

На правах рукописи



**АЛЬ ДУЛАЙМИ САЛМАН ДАВУД САЛМАН**

**САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ БЕТОНЫ,  
МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ  
ДОБАВКОЙ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва» на кафедре «Строительные материалы и технологии»

- Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович
- Официальные оппоненты – СТРОГАНОВ Виктор Федорович  
доктор химических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Химии и инженерной  
экологии в строительстве»  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Казанский государственный  
архитектурно-строительный университет»
- КОРОТКИХ Дмитрий Николаевич  
доктор технических наук, доцент кафедры  
«Технологии строительных материалов, изделий и  
конструкций»  
Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Воронежский государственный  
архитектурно-строительный университет»
- Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего  
образования «Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-строительный  
университет», г. Санкт-Петербург

Защита состоится «24» октября 2019 г., в 14.00 часов на заседании диссертационного совета Д 999.183.02 на базе ФГБАУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, (Минаевский переулок, д. 2, ГУК-7, аудитория 7618). С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РУТ (МИИТ) по адресу: 127994, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9 и на сайте РУТ (МИИТ), [www.miiit.ru](http://www.miiit.ru). Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета

Зайцев Андрей Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы исследований.**

В настоящее время бетон является основным строительным материалом, используемым при строительстве зданий и сооружений различного назначения. И, по мнению многих специалистов, он останется таковым на многие годы.

Мировой объем производства бетонов в настоящее время составляет около восьми миллиардов кубометров в год. В этой связи одной из важнейших задач современной строительной отрасли являются разработка и внедрение ресурсосберегающих технологий, предусматривающих получение долговечных бетонов и строительных изделий на их основе.

Проблема получения высококачественных бетонов и других цементных композитов успешно решается путем оптимизации их состава, активацией компонентов бетонных смесей, модифицированием структуры материалов комплексными добавками различного функционального назначения.

Однако, очень часто, во время эксплуатации бетонные изделия, железобетонные конструкции подвергаются растрескиванию, что приводит к ухудшению их качества и сокращению ожидаемого срока эксплуатации. Трещины могут возникать как от силовых нагрузок, так и от неблагоприятных условий окружающей среды, ошибок конструирования и т.д.

Как правило, обслуживание и ремонт железобетонных конструкций с помощью полимерных, металлических и других материалов влекут за собой значительные расходы.

Для продления службы конструкций крайне важно свести к минимуму распространение в бетоне трещин. В этой связи существует насущный экономический стимул для разработки бетона самостоятельно восстанавливающего и устраняющего повреждения.

Известно, что животные и растения обладают естественной способностью за относительно короткий промежуток времени самостоятельно залечивать небольшие телесные повреждения, без какого-либо внешнего воздействия. Такая же картина наблюдается в старых конструкциях. Трещины небольших размеров самоустраняются в результате повторной кристаллизации кальцита.

Опыт показывает, что во время эксплуатации железобетонные конструкции, имеют более значительные повреждения в виде трещин больших размеров, которые не могут самозалечиваться без активизации процессов, что приводит к ухудшению качества и сокращению ожидаемого срока эксплуатации конструкций.

Ранее полученные данные различных исследователей свидетельствуют о том, что самовосстановление бетона может быть достигнуто путем введения в бетонную матрицу бактерий. Имобилизованные в бетонной матрице бактериальные споры, находящиеся в состоянии покоя, но жизнеспособные, становятся стабильно

активными, как только через вновь образованные трещины проникает влага. Затем эти трещины затянутся вследствие осаждения кальцита, образованного в результате жизнедеятельности микроорганизмов.

Несмотря на то, что ряд исследователей проводили эксперименты с различными видами бактерий, еще предстоит точно идентифицировать идеальное сочетание таких факторов, как виды бактерий, типы минерального субстрата, типы материалов-носителей бактерий и количество каждого из этих компонентов для качественного прорыва в решении проблемы получения самовосстанавливающихся бетонов и железобетонных конструкций.

В настоящей работе приводятся исследования по разработке технологии получения материалов с биодобавками, изучению процесса устранения трещин в бетоне и установлению физико-технических свойств бетонов, модифицированных микроскопическими организмами и восстановленных материалов.

#### **Степень разработанности избранной темы.**

В качестве способов, повышающих прочность и другие свойства бетонов, рассматриваются различные технологические и рецептурные приемы.

На эволюционном пути улучшения качества бетона, повышения его прочности были прорывные технологии, связанные с разработкой высокоэффективных способов изготовления бетонов и других цементных композитов за счет внедрения эффективных методов уплотнения и применения пластификаторов в создание которых большой вклад внесли И. М. Грушко, Б. В. Гусев, В. И. Соломатов, Э. Фрейсине, М. Н. Ахвердов, А. А. Афанасьев, Н. Б. Урьев, П. Г. Комохов, С. М. Мчедлов-Петросян, Ю. М. Баженов, П. А. Ребиндер, В. Г. Батраков, В. Б. Ратинов, А. В. Ушеров-Маршак, В. С. Рамачандран, Б. Р. Фаликман, М. Коллепарди, Р. Кондо, Д. Рой, К. Хатторн, М. Даймон.

Основой создания высококачественных бетонов нового поколения служат суперпластификаторы третьего поколения в сочетании с новой рецептурой сухих компонентов, взаимно усиливающих друг друга при превращении геля в золь. Современные высококачественные бетоны имеют большой спектр различных характеристик: это высокопрочные и ультравысокопрочные бетоны, самоуплотняющиеся, самонивелирующиеся, высококоррозионностойкие, реакционно-порошковые, в том числе дисперсно-армированные, бетоны. Эти виды бетонов удовлетворяют высоким требованиям прочности на сжатие и растяжение.

Над созданием бетонов нового поколения с помощью различных методов активации составляющих компонентов, введения порошковой и тонкодисперсной фазы работали В. И. Калашников, С. С. Каприелов, В. И. Соломатов, В. И. Классен, В.Т. Ерофеев, Ю. В. Пухаренко, Е. М. Чернышов, В. Г. Хозин, Г. И. Яковлев, С. В. Федосов, Е. В. Королев, В. С. Лесовик, В. В. Строкова, А.П. Федорцов, У. Людвиг, А. В. Шейнфельд, Р. Aitchin, M. Cheurexu, E. G. Deharrard, V. Mechtherine, P. T. Santhosh,

M. Schmidt, P. Kleingelhöfer, D. Frank, K. Fridemenn, P. Richard, M. Chentern, P. Y. Blais, C. Danrioc, A. S. Belardi, K. K. Sideris, E. Guneyisi, M. Fenollera, L. Garcia.

Большинство бетонов и других цементных композитов подвергаются воздействию статических и динамических нагрузок, а также различных агрессивных факторов. Исследованию долговечности бетонов и разработке способов их повышения в этих условиях посвящены работы В. М. Бондаренко, И. Г. Овчинникова, Е. А. Гузеева, О. Г. Ржаницина, В. П. Цернанта, В. И. Соломатова, Ю. М. Баженова, Е. Н. Каблова, С. В. Федосова, В. Ф. Строганова, В. П. Селяева, О. В. Старцева, В.Т. Ерофеева, Л. М. Добщица, В. М. Латыпова, В. И. Римшина, В. И. Кондращенко, В. И. Бабушкина, В. Ф. Степановой, А. Ф. Полака, В. М. Латыпова, В. Б. Ратинова, Ф. М. Иванова, А. Ф. Алексеева, Б. В. Гусева, Н. К. Розенталя, Г. С. Рояка, А. Е. Шейкина, П. Г. Комохова, В. М. Москвина, В. Ф. Смирнова, Е. М. Чернышева, Д. Н. Коротких, С. Н. Леоновича, А. П. Федорцова, A. Alum, S. I. Pirt, R. T. Ross, G. Griffin, D. K. Platt, C. Andrade, M. Akijama, F. Xing, L. Bertolint, K. Holschemacher.

Исследованиям технологии получения бетонов, модифицированных микроскопическими организмами и самовосстанавливающимися железобетонных конструкций с трещинами посвящены работы Neville, Ramakrishnan, Day, De Muynck, Patil, Raijiwala, Tittelboom, Jonkers, Schlangen, Jonkers, Wang, Jing, Wu, Navneet, Rafat, Sierra-Beltran, Чарльз Т. Дж., Аль-Самави А.А., Махмуд Д.А., В. И. Соломатова, В. Д. Черкасова, В. В. Ревина, В. И. Бузулукова, С. В. Дудынова, В.Т. Ерофеева, В.Ф. Смирнова, В.Т. Фомичёва, Е. В. Киселева и др. В работах авторов было высказано предположение, что иммобилизованные в бетонной матрице бактериальные споры, находящиеся в состоянии покоя, но жизнеспособные, становятся метаболически активными, как только через вновь образованные трещины проникает влага. Затем эти трещины затянутся вследствие нахождения кальцита, образованного в результате жизнедеятельности микроорганизмов.

Данное исследование посвящено изучению различных видов бактерий, выделяющих минеральные вещества, а именно, их жизнеспособности в течение длительного времени, возможности их инкорпорации, их выживанию в цементном бетоне и их способности заделывать трещины в результате самовосстановления. Изучались три вида бактерий (в комплексе с цеолитом/пемзой в качестве вещества-носителя и лактатом кальция, мочевиной и дрожжевым экстрактом в качестве питательных веществ), включенные в цементные и бетонные композиты (обычный цементный раствор, фиброармированный цементный раствор и модифицированный бетон), и их активность в стимулировании процессов самовосстановления. Проводились обширные экспериментальные исследования, в том числе изучение микроструктуры (методами сканирующей растровой электронной микроскопии (SEM), энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDS),

рентгеноструктурного анализа (XRD)) и методом неразрушающего контроля (таким как ультразвуковой импульсный метод (UPV)), а также методом статистического/математического моделирования. Для разработки композитных материалов на основе самовосстанавливающихся бактериальных бетонов важно понять, как введение в их состав вырабатывающих неорганические соединения бактерий и питательных веществ, необходимых для роста микроорганизмов, повлияет на свойства бетона, особенно на способность заделывать трещины и восстанавливать механические свойства изделий и конструкций.

