

На правах рукописи



Гальцев Алексей Андреевич

**ПОВЫШЕНИЕ СТОЙКОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОНА К ВОЗДЕЙСТВИЮ
ГРИБКОВЫХ МИКРООРГАНИЗМОВ С ПОМОЩЬЮ
ГИДРОФОБНОЙ ДОБАВКИ**

2.1.5 Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сахалинский государственный университет», в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тамбовский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Строкин Константин Борисович**, доктор экономических наук, доцент, советник РААСН

Официальные оппоненты: **Степанова Валентина Федоровна**, академик МИА, доктор технических наук, профессор, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», заведующий лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций

Артамонова Ольга Владимировна, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», профессор кафедры «Химия и химическая технология материалов»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Защита состоится «23» мая 2025 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.300.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, Иваново, пр. Шереметевский, 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета (www.ivgpu.ru).

Автореферат разослан «___» апреля 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Касьяненко Наталья Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Разрушения и повреждения от коррозии являются проблемой во всех областях промышленности, а для строительного сектора – одной из основных. Коррозия, вызванная микробиологическим воздействием, вызывает деструкцию зданий и сооружений повсеместно. Развитию этой формы коррозионной деградации материалов способствует наличие на поверхности микроорганизмов, их развитие и активность. Микробиологическая коррозия повысила спрос на экологически чистые и экономически эффективные строительные материалы на глобальном уровне.

Зачастую под микробиологической коррозией рассматриваются повреждения, вызванные сульфатредуцирующими и сероокисляющими бактериями в канализационных стоках. Однако в окружающей среде присутствует значительно большее количество видов микроорганизмов, оказывающих особо неблагоприятное воздействие на каменные здания и сооружения и конструкции на цементной основе, такие как мосты, прибрежные и гидротехнические сооружения, фундаменты, стены складов и подвалов. Вид и распространение микробных сообществ на поверхности бетона зависит от pH, трофических свойств микроорганизмов (автотрофы, гетеротрофы) и доступности питательных веществ.

Несмотря на все исследования, проведенные на сегодняшний день, точный механизм микробиологического повреждения бетона и железобетона требует исследований ввиду большого разнообразия микроорганизмов, заселяющих поверхность, и условий эксплуатации изделий. Было предложено несколько математических моделей, описывающих поведение бетонных изделий в условиях биodeградации, недостатком которых является ограниченность геометрическими характеристиками структур и категориями микроорганизмов. Из-за сложности понимания механизма протекания микробиологической коррозии возникают неточности в проведении лабораторных испытаний, имитации этого типа воздействия. Проведение исследований может быть трудоемким, дорогим и неэффективным из-за использования неподходящих методов. Разнообразие микроорганизмов, колонизирующих поверхности материалов, обуславливает отсутствие общего подхода к описанию деструктивных процессов и повышению биостойкости материалов. Часто в исследованиях используются допущения и упрощенные методики, дающие нестабильные результаты.

Изучение массообмена в цементном камне на начальном этапе воздействия агрессивной среды необходимо для определения сроков установления равновесного состояния в системе, в течение которых концентрация кальция в бетоне будет снижаться до значений, соответствующих разложению ценных компонентов, ответственных за поддержание прочности.

Степень разработанности темы. Многие авторы рассматривали коррозию бетона в канализационных трубах, и биоповреждения в этих конструкциях были тщательно исследованы. Химическая коррозия бетона в водной среде хорошо изучена с точки зрения вымывания из структуры компонентов цементного камня.

Всесторонне рассмотрены аспекты колонизации микроорганизмами поверхностей строительных изделий и конструкций, и вызванные этим разрушения пораженных материалов. Анализируются возможности инициирования микробиологической коррозии с учетом физических (например, пористости) и биологических (например, наличия органических веществ, необходимых для надлежащего роста микроорганизмов) особенностей бетонов. Изучаются характеристики бактерий и грибов, ответственных за биологическое разрушение бетонных поверхностей, с учетом явления сукцессии микроорганизмов. Устанавливаются основные симптомы микробиологической коррозии, включая наиболее распространенные морфологические (например, изменение цвета или фибрилляции) и структурные (например, снижение прочности) изменения в корродирующих материалах.

Разрабатываются и совершенствуются методики и техники нейтрализации и удаления микробиологического загрязнения бетонных поверхностей, а также алгоритм работы для проверки эффективности профилактических решений.

Сложности в понимании и прогнозировании биоповреждений бетона микроорганизмами в водной среде и возможных взаимодействий между абиотической и микробиологической коррозией обуславливают необходимость в разработке эффективных, но простых и дешевых методов предотвращения этого.

Сахалинской научной школой проводились исследования стен подвалов жилых домов и зданий текстильных фабрик, в ходе которых на бетонной поверхности были обнаружены различные микроорганизмы, но большинство из них были грибами *Aspergillus niger*. Проведенные ранее исследования и анализ научной литературы показали целесообразность обеспечения первичной защиты бетона от биообрастания и биоповреждения. Представленная работа является продолжением исследований кинетики и динамики коррозионного массопереноса. Полученные представления об интенсивности коррозионных процессов в цементном камне коррелируют с результатами исследований других авторов и дополняют общую картину коррозионных явлений в бетоне. Установленные в работе показатели массопереноса могут быть использованы в существующих математических моделях для прогнозирования срока службы бетона или для разработки и проверки новых уравнений, описывающих процессы массопереноса.

Научная гипотеза диссертационного исследования заключается в том, подход к оценке степени повреждения грибковыми микроорганизмами железобетона на основе изучения коррозионного массопереноса дает научное обоснование рекомендациям по обеспечению защиты бетона от биообрастания с помощью гидрофобных добавок.

Объектом исследования является грибковая деструкция бетона и стальной арматуры в нем.

Предметом исследования являются эксплуатационные характеристики железобетона и коррозионные процессы, протекающие в композите при грибковом воздействии.

Цель работы: научно обосновать эффективность добавления стеарата кальция в цементную смесь при изготовлении бетона для предотвращения обрастания и повреждения железобетона, эксплуатируемого при увлажнении, грибковыми микроорганизмами.

Для реализации поставленной цели необходимо выполнить следующие **задачи**:

1. Подобрать оптимальное количество стеарата кальция для введения в цементную смесь, обеспечивающее замедление развития грибковой деструкции железобетона при эксплуатации в условиях увлажнения.
2. Изучить влияние добавки стеарата кальция на эксплуатационные характеристики бетона и совместную работу бетона и стальной арматуры.
3. Установить степень повреждения бетона, содержащего стеарат кальция, грибковыми микроорганизмами.
4. Спрогнозировать срок службы железобетона, изготовленного с добавкой стеарата кальция, в условиях грибкового воздействия при увлажнении.

Научная новизна работы:

- обоснована целесообразность и показана эффективность введения в цементную смесь при изготовлении бетона стеарата кальция в количестве 0,5-1 % от массы цемента для предотвращения биообрастания поверхности и развития грибковой деструкции в условиях увлажнения. Концентрации гидрофобной добавки 0,5 масс. % достаточно для обеспечения биостойкости бетона внутренних помещений, в том числе эксплуатируемых в условиях увлажнения. Введение в цементную смесь добавки стеарата кальция в количестве 1 масс. % может быть рекомендовано для бетона наружных сооружений, также эксплуатируемых в условиях увлажнения;

- установлена связь изменений в структурообразовании при гидратации и твердении цементного камня бетона с гидрофобной добавкой, сохранения прочностных характеристик биодegradируемого железобетона и степени повреждения бетона грибами *Aspergillus niger* при увлажнении. Механизм влияния стеарата кальция заключается в запирации воды в структуре цементного камня при твердении, что обуславливает продлевание гидратационных процессов и образование большего количества кальцийсодержащих фаз, обеспечивающих повышение прочности бетона. Прогнозируемая глубина разрушения составляет через 10 лет 1 см для обычного бетона и 2-2,5 мм для гидрофобного бетона, через 50 лет – 2 см и 5-5,5 мм, соответственно;

- на основании полученных данных об изменении электрохимического состояния стальной арматуры в бетоне, подвергаемом воздействию грибов *Aspergillus niger* в условиях увлажнения, рассчитаны показатели скорости коррозии и спрогнозированы сроки критического повреждения арматуры. Скорость коррозии стальной арматуры в среде биогенных органических кислот в 3-4 раза замедлена в гидрофобном бетоне, по сравнению с обычным. При распространении агрессивной среды по поверхности арматуры скорость коррозии составит 0,14 мм/год, что за 10 лет вызовет уменьшение диаметра на 1,5 мм;

- определены показатели массопереноса (плотность потока, коэффициенты массопроводности и массоотдачи) в бетоне при грибковой деструкции, характеризующие замедление массообменных процессов в бетоне, содержащем гидрофобную добавку, в 2,5-3 раза. Представлена математическая модель массопереноса целевого компонента в структуре гидрофобизированного стеаратом кальция цементного бетона при воздействии грибковых микроорганизмов, с помощью которой рассчитаны сроки достижения у поверхности арматуры необходимой для развития коррозии концентрации органических кислот, выделяемых грибами: в обычном бетоне – 4 года, в бетоне со стеаратом кальция – 12-16 лет. С учетом скорости коррозии стальной арматуры в растворе органических кислот критической концентрации прогнозируемый срок деструкции системы «бетон – стальная арматура» грибами *Aspergillus niger* в условиях увлажнения составляет 15-17 лет после биообрастания бетона без добавок; 25-30 лет – бетона с добавками стеарата кальция.

Теоретическая и практическая значимость работы. Получены представления о влиянии гидрофобной добавки стеарата кальция на эксплуатационные характеристики бетона и на совместную работу бетона со стальной арматурой, а также о степени повреждения бетона с гидрофобной добавкой грибковыми микроорганизмами.

Сформулирована математическая модель массопереноса целевого компонента в структуре гидрофобизированного стеаратом кальция цементного бетона при воздействии грибковых микроорганизмов. Спрогнозирован срок службы железобетона, изготовленного с добавкой стеарата кальция в бетонную смесь, в условиях эксплуатации при увлажнении и грибковом воздействии. Введение добавок стеарата кальция в цементную смесь при изготовлении бетона позволяет увеличить срок капитального ремонта железобетонных изделий, подвергаемых грибковой деструкции, до 30-35 лет.

Предложено оптимальное количество добавки стеарата кальция для предотвращения биообрастания и замедления развития грибковой деструкции бетона – 0,5 масс. %, а при эксплуатации бетонных изделий в условиях увлажнения – 1 масс. %.

Экспериментально установлено, что добавка стеарата кальция повышает стойкость бетона к повреждению грибами и улучшает его эксплуатационные характеристики, обеспечивает сохранность стальной арматуры в бетоне.

