавлении 10 % РцЗ от массы портландцемента: ПЦ+РцЗ (0,63–1,25) → ПЦ+РцЗ (1,25–2,5) → ПЦ+РцЗ (0,315–0,63) → ПЦ+РцЗ (0,16–0,315) → ПЦ+БС+СКЦТ (1,25–2,5) → ПЦ+БС+РцЗ (0,16–0,315) → ПЦ+БС+РцЗ (0,63–1,25);

– при добавлении 20 % РцЗ от массы портландцемента: ПЦ+РцЗ (1,25–2,5) → ПЦ+РцЗ (0,315–0,63) / ПЦ+РцЗ (0,63–1,25) → ПЦ+РцЗ (0,16–0,315) → ПЦ+БС+РцЗ (1,25–2,5) → ПЦ+БС+РцЗ (0,63–1,25) → ПЦ+БС+РцЗ (0,315–0,63) → ПЦ+БС+РцЗ (0,16–0,315).

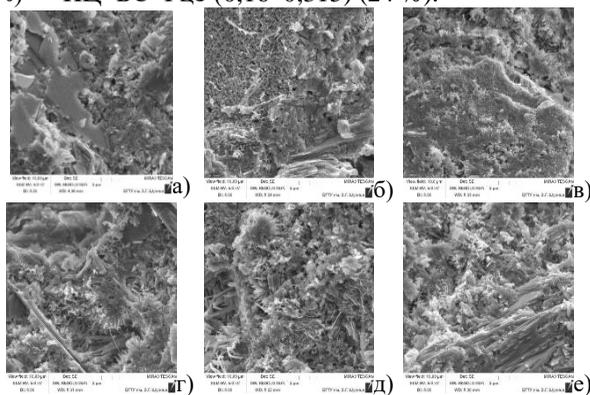
Сравнительная оценка водопоглощения цементного камня позволила установить снижение показателей на 16–56 % по сравнению с бездобавочными образцом в зависимости от фракции РцЗ.

**Прогнозирование прочности цементной матрицы, модифицированной биоминерализующим составом.** Анализ кинетики твердения разработанных составов показал, что начальная скорость твердения ( $U_0$ ) составов при введении БС снижается по сравнению с контрольным на 9 %, при этом коэффициент торможения ( $K_{\text{отр}}$ ) снижается на 2 %. Введение в систему РцЗ фракции 0,16–0,315 привело к резкому скачку  $U_0$  до 131 единицы, а более крупные фракции заполнителя, наоборот, к снижению на 25–38 единиц. Введение БС оказало неоднозначный характер влияния на начальную скорость твердения системы «вяжущее – биоминерализующий состав – РцЗ»: от увеличения на 18 % и 154 % при введении фракций 1,25–2,5 и 0,315–0,63 до снижения на 5 % и 63 % для фракций 0,63–1,25 и 0,16–0,315 соответственно. Расчетные значения прочности всех составов сопоставимы с экспериментальными, однако, наименьшее отклонение регистрируется в об-

разцах ПЦ+БС+РцЗ (0,16–0,315).

Совмещение РцЗ и БС в цементной системе позволяет улучшить физико-механические характеристики композита тем эффективнее, чем меньше размер применяемой фракции. Это объясняется тем, что частицы заполнителя меньшего размера имеют большую удельную поверхность, влияющую на адгезию бактерий к поверхности зерен РцЗ. Помимо этого, частицы РцЗ выступают в качестве центров кристаллизации ввиду содержания в них продуктов карбонизации первичного бетона, необходимых для интенсификации биокарбонизации разработанных ремонтных составов.

Анализ влияния МКБ на *микроструктуру* (рис. 6) и *фазовый состав камня* показал более плотное зарастание новообразованиями порового пространства в образцах с БС, при этом, чем меньше фракция заполнителя, тем интенсивнее формирование вторичного кальцита, что подтверждает ранее высказанное предположение. По результатам РФА образцы с заполнителем из РцЗ, модифицированные биоминерализующим составом, проранжированы по увеличению содержания кальцита в составе: ПЦ+БС+РцЗ (1,25–2,5) (13 %) → ПЦ+БС+РцЗ (0,63–1,25) (20 %) → ПЦ+БС+РцЗ (0,315–0,63) (21 %) → ПЦ+БС+РцЗ (0,16–0,315) (24 %).