#### **Связь работы с научными программами и планами.**

Настоящая работа выполнена с соответствии с грантами: РААСН «Исследование механизмов деструкции и разработка способов повышения стойкости строительных композитов на основе цементных и полимерных связующих, металлических материалов в агрессивных климатических условиях»; РФФИ (региональный конкурс) «Исследования в области создания новых полимербетонов, каркасных, фибробетонов, бетонов различного фракционного состава с биоцидными добавками для организации промышленного производства строительных изделий с повышенной долговечностью, биологической и климатической стойкостью на предприятиях Республики Мордовия», а также в инициативном порядке.

#### **Цель и задачи диссертационного исследования.**

Целью данной работы является исследование и разработка самовосстанавливающихся бетонов, модифицированных микробиологической добавкой.

#### **Задачи исследования.**

В соответствии с поставленной целью определены следующие задачи:

1. Проанализировать процессы структурообразования, физико-механические свойства бетонов и других цементных композитов, способы их улучшения, деградиационные процессы, повреждения и дефекты, снижающие долговечность железобетонных конструкций, а также способы их ремонта и восстановления.

2. На основе анализа существующих подходов к созданию бетонов с помощью биотехнологий и процессов самовосстановления дефектных железобетонных конструкций разработать теоретические предпосылки по разработке технологии создания бетонов, модифицированных микробиологической добавкой и самовосстанавливающихся конструкций.

3. Оценить рост, способность формировать кристаллы, спорообразование, прорастание и процент выживания трех разных видов бактерий при обработке композитов в условиях высокой температуры и рН.

4. Исследовать эффективность цеолита и пемзы в качестве материала-носителя или защитной среды для бактерий и лактата кальция в качестве питательного вещества.

5. Проверить уреолитическую активность иммобилизованных в цеолите и пемзе бактерий в бетоне с высоким показателем рН.

6. Изучить влияние добавок восстанавливающего вещества на такие механические свойства, как прочность на сжатие и на изгиб цементных растворов (обычный цементный раствор/фиброармированный цементный раствор и ЕСС).

7. Оценить эффективность затягивания трещин с точки зрения восстановления характеристик проницаемости бетона, таких как сорбционная и проникающая способность хлоридов, скорость ультразвукового импульса, и прочностных свойств – прочности на сжатие и на изгиб.

8. Наглядно представить процесс затягивания трещин и охарактеризовать минеральные составляющие, включая продукты заживления трещин, с помощью методов SEM, EDS и XRD.

9. На основании экспериментальных результатов разработать математические/статистические модели для количественной оценки процесса самовосстановления и определения механических свойств и долговечности самовосстанавливающихся цементных бетонных композитов, используя параметры материала.

10. Подтвердить эффективность разработанных моделей современными экспериментальными результатами и данными предыдущих исследований.

**Объектом научной работы** являются бетоны и поврежденные трещинами бетонные и железобетонные конструкции.

**Предмет научной работы** – получение бетонов, модифицированных микробиологической добавкой и разработка методов восстановления поврежденных железобетонных конструкций с помощью бактерий.

#### **Научная новизна работы**

Основной научный результат исследования состоит в развитии технологии получения бетонов, модифицированных микробиологической добавкой и самовосстанавливающихся бетонных и железобетонных конструкций.

Научная новизна наиболее существенных результатов заключается в следующем.

1. С помощью физико-химических и биологических исследований определены рост и способность формирования кристаллов, спорообразование, прорастание и степень выживания бактерий при обработке композитов в условиях высокой температуры и pH.

2. Выявлена уреолитическая активность иммобилизованных в цеолите и пемзе бактерий в бетоне с высоким показателем pH.

3. Установлено влияние добавок восстанавливающего вещества на прочностные свойства бетонов различных типов.

4. Установлены этапы затягивания трещин и механизмы образования минеральных составляющих, способствующих этому процессу, с помощью различных физико-механических методов (математические/статистические модели для количественной оценки самовосстановления и определения механических свойств и долговечности самовосстанавливающихся бетонов и других цементных композитов, используя параметры материала).

5. Выявлена эффективность затягивания трещин в железобетонных изделиях посредством оценки прочности на сжатие и на изгиб, скорости ультразвукового импульса, сорбционной способности и проникающей способности хлоридов.

#### **Теоретическая и практическая значимость работы**

В диссертации изложены научно обоснованные технические, экономические и технологические решения получения бетонов, модифицированных микробиологической добавкой и самовосстанавливающихся поврежденных железобетонных конструкций с помощью бактерий. Результаты могут быть использованы при проектировании сооружений с повышенным сроком службы.

1. Установлены закономерности совместного влияния бактерий, питательных сред и носителей бактерий на свойства бетонов и процессы самовосстановления трещин в железобетонных конструкциях.

2. Разработаны принципы производства и применения бетонов, модифицированных микробиологической добавкой для изготовления железобетонных конструкций с самозалечивающимися свойствами.

3. Предложены оптимальные параметры режима приготовления самовосстанавливающихся бетонов, модифицированных микробиологической добавкой, позволяющие повысить прочность цементных композитов в возрасте 3, 7 и 28 суток соответственно более чем на 10, 30 и 27 %.

4. Предложены рациональные составы бетонов, включающих матрицы различных составов, с добавками бактерий, их носителей и питательных сред.

#### **Методология и методы научного исследования**

Методология настоящего исследования включает системный подход с учетом основной цели и всех аспектов поставленных задач, выделения главного и существенного с перспективой дальнейшего развития научных основ формирования структуры и свойств бетонов, модифицированных микробиологической добавкой и процессов самовосстановления бетонных и железобетонных конструкций.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Обоснование экономической целесообразности использования биобетонов для изготовления самовосстанавливающихся бетонных и железобетонных конструкций.

2. Комплекс экспериментальных данных по исследованию взаимодействия бактерий с цементным камнем, физико-механических свойств биобетонов и самовосстанавливающихся конструкций.

3. Эффективные составы бетонов и других цементных композитов с добавками бактерий, их носителей и питательных сред, обладающие повышенными физико-техническими свойствами.

4. Рациональные составы цементных композитов с применением бактерий и других добавок и выявленными оптимальными соотношениями «цемент – наполнитель – вода затворения – добавки».



5. Результаты исследования физико-механических и эксплуатационных свойств бетонов, модифицированных микробиологической добавкой и самовосстанавливающимися изделиями.

#### **Апробация диссертационной работы**

Основные положения и результаты диссертационной работы представлялись и докладывались на международных и всероссийских научно-практических конференциях и совещаниях: на Академических чтениях РААСН (Курск, 2011 г.); «Актуальные вопросы строительства» (Саранск, 2013 г.); «Разработка эффективных авиационных, промышленных, электротехнических и строительных материалов в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов» (Саранск, 2013 г.); «Композиционные строительные материалы. Теория и практика» (Пенза, 2015 г.); «НАСКР-2018: Новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции» (Чебоксары, 2018 г.); «Проблемы исследования и проектирования машин. Новые химические технологии, защитные и специальные покрытия: производство и применение (Пенза, 2018 г.).

#### **Степень достоверности результатов диссертационного исследования.**

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы подтверждается применением стандартных методов испытаний, современных методов исследования структуры и свойств цементного камня, бактерий (РФА, ДТА, микропроцессорная рН-метрия, атомно-силовая микроскопия), использованием аттестованного испытательного оборудования и приборов, обработкой результатов экспериментов статистическими методами, достаточным количеством проведенных опытов, обеспечивающих адекватность и воспроизводимость результатов. Выводы и рекомендации работы получили положительную оценку и внедрение в строительной практике.

**Личный вклад автора** состоит в сборе и анализе литературных данных, выборе объектов и методов исследования, в разработке программы экспериментальных испытаний, проведении и получении результатов исследования, их обобщении и анализе, подготовке материалов публикаций.

**Публикации.** По теме диссертации опубликованы 23 работы (в том числе 2 в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science, 6 статей в центральных рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК РФ). В Федеральную службу по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам поданы 3 заявки на изобретения.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 368 источников, 4 приложений, содержит 281 лист машинописного текста, 100 рисунков, 37 таблиц, приложения изложены на 28 листах.

Диссертационная работа выполнена на кафедре строительных материалов и технологий Мордовского государственного университета им. Н. П. Огарева в соответствии с паспортом специальности 05.23.05

«Строительные материалы и изделия» и пунктами области исследования: п. 1. Разработка теоретических основ получения различных строительных материалов с заданным комплексом эксплуатационных свойств; п. 4. Разработка методов прогнозирования и оценки стойкости строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации; п. 5. Разработка методов повышения стойкости строительных изделий и конструкций в суровых условиях эксплуатации; п. 6. Создание теоретических основ получения строительных композитов гидратационного твердения и композиционных вяжущих веществ и бетонов; п. 7. Разработка составов и принципов производства эффективных строительных материалов с использованием местного сырья и отходов промышленности; п. 13. Создание материалов для специальных конструкций и сооружений с учетом их специфических требований.