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе кафедры строительства ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет» при проведении лекционных и лабораторных занятий бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство» и магистров направления 08.04.01 «Строительство» для обучения по дисциплинам «Строительные материалы, изделия и конструкции», «Тепломассоперенос в

строительных материалах», «Обследование, испытание и реконструкция зданий и сооружений», «Железобетонные и каменные конструкции», «Климатология и гидрология», «Проектирование строительных конструкций» (акт о внедрении от 06.12.2024 г., СахГУ, г. Южно-Сахалинск).

Теоретические положения и экспериментальные результаты исследования используются в образовательном процессе кафедры «Конструкции зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» при подготовке обучающихся бакалавриата и магистратуры по направлениям 08.03.01, 08.04.01 «Строительство» в рамках изучения курсов дисциплин «Строительные материалы» и «Надежность и долговечность строительных конструкций, зданий и сооружений» (акт о внедрении от 13.01.2025 г., ТГТУ, г. Тамбов).

Методология и методы исследования. Проведение экспериментальных исследований осуществлено с применением поверенного современного оборудования и методик, установленных действующими ГОСТами или иными нормативными документами. Аналитические методы экспериментальных исследований подразумевают выполнение измерений не менее 5 раз и до получения трех сходящихся результатов, не отличающихся более чем на 5 % значения.

Прогнозирование долговечности и расчет степени повреждения бетона основывались на полученных экспериментальных данных, результаты сравнивались с исследованиями других ученых. Расчеты и графические построения выполнены с помощью компьютерных программ MS Excel и MathCad.

Достоверность и обоснованность полученных результатов обоснована корреляцией экспериментальных и расчетных данных в рамках 5 %-ой погрешности. Теоретические положения работы подтверждены результатами экспериментов. Разработанные практические рекомендации прошли апробацию на предприятиях и в организациях строительной отрасли, что указано в актах внедрения от ООО «Сахалинстройинвест» и ООО «Трансстрой – Тест».

Личный вклад автора заключается в выборе тематики исследования, подборе методологических подходов к экспериментальным исследованиям эксплуатационных характеристик бетона и к установлению механизмов и скорости деструкции железобетона в условиях грибкового воздействия. Автор провел анализ литературы по изучаемой проблематике микробиологической коррозии бетона и стальной арматуры, определил направления для научно-практических исследований. Автор самостоятельно проводил лабораторные испытания, обрабатывал полученные результаты, выполнял корреляцию данных из разных источников. По результатам диссертационного исследования автор подготовил научные публикации и выступил с докладами на научно-технических конференциях различного уровня.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследования влияния добавки стеарата кальция в бетон на изменение его эксплуатационных характеристик при грибковой деструкции;
- результаты изучения влияния добавки стеарата кальция в бетон на степень грибкового повреждения системы «бетон – стальная арматура»;
- результаты исследования влияния добавки стеарата кальция в бетон на кинетику массообменных процессов, протекающих в бетоне под воздействием грибов *Aspergillus niger* в условиях увлажнения;
- результаты исследования развития коррозии стальной арматуры в гидрофобном бетоне, подвергаемом грибковой деструкции при увлажнении;
- установленные экспериментальным и расчетным методами сроки грибковой деструкции железобетона до состояния, требующего проведения ремонтно-восстановительных работ, с учетом обеспечения гидрофобности бетона.

Диссертационное исследование соответствует **паспорту специальности 2.1.5 – Строительные материалы и изделия** в части **направления исследований**: п. 1.

Разработка и развитие теоретических и методологических основ получения строительных материалов неорганической и органической природы с заданным комплексом эксплуатационных свойств, в том числе специальных и экологически чистых; п. 4. Разработка и развитие теории формирования прочности и разрушения композиционных строительных материалов под действием различных эксплуатационных факторов; п. 10. Разработка новых и совершенствование существующих методов повышения стойкости строительных материалов, изделий и конструкций в условиях воздействия физических, химических и биологических агрессивных сред на всех этапах жизненного цикла.

Апробация работы. Результаты, полученные в ходе диссертационного исследования, доложены на IX-ой международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е.М «Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт», г. Тамбов, 2022; IV Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современные проблемы материаловедения», г. Липецк, 2023; VIII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы естествознания», г. Иваново, 2023; национальной (с международным участием) молодежной научно-технической конференции «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК)», г. Иваново, 2023; VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова «Наука и инновации в строительстве», г. Белгород, 2023; International University Scientific Forum «Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA», UAE, 2023; International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration», Beijing, 2023; VI Международной конференции «Современные строительные материалы и технологии», г. Калининград, 2023; Международной научно-практической конференции «Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование», г. Иваново, 2023; Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Естественные науки и пожаробезопасность: проблемы и перспективы исследований», г. Иваново, 2024; национальной (с международным участием) молодежной научно-технической конференции «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК – 2024)», г. Иваново, 2024.

По материалам выполненных исследований опубликовано 17 научных трудов, в том числе: 4 статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 1 статья в научном журнале, индексируемом в международных реферативных базах данных Web of Science и Scopus, 1 статья в научном журнале, индексируемом в международной реферативной базе данных Scopus.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, библиографического списка и приложений. Основной текст работы изложен на 176 страницах, содержит 61 рисунок, 15 таблиц, 6 приложений. Список литературы включает 328 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе представлен литературный обзор работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных изучению микробиологически вызванной коррозии бетона и железобетона. Рассмотрено воздействие микробиологических агентов во многих отраслях промышленности и сферах деятельности, где инфраструктура регулярно подвергается воздействию агрессивных сред. Приведены новейшие методы восстановления материалов после биодеструкции с учетом их эффективности. Показано, что исследования должны быть больше сосредоточены на понимании микробной деструкции и выведении методов уменьшения взаимодействия между бетоном и микроорганизмами.

Во второй главе охарактеризованы используемые в исследовании материалы, методики изготовления и испытания образцов. Описаны методы определения степени повреждения бетона и стальной арматуры под воздействием грибковых микроорганизмов,

определяющие состав, характеристики и свойства структуры изучаемых материалов: гостированные методики определения пористости, плотности, водопоглощения и водонепроницаемости бетона; разрушающий метод измерения прочности на сжатие бетона и прочности сцепления стальной арматуры с бетоном; методика установления распределения пор по размеру в цементном камне на газовом анализаторе; методика изучения изменений в структуре цементного камня рентгеноструктурным и термическим анализом; электрометрический метод измерения значения pH твердой и жидкой фаз; определение количества выводимого в жидкие среды кальция из цементного камня комплексонометрическим титрованием; методики снятия поляризационных кривых и коррозионных диаграмм для изучения скорости коррозии стальной арматуры.

Образцы бетона изготавливались из портландцемента марки ЦЕМ I 42,5 Н, песка и гравийного щебня фракцией 5-10 мм. Расход цемента составлял 450 кг, песка и щебня – по 900 кг каждого компонента на 1 м³ бетона. На стадии замешивания цементного теста вводился стеарат кальция в количестве 0,5 и 1,0 масс. %. Равномерность распределения порошка стеарата кальция в цементном тесте достигается механическим перемешиванием в течение 5 минут. Выбор количества гидрофобной добавки обусловлен проведенными ранее исследованиями, в которых указанная добавка показала положительное влияние на стойкость цементного камня к хлоридной коррозии. Известно, что стеарат кальция не является токсичным веществом и не оказывает негативного воздействия на окружающую среду. Он считается экологически чистым ингибитором коррозионных процессов.

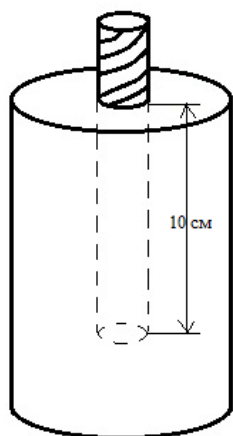


Рис. 1. Схема образца для исследования состояния стальной арматуры в бетоне

Из бетонной смеси заливались кубы с гранью 10 см. Также в цилиндрической форме диаметром 10 см бетоном заливались прутки стальной арматуры диаметром 10 мм, предварительно зачищенные наждачной бумагой и промытые водой, глубина заделки составляла 10 см (рис. 1). Образцы отверждались на воздухе при нормальных условиях в течение 28 суток.

Образцы цементного камня кубической формы с гранью 3 см изготавливались из растворов портландцемента нормальной густоты с водоцементным отношением В/Ц = 0,3. Испытания проводились после 28-суточного твердения образцов при нормальных условиях.

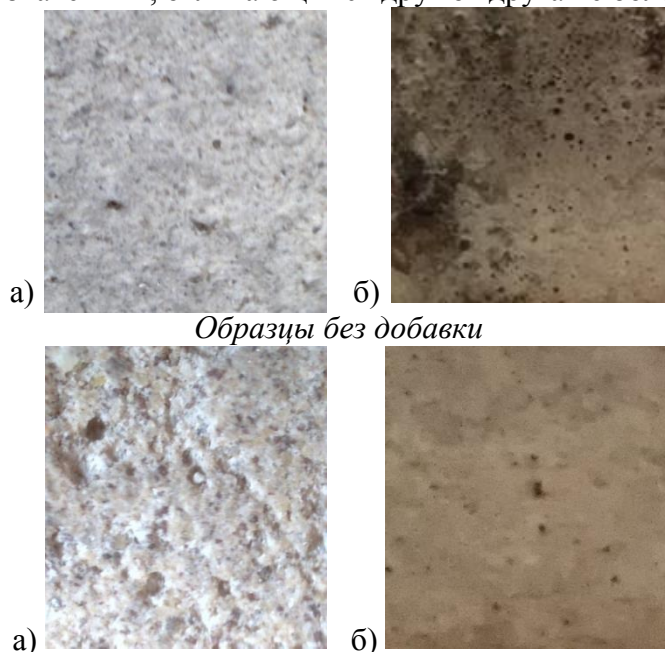
Заражение поверхности образцов цементного камня грибами *Aspergillus niger* проводилось согласно ГОСТ 9.048-89 «Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов». На поверхность цементных образцов распылялась суспензия грибов, приготовленная непосредственно перед заражением, после чего образцы выдерживались 28 суток в эксикаторе условиях, необходимых для развития и роста микроорганизмов: влажность воздуха 90 %, температура воздуха 28-30 °С. Каждые 7 дней крышка эксикатора приподнималась на 3 минуты для поступления воздуха.



Рис. 2. Емкость для создания условий воздействия на образцы капиллярного смачивания

После заражения микроорганизмами образцы бетона подвергали воздействию капиллярной влаги в течение 12 месяцев на установке, разработанной в ИВГПУ на кафедре ЕНиТБ (патент на полезную модель №. 215662, дата введения 23.06.2022 г.) Для этого образцы помещали в контейнер на синтепоновой подкладке плотностью 200 г/м², часть которой опускали в сосуд с водой для поддержания влажности на постоянном уровне (рис. 2). Группы образцов для каждого вида испытаний состояли из 10 штук без

добавок и 10 штук с добавкой стеарата кальция. Результаты усреднялись по минимум 5 значениям, отличающимся друг от друга не более чем на 5 %.



