

На правах рукописи



Новиков Денис Геннадьевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОГО РАЗРУШЕНИЯ СИСТЕМЫ
«ЦЕМЕНТНЫЙ БЕТОН – СТАЛЬНАЯ АРМАТУРА» В УСЛОВИЯХ
МИКРОБИОЛОГИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ**

05.23.05 – Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2021

Работа выполнена на кафедре строительства ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет»

Научный руководитель: доктор экономических наук,
доцент
Строкин Константин Борисович

Официальные оппоненты: **Степанова Валентина Федоровна**
Лауреат премий Правительства РФ в
Области науки и техники, академик МИА,
доктор технических наук, профессор АО
«НИЦ «Строительство» г. Москва,
заведующая лабораторией коррозии и
долговечности бетонных и железобетонных
конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева

Богатов Андрей Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент,
доцент кафедры «Строительные материалы и
технологии» ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет имени Н.П.
Огарёва».

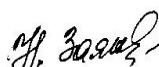
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Санкт-Петербургский
государственный архитектурно-строительный
университет»

Защита состоится «11» февраля 2022 г. в 15:00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский
государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г.
Иваново, Шереметевский пр-т, 21, ауд. У-109.

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

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Н.В. Заянчуковская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность выбранной темы. Значительная часть жилых домов и квартир в многоквартирных домах, построенных более 15 лет назад, подвержена микробиологической коррозии. Забитые вентиляционные шахты в домах 1950-70-х гг. строительства способствуют накоплению углекислого газа в квартирах и ускоренному размножению плесени и грибка в ваннных комнатах и углах жилых комнат. Старые канализационные трубы в подвальных помещениях часто засоряются, из-за чего скапливаются канализационные стоки, которые являются питательной средой для бактерий, а повышенная влажность ускоряет рост грибковых и плесневелых очагов. Опасность биокоррозии заключается в том, что микроорганизмы интенсивно размножаются, легко адаптируясь к меняющимся физико-химическим условиям среды. Известных в настоящее время антикоррозионных мер недостаточно, поскольку они, обеспечивая эффективную защиту от кислот и иных коррозионных химических соединений, часто бывают разлагаемы микроорганизмами.

Коррозия системы «цементный бетон – стальная арматура» протекает в две фазы. В течение начальной фазы стальная арматура находится под защитой слоя бетона. Продолжительность этой фазы определяется скоростью проникновения агрессивной среды через слой бетона к поверхности арматуры и протекающими в бетоне коррозионными процессами. Вторая фаза начинается после депассивации поверхности стальной арматуры и заканчивается процессами деструкции структуры железобетонного изделия вследствие накопления продуктов коррозии арматуры.

Изучение причин сокращения первой фазы и разработка способов увеличения ее продолжительности являются основой повышения долговечности железобетонных изделий и сооружений.

Исследованиями подтверждается, что в коррозионном процессе разрушения цементного камня принимают участие не только бактерии, но и грибы. При этом грибы разрушают пористый материал как в результате прорастания гиф в тело бетона, так и за счет выделения продуктов метаболизма.

Многие исследования направлены на изучение видового многообразия воздействующих на бетон микроорганизмов. Проводятся исследования влияния различных факторов на развитие биологической коррозии бетонов. Ведутся поиски способов борьбы с микроорганизмами и методов повышения биостойкости строительных материалов.

Проводится ранжирование склонности металлов к биозаражению и обрастанию. Биокоррозии подвержены углеродистые стали, легированные стали и цветные металлы, причем биокоррозия приводит к наиболее опасному виду коррозионного разрушения – локальной коррозии.

Устанавливаются механизмы биоповреждений и исследуется биостойкость полимерных материалов в различных водных средах. Разработан ряд математических моделей процессов коррозии бетонов в разных средах.

Целесообразен поиск решения проблемы прогнозирования долговечности бетонных и железобетонных изделий в биологически агрессивных жидких средах, поскольку своевременная защита подводных бетонных и железобетонных объектов от биообрастания позволит значительно сократить экономический ущерб от последствий коррозионных разрушений, повысить надежность конструкций, эксплуатирующихся в условиях повышенной влажности, снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций. Необходимо фокусировать исследования на расширении комплекса прочностных и антикоррозионных свойств железобетона в соответствии с множеством вариантов его применения. В связи с вышеизложенным, представленная работа является актуальной.

Степень разработанности темы. Фундаментальные исследования коррозионных процессов, протекающих в бетоне, армированном бетоне и железобетоне проводились научными школами профессора В.М. Москвина, академика РААСН Е.М. Чернышова и

сейчас ведутся в НИИЖБ В.Ф. Степановой, Н.К. Розенталем; академиком РААСН В.П. Селяевым в Национальном исследовательском Мордовском государственном университете имени Н.П. Огарева; академиком РААСН В.В. Петровым в Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю.А.; профессором С.Н. Леоновичем в БНТУ, Республика Беларусь; научной школой академика РААСН С.В. Федосова в Ивановском государственном политехническом университете.

В области исследования и прогнозирования долговечности бетонов известны труды А.Ф. Полака, В.И. Бабушкина, а также советника РААСН В.М. Латыпова из Уфимского государственного нефтяного технического университета. Изучением деградационных воздействий в строительстве и ЖКХ, обследованием, проектированием и расчетом энергоэффективных зданий и сооружений занимаются чл.-корр. РААСН В.И. Римшин и академик РААСН Н.И. Карпенко в Научно-исследовательском институте строительной физики РААСН.

Были изучены многие аспекты поведения стали в бетоне, такие как природа поровой жидкости в затвердевшем бетоне, электрохимия стали в этой среде, механизм защиты стали оксидными пленками и т.д. Изучению этих вопросов посвящены работы Ю.М. Баженова, Г.С. Рояка, Ф.М. Иванова, С.Н. Алексева, Б.В. Гусева, И.Г. Овчинникова.

Исследования биологического сопротивления строительных материалов проводились В.И. Соломатовым, В.М. Бондаренко, А.Н. Бобрышевым. Научной школой академика РААСН Ерофеева В.Т. и его коллегами Федорцовым А.П., Богатовым А.Д. в Национальном исследовательском Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева проводятся исследования влияния различных факторов на развитие биологической коррозии бетонов и разработка способов обеспечения биологического сопротивления строительных материалов. Биоклиматические испытания строительных материалов ведутся учеными научного совета РАН по биоповреждениям Смирновым В.Ф., Карповым В.А. Ученые из университета Binghamton в штате Нью-Йорк ведут работы над способом самовосстановления бетона при помощи грибка *Trichoderma reesei*.

Разработаны новые правила и стандарты, являющиеся обязательными на уровне законодательства, новые технологии в области восстановления повреждений конструкций от коррозии (The American Concrete Institute, NACE, НИИЖБ).

Современные методы исследований позволяют получить достоверные данные о химических и структурных превращениях, происходящих в железобетоне при воздействии различных сред, в том числе и микроорганизмов, и подобрать необходимый комплекс мер по предупреждению коррозионных повреждений железобетонных изделий и для их последующей защиты. Тем не менее, остается не охарактеризованной значимость коррозионно-агрессивных групп микроорганизмов, как фактора коррозии бетонных и железобетонных изделий.

Цель диссертационного исследования: предложить научно-обоснованные инженерно-технические решения по обеспечению сохранности стальной арматуры в цементном бетоне в условиях микробиологической коррозии.

Для достижения цели были определены задачи:

1. Исследовать влияние микробиологических сред на физико-механические характеристики (плотность, водопоглощение, пористость, прочность) и долговечность цементных бетонов.

2. Установить изменения в структурно-фазовом составе цементного камня бетона, происходящие в результате микробиологической коррозии.

3. Определить степень повреждения системы «цементный бетон – стальная арматура» в результате воздействия на нее микроорганизмов и продуктов их метаболизма.

4. Изучить аспекты коррозии стальной арматуры в биodeградируемом цементном бетоне.

5. Разработать практические рекомендации для установления срока службы и повышения стойкости к микробиологической коррозии системы «цементный бетон – стальная арматура».