**Рис. 6.** Микроструктура образцов цементного камня:

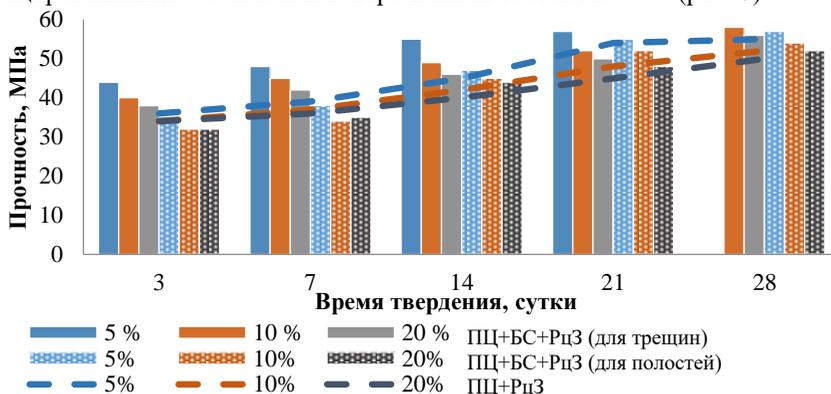
- а – ПЦ (контроль);
- б – ПЦ+БС;
- в – ПЦ+БС+РцЗ (0,16–0,315);
- г – ПЦ+БС+РцЗ (0,315–0,63);
- д – ПЦ+БС+РцЗ (0,63–1,25);
- е – ПЦ+БС+РцЗ (1,25–2,5)

При *разработке ремонтных смесей* учитывались требования к granulometрии заполнителя: для инъектирования –  $\leq 1$  мм, для заделки полостей –  $\leq 4$  мм. С учетом вышеизложенных результатов, количественное содержание фракций рециклированного заполнителя в составе модифицированных БС смесей было принято в максимальном соответствии с кривой зернового состава Фуллера: для инъектирования: 0,16–0,315 – 47 %, 0,315–0,63 – 53 %; для заделки полостей: 1,25–2,5 – 34 %; 0,63–1,25 – 26 %; 0,315–0,63 – 21 %; 0,16–0,315 – 19 %.

Предел прочности при сжатии, в течение всего рассмотренного периода твердения образцов ремонтных смесей для инъектирования, при уменьшении количества РцЗ от 20 % до 5 % повышается на 6–23 %.

При этом максимальное значение, соответствующее 60 МПа, на 28 сутки

регистрируется у образца ПЦ+БС+РцЗ (для трещин), что на 9 % выше значения прочности у контрольного состава. Прочность составов для ремонта полостей на 3 и 17 сутки гидратации имеет низкие значения по сравнению с контролем на 3–8 %, но в последующие сутки наблюдается тенденция роста прочностных характеристик для всех образцов не зависимо от количества заполнителя, при этом на 28 сутки расхождение показателей между модифицированными составами и контрольными составляет 4 % (рис. 7).



**Рис. 7.** Изменение предела прочности при сжатии в зависимости от объемной доли заполнителя РцЗ и наличия БС

Произведено ранжирование ремонтных смесей в порядке увеличения показателя прочности на сжатие без учета объемного содержания заполнителя в виду схожей тенденции для составов: ПЦ+РцЗ → ПЦ+РцЗ (для полостей) → ПЦ+РцЗ (для трещин).

Установлено увеличение контрактного угла смачивания на 30 % у образцов ПЦ+БС+РцЗ (для трещин) и на 12 % – у образцов ПЦ+БС+РцЗ (для полостей) по сравнению с контрольным составом ПЦ+РцЗ.

В соответствии с ГОСТ Р 56378-2015 произведена оценка свойств разработанных ремонтных смесей. Установлено повышение значения прочности на сжатие на 4–12 % и сцепления с основанием на 36–69 % по сравнению с составом, не имеющим БС (табл. 1).