Автор выражает глубокую благодарность доктору технических наук, главному инженеру сектора реконструкций и проектов Министерства высшего образования и научных исследований Республики Ирак Аль Дифайи Тахер Джасиму, доктору биологических наук профессору В. Ф. Смирнову, доктору технических наук профессору В. Т. Фомичеву за оказанную помощь и научные консультации по отдельным разделам диссертационной работы.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, степень ее разработанности, сформулированы цель и задачи исследований, представлены научная новизна, практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор научно-технической литературы российских и зарубежных ученых в области структурообразования, технологии изготовления, оптимизации составов, долговечности и рациональных областях применения бетонов и других цементных композиционных материалов. Выявлены приоритетные направления развития отрасли.

Показано, что повысить качество и эффективность использования бетонных смесей можно, используя технологии самоуплотняющихся бетонов. Данные бетоны можно получить только в том случае, если отдельные компоненты, и особенно тонкомолотые минеральные добавки, оптимально согласуются между собой по гранулометрическому составу. При этом наибольший эффект может быть достигнут в случае применения сочетания различных наполнителей, отличающихся дисперсностью, в том числе наноразмерного уровня, обладающих аморфной и кристаллической структурой, а также дисперсной арматуры. Приведены результаты оптимизационных исследований высококачественных бетонов зарубежными специалистами.

Показано, что конструкции на основе бетона часто подвергаются растрескиванию. Трещины могут возникать на любой стадии эксплуатации вследствие отсутствия стабильности объема в бетоне или под воздействием

внешних факторов, таких как экстремальные нагрузки, неблагоприятные условия окружающей среды, неправильный порядок производства строительных работ или ошибки конструирования. Микротрещины способствуют проникновению в бетонную матрицу воды и других примесей, таких как хлорид- и сульфат- ионы, обуславливающие преждевременное разрушение бетона, коррозию встроенной арматуры и прочее, что, в свою очередь понижает прочность конструкций и срок службы зданий и сооружений.

Приведены способы восстановления и усиления железобетонных изделий и конструкций, имеющих трещины и другие дефекты. Описаны технологии восстановления и усиления методами наращивания, пропитки структуры бетона полимерными и другими композициями, а также нанесения монолитных покрытий или приклеивания металлических, полимерных и других элементов. Отмечены преимущества и недостатки каждого из них. Главными недостатками из них являются разные коэффициенты теплового расширения материалов конструкции и усиления, многокомпонентность материалов, используемых для ремонта, трудоемкость выполнения строительных процессов, дороговизна и т.д.

Показано, что существует насущный экономический стимул для разработки бетона способного самостоятельно восстанавливаться и устранять повреждения. Самовосстанавливающиеся материалы - это особый тип материалов, регенерирующий свои прочностные свойства после незначительного разрушения, нанесенного материалу в течение срока его службы. Дана характеристика самовосстанавливающихся бетонов, получаемых посредством химических и биологических технологий. Приведены преимущества автономного внутреннего механизма самовосстановления посредством осаждения кальцита, выработанного введенными в состав бетона микроорганизмами. Описаны выполненные ранее экспериментальные исследования процесса устранения трещин с помощью инкорпорированных бактерий. Дана краткая характеристика механизма самовосстановления, описаны особенности процесса самовосстановления. В то же время отмечено, что до сих пор отсутствуют комплексные исследования в области самовосстановления бетона.

Во второй главе приводится цель и задачи исследований, дано описание объектов и методов исследований.

В этом разделе дается подробное описание используемых материалов и экспериментальных методов.

При выполнении экспериментальных исследований рассматривались образцы из обычного, фиброармированного и модифицированного бетона. Для изготовления образцов цементных композитов использованы сырьевые материалы, удовлетворяющие требованиям соответствующих стандартов. Портландцемент общего назначения GU/10b компании «St. Marys cement»; вода, удовлетворяющая нормативным требованиям, наполнитель (FA) – зола унос класса Се, удовлетворяющая требованиям стандарта ASTM C-618 (2012); в качестве водопоглощающих добавок (HRWRA) и для улучшения

удобоукладываемости ЕСС смесей использовали препарат ADVA R CAST 575 компании «Gase Construction Products»; в качестве дисперсной арматуры-волокон из поливинилового спирта (PVA) длиной 8 мм и диаметром 40 мкм.

В качестве мелкого заполнителя для обычных цементных растворных смесей использовали песок с  $M_k=2,45$ , а для ЕСС – смесей с  $M_k=1,56$ .

Для формирования бетонов использовали: бактерии вида *Sporosarcina ureae* (DSM 2281), *Sporosarcina pasteurii* (DSM 33) и подвид *Bacillus subtilis* - *Spizizenii* (DSM 15029); носители бактерий (перлитовый песок и пемза компании «Garibaldi Pumice Ltd», г. Бернаби, Британская Колумбия, Канада, с размерами частиц, соответственно, 0,42–1,4 мм и 0,1 – 0,3 мм. В качестве минеральной питательной среды применяли лактат кальция компании «Sigma Aldrich Canada Ltd.» (г. Оквилл, Онтарио), а мочевины и дрожжевой экстракт приобрели в компании «Bio basic Canada Inc.» (г. Маркхем, Онтарио).

Вслед за этим также подробно обсуждаются различные методики испытания, которые применяются для изучения бетонов, модифицированных микробиологической добавкой, и эффективности самовосстановления. Для проведения исследования применяли различные методы: оценки роста бактерий и спорообразующей способности, выживаемости, роста кристаллов, уретической активности, прочности, создания и оценки трещин в бетоне, испытания и визуального отображения процесса самовосстановления, численное моделирование механизма самовосстановления. Для изучения процессов, происходящих в бетоне с биомодификатором, использовали оптическую спектроскопию, физико-механические и другие испытания. Для создания трещин в бетоне использовали несколько методов: основанный на испытании на изгиб образцов в трех точках с контролем ширины раскрытия трещин; отливкой образцов с разрезом. Для проверки качества самовосстановления использовали метод испытания на водопроницаемость и акустическую эмиссию. Моделирование характеристик процесса восстановления выполнено на примере изменения прочности, сорбционной способности, проникающей способности хлоридов и скорости ультразвукового импульса в образцах бетона с инкорпорированными бактериями методом статического анализа и анализа экспериментальных данных.

При проведении исследований рассматривали несколько этапов: 1) изучение способов культивирования микроорганизмов, их способности к спорообразованию, характеристик прорастания и процент выживаемости различных бактерий при обработке в условиях высоких температур и значений pH; 2) оценка уретической активности выбранных бактерий, иммобилизованных в цементном растворе с высоким значением pH; 3) проверка влияния добавок восстанавливающего вещества на прочность при сжатии кубиков из цементного раствора; 4) исследование протекания процесса самовосстановления в образцах с наличием трещин, что включает: подготовку и испытание растрескавшихся цилиндрических образцов из цементного раствора с целью выявления влияния самовосстановления с участием бактерий на проницаемость, а также подготовку и испытание образцов из цементного раствора, изготовленных в виде балки (в которых

присутствуют реальные трещины) для определения и количественного описания эффективности залечивания трещин с привязкой к структурным характеристикам (с точки зрения зависимости величины прогиба от нагрузки, прочности на сжатие и пр.) во времени и 5) изучение самовосстановления модифицированных материалов (ЕСС).

Третья глава посвящена теоретическому обоснованию получения самовосстанавливающихся бетонов и объяснению механизмов, происходящих при затягивании трещин. Показано, что до недавних пор при разработке конструкционных материалов использовали концепцию «защиты от повреждений», а не концепцию «управления повреждениями». Это означает оптимизацию прочностных свойств и жесткости конструкций из этих материалов для предотвращения или задержки появления повреждений. Однако предотвратить повреждение в процессе эксплуатации практически невозможно. С другой стороны, в живых организмах процесс управления повреждениями осуществляется автономно и не требует вмешательства человека. То есть, при помощи замкнутых систем циркуляции повреждение воспринимается на биохимическом уровне, и на поврежденный участок подаются соответствующие вещества для придания материалам способности самовосстанавливаться в их матрицу преднамеренно встраивают капсулы и при появлении повреждений содержание этих капсул действует как подвижная фаза.

Для реализации механизма самовосстановления чувствительные материалы должны не только обнаруживать повреждение, но и инициировать процесс регенерации. Обязательным условием для запуска в материале процесса восстановления является наличие внутри системы жидкой компоненты. Общие принципы самовосстановления материалов приведены в работе (Надеги с соавт, 2010) и заключаются: в появлении «подвижной фазы» после образования трещины, затягивании трещины «подвижной фазой» и иммобилизации после устранения трещины.

Из анализа литературных данных следует, что для реализации самовосстановления необходимо выполнить пять общих критериев: наличие воды; наличие и достаточные концентрации химических веществ, преимущественно карбонат- и бикарбонат- ионов и растворенных свободных ионов кальция; трещина должна находиться в стабильном состоянии; ширина трещины, от которой зависит ход самовосстановления, должна быть менее 150 мкм, предпочтительно, менее 50 мкм; давление воды не должно быть слишком высоким и для трещины определенной ширины это условие зависит от соотношения напора воды и толщины структуры; стабильно распространяющаяся трещина: чтобы гарантировать, что трещина не появится снова, при этом ширина трещины должна быть постоянной, несколько изменяясь со временем.