Образцы без добавки

Образцы с добавкой стеарата кальция

Рис. 3. Снимки поверхности бетона при увеличении в 10 раз до заражения (а) и спустя 12 месяцев после заражения грибами (б)

В третьей главе изучено влияние введения стеарата кальция в количестве 0,5-1 масс. % в цементную смесь при изготовлении бетона на обрастание поверхности грибами и изменение характеристик бетона. Добавка стеарата кальция хорошо препятствует развитию грибов на поверхности бетона (рис. 3). Однако все же происходит изменение цвета поверхности бетона с добавкой стеарат кальция, что говорит о закреплении в углублениях некоторого количества грибковых микроорганизмов и их воздействии на бетонную поверхность. Степень этого воздействия предполагается более низкой, по сравнению с бетоном без добавок, но ее следует принимать во внимание.

Образцы бетона с добавкой стеарата кальция имеют более высокую плотность, что обусловлено формированием более высококристаллической

структуры вследствие введения гидрофобизатора и в его колюматирующем действии.

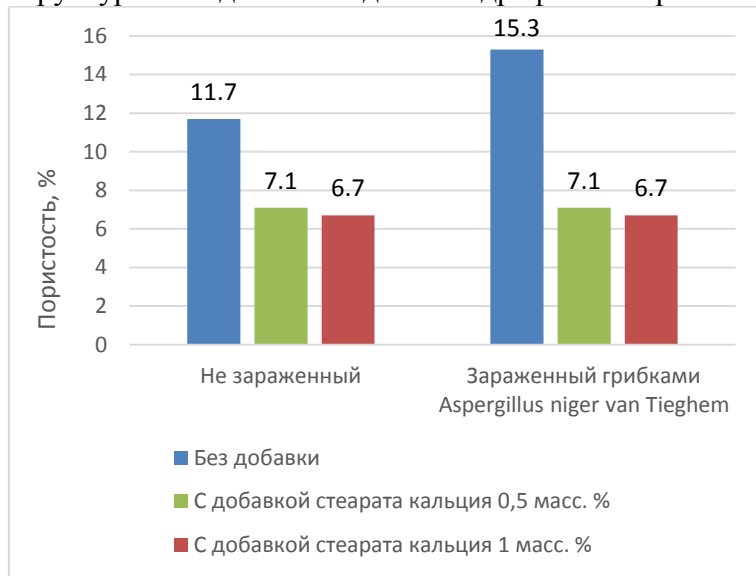


Рис. 4. Изменение пористости бетона после 12 месяцев грибковой коррозии

фобной добавкой осталось неизменным, тогда как у образца без добавок оно увеличилось на 43 %. Повышение количества вводимого в цементную смесь стеарата кальция приводит к уменьшению водопоглощения, что обусловлено образованием меньшего числа пор в структуре при твердении.

Таким образом, введение гидрофобизирующей добавки стеарата кальция в цементную смесь при изготовлении бетона позволяет не только снизить водопоглощение, но и обеспечить сохранность структуры цементного камня в условиях действия грибковых микроорганизмов.

Воздействие грибов *Aspergillus niger* на бетон в течение 6 месяцев привело к следующим изменениям его пористости (рис. 4): пористость образцов с добавками стеарата кальция не изменилась, в то же время, у образца без добавок пористость увеличилась на 30 %. В целом введение стеарата кальция изначально снижает пористость бетона на 40 %, что связано с колюматацией пор и капилляров частицами добавки при твердении.

В результате воздействия грибковых микроорганизмов, водопоглощение бетона с гидро-

Методом «мокрого пятна» установлено, что водонепроницаемость бетона с добавкой 0,5 % стеарата кальция от массы цемента соответствует классу W6, а с добавкой 1 % – классу W10.

Добавка стеарата кальция способствует при твердении формированию высококристаллической структуры цементного камня с повышенным содержанием кальцийсодержащих фаз, в особенности портландита, гидросиликатов кальция, этtringита, а также препятствует разложению структурных составляющих грибами.

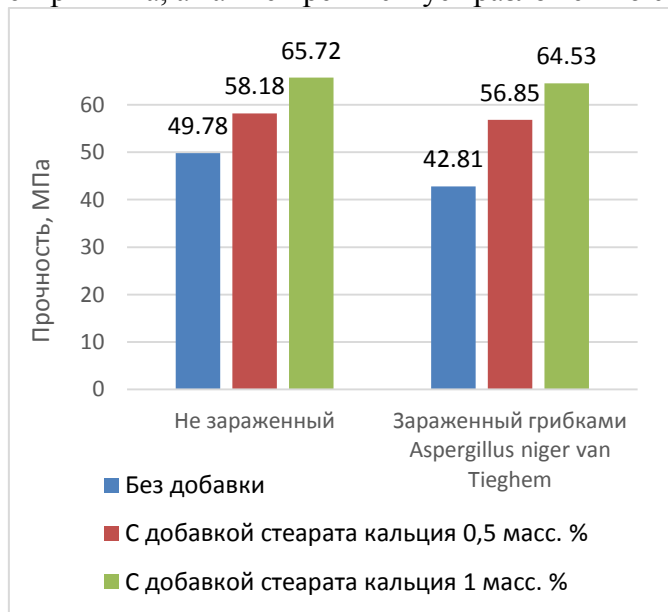


Рис. 5. Изменение прочности бетона при сжатии в результате грибковой деструкции в течение 12 месяцев

Из данных рис. 5 видно, что в результате введения добавок на стадии изготовления образцов прочность при сжатии бетона повышается. При введении 0,5 масс. % стеарата кальция в цементную смесь прочность бетона повысилась на 17 %, а 1 масс. % – на 32 % относительно образца без добавки.

Под воздействием грибковых микроорганизмов в течение 12 месяцев прочность при сжатии образцов без добавки уменьшилась на 17 %, образцов с добавками – на 2 %. Введенные реагенты снижают степень коррозионного воздействия грибковых микроорганизмов благодаря гидрофобному действию стеарата кальция и формированию более плотной структуры бетона.

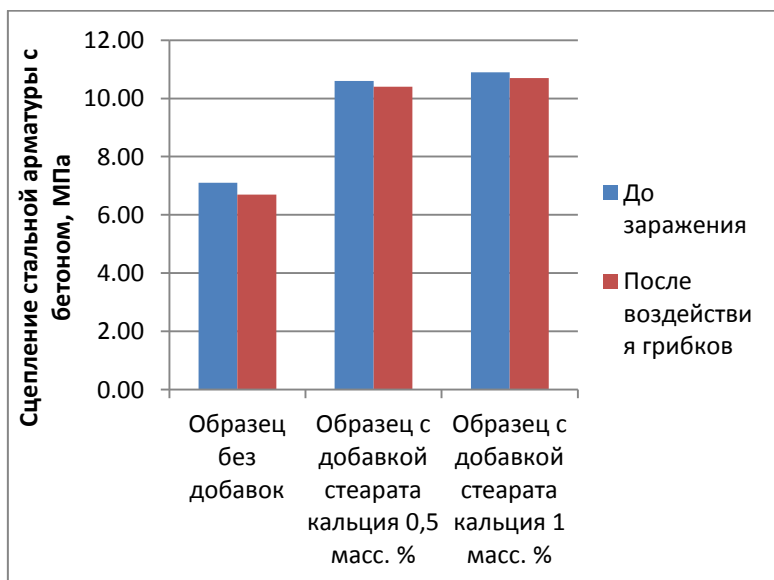


Рис. 6. Влияние добавки стеарата кальция на сцепление стальной арматуры с бетоном, МПа, в условиях воздействия грибов *Aspergillus niger*

На рис. 6 приведены результаты испытаний по вырыванию прутков стальной арматуры из бетона. В результате введения добавки прочность сцепления повысилась примерно на 40 %. Прочность сцепления арматуры с бетоном после воздействия грибов *Aspergillus niger* снижается на 2 % у образцов с добавками стеарата кальция. Для образцов без добавок прочность сцепления стальной арматуры с бетоном уменьшилась на 5,5 %. Небольшие изменения связаны с тем, что грибковые микроорганизмы успели повредить только верх-

ний слой бетона и не проникли к поверхности арматурного стержня, соответственно нарушения адгезии не произошло.

Испытание образцов бетона на трещиностойкость показало, что введение стеарата кальция улучшает стойкость бетона к растрескиванию при нагрузках, также в меньшей степени снижается значение характеристики трещиностойкости под воздействием грибковых микроорганизмов (рис. 7). Уменьшение трещинообразования связано не только

с повышением прочностных характеристик бетона с добавками, но и с образованием более плотной структуры вследствие коагуляции пор стеаратом кальция.

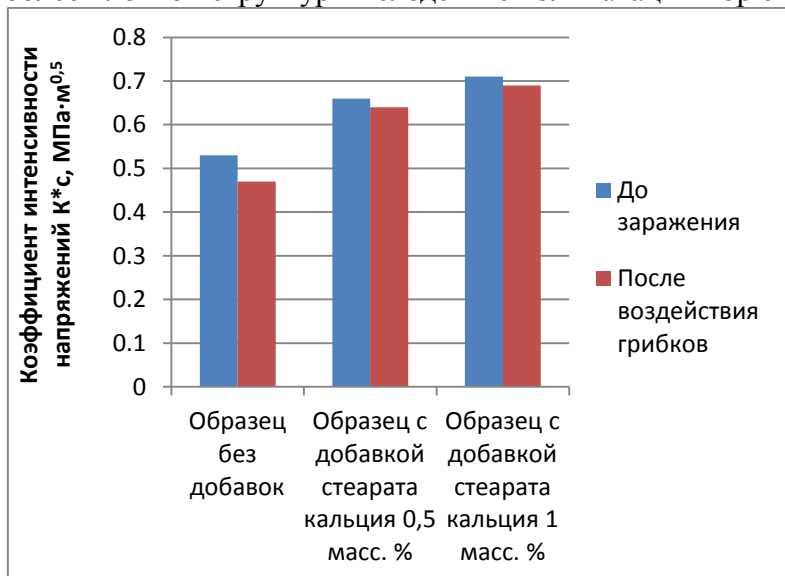


Рис. 7. Влияние добавки на основе стеарата кальция на величину условного критического коэффициента интенсивности напряжений $K^*_{с}, \text{МПа} \cdot \text{м}^{0,5}$, при испытании бетона на трещиностойкость

Таким образом, добавка стеарата кальция в цементную смесь при изготовлении бетона улучшает прочностные характеристики бетона и сцепление арматурного стержня с ним. Это обеспечит сохранение целостности железобетонного изделия при нагрузках и коррозионных воздействиях.

Для установления степени влияния грибков на скорость вывода кальция из цементного камня образцы помещались в дистиллированную воду по одному образцу в емкость. Количественное определение содержания катионов кальция в жидких

средах основано на комплексонометрическом титровании.

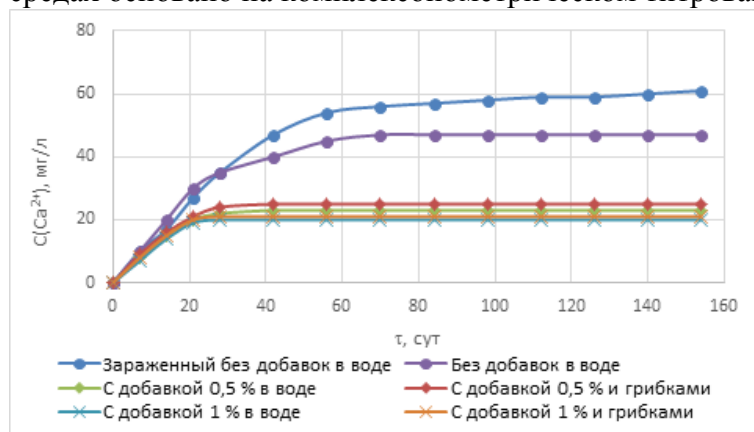


Рис. 8. Кинетика вымывания кальция из цементного камня водой

С помощью дериватографа установлено содержание кальция в цементном камне после биообрастания. Образцы разделялись на три части по 1 см толщиной, пробу для анализа отбирали из центра пластин. За 12 месяцев грибковой коррозии содержание кальция в поверхностном слое обычного цементного камня уменьшилось в среднем на 9 %, цементного камня с добавками стеарата кальция – на 1 %. В образцах без стеарата кальция действие выделяемых грибами продуктов жизнедеятельности коснулось и середины образца. Меньшее количество свободного кальция в гидрофобизированном цементном камне, связано с тем, что стеарат кальция «запирает» воду при твердении, что усиливает гидратацию компонентов цемента и приводит к образованию большего количества кальцийсодержащих фаз.

Так как при жидкостной коррозии цементного камня без добавок состояние, близкое к равновесному, устанавливается после 70 суток испытаний, для группы образцов в течение этого срока определено содержание кальция по толщине. С водой биогенные кислоты, выделяемые грибковыми микроорганизмами, поступают внутрь цементного камня, где вступают в химическое взаимодействие со свободным гидроксидом кальция в

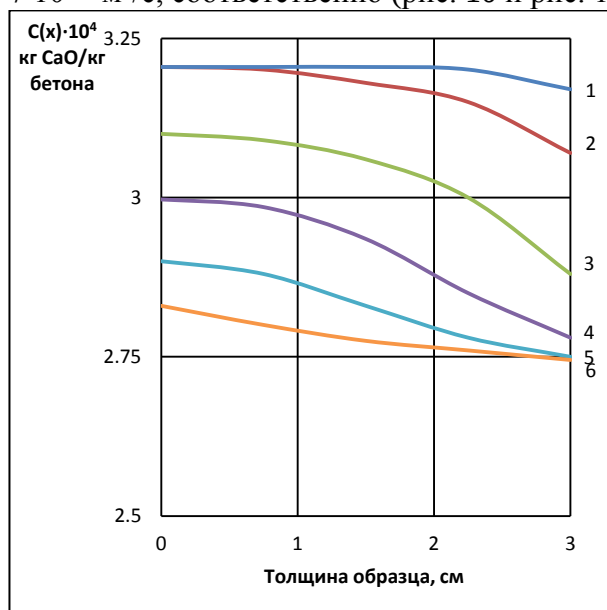
Присутствие на поверхности образцов грибков способствует выводу кальция из структуры цементного камня (рис. 8). Ускорение процесса связано с действием выделяемых грибами органических кислот, которые легко вступают в химические реакции с кальцийсодержащими компонентами цементного камня, разрушают их и выводят кальций из структуры.

поровой жидкости и с кальцийсодержащими компонентами цементного камня. Вследствие этого уменьшается количество кальция в цементном камне (рис. 9).

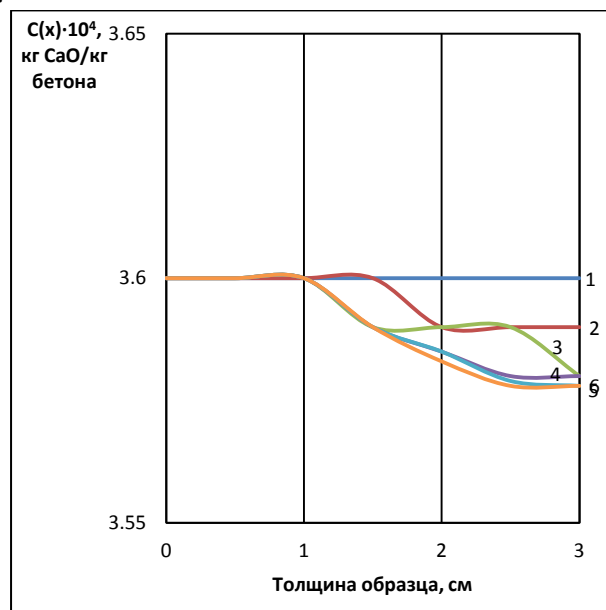
На рис. 9 видно, что добавки стеарата кальция способствуют установлению равновесия в структуре цементного камня и снижают вымывание из структуры гидроксида кальция микроорганизмами. В бетоне с гидрофобизатором незначительное изменение содержания кальция наблюдается только в поверхностном слое.

Предложенная добавка стеарата кальция уже в количестве 0,5 % от массы цемента эффективно препятствует биообрастанию бетона и эффективно замедляет процессы массообмена в цементном камне. Процессы коррозионного массопереноса при грибковой деструкции цементного камня, изготовленного со стеаратом кальция, протекают в 2,5-3 раза медленнее, что связано не только с гидрофобным действием добавки, но и с частичным перекрыванием пор ее кристаллами.

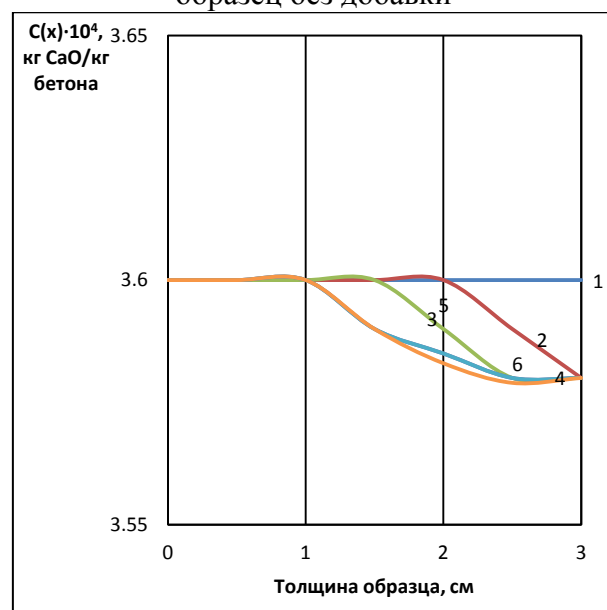
Коэффициенты массопроводности у образцов бетона без добавки и со стеаратом кальция различаются на два порядка и имеют значения в интервалах $0,5\text{--}2\cdot 10^{-9}\text{ м}^2/\text{с}$ и $3\text{--}7\cdot 10^{-11}\text{ м}^2/\text{с}$, соответственно (рис. 10 и рис. 11).



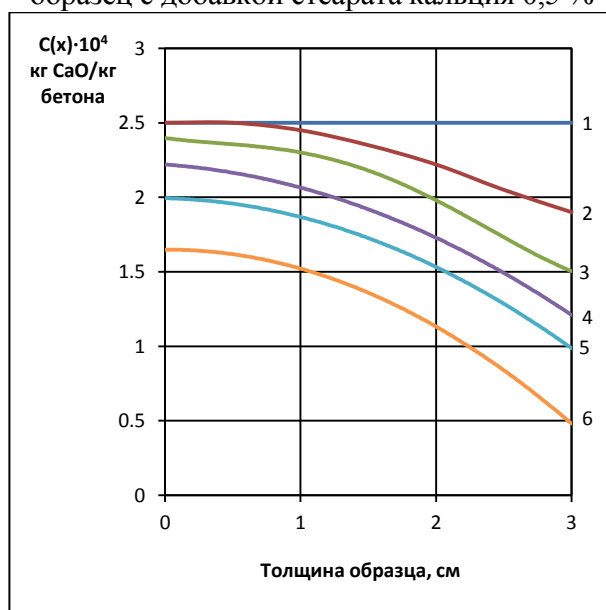
а) зараженный грибами *Aspergillus niger* образец без добавки



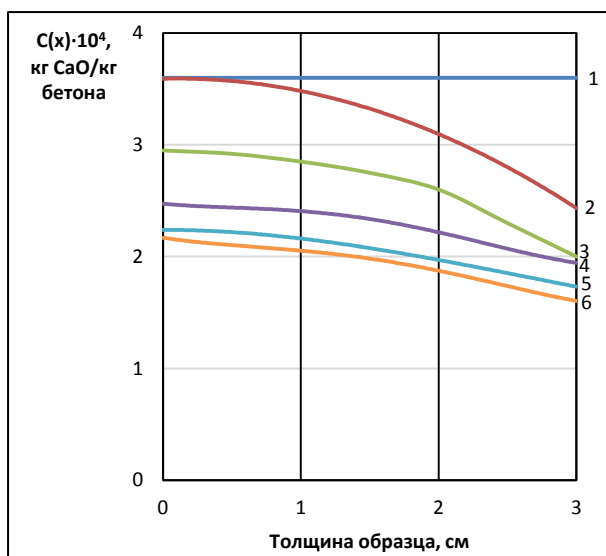
б) зараженный грибами *Aspergillus niger* образец с добавкой стеарата кальция 0,5 %



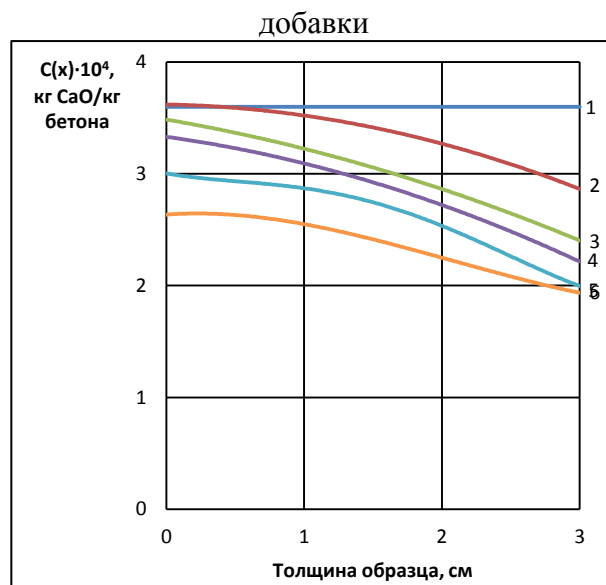
в) зараженный грибами *Aspergillus niger* образец с добавкой стеарата кальция 1 %



г) находящийся в воде зараженный грибами *Aspergillus niger* образец без

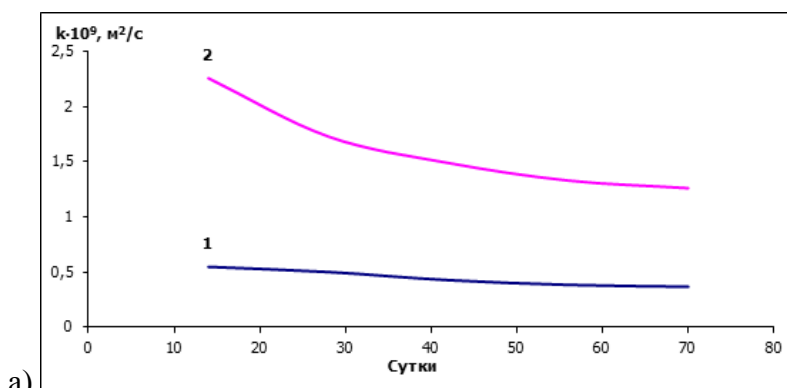


д) находящийся в воде зараженный грибами *Aspergillus niger* образец с добавкой стеарата кальция 0,5 %

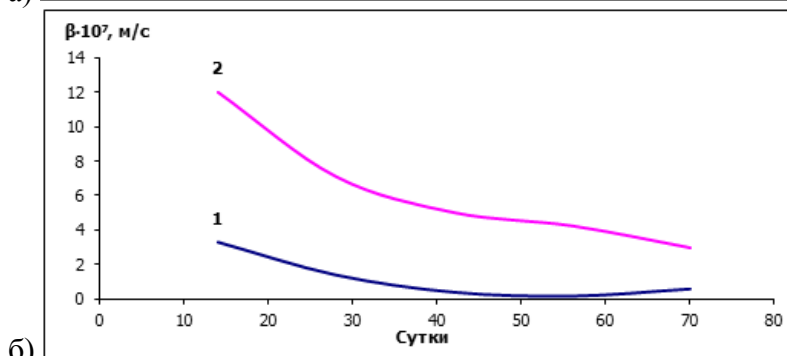


е) находящийся в воде зараженный грибами *Aspergillus niger* образец с добавкой стеарата кальция 1 %

Рис. 9. Профили концентраций $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине образцов цементного камня в разные моменты времени: 1 – 0 сут.; 2 – 14 сут.; 3 – 28 сут.; 4 – 42 сут.; 5 – 56 сут.; 6 – 70 сут.



а)



б)

Рис. 10. Изменение значений коэффициентов массопроводности (а) и массоотдачи (б) при коррозии образцов цементного камня без добавок в воде: 1) не зараженного; 2) зараженного грибами

Биогенные кислоты, выделяемые грибами *Aspergillus niger*, усиливают вымывание гидроксида кальция из структуры цементного камня, о чем свидетельствует экспоненциальное изменение значений коэффициента массопроводности и больший наклон кривой по сравнению с незараженным образцом (рис. 10-а). Коэффициент массоотдачи при биокоррозии цементного камня также изменяется более интенсивно (рис. 10-б). О значительном замедлении массопереноса в цементном камне с гидрофобной добавкой свидетельствует более пологий вид кривых и низкие величины коэффициентов массопроводности и массоотдачи (рис. 11). Уровень коррозионных процессов снижен.

Таким образом, объемная гидрофобизация бетона стеаратом кальция повышает коррозионную стойкость и срок службы бетонного изделия, эксплуатируемого в условиях, благоприятных для биообрастания поверхности грибковыми микроорганизмами.

Математическое моделирование динамики нестационарного массопереноса при одновременной жидкостной и биологической коррозии, в среде с переменными потенциалами и коэффициентами переноса по толщине конструкции проводим методом

микропроцессов, разбивая весь период эксплуатации на небольшие временные интервалы $\Delta\tau = \tau_i - \tau_{i-1}$. В каждом микропроцессе считаем параметры среды и коэффициент массопроводности постоянными. Две выделенные зоны между собой будут отличаться численными значениями граничных условий, коэффициента массопроводности и наличием в первой зоне мощности объемного поглощения гидроксида кальция, вследствие химических реакций с органическими кислотами.

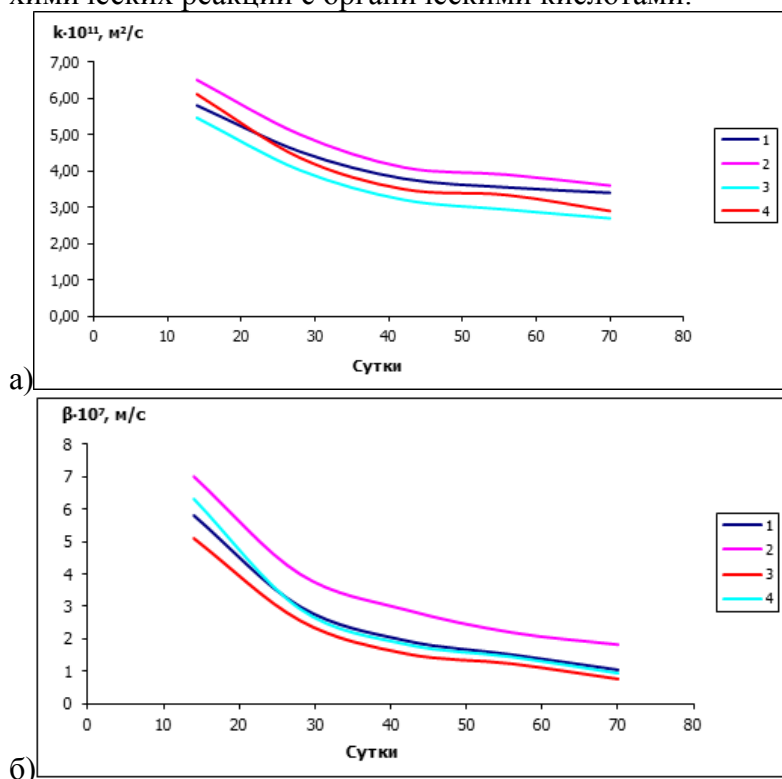


Рис. 11. Изменение значений коэффициентов массопроводности (а) и массоотдачи (б) при коррозии гидрофобизированных образцов цементного камня:

- 1) с добавкой стеарата кальция 0,5 % не зараженного грибами;
- 2) с добавкой стеарата кальция 0,5 % зараженного грибами;
- 3) с добавкой стеарата кальция 1 % не зараженного грибами;
- 4) с добавкой стеарата кальция 1 % зараженного грибами

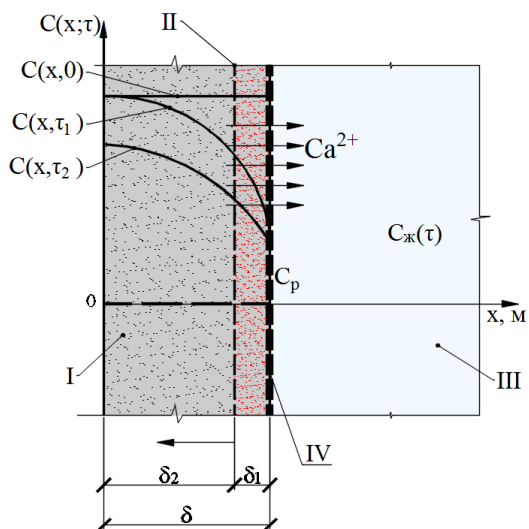


Рис. 12. Расчетная схема массопереноса в условиях жидкостной и биологической коррозии цементного бетона:

I – бетон; II – граница зоны химических реакций органических кислот; III – жидкая среда; IV – биопленка на поверхности бетона

Расчетная схема массопереноса в условиях жидкостной и биологической коррозии бетона показана на рис. 12. В последующих расчетах и на рис. 12 обозначено: C_p – равновесная концентрация гидроксида кальция в жидкости у границы раздела фаз, кг СаО / кг бетона; $C_{\text{ж}}$ – концентрация гидроксида кальция в объеме жидкой фазе, $C(x, \tau)$ – распределение концентраций свободного гидроксида кальция в поровой структуре бетона в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , кг СаО/кг бетона; δ – общая толщина рассчитываемого железобетонного элемента; δ_1 – толщина первой зоны, в которой происходит поглощение свободного гидроксида кальция в результате химических реакций с органическими кислотами и его массоперенос к границе раздела фаз; δ_2 – толщина второй зоны, в которой происходит только диффузия гидроксида кальция к границе первой зоны.

Для первой зоны i -го микропроцесса, задача нестационарного массопереноса, осложненная наличием внутреннего источника массы, расчетная схема которого – неограниченная пластина, запишется следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \frac{\partial^2 C_1(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v(x, \tau)}{\rho_{\text{бет}}}, \tau > 0, \delta_2 \leq x \leq \delta_1, \quad (1)$$

$$C_1(x, \tau)|_{\tau=0} = C_1(x, \tau) = C_{0,1}(x), \quad (2)$$

$$C_1(\delta_1, \tau) = C_{\delta_1}, \quad (3)$$

$$C_1(\delta, \tau) = C_p. \quad (4)$$

Соотношения (2) – это начальное условие, по которому в начале рассматриваемого i -го микропроцесса описывается распределение концентраций свободного гидроксида кальция. При моделировании численные значения распределений концентраций могут быть аппроксимированы некоторыми несложными для анализа математическими функциями. Граничное условие на левой границе первой зоны (3) определяет фиксированное значение концентрации на i -м микропроцессе, определяемое по расчету второй зоны. Одновременно, на правой границе устанавливается равновесное значение концентраций гидроксида кальция, описываемое граничным условием первого рода (4). Численные значения концентраций на границах первой зоны изменяются при переходе между микропроцессами.

В конце i -го микропроцесса на левой границе первой зоны можно определить значение плотности потока массы гидроксида кальция на границе между зонами:

$$\rho_{\text{бет}} k_1 \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_2} = -q_{m1}. \quad (5)$$

Рассчитанное по формуле (5) значение плотности потока массы переходит для определения динамики массопереноса второй выделенной зоны, в которой, в соответствии с расчетной схемой рис. 12, протекает только массоперенос свободного гидроксида кальция от левой границы зоны к правой, посредством градиента концентраций, что описывается следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial \tau} = k_2 \frac{\partial^2 C_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, 0 \leq x \leq \delta_2, \quad (6)$$

$$C_2(x, \tau)|_{\tau=0} = C_2(x, \tau) = C_{0,2}(x), \quad (7)$$

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0, \quad (8)$$

$$\rho_{\text{бет}} k_2 \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_2} = -q_{m1}. \quad (9)$$

В соответствии с расчетной схемой, движение вещества спровоцировано на правой границы второй зоны, т.е. при решении линейного дифференциального уравнения (6) применяем граничное условие второго рода (9). Краевое условие на левой границе второй зоны – условие проляции (частный случай граничного условия второго рода), математически отражающее отсутствие потока свободного гидроксида кальция.

Решения систем дифференциальных уравнений получено в безразмерных переменных методом интегрального преобразования Лапласа научной школой академика РААСН С.В. Федосова. Принимая во внимание, что при расчете полей концентраций в числах, с учетом разных методов перевода в безразмерные величины при решении систем уравнений первой и второй зоны, приведем аналитические уравнения распределения концентраций по зонам в виде натуральных величин, где $\bar{x}_1, \bar{x}_2$; ξ_1, ξ_2 – относительные безразмерные координаты в пределах рассматриваемой зоны и отнесённые к ее толщине на i -м микропроцессе; ξ – безразмерная координата абсцисс начального распределения концентраций или источника массы:

$$C_1(\bar{x}_1, Fo_{m1}) = (C_{\delta_1} - C_p) \left[(1 - \bar{x}_1) - \frac{2}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \pi m \bar{x}_1}{m} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_{m1}) \right] + C_p + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \sin \pi m \bar{x}_1 \exp(-\pi^2 m^2 Fo_{m1}) \int_0^1 (C_{0,1}(\xi_1) - C_p) \sin(\pi m \xi_1) d\xi_1 + \bar{x} C_p \int_0^1 Po_m^*(\xi_1) (1 - \xi_1) d\xi_1 - \frac{2C_p}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \pi m \bar{x}_1}{m^2} \exp(-\pi^2 m^2 Fo_{m1}) \int_0^1 Po_m^*(\xi_1) \sin(\pi m \xi_1) d\xi_1, \quad (10)$$

$$C_2(\bar{x}_2, Fo_{m2}) = C_0 - \frac{Ki_m^*}{6} (6Fo_m + 3\bar{x}_2^2 - 1) C_0 + \int_0^1 (C_{0,2}(\xi_2) - C_0) d\xi_2 + \frac{2C_0 Ki_m^*}{\pi^2} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^m}{m^2} \cos(\pi m \bar{x}_2) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_{m2}) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos \pi m \bar{x}_2 \exp(-\pi^2 m^2 Fo_{m2}) \int_0^1 (C_{0,2}(\xi_2) - C_0) \cos(\pi m \xi_2) d\xi_2, \quad (11)$$

По приведенным выражениям (10) и (11), основываясь на принципах и допущениях метода микропроцессов, смоделирован массоперенос целевого компонента в структуре гидрофобизированного стеаратом кальция цементного бетона при воздействии грибковых микроорганизмов в условиях жидкостной коррозии на железобетонную стенку толщиной 250 мм. Моделирование выполнено для различной интенсивности действия вырабатываемых микроорганизмами кислот: при активных и пассивных кислотных атаках. Весь расчетный период эксплуатации в биологически активной среде разделялся на микропроцессы продолжительностью 60 суток, на первом микропроцессе первая зона не выделялась. Между каждым микропроцессом корректировались граничные условия, значения коэффициента массопроводности и мощность источника поглощения гидроксида кальция при химическом взаимодействии с органическими кислотами. При моделировании пассивной кислотной атаки принималось, что действие кислот чередуется через 1 микропроцесс. Результаты моделирования показаны на рис. 13-15.

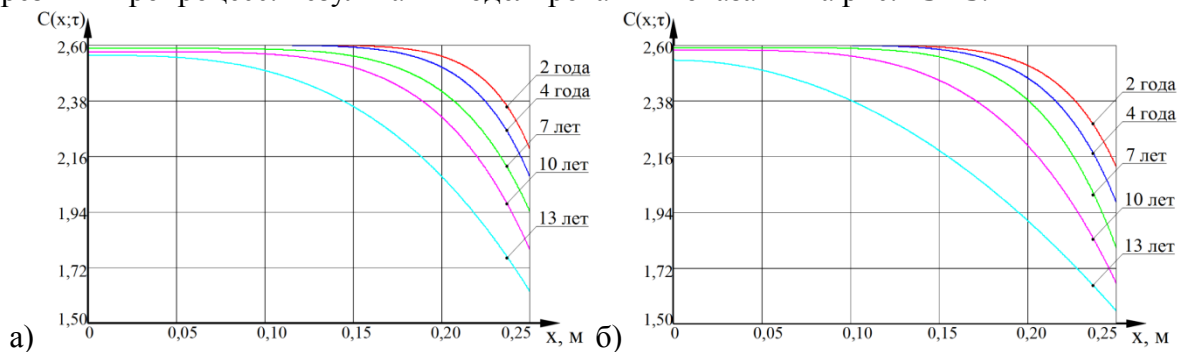


Рис. 13. Смоделированная динамика полей концентраций свободного гидроксида кальция по толщине железобетонной стенки, изготовленной без применения гидрофобизирующих добавок, на разных этапах эксплуатации при грибковой деструкции и увлажнении при пассивной (а) и активной (б) кислотных атаках

Прогноз на длительный срок показывает, что основные повреждения от грибкового воздействия будут сконцентрированы на поверхности бетона, но и по его толщине начнутся деструктивные процессы. В бетоне с добавками стеарата кальция наиболее интенсивное вымывание кальция из поверхностного слоя произойдет в течение 4 лет

биоповреждения, затем процессы замедлятся, аналогично той картине, что была установлена экспериментально на начальном этапе коррозии (рис. 8).

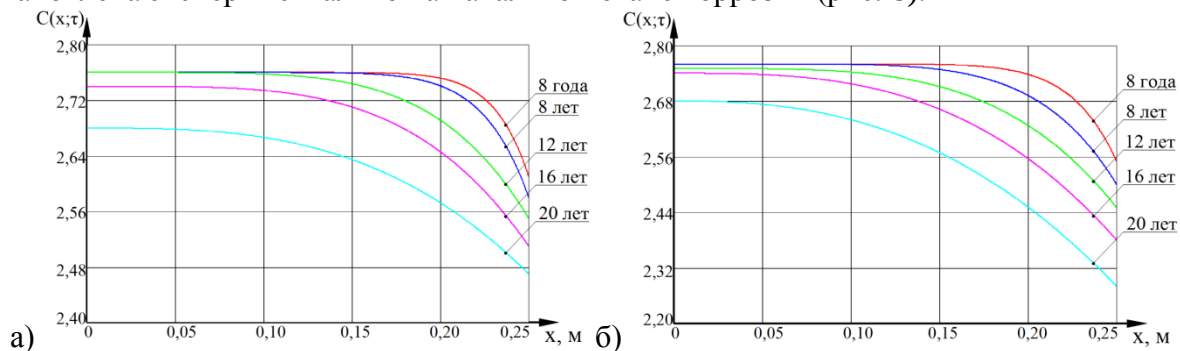


Рис. 14. Смоделированная динамика полей концентраций свободного гидроксида кальция по толщине железобетонной стенки, изготовленной с добавкой стеарата кальция 0,5 масс. %, на разных этапах эксплуатации при грибковой деструкции и увлажнении при пассивной (а) и активной (б) кислотных атаках

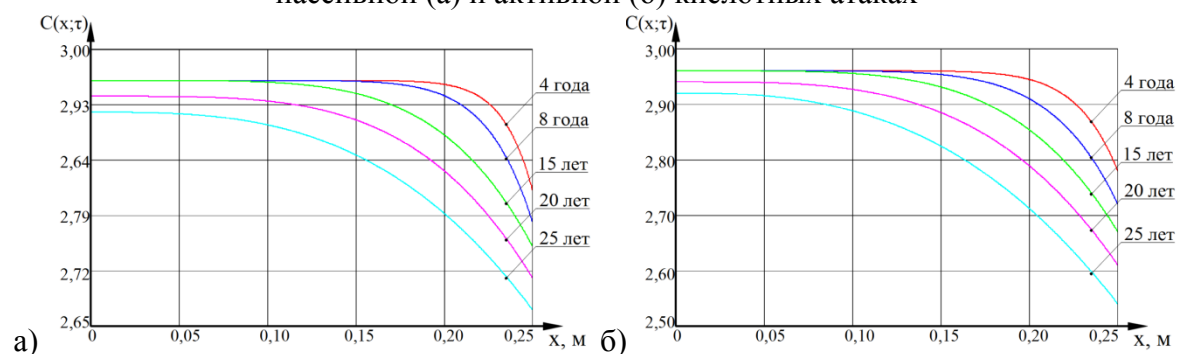


Рис. 15. Смоделированная динамика полей концентраций свободного гидроксида кальция по толщине железобетонной стенки, изготовленной с добавкой стеарата кальция 1 масс. %, на разных этапах эксплуатации при грибковой деструкции и увлажнении при пассивной (а) и активной (б) кислотных атаках

В бетоне без добавок разложение кальцийсодержащих фаз в поверхностном слое начнется после 4 лет грибковой деструкции при увлажнении и уже к 10 годам эксплуатации бетона в этих условиях распространится на всю толщину. Исходя из профилей на рис. 13, можно ожидать, что нарушение целостности структуры бетона вследствие разрушения связей между компонентами и потери прочности произойдет через 15 лет после биообрастания.

Сроки возникновения подобных состояний разрушения гидросиликатов кальция в бетоне с добавками стеарата кальция составляют 12-15 лет (рис. 14 и рис. 15). Можно считать, что за это время выделяемые грибами вещества проникнут через поровую структуру бетонного покрытия к поверхности арматуры. Развитие деструктивных процессов и снижение прочности бетона продлится и после 20-25 лет эксплуатации, и достигнет опасных значений через 30-35 лет, когда повреждения будут распространены по всему объему бетона.

Было установлено, что органические кислоты, выделяемые в процессе жизнедеятельности грибов *Aspergillus niger*, оказывают воздействие на состав цементного камня бетона. Методом жидкостной хроматографии определен состав из органических кислот, выделяемых микромицетами *Aspergillus niger*, и соотношение их содержания в поровом растворе бетона (рис. 16). Предположительно, скорость разрушения бетона будет зависеть от растворения кальция под воздействием глюконовой, лимонной и щавелевой кислот с образованием соответствующих кальциевых солей, так как выделение других органических кислот грибами *Aspergillus niger*.