**Таблица 1** – Сравнительная оценка прочностных характеристик ремонтных смесей

Наименование показателя	Требования по ГОСТ Р 56378-2015	Содержание РцЗ, %								
		ПЦ+РцЗ (контрольный)			ПЦ+БС+РцЗ (для трещин)			ПЦ+БС+РцЗ (для полостей)		
		5	10	20	5	10	20	5	10	20
Прочность на сжатие, МПа	≥15	55	52	50	60	58	56	57	54	52
Прочность сцепления с основанием, МПа	≥0,8	1,3	1,1	0,9	2,2	1,8	1,6	2	1,5	1,4

Таким образом, предложены составы ремонтной смеси, содержащей

следующие компоненты в процентном содержании от массы вяжущего: 8 % БС (D-глюкоза – 10 г/л, пептон – 30 г/л,  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  – 20 г/л,  $\text{CaCl}_2$  – 20 г/л, бактериальный инокулят  $5 \times 10^6$  кл/мл), 5 %, 10 % и 20 % РцЗ, вода затворения – 24 %. Зерновой состав РцЗ в разработанных составах варьируется в зависимости от ремонта дефектных участков: для трещин – от 0,16 до 0,63 мм, для полостей – от 0,16 до 2,5 мм. Изменение содержания заполнителя и его гранулометрического состава позволяет регулировать в широких пределах подвижность ремонтных смесей, обеспечивая надёжное заполнение трещин или полостей.

С целью оценки жизнеспособности бактерий производился высев смывов с внутренней части разлома образцов в возрасте 6 месяцев на агаризованную среду в чашки Петри с последующей культивацией в жидкой питательной среде. В образце ПЦ+БС+РцЗ наблюдается  $2,3 \times 10^5$  кл/мл, что на 35 % выше по сравнению с образцом ПЦ+БС  $1,7 \times 10^5$  кл/мл. Присутствие РцЗ в цементной системе приводит к увеличению количества микроорганизмов за счет повышения питательных веществ, содержащихся в составе рециклированного заполнителя, а также обеспечения дополнительных мест зародышеобразования. Таким образом, введение заполнителя из дробленного РцЗ не влияет на физиологические свойства культивируемых бактерий и не снижает их биотехнологический потенциал в карбонатной минерализации в цементной матрице.

Результаты исследований легли в основу формирования схематической модели структурообразования в системе «вяжущее – биоминерализующий состав – рециклированный заполнитель».

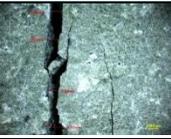
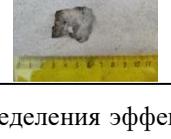
Для оценки эффективности ремонтных смесей с биоминерализующим компонентом и изучения физико-механических свойств проведены исследования в натуральных и лабораторных условиях. Метод инъектирования применялся для заполнения трещин на бетонных и цементных образцах; заполнение полостей в натуральных условиях осуществлялся ручным нанесением смеси и его разравнивание с использованием шпателя.

По истечении 28 суток в результате осмотра заполненных полостей составом ПЦ+РцЗ заметно отслаивание краев затвердевшего раствора от основания за счет усадки (табл. 2). При заполнении полостей ремонтным составом, модифицированным БС, отмечается монолитизация и осветление мест заделки повреждений.



**Рис. 8.** Поверхности цементного камня до и после выдержки в растворе с прекурсорами

**Таблица 2** – Поверхности цементного камня и бетона до и после заполнения ремонтными смесями

Вид повреждения	Состав	Материал основания				Метод применения
		Цементный камень		Бетон		
		До ремонта	После ремонта	До ремонта	После ремонта	
Трещины	ПЦ+БС+РцЗ (для трещин)					Инъектирование
	ПЦ+РцЗ (контроль)					
Полости	ПЦ+БС+РцЗ (для полостей)					Нанесение вручную
	ПЦ+РцЗ (контроль)					

Для определения эффективности микробной карбонатной биоминерализации в восстановлении повреждений цементного камня в образцах были сформированы трещины различной ширины раскрытия от 0,31 мм до 3,48 мм. В условиях лаборатории все образцы были погружены в раствор с поддержанием концентраций прекурсоров на уровне 20 г/л за счет их обновления каждые 3 дня. После 28 дней выдержки произведена оценка эффективности восстановления мест раскрытия краев трещин. Позитивная результативность применения микробной карбонатной биоминерализации в цементной системе отмечена в образцах ПЦ+БС+РцЗ и ПЦ+БС (рис. 8). В контрольном образце не прослеживается зарастание трещины, а лишь заполнение мелких дефектов (пор) за счет осаждения прекурсоров в них. Таким образом, введение бактериальных культур и прекурсоров в цементную систему интенсифицирует процессы восстановления трещин за счет индукции микроорганизмами кристаллических новообразований.