Научная новизна:

- впервые установлены закономерности между скоростью деградации цементного камня бетона в микробиологических средах и начальным этапом развития коррозии арматуры класса проката А500С под действием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов; скорость коррозии стальной арматуры обусловлена действием выделяемых микроорганизмами органических кислот; коррозия арматуры под воздействием грибковых микроорганизмов протекает в 1,5 раза быстрее, по сравнению с коррозией в условиях действия бактерий; теоретически обосновано и экспериментально показано, что скорость коррозии бетонов плотной структуры под действием мицелиарных грибов и бактерий лимитируется деградацией цементного камня;

- научно доказаны и экспериментально установлены сроки достижения предельной концентрации агрессивных продуктов жизнедеятельности микроорганизмов у поверхности стальной арматуры в цементном бетоне при микробиологической коррозии, что позволило разработать экспериментальную методику по определению степени повреждения цементного бетона в результате микробиологической коррозии, позволяющую прогнозировать глубину коррозионного разрушения на любом сроке эксплуатации изделия.

Теоретическая и практическая значимость работы. Получены представления о закономерностях протекающих физико-химических превращений в системе «цементный бетон – стальная арматура» в условиях микробиологической коррозии, которые могут быть использованы для управления процессами деструкции цементных бетонов с целью обеспечения требуемой долговечности и для прогнозирования срока службы изделий.

Установленный состав продуктов жизнедеятельности микроорганизмов, в числе которых преобладают микромицеты *Aspergillus niger*, на поверхности цементного бетона дает представление о компонентах агрессивной среды, обуславливающих скорость коррозионного разрушения системы «цементный бетон – стальная арматура».

Результаты исследований микробиологической коррозии цементного камня бетона плотной структуры дают возможность определять глубину коррозионного повреждения бетонного покрытия, устанавливать вероятность и скорость коррозионных процессов на поверхности арматуры, прогнозировать срок службы железобетонных изделий в различных условиях микробиологической коррозии. Для достижения агрессивной концентрации органических кислот у поверхности стальной арматуры в цементном бетоне с толщиной слоя 5 см понадобится около 20 лет, а в условиях постоянного увлажнения поверхности цементного бетона этот срок сокращается до 10-11 лет; скорость локальной коррозии стальной арматуры в цементном бетоне после достижения у ее поверхности предельной концентрации агрессивных компонентов превышает 0,2 мм/год.

Разработана инженерная методика расчета сроков службы биodeградируемого железобетонного изделия. Полученные представления о коррозионной деструкции системы «цементный бетон – стальная арматура» под воздействием микроорганизмов позволяют спрогнозировать ресурс безопасной эксплуатации железобетонных изделий и сооружений и используются при проведении экспертизы зданий на объектах ООО «ДВСтрой». Разработанные рекомендации по повышению стойкости к микробиологической коррозии железобетонных изделий позволяют сократить расходы на ремонтно-восстановительные работы и находят применение в деятельности компании АО «Сахалин-Инжиниринг» при выполнении строительных работ.

Методология и методы диссертационного исследования. В работе обобщены, систематизированы и проанализированы имеющиеся в отечественной и зарубежной научно-технической литературе данные по теме исследования. На основании этого сформулированы задачи, предложены пути их выполнения и проведена проверка

достоверности полученных результатов. Для этого использованы методы теоретического и эмпирического уровня исследований.

Полученные результаты и выводы основаны на результатах длительного эксперимента, выполненного с применением комплекса взаимодополняющих, высокоинформативных методов исследований, таких как электронная микроскопия, рентгеноструктурный и дифференциально-термический анализы, ионная хроматография, газовая хромато-масс-спектрометрия, поляризационные измерения, статистической обработке полученных данных, а также подтверждены высокой сходимостью результатов расчетов и экспериментальных данных и их корреляцией с известными закономерностями.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследования изменений физико-механических характеристик и структурно-фазового состава цементного бетона под воздействием микроорганизмов;
- результаты исследования степени поврежденности цементного бетона, подверженного микробиологической коррозии;
- результаты исследования электрохимической коррозии стальной арматуры в бетоне под воздействием продуктов жизнедеятельности микроорганизмов;
- инженерная методика расчета сроков службы биодegradируемого железобетонного изделия.

Степень достоверности полученных результатов. Исследования проведены с использованием современных физических, физико-химических и химических методов анализа и математической обработки данных. Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлены соответствием применяемых методов поставленным задачам, использованием гостированных методик, согласованностью теоретически рассчитанных и экспериментальных данных в пределах допустимой погрешности, а также соответствием полученных экспериментальных данных физико-химическим представлениям о реальной картине процесса микробиологической деструкции цементных бетонов и результатам исследований других авторов. Экспериментальное значение величины определялось до получения результатов трех измерений, различающихся не более чем на 0,02. Относительная погрешность результатов расчетов не превышала допустимой на 5 %.

Апробация результатов. Основные положения диссертационного исследования опубликованы в журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus: «Известия вузов. Технология текстильной промышленности» № 1 (391) 2021; «E3S Web of Conferences» Vol. 274 2021; в журналах, рецензируемых ВАК Министерства науки и высшего образования РФ: «Современные проблемы гражданской защиты» № 4 2020; «Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова» № 10 2021; «Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова» № 11 2021.

Результаты диссертационного исследования доложены на VI Международной научно-практической конференции «Комплексные проблемы техносферной безопасности», г. Воронеж, 2020; на II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современные проблемы материаловедения», посвященной 65-летию ЛГТУ, г. Липецк, 2021; на III Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современная наука: теория, методология, практика», г. Тамбов, 2021; на Национальной (с международным участием) молодежной научно-технической конференции «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК – 2021)», г. Иваново, 2021; на II Международной научной конференции «Socio-Technical Construction and Civil Engineering (STCSE – 2021)», г. Казань, 2021.

Внедрение результатов исследований. На основании проведенных исследований разработаны практические рекомендации для установления ресурса безопасной эксплуатации изделий из железобетона, подверженных воздействию грибковых

микроорганизмов, используемые при проведении экспертизы зданий на объектах ООО «ДВСтрой».

Рекомендации по повышению стойкости к микробиологической коррозии железобетонных изделий внедрены компанией АО «Сахалин-Инжиниринг» при выполнении строительных работ. Обеспечение дополнительных мер по защите железобетонного изделия от действия микроорганизмов сокращает расходы на ремонтно-восстановительные работы на 23 %.

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 для обучения бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство» по дисциплинам «Строительные материалы», «Обследование, испытание и реконструкция зданий и сооружений», «Железобетонные и каменные конструкции» (акт о внедрении от 19.03.2021 г., СахГУ, г. Южно-Сахалинск).

Личный вклад автора. Автором сформулированы цель и задачи диссертационного исследования, выбраны объекты, методология и методы исследований, разработан комплекс теоретических и экспериментальных изысканий. Автор лично осуществлял постановку и проведение эксперимента по установлению влияния микроорганизмов на физико-механические характеристики и долговечность цементного бетона; проводил исследования электрохимического поведения стальной арматуры в биodeградируемом цементном бетоне; обработал и проанализировал основные результаты, практическая реализация которых так же проводилась при непосредственном участии автора. Автор лично участвовал в разработке рекомендаций по обеспечению сохранности стальной арматуры в условиях микробиологической коррозии цементных бетонов.

Публикации. По материалам выполненных исследований опубликовано 10 работ, в том числе в изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus, опубликованы 2 статьи; в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, опубликованы 4 статьи.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографических источников, 6 приложений; изложена на 185 страницах машинописного текста, содержит 43 рисунка, 22 таблицы и список литературы из 293 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, приведена общая характеристика работы, а также научные положения, которые выносятся на защиту, аргументирована практическая и научная значимости диссертационного исследования.

В первой главе проанализированы работы зарубежных и отечественных авторов, посвященные современным представлениям о механизме микробиологической коррозии строительных материалов (бетона, железобетона, композитных материалов). Приведена классификация микроорганизмов и характеристика особенностей их роста и жизнедеятельности. Рассмотрены физические и химические факторы, оказывающие влияние на заселение поверхности материалов микроорганизмами и их последующее развитие.

За прошедшие годы были установлены основные механизмы биоповреждений, протекающих в бетоне под воздействием различных микроорганизмов, установлено влияние продуктов жизнедеятельности микроорганизмов на эксплуатационные характеристики бетонов.