В соответствии с этим, был выполнен расчет показателей степени повреждения бетона грибами *Aspergillus niger*. В образцах с добавками стеарата кальция во взаимодей-

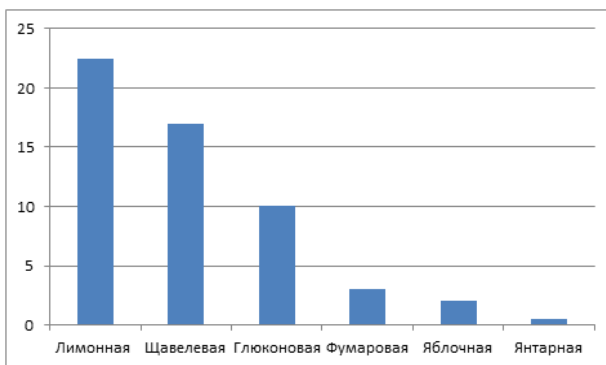


Рис. 16. Соотношение содержания кислот, масс. %, выделяемых грибковыми микроорганизмами, в поровом растворе цементного камня

Четвертая глава диссертационной работы посвящена изучению влияния добавки стеарата кальция на развитие коррозионных процессов стальной арматуры в бетоне, подверженном воздействию грибковых микроорганизмов. Добавка стеарата кальция в количестве 0,5-1 масс. % способствует сохранению пассивного состояния стальной арматуры в бетоне, находящемся под воздействием грибов *Aspergillus niger* в условиях

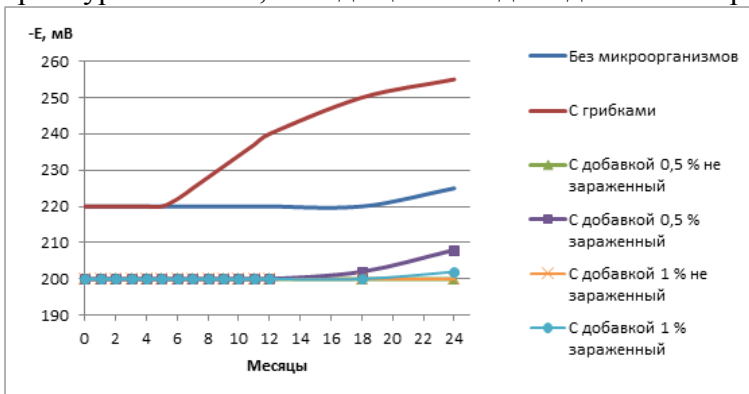


Рис. 17. Изменение потенциала стальной арматуры класса проката А500С в бетоне в условиях увлажнения в течение 24 месяцев

увлажнения, вследствие замедления поступления к ее поверхности агрессивной среды через поровую структуру цементного камня. Значение потенциала стальной арматуры сохраняется в течение 2 лет, затем начинается его незначительное снижение, связанное с изменением рН порового раствора, на участках контакта со сталью (рис. 17).

Для определения скорости микробиологической коррозии арматуры из стали класса проката А500С получены поляризационные кривые, описывающие ее коррозионное поведение в бетоне через 24 месяца испытаний. Достигнутые значения плотности тока стали в образцах с гидрофобизатором значительно ниже, чем у арматуры в бетоне без добавки. При воздействии микроорганизмов плотность коррозионного тока увеличивается, следовательно, скорость коррозии стали будет увеличиваться. Данные показывают (рис. 18), что коррозия стальных образцов в бетоне без добавок, зараженном грибковыми микроорганизмами, через 24 месяца протекает примерно в 3-4 раза быстрее, по сравнению с арматурой, находящейся в бетоне с гидрофобной добавкой.

Данные, полученные при исследовании кинетики выщелачивания цементного бетона в условиях грибковой коррозии, позволяют по количеству вымываемых из бетона катионов кальция с учетом стехиометрии уравнений протекающих реакций рассчитать, сколько агрессивных компонентов проникает в бетон. Определение сроков достижения в бетоне агрессивной концентрации кислот при микробиологической коррозии проводилось из выражения первого закона Фика:

$$dm = -D \frac{dC}{dx} dS d\tau, \quad (12)$$

где: dm – количество диффундирующего вещества, которое переносится через элементарную площадь поверхности dS за отрезок времени dt в направлении нормали x ; D – коэффициент диффузии; dC/dx – градиент концентраций.

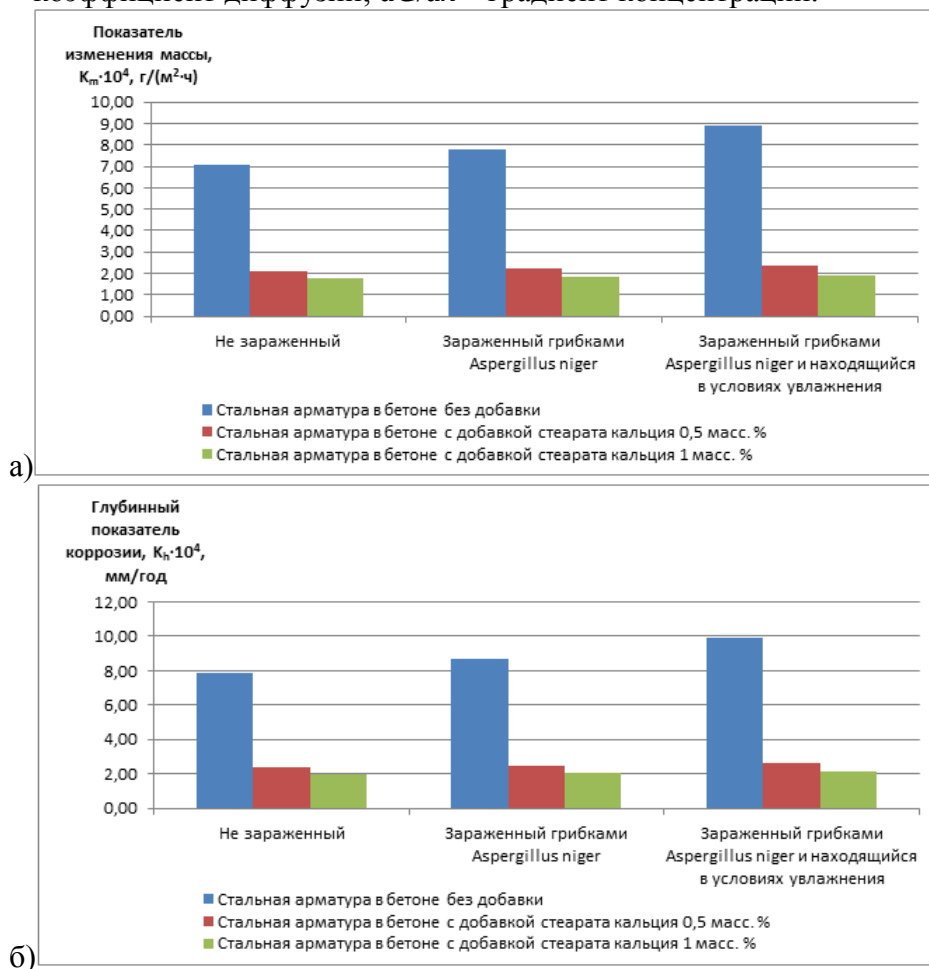


Рис. 18. Показатели скорости коррозии арматуры из стали класса проката А500С в бетоне после 24 месяцев грибковой коррозии:
(а) показатель изменения массы образцов, г/(м²·ч);
(б) глубинный показатель коррозии, мм/год

Основное воздействие на бетон и арматуру в нем оказывают лимонная, щавелевая и глюконовая кислоты. Коэффициент диффузии для них в бетоне составляет $2,4 \cdot 10^{-8}$ м²/с. На основании данных о степени протекания массообменных процессов в цементном камне рассчитаны сроки накопления у поверхности стальной арматуры в бетоне предельной концентрации 0,05 г/л органических кислот, выделяемых грибами *Aspergillus niger*: в бетоне без добавок – 4 года, в бетоне с добавками стеарата кальция – 12-16 лет.

Поскольку после накопления у поверхности арматуры в бетоне органических кислот, выделяемых грибами, начинаются коррозионные процессы, была установлена скорость разрушения стали в этих условиях. После достижения предельной концентрации органических кислот и распространения среды по поверхности арматуры, разрушение стали составляет 0,14 мм/год. Таким образом, критическое состояние стальной арматуры, соответствующее потере сечения в 15 %, будет достигнуто в течение 10 лет, значит, деструкция железобетона в условиях грибкового воздействия при увлажнении будет считаться опасной через 15-17 лет после биообрастания бетона без добавок; через 25-30 лет – бетона с добавкой стеарата кальция в количестве 0,5 масс. %; через 30-35 лет – бетона с добавкой стеарата кальция в количестве 1 масс. %.

Определение экономического эффекта от введения гидрофобной добавки стеарата кальция в бетон при его изготовлении с целью защиты бетонных изделий от биообрастания грибами *Aspergillus niger* проводилось согласно «Руководству по определению экономической эффективности повышения качества и долговечности строительных конструкций».

В качестве средства защиты бетона от грибковой деструкции предложено вводить в цементную смесь при изготовлении бетона стеарат кальция в количестве 0,5 и 1 масс. %.

Экономический эффект от проведения мероприятий по очистке и дополнительной обработке 100 м³ бетона от грибкового воздействия составит 125000 рублей для бетона с 0,5 % добавкой стеарата кальция и 200000 рублей для бетона с 1 % добавкой стеарата кальция. Введение добавок стеарата кальция в цементную смесь при изготовлении бетона позволяет увеличить срок капитального ремонта железобетонных изделий, подвергаемых грибковой деструкции, до 30-35 лет.

В заключении указаны основные выводы по результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

1. Предложено вводить в цементную смесь на стадии приготовления бетона стеарат кальция в количестве 0,5 и 1 % от массы цемента для предотвращения обрастания поверхности грибами *Aspergillus niger* в условиях увлажнения и изменения эксплуатационных характеристик бетона при грибковом воздействии. Указанные количества добавки обеспечивают класс бетона по водонепроницаемости W6-W10. Общая пористость и водопоглощение бетона с добавкой стеарата кальция 0,5-1 масс. % на 40 и 30 %, соответственно, ниже, чем у бетона без гидрофобизатора, и они не меняются в результате грибкового действия при увлажнении. Это обусловлено формированием при твердении бетона структуры с меньшим размером пор: 6-31 мкм у бетона без добавок и 6-21 мкм у бетона со стеаратом кальция. Меньшая пористость способствует замедлению процессов массопереноса в цементном камне бетона.