Предложена технология получения ремонтной смеси, включающая приготовление биоминерализующего состава, допускающего использование в период от 36 до 72 часов с момента его приготовления, вводимого с водой затворения. Эффективность ремонтных смесей с модифицирующим компонентом обусловлена возможностью пролонгации процессов структурообразования за счет микробной карбонатной биоминерализации в процессе эксплуатации и достижения эффекта самозалечивания микродефектов цементной матрицы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования.** Дополнены теоретические представления о процессах микробной карбонатной биоминерализации при использовании биоминерализующего состава в качестве модифицирующего компонента ремонтных смесей. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено, что введение биоминерализующего раствора в ремонтный состав на цементной основе приводит к продуцированию кристаллов карбоната кальция бактериальной культурой *Bacillus pumilus* с последующим упрочнением контактной зоны между РС и реликтовой бетонной поверхностью.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение ремонтных смесей на цементной основе с эффектом микробной карбонатной биоминерализации за счет использования в качестве модифицирующего компонента биоминерализующего состава (БС), вводимого с водой затворения. Установлены рациональные концентрации биоминерализующего состава в системе «вяжущее – биоминерализующий состав – рециклированный заполнитель», не оказывающие негативного влияния на процессы гидратации цемента и продуцирующую способность бактерий. Показано, что реакции преципитации карбоната кальция, приводящие к улучшению характеристик, как самой ремонтной смеси, так и контактной зоны, обеспечивают сходство структур с насыщенной вторичным кальцием ремонтной поверхностью и эффект самовосстановления.

Установлены закономерности влияния модифицирующей добавки биоминерализующего состава на свойства и процессы структурообразования ремонтных смесей. Введение БС в диапазоне от 2 до 10 % с шагом 2% приводит к: снижению нормальной плотности цементного теста на 3–9 %; замедлению начала схватывания на 16–34 %; снижению среднего значения начальной скорости твердения (при введении 8 % БС) на 9 % и коэффициента торможения гидратации на 2 %; повышению прочности на сжатие цементного камня при оптимальной концентрации БС на 8 %. РцЗ, как дополнительный источник кальция, в зависимости от его содержания, обеспечивает повышение прочности на сжатие на 6–27 %. С уменьшением крупности РцЗ прослеживается тенденция увеличения содержания кальцита в биоминерализованной цементной матрице от 13 до 24 %. Смывы из разломов по закрытым трещинам показали увеличение количественного содержания штаммов *Bacillus pumilus* на 35 % по сравнению с образцами с БС без РцЗ. Рациональные составы модифицированной РС, характеризуются увеличением прочности на сжатие на 4–12 %, адгезии к ремонтируемой поверхности на 36–69 % по сравнению с составом без БС.

Предложена феноменологическая модель структурообразования ремонтной смеси в системе «вяжущее – биоминерализующий состав – рециклированный заполнитель», при применении технологии МКБ. Поверхность карбонизованного рециклированного заполнителя ремонтного состава, а также вторичные карбонаты ремонтируемой поверхности (РП), выступают подложкой для роста биокарбонатов, являясь дополнительным источником ионов

кальция. Тем самым, контактная зона между РС и РП, помимо продуктов гидратации, включает биогенные кристаллические новообразования, кольматирующие контракционные и капиллярные поры в процессе продуцирующей деятельности бактерий, пролонгируя процессы структурообразования в эксплуатационный период.