Проводимые исследования посвящены изучению биокоррозии конструкционных материалов и условий, которые вызывают и предполагают закономерности ее развития. Учеными разработаны методы диагностирования и способы контроля процессов

микробиологической коррозии, а также специализированная техника и приборы для отбора проб и проведения анализа степени поврежденности микроорганизмами строительных материалов и изделий.

Несмотря на обилие способов защиты от обрастания и накопленный теоретический и практический материал в области изучения микробиологической коррозии строительных материалов, радикальных методов борьбы не существует. Глубокое исследование всех участвующих в биодеструкции процессов позволит значительно повышать долговечность и увеличивать срок службы строительных материалов и изделий.

Во второй главе представлены сведения о материалах, которые используются при проведении экспериментальных исследований микробиологической коррозии системы «цементный бетон – стальная арматура». Приведены методики получения экспериментальных данных, подготовки образцов к исследованию и последующей обработки результатов.

Исследования проводились на образцах, изготовленных из портландцемента с нормированным составом без минеральных добавок марки ПЦ 500-Д0-Н с В/Ц = 0,3, с размерами 10x10x10 см. Изучение действия микроорганизмов на стальную арматуру проводилось на прутках арматуры диаметром 10 мм из стали класса проката А500С. Для заражения поверхности цементного камня использовались бактерии *Bacillus subtilis* и микромицеты *Aspergillus niger* van Tieghem.

Заражение поверхности цементного камня микроорганизмов проводилось согласно ГОСТ 9.048-89 «Единая система защиты от коррозии и старения. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов». Идентификация микроорганизмов в биопленке проводилась с помощью электронного микроскопа при окрашивании образцов по методу Грама.

Для изучения свойств, структуры и состава исследуемых в работе материалов (твердой и жидкой фазы) до и после воздействия микроорганизмов проведены экспериментальные исследования с применением методов химического и физико-химического анализа: методики определения плотности, водопоглощения, пористости и прочности цементного камня; анализ распределения пор по размеру; рентгенографический анализ; дифференциально-термический анализ; количественный анализ катионов кальция; электрометрический метод для измерения водородного показателя рН среды; ионная хроматография; газовая хромато-масс-спектрометрия; прямое титрование; методика поляризационных измерений; метод контактной коррозии.

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований коррозии цементного камня и стальной арматуры в условиях воздействия на них микромицетов *Aspergillus niger* van Tieghem и бактерий *Bacillus subtilis*. Полученные данные позволяют судить об изменениях, произошедших в цементном камне вследствие воздействия микроорганизмов.

После заражения микроорганизмами одна часть цементных образцов находилась в условиях воздействия капиллярной влаги. Для этого образцы помещались в емкость на синтепоновую подкладку, часть которой для поддержания влажности на постоянном уровне была опущена в сосуд с водой. Другая часть образцов оставалась на воздухе при комнатных условиях. Срок испытаний составлял 6 месяцев.

Рассмотрено влияние микроорганизмов на физико-механические характеристики цементного камня (таблица 1): плотность, водопоглощение, пористость, прочность.

Плотность незараженных мицеллярными грибами и бактериями цементных образцов увеличивается при увлажнении вследствие заполнения поровой структуры бетона влагой. На воздухе под воздействием микроорганизмов на цементный камень его плотность практически не изменилась. При микробиологической коррозии на начальном этапе плотность бетона увеличивается на 1,5-3 % вследствие образования биопленки, накопления в порах продуктов жизнедеятельности микроорганизмов и поглощения влаги, и за полгода повышение плотности достигает 6,5-7,5 %. Дополнительно определялась плотность бетона,

подвергнувшегося воздействию капиллярной влаги, после высушивания. Плотность незараженных бактериями и грибами образцов уменьшилась в связи с выщелачивающим действием воды. Снижение плотности цементного камня в этом случае объясняется деструкцией под воздействием микроорганизмов и продуктов их жизнедеятельности. Плотность высушенного бетона ниже первоначальных значений на 5 % при бактериальной коррозии, на 9 % при грибковой коррозии.

Таблица 1

Изменение физико-механических характеристик цементного камня под воздействием микроорганизмов при различных условиях

Микроорганизмы	До испытаний	Через 6 месяцев на воздухе	Через 6 месяцев воздействия капиллярной влаги	Через 6 месяцев воздействия капиллярной влаги и высушивания
<i>Плотность, кг/м³</i>				
-	2063	2065	2181	2020
Бактерии <i>Bacillus subtilis</i>	2093	2107	2230	1983
Грибки <i>Aspergillus niger</i>	2122	2140	2282	1918
<i>Водопоглощение, %</i>				
-	5,2	5,7	8,9	
Бактерии <i>Bacillus subtilis</i>	7,8	9,1	12,3	
Грибки <i>Aspergillus niger</i>	8,9	10,8	15	
<i>Пористость, %</i>				
-	11,7	11,9	12,2	
Бактерии <i>Bacillus subtilis</i>	11,8	12,8	13,5	
Грибки <i>Aspergillus niger</i>	11,9	13,5	15,3	
<i>Прочность на сжатие, МПа</i>				
-	35,78	36,17	33,74	
Бактерии <i>Bacillus subtilis</i>	34,44	32,25	29,89	
Грибки <i>Aspergillus niger</i>	33,32	30,51	27,72	

Водопоглощение цементного камня, зараженного бактериями *Bacillus subtilis*, увеличилось на 4,5 % через 6 месяцев воздействия капиллярной влаги. В этих же условиях водопоглощение образцов цементного камня, зараженного грибами *Aspergillus niger* van Tieghem, увеличилось на 6 %. Относительно незараженного цементного камня водопоглощение увеличивается на 7 % при бактериальной коррозии, на 10 % при грибковой коррозии в течение 6 месяцев в условиях увлажнения.

Пористость зараженных и незараженных образцов до испытаний практически не отличается. После выдержки на воздухе при комнатных условиях в течение полугодия пористость цементного камня увеличивается, в этом случае влага из пор затрачивается на поддержание жизни в биопленке на поверхности цементного камня. Очевидно, что грибковые микроорганизмы сильнее влияют на поровую структуру цементного камня. При биодеструкции во влажных условиях в течение полугодия повышается пористость цементного камня на 14 % при бактериальной коррозии, на 29 % при грибковой коррозии.

Из экспериментальных данных, представленных в таблице 1, следует, что несмотря на увеличение пористости зараженных образцов при увлажнении их плотность возрастает. Это явление связано со вскрытием закрытых пор в структуре цементного камня, вследствие чего он поглощает больше влаги, происходит накопление продуктов жизнедеятельности микроорганизмов в порах, увеличивается масса образца.

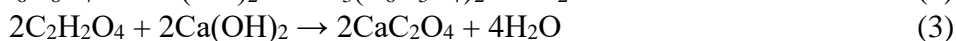
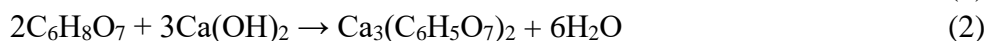
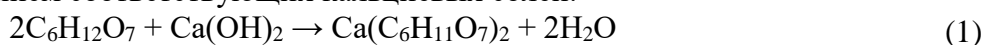
Незначительное повышение прочности на сжатие незараженного микроорганизмами цементного камня на воздухе обусловлено продолжающимися процессами гидратации и

изменениями структурно-фазового состава. Снижение прочности цементного камня под воздействием влаги связано с ослаблением и разрушением межкристаллических связей О-Са-О за счет вымывания кальция из его структуры. Процесс биоповреждения цементного камня связан с изменением прочностных характеристик. После заражения поверхности цементного бетона бактериями *Bacillus subtilis* прочность на сжатие снижается на 4 %, грибами *Aspergillus niger van Tieghem* – на 7 %. За 6 месяцев прочность на сжатие образца, зараженного бактериями, уменьшилась на 6 % на воздухе и на 13 % под воздействием капиллярной влаги. Для образца, зараженного грибами, снижение прочности произошло на 8,5 и 17 %, соответственно.