2. Прочность при сжатии и трещиностойкость бетона с добавками стеарата кальция по сравнению с обычным бетоном на 20-25 % и 25-30 %, соответственно, выше. При грибковой деструкции в условиях увлажнения в течение 12 месяцев прочность при сжатии бетона без добавки уменьшилась на 17 %, бетона с добавками – на 2 %, а снижение трещиностойкости составило 11 и 3 %. В результате введения стеарата кальция прочность сцепления арматуры периодического профиля с бетоном выше примерно на 40 %, и после воздействия грибов *Aspergillus niger* снижается на 2 %, тогда как для образцов без добавок уменьшение составило 5,5 %. Улучшение прочностных характеристик бетона классов по водонепроницаемости W6-W10 обусловлено формированием высококристаллической структуры цементного камня при твердении вследствие более полной гидратации компонентов цемента. В бетоне с гидрофобными добавками повышено содержание гидроксида кальция, этtringита и высокоосновных гидросиликатов кальция, обеспечивающих механическую прочность бетона.

3. В бетоне классов по водонепроницаемости W6-W10 степень разложения кальцийсодержащих фаз грибковыми микроорганизмами и вывода кальция из структуры снижена примерно в 3 раза по сравнению с обычным бетоном. Получены профили концентраций гидроксида кальция по толщине бетона, свидетельствующие, что грибковая деструкция гидрофобного бетона протекает преимущественно на поверхности, и позволяющие определить коэффициенты массопроводности и массоотдачи. Величины коэффициентов массопроводности для случая грибковой деструкции обычного бетона при увлажнении и бетона с добавками стеарата кальция отличаются на два порядка: 10^{-9} и 10^{-11} м²/с, соответственно, что также говорит о значительном замедлении массопереноса. Прогнозируемая глубина повреждения бетона грибами *Aspergillus niger* в условиях увлажнения через 10 лет составляет 1 см для обычного бетона и 2-2,5 мм для бетона классов W6-W10. Прогноз на 50 лет дал значения 2 см и 5-5,5 мм, соответственно.

4. В бетоне классов по водонепроницаемости W6-W10, подвергаемом действию грибов и влаги, стальная арматура сохраняет пассивное состояние в течение 2 лет, а в бетоне без добавок – 6 месяцев. При нарушении пассивности поверхности стали начинается точечное растворение металла, скорость которого снижается в 3-4 раза в результате введения стеарата кальция в бетон при изготовлении. Прогнозирование сроков накопления критической для начала коррозии стали концентрации выделяемых грибами *Aspergillus niger* кислот у поверхности арматуры в бетоне проведено с помощью профилей концентраций, характеризующих распределение кислот по толщине бетонного покрытия.

Накопление кислот в количестве, достаточном для нарушения пассивности стальной арматуры, в обычном бетоне произойдет через 4 года, в бетоне классов W6-W10 – через 12-16 лет. После этого коррозия арматуры будет протекать со скоростью 0,14 мм/год, что за 10 лет вызовет уменьшение диаметра на 1,5 мм, следовательно, повреждение будет критическим. Прогнозируемый срок разрушения системы «бетон – стальная арматура» грибами *Aspergillus niger* в условиях увлажнения составляет 15-17 лет после биообрастания бетона без добавок; 25-30 лет – бетона классов W6-W10.

5. Эффективность от введения предложенных количеств стеарата кальция в цементную смесь при изготовлении бетона заключается в экономии при ремонтно-восстановительных работах бетонных поверхностей и железобетона 125000-200000 рублей на 100 м³ вследствие меньшей степени разрушения бетонного покрытия и повреждения стальной арматуры в нем грибковыми микроорганизмами, а также в увеличении срока проведения капитального ремонта биодegradуемого бетона до 30-35 лет. Практические рекомендации по повышению биостойкости бетона нашли применение на производстве ООО «Сахалинстройинвест», г. Южно-Сахалинск (акт внедрения от 20.12.2024 г.) и ООО «Трансстрой – Тест», г. Корсаков (акт внедрения от 16.05.2024 г.).

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе кафедры строительства ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет» при проведении лекционных и лабораторных занятий бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство» и магистров направления 08.04.01 «Строительство» для обучения по дисциплинам «Строительные материалы, изделия и конструкции», «Тепломассоперенос в строительных материалах», «Обследование, испытание и реконструкция зданий и сооружений», «Железобетонные и каменные конструкции», «Климатология и гидрология», «Проектирование строительных конструкций» (акт о внедрении от 06.12.2024 г., СахГУ, г. Южно-Сахалинск).

Теоретические положения и экспериментальные результаты исследования используются в образовательном процессе кафедры «Конструкции зданий и сооружений» ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет» при подготовке обучающихся бакалавриата и магистратуры по направлениям 08.03.01, 08.04.01 «Строительство» в рамках изучения курсов дисциплин «Строительные материалы» и «Надежность и долговечность строительных конструкций, зданий и сооружений» (акт о внедрении от 13.01.2025 г., ТГТУ, г. Тамбов).

Перспективы дальнейшей разработки тематики: результаты диссертационного исследования помогут в разработке комплексных мер по предотвращению коррозионной разрушения железобетонных изделий при многофакторном воздействии: с учетом температурных колебаний, действия хлоридных и сульфатных сред. Целесообразно продолжить работу по изучению предложенных рекомендаций по введению добавки стеарата кальция в бетон на его стойкость к биообрастанию и степень повреждения другими организмами: бактериями, грибами иных видов, водорослями, лишайниками, мхами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящий в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ

1. Скорость коррозии стальной арматуры в бетоне с гидрофобной добавкой стеарата кальция в условиях воздействия микроорганизмов / В.Е. Румянцев, В.С. Коновалова, К.Б. Строкин, **А.А. Гальцев** // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 1 (50). – С. 119-129.

2. Влияние стеарата кальция на микробиологическую коррозию цементного камня бетона / К.Б. Строкин, **А.А. Гальцев**, В.С. Коновалова, Б.Е. Нармания // Строительные материалы. – 2024. – № 8. – С. 25-29.

3. Прочность и трещиностойкость бетона с добавкой на основе стеарата кальция / В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, К.Б. Строкин, **А.А. Гальцев**, Б.Е. Нармания // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 3 (52). – С. 71-82.

4. Повышение прочности сцепления арматуры с бетоном посредством объемной гидрофобизации цементного камня / В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, К.Б. Строкин, **А.А. Гальцев**, Д.Г. Новиков // Современные проблемы гражданской защиты. – 2024. – № 3 (52). – С. 83-92.

Статья в журнале, индексируемом в международных базах Web of Science и Scopus

5. Degradation of Concrete Cement Stone Under the Influence of *Aspergillus niger* Fungi / V.S. Konovalova, V.E. Rumyantseva, K.B. Strokin, **A.A. Galtsev**, D.G. Novikov, P.V. Monastirev // Corrosion and Materials Degradation. – 2024. – Vol. 5. – Issue 4. – Pp. 476-489.

Статья в издании, индексируемом в международной базе Scopus

6. Changing The Characteristics Of Cement Stone with The Calcium Stearate Additive Under The Influence Of Fungal Microorganisms / V.E. Rumyantseva, V.S. Konovalova, B.E. Narmaniya, K.B. Strokin, **A.A. Gal'tsev** // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3243. – Article ID 020046.

Другие публикации:

7. Скорость коррозии стальной арматуры в бетоне в условиях воздействия микроорганизмов / К.Б. Строкин, Д.Г. Новиков, В.С. Коновалова, **А.А. Гальцев**, Д.А. Орысюк // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: Материалы IX-ой международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е.М. / ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». – Тамбов, Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2022. – С. 241-245.

8. Влияние объемной гидрофобизации цементного камня бетона на коррозию стальной арматуры в условиях воздействия агрессивной хлоридсодержащей среды / К.Б. Строкин, **А.А. Гальцев**, В.С. Коновалова, Е.С. Промзелева, Б.Е. Нармания // Современные проблемы материаловедения: сборник научных трудов. – Липецк: Изд-во Липецкого государственного технического университета, 2023. – С. 136-145.

9. Интенсивность протекания массообменных процессов при коррозии гидрофобизированных бетонов в условиях воздействия грибковых микроорганизмов / К.Б. Строкин, **А.А. Гальцев**, В.С. Коновалова, Е.С. Промзелева // Актуальные вопросы естествознания: сборник материалов VIII Всероссийской научно-практической конференции. – Иваново: Ивановская пожарноспасательная академия ГПС МЧС России, 2023. – С. 150-155.

10. Аспекты микробиологической коррозии бетона / **А.А. Гальцев**, В.С. Коновалова, К.Б. Строкин // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2023. – № 1. – С. 333-334.

11. Влияние объемной гидрофобизации на степень повреждения цементного камня бетона грибковыми микроорганизмами / К.Б. Строкин, **А.А. Гальцев**, В.С. Коновалова, Е.С. Промзелева, Б.Е. Нармания // Наука и инновации в строительстве: сборник докладов VII Международной научно-практической конференции, посвященной 170-летию В.Г. Шухова. – Т. 2. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 215-220.

12. The degree of damage to the reinforcement in hydrophobic concrete during fungal corrosion / K.B. Strokin, **A.A. Galtsev**, V.S. Konovalova // Proceedings of the International University Scientific Forum «Practice Oriented Science: UAE – RUSSIA – INDIA». – Part 2. – UAE, 2023. – Pp. 132-136.

13. The effect of volumetric hydrophobization on the degree of damage to cement stone concrete by fungal microorganisms / K.B. Strokin, **A.A. Galtsev**, V.S. Konovalova //

Proceedings of the International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration» – Reports in English. Part 2. – Beijing, PRC, 2023. – Pp. 156-161.

14. Влияние грибковых микроорганизмов на физико-механические характеристики цементного камня бетона с добавкой стеарата кальция / К.Б. Строкин, **А.А. Гальцев**, В.С. Коновалова, Е.С. Промзелева // Современные строительные материалы и технологии: сборник научных статей. – Вып. 3. – Калининград: Издательство БФУ им. И. Канта, 2023. – С. 39-47.

15. Ингибирование воздействия грибковых микроорганизмов на цементный камень бетона добавками нитратов металлов / К.Б. Строкин, **А.А. Гальцев**, В.С. Коновалова // Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование: сборник материалов Международной научно-практической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2023. – С. 212-215.

16. Влияние комбинированной добавки для предотвращения биокоррозии бетона на физико-механические свойства цементного камня / В.С. Коновалова, Е.С. Промзелева, К.Б. Строкин, **А.А. Гальцев** // Естественные науки и пожаробезопасность: проблемы и перспективы исследований: сборник материалов Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2024. – С. 53-58.

17. Развитие биоповреждений в гидрофобизированном железобетоне / В.С. Коновалова, **А.А. Гальцев**, К.Б. Строкин // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК – 2024): сб. материалов национальной (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2024. – С. 503-505.