Разработаны ремонтные смеси, содержащие (по массе вяжущего): 8 % БС (D-глюкоза – 10 г/л, пептон – 30 г/л,  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$  – 20 г/л,  $\text{CaCl}_2$  – 20 г/л, бактериальный инокулят  $5 \times 10^6$  кл/мл), 5 %, 10 %, 20 % РцЗ, вода затворения – 24 %. Для инъектирования трещин использован наполнитель фракций 0,16–0,315, 0,315–0,63 в соотношении 47/53; для заполнения полостей – 0,16–0,315, 0,315–0,63, 0,63–1,25, 1,25–2,5 в соотношении 19/21/26/34 соответственно. Разработанные составы обеспечивают получение ремонтных растворов с прочностью на сжатие 52–60 МПа; прочностью сцепления с основанием 1,4–2,2 МПа; сохранением продуцирующей способности штаммов *Bacillus pumilus*.

Предложена технология получения ремонтных смесей, включающая приготовление биоминерализующего состава, вводимого с водой затворения не ранее 36 часов и не позднее 72 часов с момента его приготовления, непосредственно перед затворением ремонтных составов.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения на предприятиях по производству ремонтных составов и при ремонтно-восстановительных работах, а также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Строительство» и «Материаловедение и технологии материалов».

**Перспективы дальнейших исследований** целесообразно рассматривать в направлении расширения перечня защитных покрытий для строительных материалов с применением технологии микробной карбонатной биоминерализации, а также использования МКБ для объемной модификации при производстве бетонов.

## **СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ**

### *В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК*

1. **Балицкий, Д.А.** Влияние микробной карбонатной биоминерализации на прочность цементного камня / Д.А. Балицкий, У.Н. Духанина, В.В. Строкова, М.Н. Сивальнева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 5. – С. 24–33. – DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-5-24-33. (К1, ИФ – 0,661).

2. **Духанина, У.Н.** Состав пропиточного раствора для бактериальной биоминерализации и особенности его взаимодействия с компонентами цементной системы / У.Н. Духанина, Д.А. Балицкий, В.В. Строкова, А.Ю. Есина, А.А. Кузнецова // Строительство и техногенная безопасность. – 2023. № 28 (80). – С. 37–44. (К2, ИФ – 0,624).

3. **Строкова, В.В.** Влияние состава и дисперсности заполнителя на его цементацию при карбонатной биоминерализации / В.В. Строкова, У.Н. Духанина, Д.А. Балицкий, О.И. Дроздов, В.В. Нелюбова, О.В. Франк-Каменецкая, Д.Ю. Власов //

Строительные материалы. – 2022. – № 7. – С. 63–72. – DOI: 10.31659/0585-430X-2022-804-7-63-70. (*RSCI, CA(pt), ИФ – 0,832*).

4. *Строкова, В.В.* Полиморфизм и морфология карбонатов кальция в технологиях строительных материалов, использующих бактериальную биоминерализацию / В.В. Строкова, У.Н. Духанина, **Д.А. Балицкий**, О.И. Дроздов, В.В. Нелюбова, О.В. Франк-Каменецкая, Д.Ю. Власов // *Строительные материалы*. – 2022. – № 1–2. – С. 82–122. – DOI: 10.31659/0585-430X-2022-799-1-2-82-122. (*RSCI, CA(pt), ИФ – 0,832*).

5. *Духанина, У.Н.* Влияние микробной карбонатной минерализации на гидрофобность поверхности цементного камня / У.Н. Духанина, В.В. Строкова, **Д.А. Балицкий** // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. – 2020. – № 7. – С. 19–25. – DOI: 10.34031/2071-7318-2020-5-7-19-25. (*ИФ – 0,661*).

6. *Строкова, В.В.* Применение микробной карбонатной биоминерализации в биотехнологиях создания и восстановления строительных материалов: анализ состояния и перспективы развития / В.В. Строкова, Д.Ю. Власов, О.В. Франк-Каменецкая, У.Н. Духанина, **Д.А. Балицкий** // *Строительные материалы*. – 2019. – № 9. – С. 83–103. – DOI: 10.31659/0585-430X-2019-774-9-83-103. (*RSCI, CA(pt), ИФ – 0,832*).