Методами рентгеноструктурного и дифференциально-термического анализа установлены значительные изменения в структурно-фазовом составе цементного камня под воздействием микроорганизмов. Снижение содержания гидросиликатов кальция и этtringита, а также других кристаллических фаз в цементном камне вследствие микробиологической коррозии, приводит к уменьшению прочности на сжатие. При грибковой коррозии происходит интенсивное уменьшение количества как кристаллических, так и рентгеноаморфных кальцийсодержащих фаз в цементном камне. При бактериальной коррозии увеличивается количество кальцита CaCO_3 вследствие воздействия на цементный камень углекислоты, которая образуется в процессе жизнедеятельности бактерий.

Методом хромато-масс-спектрометрии изучены продукты коррозии с поверхности цементных образцов: при воздействии микромицетов *Aspergillus niger van Tieghem* образуются в основном глюконовая (10 масс. %), лимонная (22,5 масс. %) и щавелевая (17 масс. %) кислоты; при воздействии бактерий *Bacillus subtilis* выделяется углекислота.

Скорость коррозии цементного камня бетона обусловлена растворением кальция под воздействием глюконовой (реакция (1)), лимонной (2)) и щавелевой (реакция (3)) кислот с образованием соответствующих кальциевых солей:



Агрессивность органических кислот для бетона определяется по растворимости их кальциевых солей согласно СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85». Глюконовая кислота является сильноагрессивной, лимонная и щавелевая – среднеагрессивными.

Согласно ГОСТ 31383-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний» для определения степени химического воздействия микроорганизмов на цементный камень и глубины коррозионного повреждения рассчитывалось количество цементного камня (в пересчете на СаО), вошедшего в химическое взаимодействие с раствором кислоты, по формуле:

$$P_{\text{CaO}} = \frac{q_1 \cdot M \cdot f_{\text{экв}}(\text{CaO}) \cdot 0,05608 \cdot Q}{S \cdot q_2}, \text{ г/см}^2, \quad (4)$$

где: q_1 – объем стандартного раствора с известной концентрацией химически активного вещества, пошедшего на титрование раствора после взаимодействия с бетоном, мл; M – концентрация раствора, моль/л; $f_{\text{экв}}(\text{CaO}) = 1/2$; 0,05608 – молярная масса СаО, соответствующая 1 мл раствора кислоты концентрации 1 моль/л; Q – объем раствора кислоты, участвовавшей во взаимодействии с бетоном в каждый период времени между отдельными испытаниями, мл; S – площадь рабочей поверхности образцов, взаимодействовавшей с кислотой, см²; q_2 – объем раствора, отобранного для титрования, мл.

При проведении расчета проводился пересчет молярной массы СаО на установленные методом химического анализа концентрации органических кислот в продуктах жизнедеятельности микроорганизмов из поровой жидкости бетона.

Расчет глубины разрушения бетона, см, проводился по формуле:

$$\Gamma_p = \frac{P_{CaO}}{\Psi \cdot \beta}, \quad (5)$$

где: Ψ – количество цемента в 1 см^3 исследуемого образца, рассчитывают по фактическому составу бетона, г/см^3 ; β – содержание CaO в цементе, определяемое по результатам химического анализа цемента до испытаний, %.

Установлено, что скорость коррозии бетонов плотной структуры под действием микробиологических сред лимитируется деградацией цементного камня. Биодеструкция цементного камня при бактериальной коррозии протекает медленнее в 3,4 раза по сравнению с грибковой. Глубина коррозионных повреждений при воздействии на цементный камень грибковых микроорганизмов за 10 лет достигнет 1 см, за 50 лет – 2 см; при бактериальной коррозии эти значения составят 0,3 и 0,6 см, соответственно.

Накапливающиеся в продуктах жизнедеятельности микроорганизмов кислоты проникают вглубь поровой структуры бетона и постепенно проникают к поверхности стальной арматуры. Органические кислоты вызывают питтинговую коррозию стали, что приводит к локальному растворению поверхности металла и точечному истончению арматурного прутка. В случае поступления угольной кислоты в поровую жидкость бетона в ней появляются гидроксид-, карбонат- и гидрокарбонат-ионы. Взаимодействие их с ионами железа, образующимися при растворении стали, сопровождается образованием плохо растворимых гидроксида и карбоната железа и хорошо растворимого гидрокарбоната железа. Коррозия поверхности стали при этом носит язвенный характер и протекает практически без замедления вследствие неустойчивости образующихся оксидных пленок.

Для установления срока начала коррозионных повреждений стальной арматуры в бетоне прутки арматуры длиной 20 см и диаметром 10 мм заливались цементным раствором из портландцемента марки ПЦ 500-Д0-Н с $\text{В/Ц} = 0,3$ в цилиндрической форме (рис. 1-а). Толщина цементного слоя составляла 3 см. Часть арматурного прутка, находящаяся вне цементного камня, покрывалась лаком для изоляции от воздействия окружающей среды. После 28-дневного отверждения при нормальных условиях поверхность цементного камня заражалась микроорганизмами. Образцы выдерживались в условиях постоянного увлажнения в течение 6 месяцев.

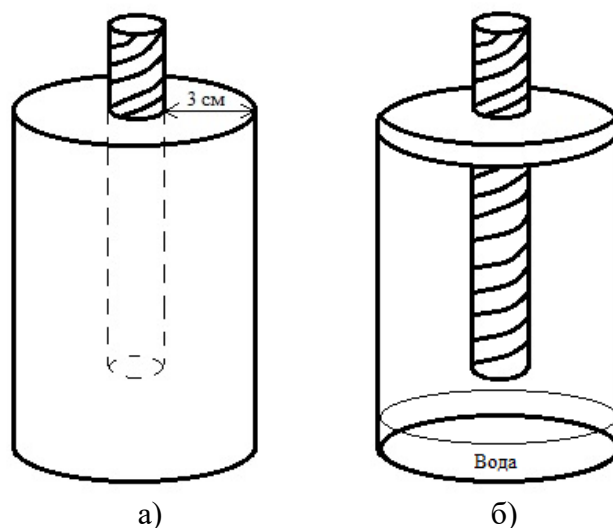


Рис. 1. Схема образца для исследования состояния стальной арматуры: а) в цементном камне; б) в условиях микробиологической коррозии

Дополнительно проведены измерения электродного потенциала поверхности стальной арматуры, находящейся в непосредственном контакте с микроорганизмами. Такое состояние может возникнуть при обрушении бетонного покрытия, тогда грибки и бактерии начнут заселять поверхность стали. Заражение поверхности стальной арматуры микроорганизмами проводили по методике, аналогичной применяемой при заражении поверхности цементного камня. Исследуемые арматурные стержни после заражения

помещались в емкости, на дно которых налит слой 1 см дистиллированной воды. Стержни закреплялись в крышках так, чтобы они не касались емкости и воды (рис. 1-б). Часть арматурного прутка, находящаяся над крышкой, покрывалась лаком для изоляции от воздействия окружающей среды.

Для определения скорости микробиологической коррозии арматуры из стали класса проката А500С получены поляризационные кривые, описывающие ее коррозионное поведение в бетоне (рис. 2) и при непосредственном контакте с микроорганизмами через 6 месяцев испытаний (рис. 3). Анализ полученных поляризационных кривых показал, что при воздействии микроорганизмов плотность коррозионного тока увеличивается, следовательно, скорость коррозии стали будет увеличиваться.