Далее приведены механизмы осаждения кальцита (MICP) микробиологического происхождения. Определены три группы микроорганизмов, обладающие способностью выделять карбонат кальция: (I) фотосинтезирующие организмы, как например, цианобактерии и водоросли, способные поглощать  $\text{CO}_2$ , (II) сульфатредуцирующие бактерии, которые осуществляют диссимиляционное восстановление сульфатов, и (III)

организмы, которые участвуют в одном из циклов превращения азота и его соединений в живых организмах, а именно, в аммонификации аминокислот/восстановлении нитратов/гидролизе мочевины. Показано что гидролиз мочевины с помощью фермента уреазы является самым простым из всех механизмов осаждения выработанных микроорганизмами кальцита.

Бактерии должны быть в состоянии действовать как катализатор реакции гидролиза мочевины. К ним, в первую очередь, относятся уреазоположительные бактерии видов *Bacillus*, *Sporosarcina*, *Clostridium* и *Desulfotomaculum*. Добавляемые в бетон бактерии должны выдерживать механические нагрузки, выживать в условиях высокой плотности. Кроме того, необходимо, чтобы бактерии в составе бетона были толерантными к кислороду.

Рассмотрены биологические и химические аспекты структурообразования и получения бетонов, модифицированных микробиологической добавкой и самовосстанавливающимися изделиями.

Показано, что фермент уреазы, который продуцируют бактерии, разлагают мочевину на ионы аммония и карбонат-ионы. Ионы аммония повышают локальное значение pH и инициирует осаждение карбоната кальция, за счет соединения ионов карбоната и иона кальция из добавленного в бетон соединений кальция. В качестве источника энергии для бактерий необходима питательная среда, которая поставляется бактериям на стадии их выращивания на стадии бетонирования. Наиболее подходящим является лактат кальция, поскольку он начинает растворяться уже в процессе перемешивания бетонной смеси и не влияет на время схватывания бетона.

Помещенные в бетонную смесь бактериальные среды могут быть дополнительно защищены путем иммобилизации в носителях. Оптимальные диаметры пор в носителе соответствуют диаметру от 1 до 5 диаметров микроорганизмов (от 1 до 10 мкм). В качестве таких носителей рекомендованы пемза и цеолит.

В четвертой главе приведен подробный анализ результатов различных экспериментов, проведенных на образцах обычного цементного раствора, фиброармированного цементного раствора и модифицированных цементных композитов (ЕЕС) с целью количественной оценки процесса самовосстановления. Составы для исследований приведены в табл.1 и 2.

Таблица 1

Составы биоцементных композиций для обычного цементного раствора

№ состав	Смесь	Содержание массовых частей в составах							
		Цемент	Песок	Вода	Носитель	BS	NS	w/c	c/s
1	Контрольный	1	3.000	0.50	-	-	-	0.5	0.333
2	NS+цеолит	1	2.836	0.25	0.122	-	0.25	0.5	0.333
3	NS+пемза	1	2.836	0.25	0.122	-	0.25	0.5	0.333
4	<i>S.pasteurii</i> +NS+цеолит	1	2.836	-	0.122	0.25	0.25	0.5	0.333
5	<i>S.pasteurii</i> +NS+пемза	1	2.836	-	0.122	0.25	0.25	0.5	0.333
6	<i>B.subtilis</i> +NS+цеолит	1	2.836	-	0.122	0.25	0.25	0.5	0.333
7	<i>B.subtilis</i> +NS+пемза	1	2.836	-	0.122	0.25	0.25	0.5	0.333
8	<i>S.ureae</i> +NS+цеолит	1	2.836	-	0.122	0.25	0.25	0.5	0.333
9	<i>S.ureae</i> +NS+пемза	1	2.836	-	0.122	0.25	0.25	0.5	0.333

Состав ЕСС в пересчете на вес цемента

Тип	Смесь 1	Смесь 2	Смесь 3
Цемент	1	1	1
ФА	1,2	1,2	1,2
Песок	0,798	0,660	0,563
PVA	0,046	0,046	0,046
HRWRA	0,009	0,009	0,009
w/b (вода/связующее)	0,27	0,27	0,27
Цеолит	-	-	0,096
NS	-	0,290	0,290
BS	-	0,290	0,290
Вода	0,581	-	-

В таблицах 1 и 2 приняты следующие обозначения: NS-питательная среда; BS-бактериальный раствор; w/c-соотношение вода/цемент; c/s-соотношение цемент/песок. NS в пересчете на массу цемента включала 0,002 дрожжевого экстракта, 0,02 кг/м<sup>3</sup> мочевины и 0,02 кг/м<sup>3</sup> лактата кальция.

Приводятся результаты экспериментальных исследований по проверке способности выбранных бактерий хорошо расти в среде бетона, образовывать споры и выживать. Выявлена методом оптической микроскопии высокая выживаемость различных бактерий в условиях высоких температур и значений pH. Также была выявлена высокая уреазная активность для выработки карбонат-ионов, необходимых для образования осадка карбоната кальция (бактерий вида *Sporosarcinaureae* (DSM 2281), так и вида *Sporosarcinapasteurii* (DSM 33)).

Анализ роста культур показал, что споры образовывались в вегетативных клетках. Показано, что три различных вида бактерий хорошо росли на питательной среде. В значительной степени стимулировало образование бактериальных спор добавление в питательную среду марганца.

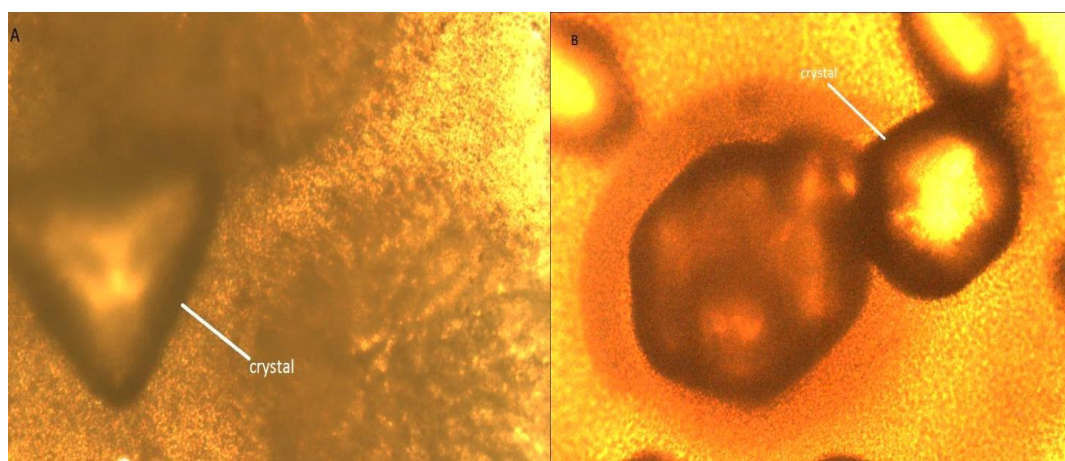


Рис. 1. Наблюдение образования кристаллов на пластинах с бактериями *Sporosarcinapasteurii* (A) и *Sporosarcinaureae* (B) методом оптической микроскопии (10-кратное увеличение)

Показано, что фиксация бактерий в цеолите и пемзе оказала значительный эффект на бактерии в цементном молочке с высоким показателем pH, который был создан для имитации реальной среды с высоким pH внутри бетона. Как качественный, так и количественный анализ процесса

самовосстановления проводили с использованием различных методов тестирования. Для качественного анализа проведены исследования методами SEM, EDS и XRD. Для детального количественного анализа проводили испытания прочности на сжатие, определение сорбционной способности, экспресс-определение химической проницаемости, измерение скорости ультразвуковых пульсов и испытания на изгиб. Испытания на сжатие образцов бетонов, модифицированных микробиологической добавкой, показали, что прочность выше при концентрации бактерий всех видов на уровне  $10^6$  кл./мл.

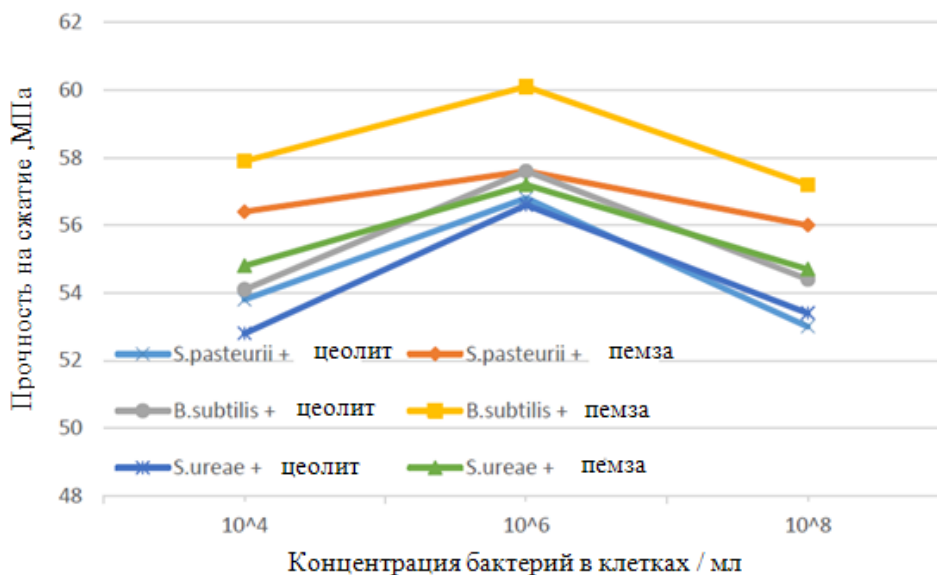


Рис.2. Прочность на сжатие 28-дневных образцов из цементного раствора с различной концентрацией бактерий