#### ***В изданиях, индексируемых в базе данных Scopus***

7. *Strokova, V.V.* Influence of medium composition on biomineralization and morphology of newgrowths / V.V. Strokova, U.N. Duhanina, **D.A. Balitsky** // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2020. – Vol. 1582 (1). – Article number 012083. – DOI: 10.1088/1742-6596/1582/1/012083. (*Scopus Q4*).

8. *Strokova, V.V.* The study of the quartz sand bio consolidation processes as a result of carbonate mineralization by urolithic bacteria / V. Strokova, U. Duhanina, **D. Balitsky** // *Materials Science Forum*. – 2020. – Vol. 1011. – Pp. 44–51. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.1011.44. (*Scopus Q4*).

9. *Strokova, V.V.* Crack closure in a cement matrix using bacterial precipitation of calcium carbonate / V.V. Strokova, U.N. Dukhanina, **D.A. Balitsky** // *Lecture Notes of Civil Engineering*. – 2020. – Vol. 95. – Pp. 158–164. – DOI: 10.1007/978-3-030-54652-6\_24. (*Scopus Q4*).

10. *Strokova, V.V.* Effect of agents of initiation of carbonate biomineralization on cement properties / V.V. Strokova, V.V. Nelyubova, U.N. Duhanina, **D.A. Balitsky**, O.I. Drozdov // *Materials Science Forum*. – 2021. – Vol. 1040. – Pp. 159–164. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.1040.159. (*Scopus Q3*).

#### ***В изданиях, включенных в базу РИНЦ***

11. **Балицкий, Д.А.** Влияние компонентов биоминерализующего состава на физику цементного теста / Д.А. Балицкий // *Инженерные задачи: проблемы и пути решения: материалы V Всерос. (национальной) науч.-практ. конф. Высшей инженерной школы САФУ*. – Архангельск: Изд-во САФУ, 2024. – С. 12–15.

12. *Дроздов, О.И.* Влияние прекурсоров на морфологию новообразований при биоминерализации / О.И. Дроздов, У.Н. Духанина, **Д.А. Балицкий**, А.А. Кузнецова, Е.Н. Губарева // *Образование. Наука. Производство: материалы XII Междунар. молодежного форума*. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2020. – С. 431–436.

13. *Строкова, В.В.* Особенности метаболизма бактерий, как компонента самовосстанавливающихся материалов / В.В. Строкова, М.И. Вициенко, У.Н. Духанина, **Д.А. Балицкий** // *Наукоемкие технологии и инновации: электр. сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова*. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2019. – Ч. 4. – С. 369–371.

14. *Духанина, У.Н.* Особенности применения карбонатной биоминерализации в сохранении материалов зданий и сооружений / У.Н. Духанина, В.В. Строкова, **Д.А. Балицкий** // *Инженерные задачи: проблемы и пути решения: сб. материалов V Всерос.*

(национальной) науч.-практ. конф. Высшей инженерной школы САФУ. – Архангельск: Изд-во САФУ, 2019. – С. 18–20.

15. *Духанина, У.Н.* Выделение и идентификация бактерий рода *Bacillus* из почвенных грунтов / У.Н. Духанина, **Д.А. Балицкий**, Е.Н. Гончарова, В.В. Строкова // *Высокие технологии и инновации в науке: сб. статей Междунар. науч. конф.* – СПб.: Изд-во ГНИИ «Нацразвитие», 2018. – С. 7–14.

16. **Балицкий, Д.А.** К вопросу о применении микроорганизмов в строительных материалах / Д.А. Балицкий, У.Н. Духанина, М.И. Вициенко // *Образование. Наука. Производство: материалы X Междунар. молодежного форума с междунар. участием.* – Белгород: Изд-во БГТУ, 2018. – С. 443–447.

## **БАЛИЦКИЙ ДМИТРИЙ АНДРЕЕВИЧ**

### **БИОМИНЕРАЛИЗУЮЩИЙ СОСТАВ КАК МОДИФИЦИРУЮЩИЙ КОМПОНЕНТ РЕМОНТНЫХ СМЕСЕЙ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

#### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 11.10.2024 г. Формат 60×84/16.

Усл. печ. л. 1,16. Тираж 120 экз. Заказ № 126

Отпечатано в Белгородском государственном  
технологическом университете им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46