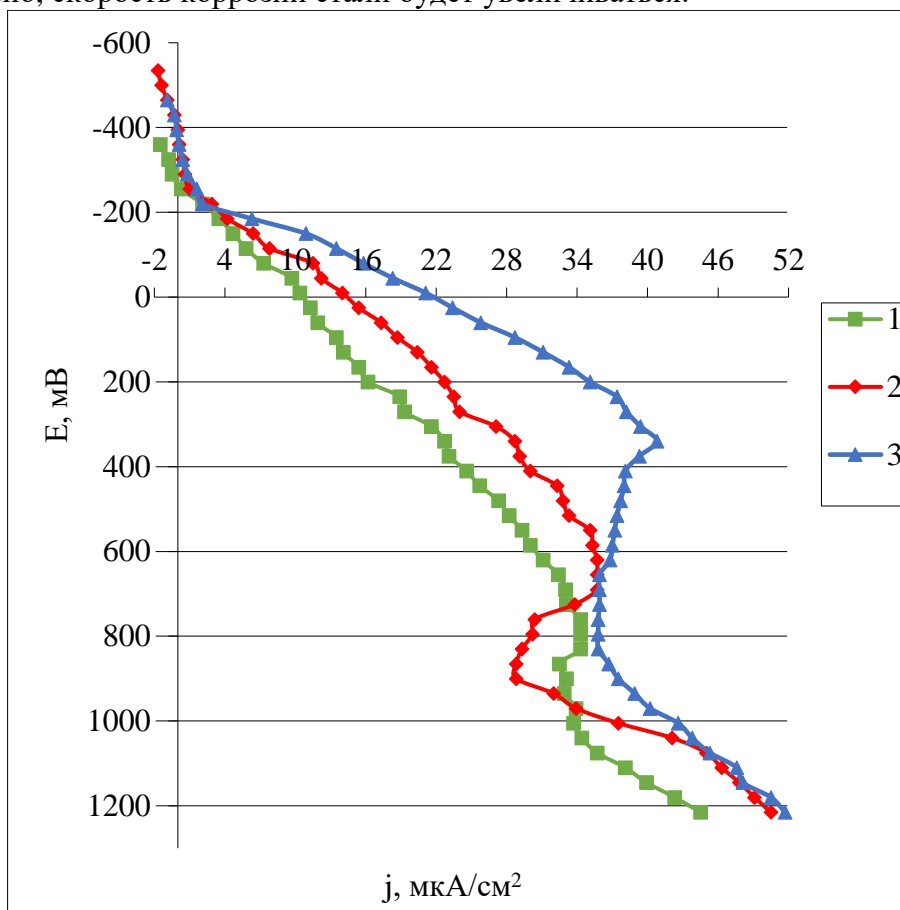


Рис. 2. Поляризационные кривые арматуры из стали класса проката А500С в цементном камне, находящемся в условиях воздействия влаги: 1 – не зараженная микроорганизмами; 2 – зараженная бактериями *Bacillus subtilis*; 3 – зараженная грибами *Aspergillus niger* van Tieghem

В цементном камне анодные процессы на поверхности арматуры развиваются медленно, кривые более пологие (рис. 2). Максимальное значение плотности тока при большом значении потенциала образца арматуры, находящейся в незараженном микроорганизмами цементном камне, свидетельствует о сохранении пассивного состояния поверхности. Локальное растворение поверхности стальной арматуры, находящейся в зараженном бактериями и грибами цементном камне, начинается из-за изменения рН поровой жидкости цементного камня под действием биогенных кислот. При значении потенциала стальной арматуры +300 мВ величина плотности тока превышает 25 мкА/см², что соответствует интенсивной коррозии арматуры в бетоне, зараженном микроорганизмами.

У незараженного образца стальной арматуры вне цементного камня значение плотности коррозионного тока проявляется при низком значении потенциала (рис. 3). Поверхность арматуры депассивирована, на ней протекают коррозионные процессы. Из

полученных диаграмм видно, что анодное растворение стальной арматуры, не имеющей защиты, начинается раньше и активно продолжается с повышением потенциала. Пассивное состояние поверхности незараженной микроорганизмами арматуры наступает при значении потенциала около 580 мВ, затем начинается питтингообразование. Значение потенциала питтингообразования составляет 690 мВ. Поляризационные кривые образцов арматуры, зараженных бактериями и грибами, имеют ступенчатый вид. Это связано с частичной репассивацией поверхности вследствие образования биопленки. Анодное растворение поверхности стальной арматуры, зараженной микроорганизмами, длится дольше, что должно отражаться в больших потерях массы образцами. Питтингообразование начинается при значении потенциала около 940 мВ при больших значениях плотностей тока, значит локальное растворение стали будет происходить интенсивно.

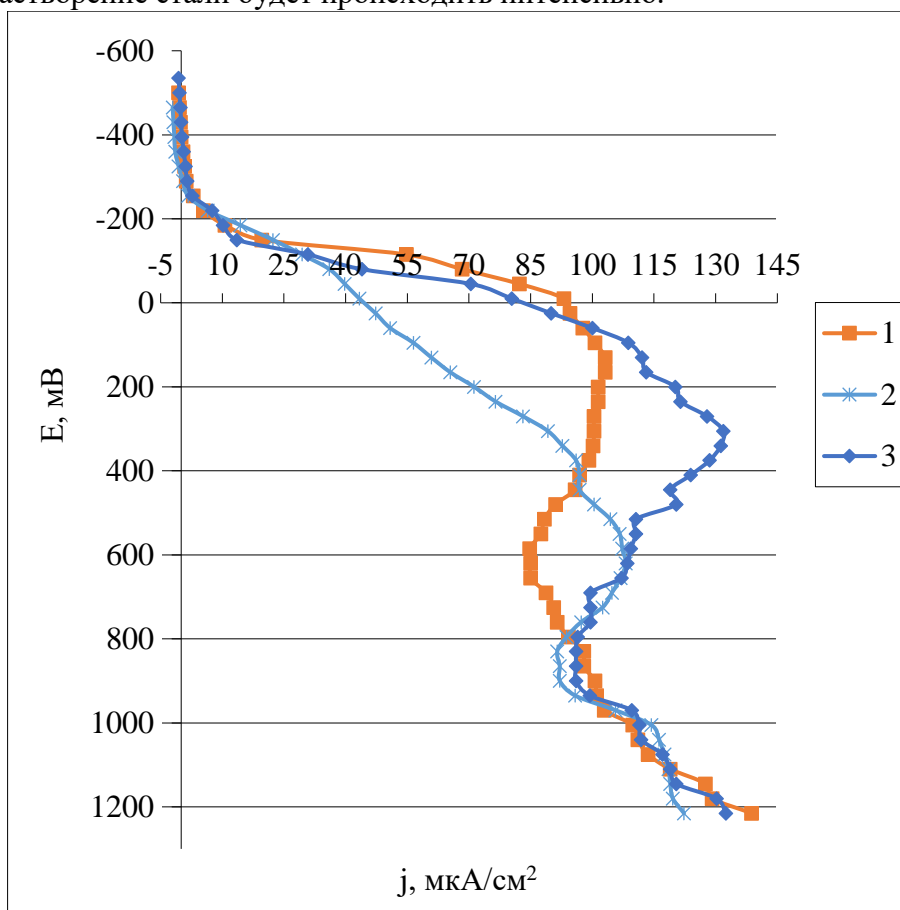


Рис. 3. Поляризационные кривые арматуры из стали класса проката А500С в условиях микробиологической коррозии: 1 – не зараженная микроорганизмами; 2 – зараженная бактериями *Bacillus subtilis*; 3 – зараженная грибами *Aspergillus niger van Tieghem*

При грибковой коррозии происходит увеличение плотности тока при меньших значениях потенциала поверхности стали, значит нарушение пассивации поверхности происходит раньше, коррозия будет развиваться интенсивнее. Это наблюдается как у образцов, находящихся в цементном камне, так и у образцов, непосредственно подвергающихся воздействию микромицетов.

Исходя из полученных графических зависимостей, для наибольшего достигнутого значения тока рассчитаны показатели скорости коррозии стальной арматуры по формулам:

$$K_m^- = \frac{j \cdot A}{z \cdot 26,8'} \quad (6)$$

$$K_h = K_m^- \frac{8,76}{\rho_{Me}} \quad (7)$$

где: K_m^- – отрицательный показатель изменения массы, г/(м²·ч); j – плотность тока коррозии, А/м²; A – атомная масса металла, г/моль; z – валентность иона металла, переходящего в

раствор; 26,8 – постоянная Фарадея, А·ч/моль; K_h – глубинный показатель коррозии, мм/год; $\rho_{\text{ме}}$ – плотность металла, г/см³.

Данные показывают (таблица 2), что коррозия стальных образцов в непосредственном контакте с микроорганизмами через 6 месяцев протекает во много раз быстрее, по сравнению с арматурой, находящейся в цементном камне, зараженном микроорганизмами.