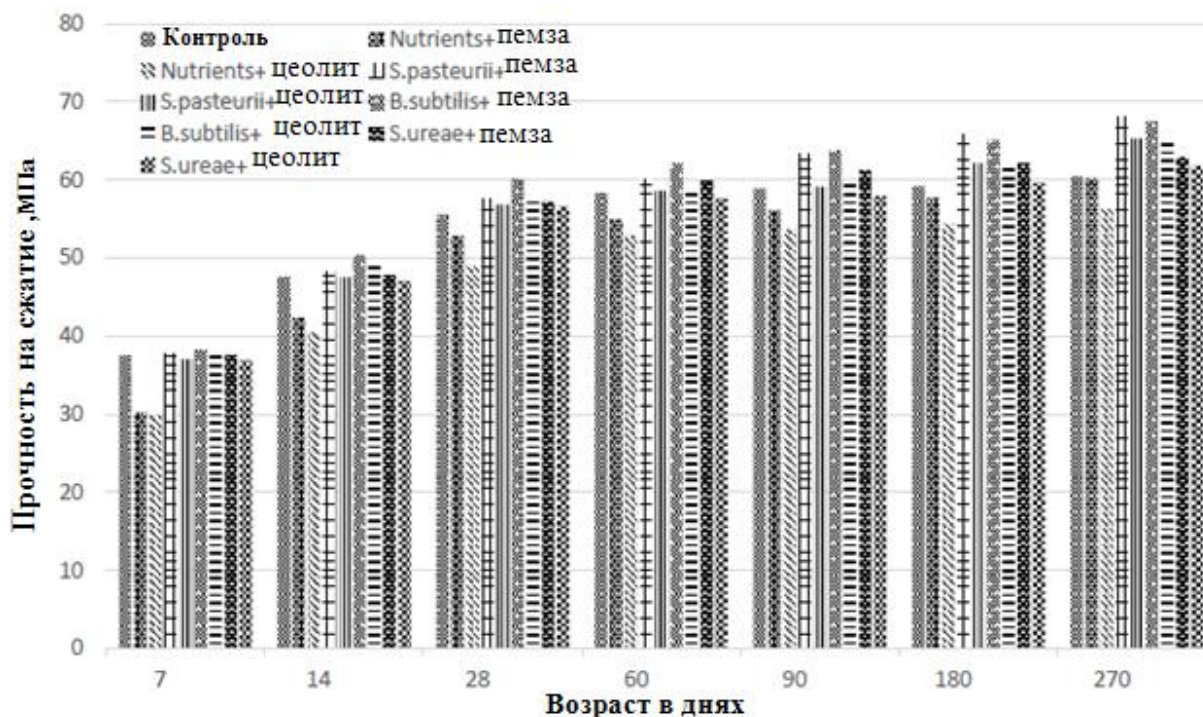


Рис.3. Прочность на сжатие образцов из 9 смесей цементного раствора разного возраста с концентрацией бактерий  $10^6$  кл./мл



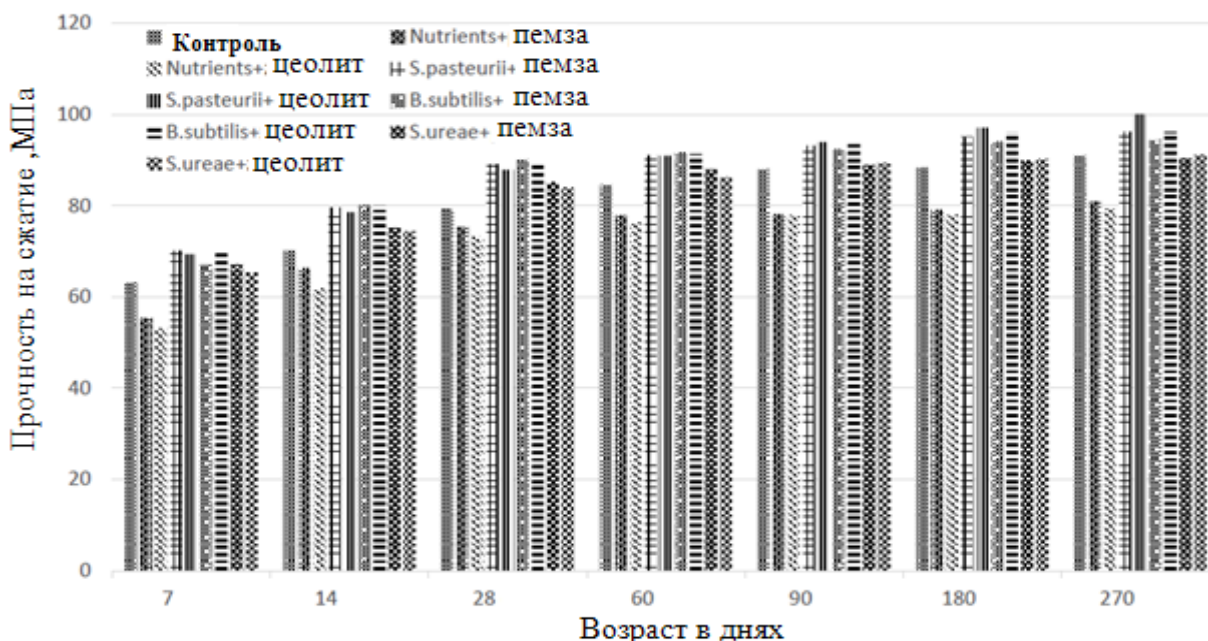


Рис 4. Прочность на сжатие образцов из 9 смесей фиброармированного цементного раствора в разном возрасте

На рис. 3 и 4 приведено сравнение прочности на сжатие образцов обычных и фиброармированных цементных композитов для смесей с концентрацией бактерий  $10^6$  кл/мл в разном возрасте.

После выяснения оптимальной концентрации компонентов бетонов, модифицированных микробиологической добавкой, лучшие результаты использовали во всех последующих экспериментах по самовосстановлению. В четвертой главе представлен подробный анализ и обсуждение всех полученных данных для оценки процесса самовосстановления. На рисунке 5 показаны фотографические изображения процесса заживления трещин, обработанных бактериями образца и контрольного образца после 4-х месяцев восстановления.

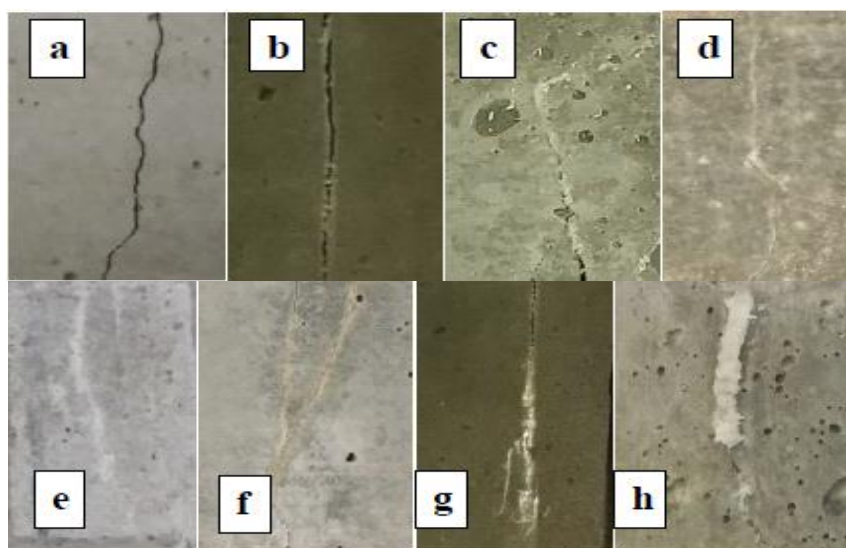


Рис. 5. Фотоснимки процесса затягивания трещин в обработанных бактериями образцах и контрольном образце: (a) - контрольный образец; (b) - образец без бактерий, но с добавлением питательных веществ; (c) и (d) - образцы, обработанные бактериями *Bacillus subtilis*; (e) и (f) - образцы, обработанные бактериями *Sporosarcina aureae*; (g) и (h) - образцы, обработанные бактериями *Sporosarcina pasteurii*

Из рисунка видно, что некоторые из более широких трещин частично заполнены, а некоторые – полностью заполнены. В то же время, в контрольном образце заживление трещин не наблюдается.

Исследования методом SFM показали, что тип материала не влияет на морфологию осаждённых кристаллов. Методом энергетической дисперсной спектроскопии (EDS) подтверждено, что образовавшийся осадок в трещинах состоит во всех случаях из трёх активных элементов: С, О и  $\text{CO}_2$ , то есть основой минеральных осадков является  $\text{CaCO}_3$ . Дополнительно данный факт подтвержден методом рентгеноструктурного анализа.

Исследования методом прозрачных шлифов внутренней области образцов во многих случаях показали открытости, которые на поверхности были закрытыми. Что связано с необходимостью для жизнедеятельности бактерий кислорода и воды, которые в большей степени доступны на поверхности, чем внутри матрицы.

Эффективность самовосстановления подтверждена на модифицированных цементных композитах, в которых создавалось множество узких трещин. Бактерии видов *Spasteurii* и *B.Subtilies* являются идеальным выбором для самовосстановления бетонов. Исследования методом SEM подтвердили, что трещины шириной до 0,16 мм полностью заполнялись кристаллами  $\text{CaCO}_3$ .

В пятой главе приводятся оптимизационные исследования рецептурных и технологических параметров при моделировании характеристик процесса самовосстановления в образцах обычного и фиброармированного цементного раствора с инкорпорированными бактериями методом статистического анализа и анализа экспериментальных данных. Использовали метод планирования эксперимента – полифакторный план типа  $3^3 2^2$ . Статистический анализ был проведен с целью смоделировать влияние ключевых параметров, таких как длительность восстановления, виды бактерий и их концентрации, концентрации лактата кальция и типы материалов-носителей, на характер изменения свойств растресканных образцов из цементных растворов в процессе самовосстановления. В таблице 3 указаны выбранные факторы и их уровни.

Таблица 3

Факторы и их уровни

Фактор	Название	Уровень(-1)	Уровень(0)	Уровень(+1)
<b>A</b>	Длительность испытания количество дней	7 дней	14 дней	28 дней
<b>B</b>	Концентрация бактерий	$10^4$ клеток/мл	$10^6$ клеток/мл	$10^8$ клеток/мл
<b>C</b>	Концентрация лактата кальция	1%	-	3%
<b>D</b>	Виды бактерий	<i>S.ureae</i>	<i>S.pasteurii</i>	<i>B.subtilis</i>
<b>E</b>	Материал-носитель	цеолит	-	пемза

Для оценки эффективности самовосстановления рассмотрены такие отклики/свойства, как проникающая способность хлорид-ионов (RCP), первичная сорбционная способность, скорость ультразвукового импульса (UPV) и прочность на сжатие. Для планирования экспериментов и анализа полученных данных использовали программное обеспечение MINITAB.

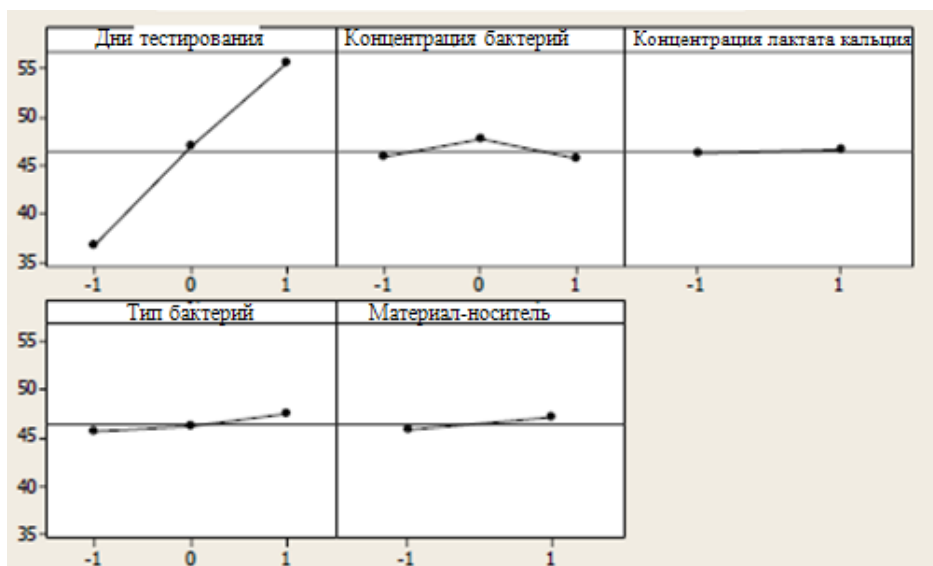


Рис.6. График основных факторов, основанный на полном факторном планировании экспериментов для определения прочности на сжатие

Были получены уравнения регрессии, по которым построены графические зависимости. На рис. 6 показаны графики основных факторов, которые используются для нахождения оптимальных уровней параметров процесса увеличивающих значение средней прочности на сжатие.

Показано, что полученные статистические модели пригодны для прогнозирования характеристик самовосстановления в отношении прочности на сжатие, сорбционной способности, проникающей способности хлоридов и скорости ультразвукового импульса. Статистическое моделирование результатов лабораторных экспериментов позволило установить значения концентраций, которые не рассматривали в ходе экспериментального исследования, и зафиксировать взаимовлияние параметров.

В шестой главе приводятся данные о производственных составах, сведения о внедрении результатов исследования и технико-экономической эффективности. Приведены рекомендуемые для применения на практике составы биобетонных материалов общего назначения, фиброармированных и модифицированных.

Предложены технологические схемы получения самовосстанавливающегося средства, добавочных композитов и бетонов различного типа.

Показана экономическая эффективность их производства в результате снижения стоимости компонентов при различных расходах последних в  $1 \text{ м}^3$ , а также золы-уноса, что значительно расширит сырьевую базу для производства биобетонных материалов и существенно снизит нагрузку на экосистему регионов с горнодобывающими и горнообогатительными предприятиями.

Показана экономическая эффективность строительных материалов с бактериальными добавками, обеспечивающими повышенную долговечность материалов и изделий.

Результаты исследований прошли апробацию и рекомендованы к внедрению министерством строительства, транспорта и дорожного хозяйства РМ.

В заключении приведены конечные результаты и выводы проведенного исследования, даны рекомендации для будущих изысканий.

## Заключение

### Итоги выполненного исследования

1. Приведен обзор научно-технической литературы в области структурообразования, технологии изготовления, оптимизации составов и рациональных областях применения цементных композиционных материалов. Показано, что повышение качества и эффективности использования бетонных смесей возможно при использовании технологии самоуплотняющихся бетонов. Результаты оптимизационных исследований высококачественных бетонов показали, что наибольший эффект может быть достигнут в случае применения сочетания различных наполнителей, отличающихся дисперсностью, в том числе наноразмерного уровня, обладающих аморфной и кристаллической структурой.

2. Показано, что бетонные конструкции во время эксплуатации часто подвергаются растрескиванию, что приводит к ухудшению качества и сокращению ожидаемого срока их эксплуатации. Трещины могут возникать вследствие отсутствия стабильности объема в бетоне или под воздействием внешних факторов, таких как экстремальные нагрузки, неблагоприятные условия окружающей среды, неправильный порядок производства строительных работ или ошибки конструирования. Приведены способы восстановления и усиления железобетонных изделий и конструкций, имеющих трещины и другие дефекты. Описаны технологии восстановления и усиления методами наращивания, пропитки структуры бетона полимерными и другими композитами, а также нанесения монолитных покрытий или приклеивания металлических, полимерных и других элементов. Отмечена многокомпонентность, трудоемкость строительных процессов, дороговизна и т.д. при применении известных методов восстановления и усиления железобетонных конструкций.

3. Показано, что существует насущный экономический стимул для разработки бетона способного самостоятельно восстанавливаться и устранять повреждения. Самовосстанавливающиеся материалы - это особый тип материалов, регенерирующий свои прочностные свойства после незначительного разрушения, нанесенного материалу в течение срока его службы. Показаны преимущества автономного внутреннего механизма самовосстановления посредством осаждения, выработанного введенными в состав бетона микроорганизмами кальцита.

4. Осуществлено теоретическое обоснование создания самовосстанавливающихся бетонов и устранения трещин с помощью бактерий. Рассмотрены биологические и химические аспекты самовосстановления.

- Известно, что в живых организмах процесс управления повреждениями осуществляется автономно и не требует вмешательства человека. То есть при посредстве замкнутых систем циркуляции повреждение воспринимается на биохимическом уровне, и на поврежденный участок подаются соответствующие вещества. Приведены общие принципы самовосстановления материалов, на конечной стадии которых происходит затягивание трещины подвижной фазой и иммобилизация после

устранения трещины. Приведены формулы химических реакций осаждения карбоната кальция.

- Приведены необходимые условия для заживления трещин: ширина трещины должна быть менее 150 мкм, наличие воды и химических соединений (карбонат – и бикарбонат ионов и растворенных ионов кальция); Наиболее эффективным способом получения карбонатных ионов является гидролиз мочевины с помощью бактерий видов *Bacillus*, *Sporosarcina*, *Clostridium* и *Desulfotomaculum*. Необходимым также для осуществления работы бактерий являются питательные среды, в качестве которой рекомендуется лактат кальция. Помещенные в бетонную смесь бактериальные споры защищаются путем их иммобилизации в носителях, в качестве которых рекомендуется пемза и цеолит.
5. Экспериментально осуществлена оценка роста и способности формировать кристаллы, спорообразование, прорастание и выживания трех разных видов бактерий в условиях высокой температуры и pH.
- Установлено, что бактерии видов *Sporosarcinapasteurii* и *Sporosarcinaureae* проявляли очень высокую уреазную активность. Однако бактерии *Sporosarcinapasteurii* показали самую высокую активность. При этом формирование кальцита в большей степени выражено в образце с инкорпорированными бактериями *Sporosarcinapasteurii*, чем в образце с бактериями *Sporosarcinaureae*. Различие между двумя бактериальными видами *Sporosarcinapasteurii* и *Sporosarcinaureae* в осаждении CaCO<sub>3</sub> может быть обусловлено различными возможностями этих видов производить различные типы ферментов уреазы.
  - Выявлено влияние питательных веществ на прочность. Добавление лактата кальция в количестве 2% от веса цемента приняты в качестве оптимальной концентрации, которая обеспечивала максимальную прочность, не влияя на характеристики цементного раствора. Также выявили, что добавки лактата кальция в количестве более 4% сильно ослабляют прочностные свойства, затрудняя образование связей между компонентами матрицы.
  - Результаты рентгеноструктурного анализа показали, что доминирующая морфология кристаллов в образцах цементного раствора, обработанных всеми тремя выбранными видами бактерий, соответствовала кальциту. Поэтому образование минеральных осадков в виде кальцита тремя различными видами бактерий обусловлено присутствием лактата кальция, выбранного в качестве источника кальция. Процентное содержание карбоната кальция в осадке было значительно выше в случае образцов с инкорпорированными бактериями, чем в образцах без бактерий.
  - Отмечено, что тип бактериальных штаммов оказывает значительное влияние на морфологию кристаллов. Тот факт, что на всех образцах получены аналогичные результаты рентгеноструктурного анализа, хотя и при наличии явных морфологических различий, свидетельствует, что различия были результатом изменения темпов роста кристаллов вдоль разных плоскостей кристаллической структуры. Другое возможное объяснение различий в

- морфологии кристаллов, полученных с различными бактериальными культурами, может быть связано с уровнем фактической уреазной активности.
- Все выбранные виды бактерий показали хорошую самовосстанавливающую эффективность в отношении сорбционной способности и быстрой проникающей способности хлоридов, хотя бактерии вида *Sporosarcinapasteurii*, как и вида *Bacillus subtilis* обладали более высокой эффективностью восстановления по сравнению с бактериями вида *Sporosarcinaureae*. Результаты химического и морфологического анализа показали, что образование  $\text{CaCO}_3$  и глубина цементации были более интенсивными в случае бактерий *Sporosarcinapasteurii* по сравнению с бактериями вида *Sporosarcinaureae*.
  - Изучены эффективности цеолита и пемзы в качестве материала-носителя или защитного средства для бактерий в высокощелочной среде бетона. Полученные результаты доказали, что для обеспечения метаболической активности бактерий в среде с высоким показателем pH они должны быть защищены. Цеолит и пемза проявили сильное защитное действие для всех трех выбранных видов бактерий в цементной среде с высоким pH.
6. Выявлено влияние бактерий на основные физико-механические свойства самоуплотняющихся бетонов.
- Установлено, что при добавлении бактерий прочность на сжатие увеличивается, и это увеличение обусловлено, главным образом, образованием на поверхности клеток микроорганизмов и в порах цементного раствора осадка карбоната кальция
  - Образцы и обычного, и фиброармированного цементного раствора с инкорпорированными бактериями вида *Bacillus subtilis* показали максимальную прочность на сжатие. Затем следовали образцы с бактериями вида *Sporosarcinapasteurii* с периодом выдержки 90 дней, а затем образцы с бактериями вида *Sporosarcinapasteurii*. В то же время, прочность на сжатие образцов, приготовленных с добавлением бактерий *Sporosarcinaureae*, была ниже, чем в случае двух других бактериальных штаммов. Сделан вывод, что оба вида бактерий: *Sporosarcinapasteurii* и *Bacillus subtilis* обладают превосходным потенциалом самовосстановления с точки зрения увеличения прочности материала на сжатие. В конечном итоге вид *Sporosarcinapasteurii* оказался лучшим восстанавливающим средством среди отобранных бактериальных штаммов. Максимальное увеличение прочности на сжатие достигали при концентрации  $10^6$  кл./мл.
7. Проведена оценка свойств образцов бетона после самовосстановления:
- Присутствие в образце бактерий привело к значительному снижению скорости поглощения воды по сравнению с контрольным образцом. Образцы обычного цементного раствора с отверстиями и растресканные образцы фиброармированного цементного раствора, содержащие бактерии и питательные вещества, оказались достаточно устойчивыми к проникновению хлоридов. В результате отложения слоя карбоната кальция на поверхности и внутри пор образцов цементного раствора привело к уменьшению поглощения воды. Когда поры заполняются такими материалами, как карбонат кальция, проникновение воды, воздуха и других загрязняющих веществ затрудняется.

- При анализе результатов определения сорбционной способности и RCP как обычного, так и фиброармированного цементного раствора обнаружено, что значительное самовосстановление образцов произошло в течение первых 120 дней восстановления. На более позднем этапе имела место менее выраженная самовосстановительная активность, о чем свидетельствует отсутствие значительного изменения сорбционной способности и значений RCP.
- Для растресканных и восстановленных образцов наблюдали снижение проникающей способности хлорид-ионов приблизительно на 13% за 4 месяца, 18% за 6 месяцев и 20% за 8 месяцев, тогда как в образцах, содержащих питательные вещества и цеолит и питательные вещества и пемзу, снижение этого параметра составляло 16% через 4 месяца, 22% через 6 месяцев, 25% через 8 месяцев и 17% через 4 месяца, 22% через 6 месяцев, 25% через 8 месяцев, соответственно. В то же время содержащие бактерии образцы показали среднее снижение проникающей способности около 32% за 4 месяца, 46% за 6 месяцев и 57% за 8 месяцев. Из 6 содержащих бактерии смесей образец с пемзой и *Sporosarcinapasteurii* показал максимальное снижение проникающей способности хлорид-ионов (приблизительно 65% за 8 месяцев).
- Выявлена более высокая эффективность восстановления, образцов с пемзой, которые проявили лучшую сорбционную способность и значение RCP, чем образцы с цеолитом как в случае обычного, так и фиброармированного цементного раствора. Причиной этого может быть разница в распределении частиц материала по размерам. В данном исследовании распределение частиц по размерам в пемзе было более тонким, чем в цеолите.
- Результаты испытаний на изгиб с приложением сосредоточенной нагрузки в четырёх точках, выполненных на призматических образцах из фиброармированного цементного раствора до и после восстановления, показали, что материал до некоторой степени смог возобновить свою прочность после частичного разрушения. Контрольные образцы (без бактерий) восстановили приблизительно 20-23% от первоначальной прочности через 8 месяцев после повреждения. В то же время образцы, содержащие бактерии, восстанавливали 41-48% своей прочности через 4 месяца и около 49-59% - через 8 месяцев после повреждения. Это свидетельствует о превосходном самовосстановлении образцов, обработанных бактериями, по сравнению с контрольными образцами.
- Образцы с инкорпорированными бактериями также показали лучшие результаты восстановления параметра UPV, чем контрольные образцы. Следует отметить, что для образца с бактериями вида *Sporosarcinapasteurii*, иммобилизованного в цеолит, получено самое высокое соотношение восстановления по показателю UPV.
- Количественная оценка заполнения трещин в течение каждого месяца (выполнялась измерением величины UPV) свидетельствует, что в большей степени заполнение трещин произошло в течение первого и второго месяцев восстановления. После двухмесячного восстановления скорость заполнения трещин значительно уменьшилась. Одной из возможных причин может быть недоступность для бактерий соединения кальция. Это

соединение могло войти в состав матрицы цементного раствора и, следовательно, стать недоступным для использования бактериями.

- Проведенные методами SEM и EDS исследования образцов фиброармированного цементного раствора показали, что инкорпорированные бактерии могут продуцировать обильное количество минералов, которые потенциально могут уплотнять свежесформованные трещины. Обнаружено, что трещины шириной 0,13-0,16 мм в цементных образцах полностью заполнялись иммобилизованными в цеолите/пемзе бактериями. В то же время только тонкий налет минерального осадка наблюдали на стенках трещины образца с питательными веществами в отсутствие бактерий и ничтожно малый осадок или тонкий налет на стенках трещины наблюдали в контрольном образце (обычный/фиброармированный цементный раствор).

8. Одна из целей настоящего исследования заключалась в выяснении, может ли процесс самовосстановления в присутствии бактерий и при опосредованном бактериями осаждении карбоната кальция привести к усилению механических свойств и адгезионной прочности ЕСС-смесей. Полученные результаты показали, что материал может реализовать эти требования применительно к прочности на сжатие и адгезионной прочности.

- Самовосстанавливающийся ЕСС демонстрирует значительное восстановление механических свойств, таких как прочность на изгиб, жесткость при изгибе и деформационная способность. Выявлены различные степени регенерации механических свойств, таких как прочность на изгиб, деформация изгиба и жесткость, благодаря процессу самовосстановления. В большей степени регенерацию механических свойств, вследствие самовосстановления наблюдали в образце с иммобилизованными в цеолите бактериями, чем в образце с незащищенными бактериями и контрольном образце.
- Результаты испытаний на изгиб фиброармированного цементного раствора и ЕСС показали, что бактерии проявляют лучшую эффективность заживления трещин меньшего размера, поскольку им может быть трудно залечивать более широкие трещины. Залеченные трещины оставались наиболее слабым местом, где повторно появлялись повреждения без образования новых трещин, в фиброармированных образцах с относительно большой шириной трещины. Напротив, в случае содержащих бактерии образцов ЕСС некоторые из трещин отходили от ранее существовавших залеченных трещин; и при повторном нагружении возникали новые трещины. Это наблюдение подтвердило вывод, что самовосстановление с участием бактерий является более мощным и способно обеспечить отличную эффективность при залечивании трещин меньшей ширины.

9. Исследование процесса самовосстановления, проведенных по таким свойствам, как прочность на сжатие, проникающая способность хлорид-ионов, водопоглощение и прочность при изгибе, доказали, что использование образованных микроорганизмами минеральных осадков, по всей видимости, оказалось перспективным для применения на практике. Образование микроорганизмами осадка может привести к снижению количества



капиллярных пор и закупорке пор, что существенно снижает проникновение в матрицу бетона агрессивных химических веществ и, следовательно, увеличивает срок его эксплуатации. Использование бактерий в бетонных композитах может быть весьма желательным, поскольку осаждение кальцита, обусловленное метаболическими процессами в микроорганизмах, является естественным и экологически чистым.

- Считается, что метод самовосстановления с использованием бактерий может быть использован для бетонных конструкций, которые труднодоступны для технического обслуживания и ремонта, а именно, подземных сооружений, мостов и плотин. Поскольку трещины могут немедленно зацементироваться, затраты на техническое обслуживание сократятся, а срок службы конструкций продлится, несмотря на предположение о более значительных первоначальных затратах.

10. На основании экспериментальных результатов разработаны математические статистические модели с использованием метода планирования и анализа экспериментов (DOE), что является идеальным выбором для моделирования характеристик процесса самовосстановления. Этот метод позволил идентифицировать оптимальное сочетание ингредиентов для превосходной эффективности восстановления. Применение метода DOE устранило большую избыточность и создало характеристические уравнения для свойств цементных композитов в целях количественной оценки процесса самовосстановления. Характеристические уравнения получили с помощью таких средств статистического анализа как анализ методом регрессии и дисперсионный анализ (ANOVA). Для прогнозирования характеристик самовосстановления на примере прочности на сжатие, RCP, сорбционной способности и UPV для армированного волокном цементного раствора разработаны статистические модели. Дееспособность этих моделей подтвердили экспериментальные результаты. Разработанные статистические модели могут использоваться в качестве полезного инструментария для количественной оценки способности самовосстановления фиброармированного цементного раствора с инкорпорированными бактериями в контексте проиллюстрированных свойств.

#### ***Рекомендации для будущих исследований***

##### ***Рекомендуется:***

Провести исследование влияния относительной влажности и температуры на эффективность бактерий в процессе самовосстановления. Диапазон изменения относительной влажности и температуры должен учитывать воздействие этих параметров на самовосстанавливающую способность бактерий в бетонных композитах.

Изучить влияние различных источников кальция, таких как нитрат кальция, ацетат кальция, глютамат кальция, хлорид кальция и пр., на самовосстанавливающиеся бетонные композиты на основе бактерий, поскольку химическая природа соединения кальция может в значительной степени влиять на скорость образования, морфологию, кристаллическое строение и химический состав минеральных осадков.

Провести более подробное исследование процесса самовосстановления образцов ЕСС с инкорпорированными бактериями, акцентируя особое

внимание на таких прочностных свойствах, как газопроницаемость, водопроницаемость, РСРТ, сорбционная проницаемость и пр.

Провести исследования различного состава ЕСС-смесей с инкорпорированными бактериями для определения наилучшего состава смеси, который обеспечит максимальную эффективность заживления. Для получения оптимального состава смеси необходимо выполнить различные перестановки и сочетания параметров. Для оптимизации состава смеси и эффективности самовосстановления могут быть использованы планирование экспериментов и средства статистического анализа.

Прежде, чем применять в промышленном масштабе этот инновационный вид бетона с включением бактерий, провести подробное исследование ряда других свойств, таких как долговременная износостойкость и рентабельность.

***Основные положения диссертации изложены в следующих публикациях:***

***- в изданиях, индексируемых в базах Scopus и Web of Science:***

1. Erofeev V.T, Maksimova I.N, Makridin N.I and Salman Dawood Salman AL-Dulaimi, 2019. Investigation of the crack resistance of cement stone and rocks. International Journal of Civil Engineering & Technology (IJCIET) – Scopus Indexed. Volume:10, Issue: 4, Pages: 1300 –1311.
2. Salman Dawood Salman AL-Dulaimi, Taher AL-Dafafea, Maksimova I.N and Erofeev V.T, 2019. Study of self-healing bio-concrete. International Journal of Civil Engineering & Technology (IJCIET) – Scopus Indexed. Volume:10, Issue: 4, Pages: 1354 – 1360.

***Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных Перечнем ВАК Минобрнауки РФ:***

3. Ерофеев В.Т. Бактерии для получения самовосстанавливающихся бетонов / В.Т. Ерофеев, Аль Дулайми Салман Давуд Салман, В.Ф. Смирнов / Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2018. – № 4, Том 5– С.1–13.
4. Ерофеев В.Т. Химические аспекты процесса устранения трещин бетона с помощью бактерий / В.Т. Ерофеев, Аль Дулайми Салман Давуд Салман, В.Т. Фомичев // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2018. – № 3, Том 5.– С.1–10.
5. Баженов Ю.М. Технология самвосстановления железобетонных конструкций с помощью микроорганизмов / Ю.М. Баженов, В.Т. Ерофеев, Аль Дулайми Салман Давуд Салман // Всероссийский информационно-аналитический и научно-технический журнал Русский инженер. – М. – 2018. – № 4– С.46–48.
6. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Технология восстановления железобетонных конструкций с помощью микроорганизмов / Аль Дулайми Салман Давуд Салман // Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 11(1011). – С. 52 – 53.
7. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Исследование изменений прочностных характеристик цементных композитов в зависимости от концентрации в них бактерий и возраста образцов / В.Т. Ерофеев, Аль Дулайми Салман Давуд Салман //Приволжский научный журнал. Строительные материалы и изделия. – 2018. – № 3. – С. 70–77.
8. Ерофеев В.Т. Бактерии для получения биобетонов / В.Т. Ерофеев, Аль Дулайми Салман Давуд Салман, В.Ф. Смирнов, В.Т. Фомичев // БСТ – Бюллетень строительной техники. – 2018. – № 8(1018). – С. 31–38.

***Публикации в других изданиях:***

9. Erofeev V.T. Bio resistant Building Composites Based on WasteGlass / V.T. Erofeev, V.F. Smirnov, S.N. Bogatova, A.D. Bogatov, S.V. Kaznacheyev, A.I. Rodin, Salman Dawood Salman Al-Dulaimi // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering . – 2016. – Volume 13. – Issue 1 Ver. V. – PP. 60–65.
10. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Исследование влияния ортофосфата цинка на коррозию труб // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2013. – № 5. – С. 210 – 214.

11. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Исследование инициированного бактериями процесса самовосстановления обычного и фиброармированных цементных растворов по сорбционной способности / Аль Дулайми Салман Давуд Салман // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2013. – № 5. – С. 1 – 3.
12. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Скорость ультразвукового импульса как критерий оценки самовосстановления цементных растворов // Сборник статей Международной научно-технической конференции: Наука и инновации: Исследование и достижения. – Пенза : Изд-во ПДЗ, 2018. С. 65 – 69.
13. Салман Давуд Салман Аль Дулайми. О методах повышения долговечности и надежности железобетонных конструкций / Салман Давуд Салман Аль Дулайми // НАСКР – 2018: новое в архитектуре, проектировании строительных конструкций и реконструкции Материалы IV Международной конференция (X Всероссийская конференция). – Чебоксары, 2018. – С. 316 – 322.
14. Салман Давуд Салман Аль Дулайми. Оценка биодеструкции строительных материалов и использование ее механизмов в планировании долговечности зданий и сооружений / Салман Давуд Салман Аль Дулайми // Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов. – 2013. – № 5. – С. 1–3.
15. Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Ерофеев В.Т., Мишуняева О.А. / Способы повышения долговечности и надежности железобетонных конструкций // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – 2016. – № 1. – С. 13 – 19.
16. Салман Давуд Салман Аль Дулайми, Ерофеев В.Т., Смирнов В.Ф. Разрушение бетонов коррозионно-активными продуктами жизнедеятельности микроорганизмов / Салман Давуд Салман Аль Дулайми, В.Т. Ерофеев, В.Ф. Смирнов // Актуальные вопросы архитектуры и строительства. – 2018. – № 16. – С. 330–334.
17. Салман Давуд Салман Аль Дулайми. Повышение долговечности железобетонных конструкций с помощью биотехнологий / Салман Давуд Салман Аль Дулайми // Актуальные вопросы архитектуры и строительства. – 2018 – № 16. – С. 334 – 336.
18. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Исследование влияния сероокисляющих бактерий на биокоррозию бетона / Аль Дулайми Салман Давуд Салман // Курский государственный университет: Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. – Курск. – 2015. – С. 55 – 62.
19. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Деструкция бетонов в условиях воздействия биогенных сред / Аль Дулайми Салман Давуд Салман // Композиционные строительные материалы. Теория и практика: Сборник статей Международной научно-технической конференции. – Пенза. – 2015. – С.120 – 128.
20. Аль Дулайми Салман Давуд Салман. Биологическая коррозия бетонов / Аль Дулайми Салман Давуд Салман // Композиционные строительные материалы. Теория и практика: Сборник статей Международной научно-технической конференции. – Пенза. – 2015. – С.129 – 138.
21. Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Аль-Дефафе Тахер, Дергунова А.В., Ерофеев В.Т. // Техничко-экономическая эффективность применения бетонов модифицированных бактериями при производстве строительных конструкций. Теория и практика: Сборник статей Международной научно-технической конференции. – Пенза. – 2019. – С.133 – 142.
22. Аль Дулайми Салман Давуд Салман, Ерофеев В.Т., Дергунова А.В. // Исследование биобетонов и их применение. Сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации» (XXIII научные чтения). – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. С. 56-59.
23. Аль Дулайми Салман Давуд Салман / Технологические инновации и решение проблем жилищно-гражданского строительства // Сборник статей XXIII Международной научно-практической конференции, посвященной 65-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации» (XXIII научные чтения). – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2019. С. 25-29.

АЛЬ ДУЛАЙМИ САЛМАН ДАВУД САЛМАН

САМОВОССТАНАВЛИВАЮЩИЕСЯ БЕТОНЫ,  
МОДИФИЦИРОВАННЫЕ МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ  
ДОБАВКОЙ

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
Кандидата технических наук

---

Подписано в печать «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2019 г. Заказ №\_\_\_ Формат 60×84/16  
Тираж 80 экз. Усл. печ.л. 1,5

---

127994, Россия, г. Москва, ул. Образцова, д. 9, стр. 9, РУТ (МИИТ)