Таблица 2

Показатели скорости коррозии арматуры из стали класса проката А500С после 6 месяцев микробиологической коррозии

Вид образца	Показатель изменения массы K_m^- , г/(м ² ·ч)	Глубинный показатель коррозии K_h , мм/год
<i>Стальная арматура находится в непосредственном контакте с микроорганизмами</i>		
Не зараженный	0,108	0,120
Зараженный бактериями <i>Bacillus subtilis</i>	0,113	0,127
Зараженный грибками <i>Aspergillus niger van Tieghem</i>	0,138	0,154
<i>Стальная арматура находится в цементном камне</i>		
Не зараженный	$7,46 \cdot 10^{-4}$	$8,34 \cdot 10^{-4}$
Зараженный бактериями <i>Bacillus subtilis</i>	$7,77 \cdot 10^{-4}$	$8,69 \cdot 10^{-4}$
Зараженный грибками <i>Aspergillus niger van Tieghem</i>	$8,88 \cdot 10^{-4}$	$9,92 \cdot 10^{-4}$

Для бетона и стальной арматуры является агрессивной концентрация органических кислот свыше 0,05 г/л. Основное воздействие на бетон и арматуру в нем оказывают глюконовая, лимонная и щавелевая кислоты. Агрессивной по отношению к стальной арматуре является концентрация растворенного углекислого газа в поровой жидкости бетона свыше 2000 мг/м³. Для определения скорости коррозии стальной арматуры в условиях агрессивного воздействия биогенных кислот снимались коррозионные диаграммы с образца, погруженного в раствор, состоящий из лимонной (22,5 масс. %), щавелевой (17 масс. %) и глюконовой (10 масс. %) кислот, с общей концентрацией 0,05 г/л, а также в раствор углекислоты с концентрацией 2,05 г/л.

Для наибольшего значения достигнутого тока рассчитаны показатели скорости коррозии образцов (таблица 3). После достижения агрессивной концентрации органических кислот у поверхности стальной арматуры коррозионные разрушения протекают быстрее, по сравнению с углекислотным воздействием. Эти данные коррелируют с результатами исследования микробиологической коррозии стальной арматуры, представленными в таблице 2: коррозия стали под действием грибков *Aspergillus niger van Tieghem* интенсивнее, чем при воздействии бактерий *Bacillus subtilis*.

Таблица 3

Показатели скорости коррозии арматуры из стали класса проката А500С в средах, моделирующих действие продуктов жизнедеятельности микроорганизмов

Вид среды	Показатель изменения массы K_m^- , г/(м ² ·ч)	Глубинный показатель коррозии K_h , мм/год
Раствор органических кислот с общей концентрацией 0,05 г/л	0,191	0,213
Раствор углекислоты с концентрацией 2,05 г/л	0,128	0,142

Достижение значения суммарной концентрации органических кислот 0,05 г/л (лимонной – 22,5 масс. %, щавелевой – 17 масс. %, глюконовой – 10 масс. %) у поверхности стальной арматуры в цементном камне толщиной 5 см происходит через 22 года после заражения поверхности бетона черной плесенью *Aspergillus niger* van Tieghem. После этого развивается питтинговая коррозия стали со скоростью 0,191 г/(м²·ч) или 0,213 мм/год.

Для достижения концентрации угольной кислоты более 2000 мг/м³ у поверхности стальной арматуры в бетоне толщиной 5 см при бактериальной коррозии под воздействием *Bacillus subtilis* понадобится 26 лет. После этого арматура корродирует со скоростью 0,128 г/(м²·ч) или 0,142 мм/год.

При такой скорости коррозии за 10 лет глубина точечного повреждения арматуры составит в среднем 2,1 мм при грибковой коррозии железобетонного изделия в условиях постоянного увлажнения и 1,4 мм при бактериальной коррозии в условиях постоянного увлажнения. Поскольку концентрация агрессивных частиц у поверхности арматуры в бетоне будет увеличиваться, а скорость коррозии возрастать, то и глубина повреждений будет больше. Для стальной арматуры диаметром 10 мм повреждения составят 21 и 14 % потери сечения при грибковой и бактериальной коррозии, соответственно, а, значит, состояние железобетонного изделия станет неудовлетворительным.

В четвертой главе представлены результаты исследования микробиологической коррозии железобетонных стен подвального помещения жилого здания. Биodeградация бетона усугубляется постоянным увлажнением стен конденсатом с канализационных и отопительных труб. На участках поверхности стен образовалась биопленка микроорганизмов (рис. 4).

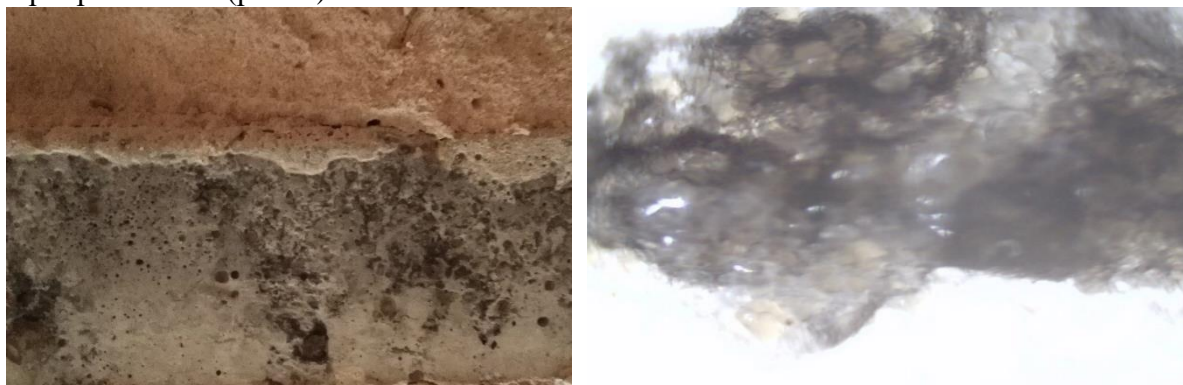


Рис. 4. Биопленка микроорганизмов на поверхности стены подвального помещения жилого дома

Исследование поверхности бетона после удаления биопленки показало, что под действием микроорганизмов произошло растрескивание поверхностного слоя, увеличилась шероховатость, произошло раскрытие пор (рис. 5). Также на поверхности обнаружены кристаллы продуктов коррозии.

Установлено, что исследуемая биопленка образована в основном микромицетами рода *Aspergillus niger*. В некоторых образцах было обнаружено присутствие бактерий *Bacillus subtilis*, а также поступающих из почвы и канализации актиномицетов класса Actinomycetes, нитрифицирующих бактерий рода *Nitrosomonas*, молочнокислых бактерий рода *Lactobacillus* и сульфатредуцирующих бактерий рода *Desulfovibrio*. В образцах биопленки, где было установлено присутствие бактерий *Bacillus subtilis*, не обнаружено микромицетов и актиномицетов. Эти бактерии обладают фунгицидными свойствами по отношению к токсигенным и плесневелым грибам, также они подавляют рост и развитие актиномицетов.

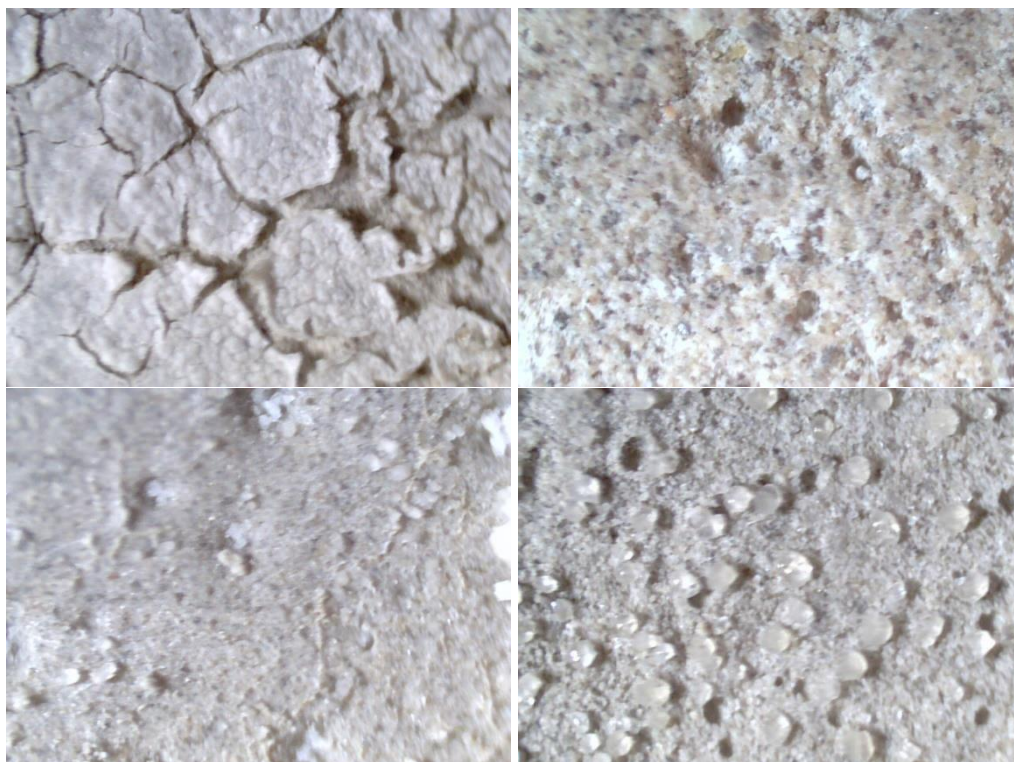


Рис 5. Состояние поверхности стены после удаления биопленки микроорганизмов

Результаты оценки качественного влияния микроорганизмов на бетон методом рентгеноструктурного анализа показывают значительное уменьшение всех кальцийсодержащих фаз. Зафиксировано исчезновение из структуры бетона рентгеноаморфной фазы гидросиликатов кальция и тоберморитового геля вследствие разложения их биогенными кислотами. Снижение количества этtringита и низкоосновных гидросиликатов кальция предполагает ухудшение прочностных характеристик бетона. Дифференциально-термический анализ образца поврежденного микроорганизмами бетона подтверждает, что в структуре значительно уменьшается содержание кристаллических фаз портландита, этtringита, кальцита, а также гидросиликатов и гидроалюминатов кальция.

Для установления степени развития коррозии стальной арматуры, находящейся под слоем поврежденного микроорганизмами бетона, измерены значения потенциала ее поверхности (таблица 4) по методике с двумя электродами сравнения. Поскольку информация о точном расположении арматуры в бетоне отсутствовала, измерения проводились в произвольных точках поверхности стены, откуда до этого были взяты соскобы для установления степени биодеструкции бетона. Чтобы не пропустить участок с локальной коррозией арматуры шаг измерений не превышал 0,5 м. Перед замером зачищался участок поверхности стены размером 5x5 см.

Таблица 4

Значения потенциала стальной арматуры в бетонной стене, находящейся под воздействием микроорганизмов, мВ

В местах присутствия на поверхности бетона только бактерий	В местах присутствия на поверхности бетона грибков <i>Aspergillus niger</i> и бактерий
-220 ÷ -233	-351 ÷ -376

Вероятность протекания локальной коррозии стальной арматуры в бетоне, подверженном бактериальной коррозии, средняя. Скорость протекания коррозионных процессов может быть низкой. В условиях совместного воздействия грибков и бактерий на поверхность бетона вероятность развития коррозии арматуры высокая.

Для установления скорости коррозии стальной арматуры приготовлена модельная среда (таблица 5) в соответствии с установленным составом продуктов жизнедеятельности

микроорганизмов в соскобах бетона с поверхности стены. Проводился пересчет концентраций на поровую жидкость бетона по процентному соотношению компонентов. Пористость принималась равной объему открытых пор 8,2 %, который был определен в лабораторных исследованиях для цементного камня, подверженного грибковой коррозии в условиях воздействия капиллярной влаги.

Таблица 5

Состав модельной среды, имитирующей продукты жизнедеятельности микроорганизмов в поровой жидкости бетона

Неорганические ионы, мг/л												
Ca ²⁺	NO ₃ ⁻	S ²⁻	CO ₃ ²⁻	Cl ⁻	F ⁻	NH ₄ ⁺	PO ₄ ³⁻	Fe ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Al ³⁺
32	3	50	35	1	1	1	2	27	9	1	1	26
Органические кислоты, мг/л												
Уксусная		Лимонная		Щавелевая		Глюконовая		Янтарная		Винная		
99		801		1355		36		20		18		
Яблочная				Фумаровая				Молочная				
20				26				35				

Методом контактной коррозии получены коррозионные диаграммы стальной арматуры при воздействии на нее модельной среды состава, указанного в таблице 5. Для приближения к реальным условиям определение скорости коррозии проводилось на прутках арматуры, которые были до этого подвержены воздействию грибков *Aspergillus niger* van Tieghem в лабораторных исследованиях. Поверхность стальной арматуры предварительно очищалась от микромицетов. Для максимального достигнутого значения коррозионного тока рассчитаны показатели скорости коррозии: показатель изменения массы образцов $K_m^- = 0,254 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и глубинный показатель коррозии $K_h = 0,283 \text{ мм}/\text{год}$.

Как видно из таблицы 5 концентрация органических кислот в модельной среде превышает значение 0,05 г/л, при котором начинаются необратимые коррозионные разрушения в бетоне и на поверхности стальной арматуры. Исходя из значения глубинного показателя коррозии, можно сделать заключение, что на поверхности арматурных стержней в бетоне развиваются локальные повреждения. Даже с учетом того, что концентрация неорганических ионов и органических кислот в модельной среде выше, чем у поверхности арматуры, находящейся под слоем бетона, прогнозируемая скорость коррозии не меньше 0,2 мм/год. Это значит, что через 10 лет глубина локального коррозионного повреждения стальной арматуры в таких условиях превысит 2 мм.

В таблице 6 представлены характеристики степени повреждения бетона в результате жизнедеятельности микроорганизмов. При расчете количества цементного камня, вошедшего в химическое взаимодействие с продуктами жизнедеятельности микроорганизмов, использовались концентрации, указанные в таблице 5.

Таблица 6

Степень повреждения бетона в результате микробиологической коррозии

Количество цементного камня (в пересчете на CaO), г/см ² , вошедшего в химическое взаимодействие с растворами кислот	1,3
Глубина разрушения бетона, см - на данный момент (через 20 лет после ввода здания в эксплуатацию)	1,34
- через 50 лет	2,12

Результаты расчетов соответствуют полученным при лабораторных исследованиях микробиологической коррозии цементного камня. Следовательно, экспериментальные исследования могут быть использованы для прогнозирования долговечности цементных бетонов в условиях воздействия микроорганизмов.

Таким образом, учитывая текущие повреждения бетона, уже сейчас, через 20 лет после ввода дома в эксплуатацию, необходимо проводить работы по восстановлению поврежденного в результате микробиологической коррозии участка бетонной стены: снять разрушенный слой бетона до стальной арматуры, провести очистку поверхности арматуры от продуктов коррозии, нанести новый слой. Во избежание повторного заражения, с учетом большой влажности помещения и регулярного смачивания стен конденсатом с труб и протечками, необходимо обеспечить защиту бетона от воздействия влаги и микроорганизмов, например, с помощью нанесения на поверхность стен гидрофобных составов, защитных лакокрасочных или мастичных материалов, уплотняющих пропиток. В качестве меры предотвращения биообрастания поверхности бетона и разрушения его микроорганизмами следует еще на этапе строительства проводить обработку бетонных стен подвала фунгицидными и бактерицидными составами проникающего действия, и повторять эту процедуру каждые 5 лет.

Экономический эффект от проведения мероприятий по очистке и дополнительной обработке бетонных стен подвала от воздействия микроорганизмов составляет 88500 рублей на 100 м² поверхности.

В заключении приведены итоги выполненного исследования:

1. Аналитический обзор литературных источников показал, что биологической коррозии подвержены практически все строительные материалы. По оценкам экспертов не менее 20 % всех коррозионных повреждений вызваны деятельностью микроорганизмов. К настоящему времени в строительном материаловедении накоплен огромный теоретический и практический материал о коррозионных процессах, протекающих в цементных бетонах, о влиянии различных факторов на скорость коррозии бетонных изделий, разработаны математические модели для прогнозирования долговечности изделий и конструкций из цементных бетонов. Существующие нормативные документы по биостойкости разработаны без учета специфики эксплуатации строительных материалов.

2. При микробиологической коррозии цементного камня бетона ухудшаются его физико-механические характеристики. В течение 6 месяцев воздействия микроорганизмов снижается плотность цементного камня на 5-9 %; повышается водопоглощение на 7-10 %; увеличивается пористость за счет увеличения количества открытых пор на 14 % при бактериальной коррозии, на 29 % при грибковой коррозии; снижается прочность на сжатие в среднем на 15 %.

3. На основании данных рентгеноструктурного и дифференциально-термического анализов цементного камня установлено, что снижение содержания низкоосновных гидросиликатов кальция и этрингита, а также других кристаллических фаз в структурно-фазовом составе цементного камня вследствие микробиологической коррозии приводит к уменьшению прочности на сжатие. Под действием микроорганизмов происходит значительное уменьшение всех кальцийсодержащих фаз в цементном камне. Уменьшение фазы портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$ обусловлено его выщелачиванием в результате воздействия на цементный камень влаги и микроорганизмов. При бактериальной коррозии происходит накопление кальцита CaCO_3 вследствие воздействия на цементный камень углекислоты, образуемой бактериями.

4. При проведении идентификации микроорганизмов на поверхности бетонной стены подвального помещения жилого дома обнаружены микромицеты рода *Aspergillus niger*, бактерии *Bacillus subtilis*, актиномицеты класса *Actinomycetes*, нитрифицирующие бактерии рода *Nitrosomonas*, молочнокислые бактерии рода *Lactobacillus* и сульфатредуцирующие бактерии рода *Desulfovibrio*. Продукты жизнедеятельности микроорганизмов в соскобах с поверхности бетона в основном состоят из органических кислот, продуцируемых грибами, а также ионов аммония, карбонат-, нитрат- и сульфид-ионов, выделяемых бактериями в процессе жизнедеятельности.

5. Разработана и апробирована инженерная методика определения степени повреждения цементного бетона на основании установленного количественного

содержания продуктов жизнедеятельности микроорганизмов в поровой жидкости бетона. Установлено, что глубина разрушения бетона под воздействием микроорганизмов, преимущественно микромицетов *Aspergillus niger van Tieghem*, за 20 лет составляет 1,3 см; за 50 лет – 2,1 см. Результаты, полученные при исследовании степени поврежденности биodeградируемой бетонной стены, подтверждают данные лабораторных исследований микробиологической коррозии цементного камня, в которых глубина повреждения цементного бетона грибами *Aspergillus niger van Tieghem* за 50 лет составляет 2 см. Следовательно, экспериментальные исследования могут быть использованы для прогнозирования долговечности цементных бетонов при микробиологической коррозии.

6. Экспериментально исследовано коррозионное состояние стальной арматуры в бетоне, находящемся под воздействием микроорганизмов. По измеренным значениям электродного потенциала, находящимся в интервале $-351 \div -376$ В, установлено, что вероятность развития локальной коррозии стальной арматуры в биodeградируемой бетонной стене сильная. Для достижения агрессивной концентрации органических кислот у поверхности стальной арматуры в бетоне с толщиной слоя 5 см понадобится около 20 лет. Однако в условиях постоянного увлажнения поверхности бетона этот срок сокращается до 10-11 лет. Скорость локальной коррозии стальной арматуры в бетоне превышает 0,2 мм/год, следовательно за 10 лет повреждение составит более 2 мм, а для арматуры диаметром 10 мм такое состояние будет неудовлетворительным.

7. На основании проведенных исследований разработаны практические рекомендации для установления ресурса безопасной эксплуатации изделий из железобетона, подверженных воздействию грибковых микроорганизмов, используемые при проведении экспертизы зданий на объектах ООО «ДВСтрой» (акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы от ООО «ДВСтрой»).

Рекомендации по повышению стойкости к микробиологической коррозии железобетонных изделий внедрены компанией АО «Сахалин-Инжиниринг» при выполнении строительных работ (акт о внедрении результатов научно-исследовательской работы от АО «Сахалин-Инжиниринг»). Обеспечение дополнительных мер по защите железобетонного изделия от действия микроорганизмов сокращает расходы на ремонтно-восстановительные работы на 23 %.

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 для обучения бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство» по дисциплинам «Строительные материалы», «Обследование, испытание и реконструкция зданий и сооружений», «Железобетонные и каменные конструкции» (акт о внедрении от СахГУ, г. Южно-Сахалинск).

Перспективы дальнейшей разработки тематики: полученные представления о процессах, протекающих при микробиологической коррозии цементного камня бетона и стальной арматуры, могут быть использованы при создании математических моделей для прогнозирования долговечности железобетонных изделий и сооружений, а также при разработке мер по предотвращению биообрастания поверхности бетонов и борьбе с развитием микроорганизмов. Продолжить работу по изучению влияния биологических сред на деградацию бетонов различной плотности, в том числе высокофункциональных, модифицированных бетонов и особо плотных бетонов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

публикации, включенные в перечень, определенный ВАК Минобрнауки РФ:

1. Определение ресурса безопасной эксплуатации конструкций из железобетона в условиях микробиологической коррозии / К.Б. Строкин, Д.Г. Новиков, В.С. Коновалова, С.А.

Логинова, Б.Е. Нармания // Современные проблемы гражданской защиты. – 2020. – № 4. – С. 62-69.

2. Влияние микроорганизмов на физико-механические свойства бетона / К.Б. Строкин, **Д.Г. Новиков**, В.С. Коновалова, Н.С. Касьяненко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 10. – С. 90-98.

3. Изменение структурно-фазового состава цементного бетона при микробиологической коррозии / К.Б. Строкин, **Д.Г. Новиков**, В.С. Коновалова, Н.С. Касьяненко // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2021. – № 11. – С. 106-113.

публикации, включенные в международную базу цитирования Scopus:

4. Прогнозирование коррозии стальной арматуры в железобетоне в условиях воздействия черной плесени *Aspergillus niger* / К.Б. Строкин, **Д.Г. Новиков**, В.С. Коновалова, А.В. Осыко, Б.Е. Нармания // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 1 (391). – С. 128-133.

5. Strokin, K.B. Forecasting the durability of reinforced concrete under conditions of microbiological corrosion / К.В. Strokin, **D.G. Novikov**, V.S. Konovalova // E3S Web of Conferences. – 2021. – Vol. 274. – P. 04003.

в других изданиях:

6. Круглый стол «Современные информационные технологии в строительстве и нефтегазовом секторе Российской Федерации» / А.А. Абси, К.Б. Строкин, Д.Д. Син, В.Д. Малюк, **Д.Г. Новиков**, С.Д. Пак, Е.Е. Истратова // Творчество и современность. – 2020. – 1 (12). – С. 228-236.

7. Строкин, К.Б. Бактериальная коррозия стальной арматуры железобетона / К.Б. Строкин, **Д.Г. Новиков**, Б.Е. Нармания // Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций: материалы XI академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции, посвященной памяти первого председателя научного совета РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов», почетного члена РААСН, доктора технических наук, профессора Зайцева Юрия Владимировича. – Саранск, 2020. – С. 262-265.

8. Скорость коррозии углеродистых конструкционных сталей под воздействием черной плесени *Aspergillus niger* / К.Б. Строкин, **Д.Г. Новиков**, В.С. Коновалова, Б.Е. Нармания // Современные проблемы материаловедения: сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ. – Липецк, 2021. – С. 206-210.

9. Изменение структурно-фазового состава бетона под воздействием микроорганизмов / К.Б. Строкин, **Д.Г. Новиков**, В.С. Коновалова, Б.Е. Нармания // Современная наука: теория, методология, практика: материалы III-ей Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, 13-14 апреля 2021 г. / ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет». – Тамбов, Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2021 – С. 103-106.

10. **Новиков, Д.Г.** Влияние водной среды и грибковых микроорганизмов *Aspergillus niger* на прочность бетона / **Д.Г. Новиков** // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2021. – № 1. – С. 355-356.

Научно-информационное издание
Новиков Денис Геннадьевич
Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия
**Исследование коррозионного разрушения системы «цементный бетон – стальная
арматура» в условиях микробиологической коррозии**
Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук