

На правах рукописи

Лоч

Логинова Светлана Андреевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА
ПРИ БИОКОРРОЗИИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ**

05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (строительство)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново - 2020

Работа выполнена на кафедре естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет».

Научный руководитель: Доктор технических наук, профессор,
советник РААСН
Румянцева Варвара Евгеньевна

Официальные оппоненты: **Рудобашта Станислав Павлович,**
Заслуженный деятель науки РФ, академик
МАО, доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры «Теплотехники, гидравлики
и энергообеспечения предприятий», ФГБОУ ВО
«Российский государственный аграрный
университет имени К.А. Тимирязева»

Богатов Андрей Дмитриевич,
кандидат технических наук, доцент, заместитель
директора НИИ «Материаловедение»,
заместитель декана по научной работе ФГБОУ
ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
имени Н.П. Огарёва»

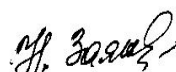
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет», г. Санкт-Петербург

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

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

Автореферат разослан « _____ » _____ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент



Н.В. Заянчуковская

**Научный консультант - Заслуженный деятель науки РФ,
Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники,
академик РААСН, доктор технических наук, профессор
Федосов Сергей Викторович**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы исследований. С момента начала широкого применения бетонных и железобетонных конструкций в промышленном и гражданском строительстве остается актуальной проблема обеспечения их долговечности в условиях воздействия агрессивных сред.

Бетон остается наиболее широко используемым строительным материалом современного строительства. Эта позиция сохраняется благодаря уникальной линии физико-механических свойств по сравнению с другими классическими строительными материалами. Несмотря на теоретический срок службы бетона, достигающего до миллиона лет, коррозия, спровоцированная действием агрессивных сред и микроорганизмов, является одним из наиболее важных факторов, способствующих преждевременной деградации бетона.

Микробные процессы затрагивают структурную целостность многих наземных и морских конструкций, мостов, зданий и сооружений, в результате чего бетон подвергается биодеградации.

Микробиологическая коррозия бетона является серьезной глобальной проблемой, ущерб от которой оценивается в размере миллиардов долларов в год. В настоящее время микробные сообщества, ответственные за ухудшение структуры бетона, остаются недостаточно изученными. Для разработки новых подходов к снижению вероятности возникновения биокоррозионных процессов необходимо углубленное изучение микробного разнообразия и структуры сообществ корродированного бетона. Комплексное изучение причинно-следственных факторов и механизмов процессов биоповреждений имеет важное значение для эффективной профилактики и контроля процесса износа бетонных конструкций.

Кроме того, исследование микробиологического воздействия на цементные материалы имеет санитарно-гигиеническое значение. Нередко микроорганизмы могут представлять опасность для здоровья человека. Например, микроорганизмы *Aeromonas*, *Pleisiomonas*, *Mycobacterium*, *Flavobacterium*, *Serratia* и др. являются возбудителями различных инфекционных заболеваний у человека.

Разрушение цементных бетонов при биокоррозии, как и при других видах коррозионной деструкции, определяются процессами массопереноса и химическими реакциями. Успешное прогнозирование долговечности строительных конструкций, эксплуатирующихся в водной среде, возможно путем математического моделирования, учитывающего как свойства цементного бетона, параметров жидкости, так и характер воздействия микрофлоры.

Привлечение математического аппарата к исследованию микробиологической коррозии дает возможность уяснить суть обменных процессов между цементным камнем и бактериальной клеткой, прогнозировать этот обмен и наметить возможные пути уменьшения коррозионного разрушения.

Степень разработанности темы. Диссертационная работа выполнена в рамках научно-исследовательского направления под общим руководством академика РААСН С.В. Федосова, связанного с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов массопереноса при коррозии бетона и железобетона. К настоящему времени данной научной школой представлен ряд математических моделей процессов коррозии в разных средах. Тем не менее, моделирование процессов массопереноса при биокоррозии цементных бетонов в жидких средах не проводилось. Не охарактеризована значимость коррозионно-агрессивных групп

микроорганизмов, как фактора жидкостной коррозии бетонных и железобетонных конструкций.

Все вышесказанное определило актуальность цели настоящей работы, которая выполнялась в рамках НИОКР НИИСФ РААСН по теме: «Управление процессами коррозионной деструкции строительных материалов в условиях комплексного воздействия окружающей среды для повышения безопасности жизнедеятельности».

Цель диссертационного исследования. Установление и обобщение закономерностей массопереноса при биокоррозии цементных бетонов в жидкой среде. Определение основных параметров (коэффициентов массопроводности, массоотдачи), изучение кинетики и динамики исследуемого процесса. Построение расчетной математической модели жидкостной коррозии цементных бетонов с учетом биогенного фактора. Разработка на основе полученных данных научно обоснованных рекомендаций по повышению коррозионной стойкости мостовых опор и гидротехнических сооружений.

Задачи диссертационного исследования:

1. Установить подходы к механизмам воздействия биогенного фактора на общий коррозионный процесс цементных бетонов.
2. Разработать физико-математическую модель процесса диффузии целевого компонента «свободного» гидроксида кальция в твердой фазе цементного бетона и в биопленке, образованной микроорганизмами в жидкой среде, которая позволяет получить решения краевой задачи массопереноса в системе «цементный бетон - биопленка - жидкость», что в совокупности дает возможность осуществлять мониторинг процесса массопереноса в области контроля биоразрушений цементных бетонов.
3. Провести численный эксперимент с целью изучения влияния коэффициентов массопроводности и массоотдачи на кинетику и динамику процесса.
4. Провести натурный эксперимент для проверки адекватности и универсальности предлагаемой математической модели и разрабатываемого инженерного метода расчета.
5. Разработка практических рекомендаций для более рациональной эксплуатации подводных бетонных конструкций в биологически агрессивных средах.

Научная новизна:

- разработана физико-математическая модель процесса массопереноса «свободного» гидроксида кальция в системе «цементный бетон - биопленка - жидкость» при жидкостной коррозии с учетом воздействия биогенного фактора;
- получены аналитические решения задачи массопереноса в процессах биокоррозии бетона для системы «цементный бетон - биопленка - жидкость», что дает возможность расчета концентрации «свободного» гидроксида кальция в твердой фазе и концентрации растворенного гидроксида кальция в жидкой фазе;
- определены основные параметры массопереноса (коэффициенты массопроводности и массоотдачи) при бактериальной и грибковой коррозии бетона;

- в лабораторных условиях проведены исследования по изучению закономерностей формирования сообществ бактерий и микромицетов на цементном бетоне в жидкой среде.

Теоретическая и практическая значимость. Расширены представления о механизмах и степени воздействия различных групп микроорганизмов на общий процесс коррозионного разрушения цементных бетонов в жидкой среде.

Предложенная физико-математическая модель массопереноса «свободного» гидроксида кальция в системе «цементный бетон - биопленка - жидкость» для биологически активных сред позволяет рассчитывать динамику полей концентраций «свободного» гидроксида кальция по толщине бетонной конструкции, а также кинетику массопереноса в твердой и жидкой фазах, с целью прогнозирования продолжительности коррозионного процесса.

Проведена верификация математической модели на основе данных эксперимента. Высокое сходство результатов теоретического расчета с экспериментальными данными свидетельствует об адекватности предложенной математической модели и позволяет рекомендовать ее для прогнозирования последствий воздействия биоагрессивных эксплуатационных сред на бетонные и железобетонные конструкции.

Методология и методы диссертационного исследования. В работе проанализирован отечественный и мировой опыт научно-исследовательских работ в области биологической коррозии строительных материалов, обобщена практика применения современных методов антикоррозионной защиты. На основании этого поставлена цель, сформулированы задачи, предложены пути их решения, разработана физико-математическая модель массопереноса при биокоррозии и проведена проверка достоверности полученных результатов.

Для реализации цели и поставленных задач диссертации использовались методы микробиологического исследования, электро- и комплексонометрии, рентгенофлуоресцентного и дифференциально-термического анализов, а также методы математической статистики для обработки результатов эксперимента.

Положения, выносимые на защиту:

- физико-математическая модель массопереноса «свободного» гидроксида кальция в системе «цементный бетон - биопленка - жидкость» при коррозии с учетом воздействия коррозионно-агрессивных групп микроорганизмов на уровне феноменологических уравнений;

- аналитические решения задачи массопереноса в процессах коррозии в биологически активных средах;

- результаты верификации основных положений физико-математической модели процесса биокоррозии бетонов, подтверждающие адекватность предложенной модели.

Достоверность полученных результатов Достоверность научных результатов диссертационной работы обусловлена соответствием используемых методов поставленным задачам, согласованностью полученных теоретически рассчитанных и экспериментальных данных в пределах допустимой погрешности, согласованностью с результатами ранее проведенных исследований другими авторами.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации опубликованы в научных журналах, рецензируемых ВАК Министерства образования и науки РФ: «Вопросы современной науки и практики. Университет

им. В.И. Вернадского» № 1(55), 2015; «Строительные материалы» №12, 2017; «Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение» №2, 2018 и №3, 2019; в издании, включенном в международную базу цитирования Scopus, «International Journal for Computational Civil and Structural Engineering», 2018; в издании, включенном в международную базу цитирования Web of Science, Magazine of Civil Engineering, №7, 2020.

Доложены на XXI Международной научно-технической конференции «Информационная среда вуза» г. Иваново, 2015; XII Международной научно-практической конференции «Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации», г. Курск, 2015; Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в науке и образовании», г. Москва, 2015; Международной научно-практической конференции «Новые задачи технических наук и пути их решения», г. Уфа, 2015; веб-конференции «Первые Международные Лыковские научные чтения, посвящённые 105-летию академика А.В. Лыкова - МЛНЧ - 2015», г. Москва, 2015; межвузовской научно-технической конференции с Международным участием «Молодые ученые развитию промышленно-текстильного кластера» (Поиск-2017), г. Иваново; XXII Международном научно-практическом Форуме «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы» (SMARTEX), г. Иваново, 2017; VII Международной молодежной научной конференции «Молодежь и XXI век», г. Курск, 2017; Всероссийской научно-технической конференции «Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций», г. Саранск, 2019; I-ом научно-практическом форуме «SMARTBUILD», г. Иваново, 2018; 72-ой Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, г. Ярославль, 2019; VI Всероссийской (с междунар. уч.) научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства, ЖКХ и техносферной безопасности», г. Волгоград, 2019; II Международной научно-технической конференции «Инженерные системы и энергоэффективность в строительстве, природообустройстве», Республика Крым, 2019.

Внедрение результатов исследований. Полученные представления о коррозионной деструкции бетонов при биокоррозии с учетом особенностей процессов массопереноса позволяют своевременно спрогнозировать последствия воздействия жидких сред с учетом действия биогенного фактора, что подтверждается эффективностью их применения на производственных объектах (акт о внедрении от 17.06.2019 г., ООО «Геопроект», г. Иваново). Разработанные практические рекомендации по мониторингу и повышению коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций применялись при проведении промышленной экспертизы строительных конструкций зданий и сооружений (акт о внедрении ООО «Базовый инжиниринг», г. Иваново). Экономический эффект составил 8,9% от стоимости сметных работ.

Теоретические и практические результаты диссертационного исследования внедрены в учебный процесс кафедры «Нанотехнологий, физики и химии» ФГБОУ ВО «ИВГПУ» при изучении бакалаврами направления подготовки 08.03.01 «Строительство» дисциплины «Коррозия металлов и способы защиты», магистрами направления подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» дисциплин «Мониторинг коррозии и защита от коррозии» и

«Методы защиты от коррозии оборудования и сооружений» (акт о внедрении от 06.09.2019 г.).

Личный вклад автора. Автором, по согласованию с научным руководителем, сформулированы цель и задачи исследования, проанализированы возможные пути их решения, выбраны объекты, методология исследования, обработаны, интерпретированы и обобщены экспериментальные результаты. Лично автором осуществлен комплекс практических исследований, постановка и решение краевой задачи массопереноса «свободного» гидроксида кальция в системе «цементный бетон - биопленка - жидкость» при коррозии с учетом воздействия коррозионно-агрессивных групп микроорганизмов. В совместных работах, выполненных в соавторстве с академиком РААСН, доктором технических наук, профессором С.В. Федосовым, доктором технических наук, профессором В.Е. Румянцевой, кандидатом биологических наук, доцентом Т.В. Чесноковой, автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и обсуждении результатов.

Публикации. По материалам выполненных исследований опубликовано 19 работ, из них 4 работы в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ, 1 работа в издании, включенном в международную базу цитирования Scopus, и 1 работа в издании, включенном в международную базу цитирования Web of Science.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений; изложена на 153 страницах машинописного текста, содержит 36 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 159 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены цели и задачи, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования, а также, основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен краткий литературный обзор работ отечественных и зарубежных авторов, посвященный влиянию биотических факторов водных сред на процессы коррозии бетонов, определены задачи исследования.

Первое исследование, посвященное микробиологическому биоразрушению бетона, было проведено в 1900 году учеными из Лос-Анджелеса. При обследовании бетонного водопроводного канала в поверхностном слое поврежденного бетона были обнаружены нитрифицирующие бактерии.

В СССР первые исследования микробной коррозии бетона были проведены в 1931 году академиком Б.Л. Исаченко. Значительный вклад в изучение процессов микробиологической коррозии строительных сталей и бетонов внесли работы советских исследователей Е.И. Андреюк, И.А. Козловой, А.М. Рожанской и др.

Изучению влияния эксплуатационных сред на коррозионную стойкость строительных композитов посвящены работы В.М. Москвина, Ф.М. Иванова, Н.К. Розенталя, Б.В. Гусева, В.Ф. Степановой, В.И. Соломатова, В.Т. Ерофеева, А.А. Горбушина, Б.В. Громова и др. Представление о решающей роли массопереноса в коррозионных процессах развивали А.В. Лыков, С.П. Рудобашта и др.

В результате ряда исследований было установлено, что в большинстве случаев биокоррозия протекает повсеместно с другими видами деструкции. Биодеструкция

бетонных конструкций способствует увеличению пористости бетона и ускорению диффузионных процессов в нем, тем самым стимулируя коррозионные процессы.

В настоящее время в области контроля биодеградации различных строительных материалов достигнуты определенные успехи. Однако данные о биоразрушении бетонов в отечественной и зарубежной литературе весьма малочисленны. Теоретические исследования и реализация их результатов остается затруднительной вследствие отсутствия комплексной системы исследований и испытаний, единой методологии и нормативной базы исследований в области биокоррозии.

Анализ современного состояния проблемы моделирования и расчета массообменных процессов при жидкостной коррозии цементных бетонов показал, что в исследовании данной проблемы достигнуты большие успехи: сформулирована классификация процессов коррозии в бетоне, установлены принципиальные схемы жидкостной коррозии и ее этапы; разработаны способы первичной и вторичной защиты бетона и железобетона от коррозии; на базе эмпирических и феноменологических уравнений разработан ряд математических моделей, позволяющих прогнозировать долговечность конструкций; накоплена большая экспериментальная база, которая дает возможность смоделировать деструктивные процессы цементного бетона при воздействии на него агрессивных сред, и дает возможность определять основные параметры процесса, необходимые для проведения математического моделирования.

Ранее в существующих математических моделях не производился учет дополнительного воздействия биологического фактора на бетон и железобетон в процессе эксплуатации. Разработка математической модели массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов на уровне феноменологических уравнений с учетом биотического фактора среды позволит более точно прогнозировать сроки эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций в природных водных средах, рационально, с требуемой периодичностью проводить противообрастающие обработки бетонных поверхностей, экономически верно назначать антикоррозионные средства защиты.

Все вышеизложенное явилось предпосылками при постановке задач исследований данной диссертации.

Во второй главе представлены сведения об исходных материалах, характеристики объектов исследования, описание штаммов используемых микроорганизмов, методики проведения испытаний.

Объектами исследования на коррозионную стойкость служили образцы-кубы с гранью 3 см, изготовленные из портландцемента марки ПЦ 500-ДО с водоцементным отношением В/Ц = 0,3. После 28-суточного предварительного твердения (условия твердения: температура 20 ± 2 °C и относительная влажность воздуха 50-70 % в соответствии с ГОСТ 5802-86 «Растворы строительные. Методы испытаний») образцы заражали суспензиями микроорганизмов (*Aspergillus niger* van Tieghem, *Bacillus subtilis*) и выдерживали в условиях, оптимальных для их развития, в течение 28 сут. Далее образцы-кубы из цементного бетона погружались в дистиллированную воду объемом 1000 см³, откуда с периодичностью 14 сутки отбирались пробы для титрования, объемом 10 см³.

Для проведения испытаний использовался «Прибор для исследования процессов коррозии строительных материалов» (Патент РФ на полезную модель №

71164). Контроль содержания катионов кальция в растворах проводился методом комплексонометрического объемного анализа.

Анализ результатов микробиологического исследования, электро- и комплексонометрии, рентгенофлуоресцентного и дифференциально-термического анализов, позволил сделать выводы о кинетике и динамике коррозионных процессов, произошедших в цементном камне и жидкости в результате их взаимодействия с учетом влияния биотического фактора.

В третьей главе приведена разработанная математическая модель массопереноса при биологической коррозии бетона (рис. 1). С началом массообменных процессов бетона и жидкой среды, концентрация растворенного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в порах бетона начинает уменьшаться, вызывая тем самым, растворение свободных кристаллов гидроксида кальция. Уменьшение содержания гидроксида кальция в результате «вымывания» его из бетона приводит к разложению основных составляющих цементного клинкера. В случае биологической коррозии протекание жидкостной коррозии усложняется дополнительным воздействием микроорганизмов-деструкторов.

Система «цементный бетон - биопленка - жидкость» может быть представлена двумя находящимися в контакте неограниченными пластинами, каждая из которых характеризуется своими размерами и свойствами.

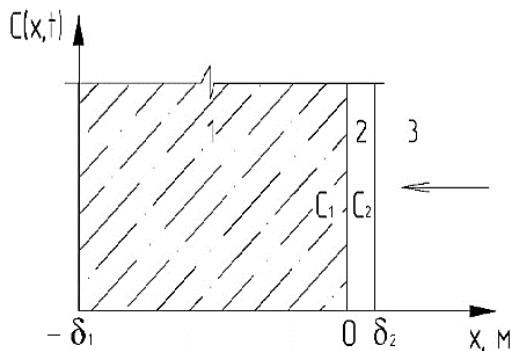


Рис. 1. Иллюстрация модели биообращения бетонной конструкции: (1) - бетон; (2) – биопленка; (3) – жидкость

Математическая модель массопереноса в полуограниченной двухслойной пластине может быть представлена в виде дифференциальных уравнений с граничными условиями второго рода на границе бетона с жидкостью и четвертого рода на границе между бетоном и биопленкой.

Массоперенос описывается дифференциальными уравнениями массопроводности второго порядка:

$$\frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \cdot \frac{\partial^2 C_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, \quad -\delta_1 \leq x \leq 0, \quad (1)$$

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

Начальные условия:

$$C_1(x, \tau)|_{\tau=0} = C_1(x, 0) = C_{1,0}. \quad (3)$$

$$C_2(x, \tau)|_{\tau=0} = C_2(x, 0) = C_{2,0}. \quad (4)$$

Граничные условия. На левой изолированной границе бетона:

$$\left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=-\delta_1} = 0. \quad (5)$$

В месте контакта бетона и биопленки. Равновесие в системе подчиняется закону Генри:

$$C_1(x, \tau)|_{x=0} = m \cdot C_2(x, \tau)|_{x=0}, \quad (6)$$

$$-\rho_{\delta em} \cdot k_1 \cdot \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = -\rho_{\delta uom} \cdot k_2 \cdot \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0}. \quad (7)$$

На границе контакта биоопленки с жидкостью:

$$-k_2 \cdot \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\frac{\delta_2}{\delta_1}} = q_n(\tau). \quad (8)$$

Решение системы (1)-(8) проводилось методом интегральных преобразований Лапласа, хорошо зарекомендовавшим себя при анализе задач тепломассопереноса.

В безразмерных координатах краевая задача массопроводности (1)-(8) имеет следующий вид:

$$\frac{\partial Z_1(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z_1(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}, \quad Fo_m > 0, \quad -1 \leq \bar{x} \leq 0. \quad (9)$$

$$\frac{\partial Z_2(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z_2(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2} \cdot K_k, \quad Fo_m > 0, \quad 0 \leq \bar{x} \leq K_\delta. \quad (10)$$

Начальные условия:

$$Z_1(\bar{x}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = Z_{1,0}(\bar{x}), \quad (11)$$

$$Z_2(\bar{x}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = Z_{2,0}(\bar{x}). \quad (12)$$

Граничные условия:

$$\frac{\partial Z_1(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=-1} = 0, \quad (13)$$

$$Z_1(\bar{x}, Fo_m)|_{\bar{x}=0} = Z_2(\bar{x}, Fo_m)|_{\bar{x}=0}, \quad (14)$$

$$\frac{\partial Z_1(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0} = N \cdot \frac{\partial Z_2(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=0}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial Z_2(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \Big|_{\bar{x}=K_\delta} = Ki_H^*. \quad (16)$$

Общее решение системы (1) - (8) имеет вид:

$$\begin{aligned} Z_1(\bar{x}, Fo_m) = & \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} \left\{ 1 - NK_\delta + NKi_H^* \left[Fo_m + \frac{(1-\bar{x})^2}{2} + \varphi(K_k, N, K_\delta) \right] \right\} + \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 \psi_1'(\mu_n)} (\mu_n \sin \mu_n [\cos(\mu_n \bar{x}) \cos(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta) - \sqrt{K_k} K_\delta \sin(\mu_n \bar{x}) \sin(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta)]) - \\ & - \frac{N}{\sqrt{K_k}} \cos(\mu_n (1 + \bar{x})) \exp(-\mu_n^2 Fo_m). \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} Z_2(\bar{x}, Fo_m) = & \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} (1 - NK_\delta + Ki_H^* [\bar{x} - Fo_m K_k K_\delta] + NKi_H^* (\varphi(K_k, N, K_\delta) - \\ & - \frac{1 + K_k \bar{x}^2}{2}) - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J}{\mu_m^2 \psi_1'(\mu_m)} (\mu_m \sin \mu_m \cos[\mu_m \sqrt{K_k} (K_\delta - \bar{x})] - \\ & - \frac{\mu_m}{\sqrt{K_k}} \sin(\mu_m \sqrt{K_k} K_\delta) \left[N \cos \mu_m \cos(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_m \sin(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) \right] + \\ & + Ki_H^* \left[N \cos \mu_m \cos(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_m \sin(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) \right] \exp(-\mu_m^2 K_k Fo_m). \end{aligned} \quad (18)$$

$$\varphi(K_k, N, K_\delta) = \frac{1 + K_k K_\delta (3K_\delta + 3N + NK_k K_\delta^2)}{6(1 + NK_k K_\delta)}, \quad J = \int_0^1 Z_{1,0}(\xi) \cos[\mu_m(1-\xi)] d\xi, \quad (19)$$

$$\operatorname{tg} \mu_m = N \sqrt{K_k} \operatorname{tg}(\mu_m \sqrt{K_k} K_\delta).$$

Сложный механизм роста, размножения и гибели микроорганизмов удается учесть введением коэффициента N , учитывающего изменения плотности биомассы.

Согласно трудам В.Т. Ерофеева уравнение, учитывающее рост, размножение и гибель микроорганизмов с учетом естественной смертности, учитывая стохастический характер этих процессов, может быть представлено в виде:

$$X = \bar{X}(\mu_x - A_x). \quad (20)$$

Согласно литературным источникам средняя плотность биомассы составляет 3-5 кг/м³. Полученные решения (17), (18) позволяют определять значения концентраций переносимого компонента по толщине как бетонной конструкции, так и в самой биопленке, в любой момент времени, а также дают возможность расчета концентрации «свободного» гидроксида кальция в жидкой фазе, расчета кинетики процесса по твердой, жидкой фазам и в биопленке, что в конечном итоге позволяет с минимальной погрешностью прогнозировать долговечность и надежность строительных конструкций. Некоторые результаты расчетов по полученным выражениям (17), (18) приведены на рисунках 2-3.

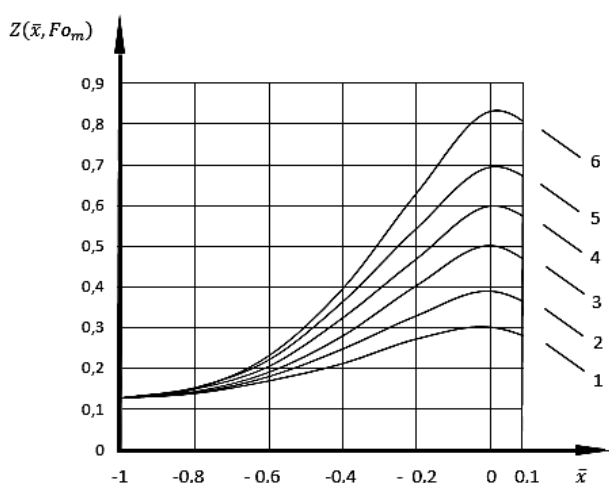


Рис. 2. Профили безразмерных концентраций по толщине бетона и биопленки при $K_k = 1$; $K_\delta = 0,1$; $N = 1$; $Fo_m = 1$, Ki_H^* : 1 - 0,5; 2 - 1; 3 - 1,5; 4 - 2; 5 - 2,5; 6 - 3.

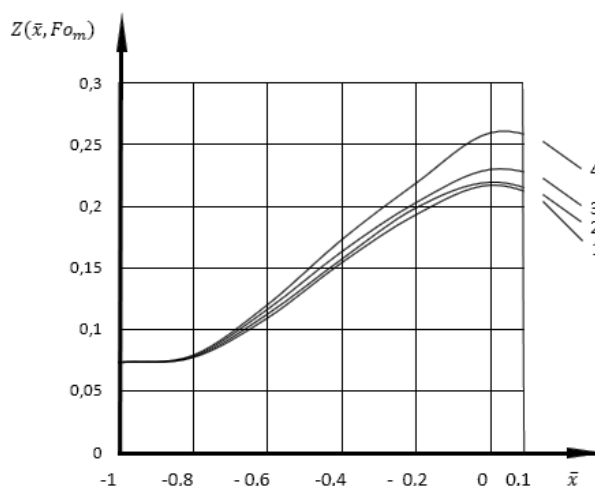


Рис. 3. Профили безразмерных концентраций по толщине бетона и биопленки при $K_k = 1$; $K_\delta = 0,1$; $Fo_m = 1$; $Ki_H^* = 0,5$; N : 1 - 0,01; 2 - 0,05; 3 - 0,1; 4 - 0,5.

В четвертой главе приведены результаты физико-химических исследований жидкой и твердой фаз, позволяющие судить об изменениях, происшедших в цементном камне вследствие воздействия реакционной среды.

При исследовании поверхности образцов, подверженных действию микроорганизмов, были отмечены новообразования – продукты процесса коррозии, природа возникновения которых связана с их ферментативной деятельностью (рис. 4). В данном случае имеет место быть кристаллизация оксалатов кальция и цитратов кальция, под влиянием органических кислот.

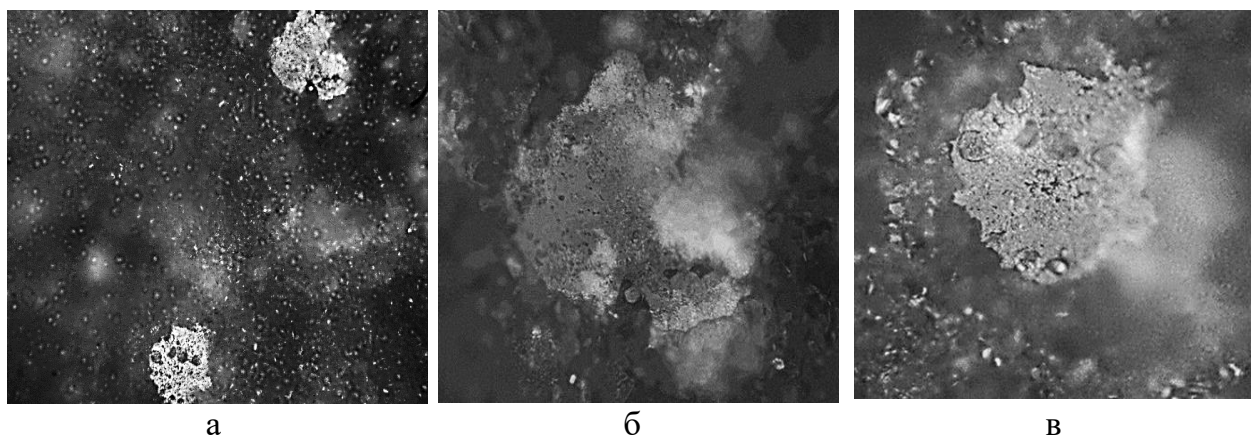


Рис.4 Микрофотография поверхности цементного бетона при биоповреждении со следами продуктов коррозии спустя 70 суток при увеличениях: а - х200; б, в - х500.

В целях определения таксонометрического состава биопленок был проведён отбор проб с поверхности образцов цементного камня. На рисунке 5 представлены результаты окраски по Граму мазков для контрольных и подверженных биокоррозии образцов, после выдерживания в водной среде в течении 70 суток.

На основании морфолого-культуральных особенностей представленных микроорганизмов, согласно методике, предложенной Дж. Р. Норрисом, а также используя определители и пособия, удалось установить, что биопленка образована спорами и вегетативными формами бактерий *Bacillus subtilis* (рисунок 5, а) и бактериями рода *Nitrosomonas*, *Lactobacterium*, *Desulfovibrio* (рисунок 5, б,в), а также некоторыми формами актиномицетов и микромицетов (рисунок 5, в).

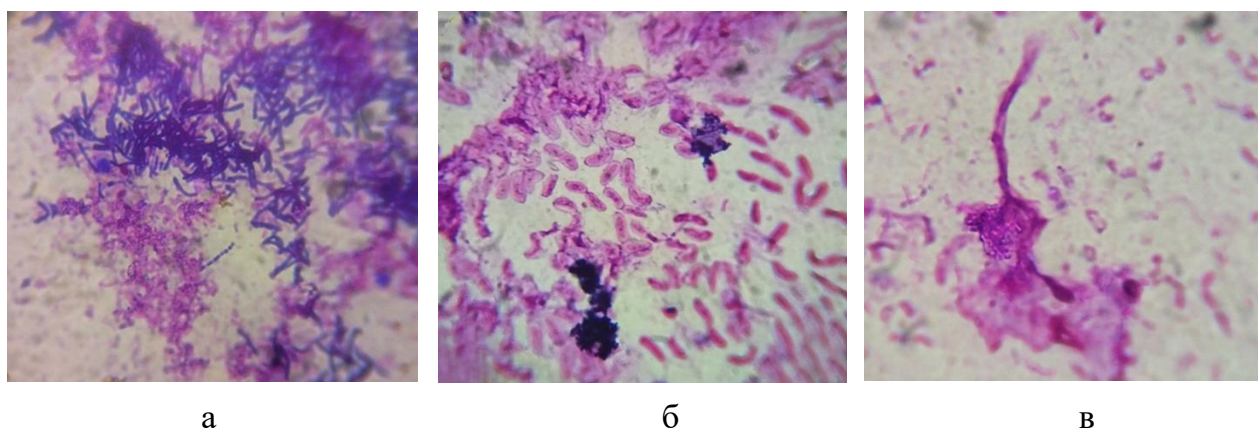


Рис.5 Мазки с поверхности цементного камня, подверженного биокоррозии. Окраска по Граму.

С целью исследования твердой фазы цементного камня в соответствии с методикой проведения исследований, изложенной во второй главе, образцы подвергались дифференциально-термическому анализу, результаты которого сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Содержание «свободного» гидроксида кальция в порах образцов
цементного бетона

Время, сут.	Содержание Са (ОН) ₂ %		
	внешняя пластина	переходная пластина	внутренняя пластина
при бактериальном воздействии			
Контр.	1,8		
14 сут.	1,41	1,63	1,79
28 сут.	1,32	1,49	1,74
42 сут.	1,11	1,36	1,62
56 сут.	0,92	1,15	1,41
70 сут.	0,90	1,09	1,26
при грибковом воздействии			
Контр.	1,8		
14 сут.	1,38	1,61	1,79
28 сут.	1,19	1,51	1,71
42 сут.	0,93	1,27	1,59
56 сут.	0,80	1,06	1,36
70 сут.	0,75	0,94	1,12

При анализе полученных дериватограмм во всех пробах зафиксировано изменение содержания гидроксида кальция по эндоэффекту при температуре 430 - 480 °С. Таким образом, на основании данных дифференциально-термического анализа можно сделать вывод, что дополнительное воздействие биологического фактора приводит к изменению фазового состава в цементном камне в сторону уменьшения количества гидроксида кальция и увеличения иных соединений кальция в твердой фазе системы.

Таблица 2

Изменение значений концентраций «свободного» гидроксида кальция в
растворе пор образца от времени и координаты

Время			Концентрация, кг _{СаО} /кг _{бет} · 10 ⁴ в точке с координатой		
			x ₁ = 0,005 м	x ₂ = 0,015 м	x ₃ = 0,025 м
при бактериальном воздействии					
1	τ ₀	0 сут	2,47	2,47	2,47
2	τ ₁	14 сут	2,47	2,23	1,93
3	τ ₂	28 сут	2,38	1,98	1,76
4	τ ₃	42 сут	2,16	1,81	1,48
5	τ ₄	56 сут	1,88	1,53	1,23
6	τ ₅	70 сут	1,68	1,45	1,20
при грибковом воздействии					
1	τ ₀	0 сут	2,47	2,47	2,47
2	τ ₁	14 сут	2,47	2,15	1,84
3	τ ₂	28 сут	2,28	2,01	1,59
4	τ ₃	42 сут	2,12	1,69	1,24
5	τ ₄	56 сут	1,81	1,41	1,07
6	τ ₅	70 сут	1,49	1,25	1,01

Исследование образцов методом дифференциально-термического анализа позволило определить значения концентраций «свободного» гидроксида кальция в середине каждой пластины (кусочек цементного бетона из центральной части исследуемого образца) для шести моментов времени, необходимые для аналитического построения профилей концентраций. Полученные данные представлены в таблице 2. В результате были получены профили концентраций «свободного» гидроксида кальция по толщине образца в биологически активной среде (рисунок 6).

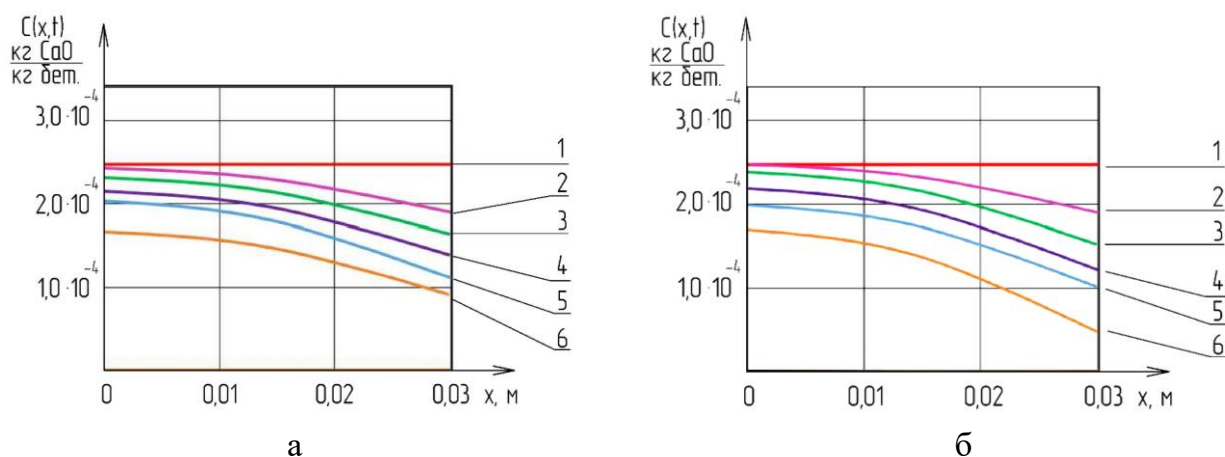


Рис. 6. Профили концентраций $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине образца цементного камня в водной среде в разные промежутки времени (при t : 1 – 0 сут.; 2 – 14 сут.; 3 – 28 сут.; 4 – 42 сут.; 5 – 56 сут.; 6 – 70 сут.): а – при бактериальной коррозии, б – при грибковой коррозии

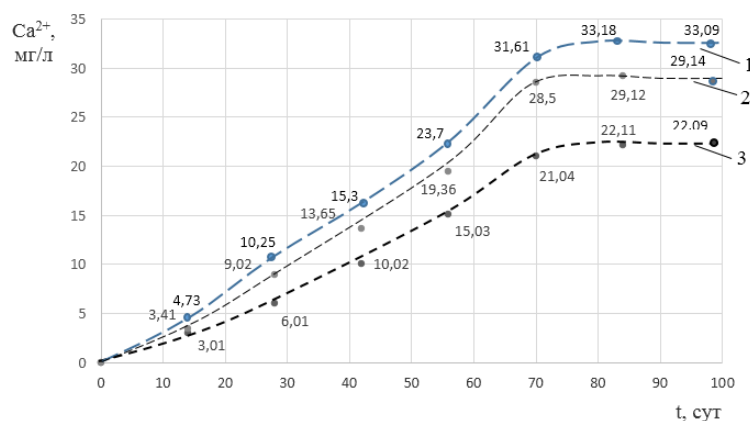


Рис. 7. Изменение концентрации катионов Ca^{2+} в жидкой фазе для образцов из портландцемента: 1 – подверженных воздействию водной среды и микромицетов; 2 – подверженных воздействию водной среды и бактерий; 3 – подверженных воздействию водной среды.

На ряду с этим, на графике (рис. 7) наблюдается увеличение значений концентрации катионов Ca^{2+} в жидкой среде в образцах, подверженных бактериальному воздействию, по сравнению с образцами, подверженных лишь водному воздействию. Параллельно с определением коррозионной стойкости образцов цементного камня регистрировалось значение водородного показателя рН

В целях исследования жидкой фазы системы «цементный бетон – биопленка – жидкость» методом комплексометрического объемного анализа проводился контроль содержания катионов кальция в растворах, результаты которого представлены на рис. 7. Установлено, что равновесная концентрация катионов кальция достигается после 70 суток пребывания образцов в агрессивной среде.

исследуемых растворов с помощью прибора ЭВ-74 (а также РН-метра Testo 206 РН2) согласно методике.

Анализ результатов проведенных комплексных физико-химических исследований подтверждает принятые ранее модельные представления о характере массопереноса в рассматриваемой системе «цементный бетон - биопленка - жидкость» с учетом биотического фактора среды, что позволяет рассчитать по разработанной математической модели характеристики массопереноса «свободного» гидроксида кальция при биокоррозии цементных бетонов в соответствии с методиками расчета.

В пятой главе приведены результаты расчетов по разработанной математической модели процесса массопереноса «свободного» гидроксида кальция в процессах биокоррозии бетона. Анализ расчетов показывает, что в начальный период времени поток массы вещества максимален, в дальнейшем он уменьшается. Сопоставляя данные о изменении потока массы вещества в зависимости от вида биологической коррозии, можно сделать вывод о том, что при грибковой коррозии бетона интенсивность потока массы вещества несколько выше, чем при бактериальной коррозии. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

Таблица 3

Экспериментально рассчитанные характеристики массопереноса для образца цементного камня при бактериальной и грибковой коррозии

№ п/ п	Наименование показателя	τ , сут				
		14	28	42	56	70
при бактериальной коррозии						
1	Плотность потока массы вещества в образце, кг/(м ² ·с)	$5,52 \cdot 10^{-7}$	$2,41 \cdot 10^{-7}$	$6,95 \cdot 10^{-8}$	$6,21 \cdot 10^{-8}$	$8,72 \cdot 10^{-9}$
2	Коэффициент массопроводности, м ² /с	$2,59 \cdot 10^{-9}$	$1,72 \cdot 10^{-9}$	$4,83 \cdot 10^{-10}$	$4,53 \cdot 10^{-10}$	$5,01 \cdot 10^{-11}$
3	Коэффициент массоотдачи, м/с	$1,61 \cdot 10^{-8}$	$1,61 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-8}$	$1,59 \cdot 10^{-8}$
при грибковой коррозии						
4	Плотность потока массы вещества в образце, кг/(м ² ·с)	$7,24 \cdot 10^{-7}$	$4,07 \cdot 10^{-7}$	$7,95 \cdot 10^{-8}$	$7,81 \cdot 10^{-8}$	$9,67 \cdot 10^{-9}$
5	Коэффициент массопроводности, м ² /с	$4,01 \cdot 10^{-9}$	$3,71 \cdot 10^{-9}$	$5,54 \cdot 10^{-10}$	$5,41 \cdot 10^{-10}$	$6,38 \cdot 10^{-11}$
6	Коэффициент массоотдачи, м/с	$1,64 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-8}$	$1,63 \cdot 10^{-8}$	$1,65 \cdot 10^{-8}$

Анализ рис. 8 - 11 подчеркивает аналогичность процессов, протекающих при бактериальной и грибковой коррозии.

В совокупности экспериментальные и расчетные данные позволяют судить о сходимости полученных результатов, что подтверждает возможность применения разработанной математической модели для расчетов процессов массопереноса при биокоррозии цементных бетонов не зависимо от видового состава биообрастания.

В диссертационной работе приведена информация о практическом применении разработанной математической модели (1) - (8) при проведении промышленной экспертизы строительных конструкций и сооружений.

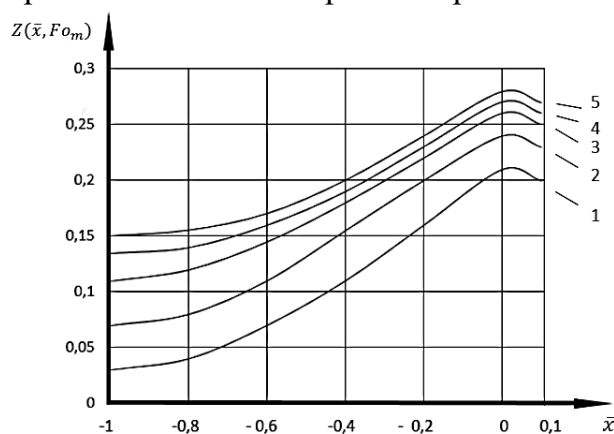


Рис. 8. Профили безразмерных концентраций «свободного» гидроксида кальция по толщине бетона и био пленки при бактериальной коррозии для моментов времени: 1-на 14 сут., 2-на 28 сут., 3-на 42 сут., 4-на 56 сут., 5-на 70 сут.

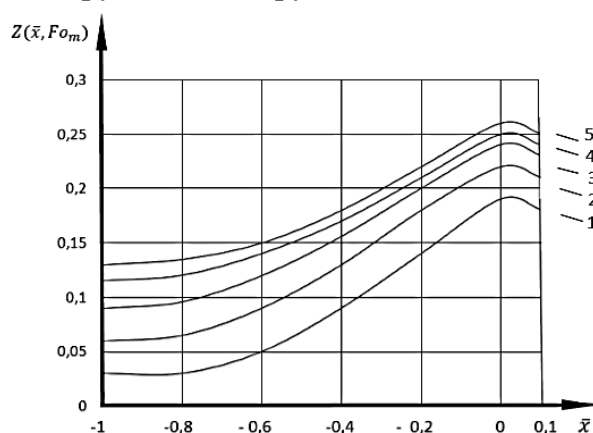


Рис. 9. Профили безразмерных концентраций «свободного» гидроксида кальция по толщине бетона и био пленки при грибковой коррозии для моментов времени: 1-на 14 сут., 2-на 28 сут., 3-на 42 сут., 4-на 56 сут., 5-на 70 сут.

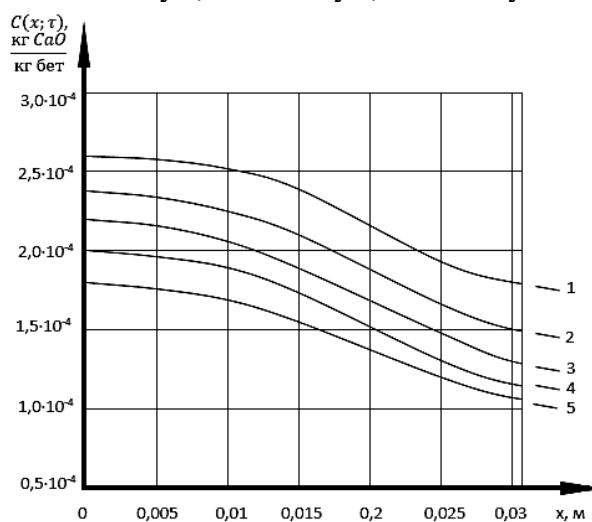


Рис. 10. Профили концентраций «свободного» гидроксида кальция по толщине бетона и био пленки при бактериальной коррозии для моментов времени: 1-на 14 сут., 2-на 28 сут., 3-на 42 сут., 4-на 56 сут., 5-на 70 сут.

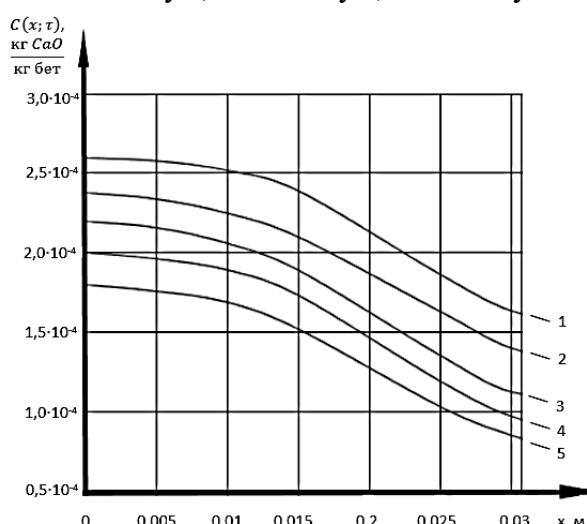


Рис. 11. Профили концентраций «свободного» гидроксида кальция по толщине бетона и био пленки при грибковой коррозии для моментов времени: 1-на 14 сут., 2-на 28 сут., 3-на 42 сут., 4-на 56 сут., 5-на 70 сут.

В **заклучении** приведены итоги выполненного исследования:

1. Анализ литературных источников показал, что к настоящему времени в строительном материаловедении накоплен большой объем научных данных о коррозионных процессах, протекающих в бетонах: установлены и исследованы принципиальные схемы химических реакций; даны математические описания некоторых коррозионных процессов; создана система нормативных документов по антикоррозионной защите. Однако процесс биокоррозии бетона остается мало изученной проблемой, как в России, так и за рубежом. Математические

модели, позволяющие прогнозировать долговечность бетонных конструкций при биологической коррозии отсутствуют.

2. Разработана физико-математическая модель процесса диффузии целевого компонента «свободного» гидроксида кальция в твердой фазе цементного бетона и в биопленке, образованной микроорганизмами в жидкой среде, которая позволяет получить решения краевой задачи массопереноса в системе «цементный бетон - биопленка - жидкость», что в совокупности дает возможность осуществлять мониторинг процессов массопереноса в области контроля биоразрушения цементных бетонов.
3. Определены основные параметры массопереноса (коэффициенты массопроводности, массоотдачи) для бактериальной и грибковой коррозии. Установлено, что для рассматриваемой системы значение коэффициента массопроводности находится в диапазоне $2,59 \cdot 10^{-9} \dots 5,01 \cdot 10^{-11}$ м²/с при бактериальной коррозии, при грибковой коррозии – $4,01 \cdot 10^{-9} \dots 6,38 \cdot 10^{-11}$ м²/с.
4. Выполнен численный эксперимент, подтверждающий возможность применения разработанной математической модели для расчетов процессов массопереноса при биокоррозии цементных бетонов не зависимо от видового состава биообрастания.
5. На основании результатов диссертационного исследования были разработаны практические рекомендации по мониторингу и повышению коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций, которые применялись при проведении промышленной экспертизы строительных конструкций зданий и сооружений (акт о внедрении ООО «Базовый инжиниринг», г. Иваново). Экономический эффект составил 8,9% от стоимости сметных работ. Полученные представления о коррозионной деструкции бетонов при биокоррозии с учетом особенностей процессов массопереноса позволяют своевременно спрогнозировать последствия воздействия жидких сред с учетом действия биогенного фактора, что подтверждается эффективностью их применения на производственных объектах (акт о внедрении от 17.06.2019 г., ООО «Геопроект», г. Иваново).

Перспективы дальнейшей разработки тематики: общность математического описания позволит распространить разработанную математическую модель и предложенный метод расчета для различных видов биокоррозии бетонов с учетом определяемых экспериментально коэффициентов массопереноса в зависимости от таксонометрического состава биообрастания.

Принятые обозначения:

$C_1(x, \tau)$ - концентрация «свободного» гидроксида кальция в перерасчете на СаО в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , (кг СаО/кг бетона);
 $C_2(x, \tau)$ - концентрация «свободного» гидроксида кальция в перерасчете на СаО в биопленке в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , (кг СаО/кг биомассы); $k_{1,2}$ - коэффициенты массопроводности, м²/с; δ_1 - толщина бетонной конструкции, м; δ_2 - толщина биопленки, м; $\rho_{бет}$ - плотность бетона, кг/м³;
 $\rho_{биом}$ - плотность биомассы, кг/м³; $C_{1,0}$ - начальная концентрация «свободного» СаО, кг СаО/кг бетона; $C_{2,0}$ - начальная концентрация «свободного» СаО, кг СаО/кг биомассы; $Z_1(\bar{x}, F_{O_m})$ - безразмерная концентрация переносимого

компонента по толщине бетона; $Z_2(\bar{x}, Fo_m)$ - безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине биопленки; $\bar{x} = x / \delta_1$ - безразмерная координата; коэффициент $K_k = k_2 / k_1$; коэффициент $K_\delta = \delta_2 / \delta_1$; q_H - плотность потока массы, уходящей от биопленки в поток жидкости; m - константа Генри (кг биопленки/кг бетона); $N = (\rho_{биом} \cdot k_2) / (\rho_{бет} \cdot k_1 \cdot m)$ - коэффициент, учитывающий характеристики фаз; $Fo_m = (k_1 \cdot \tau) / \delta_1^2$ - критерий Фурье; $Ki_H^* = \frac{q_H \cdot \rho_{бет} \cdot m \cdot K_\delta}{\delta_2 \cdot \rho_{биом} \cdot k_2 \cdot C_0}$ - массообменный критерий Кирпичева; \bar{X} - предельная критическая биомасса; μ_x - удельная скорость роста биомассы; A_x - удельная скорость отмирания клеток.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:
публикации, включенные в перечень, определенный ВАК Минобрнауки РФ:

1. Румянцева, В.Е. Математическое моделирование коррозионных процессов бетона и железобетона. / В.Е. Румянцева, **С.А. Логинова** // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. Тамбов: ТГТУ. - 2015. - № 1(55). - С. 235-244 (ВАК).

2. Федосов, С.В. Исследование влияния процессов массопереноса на надежность и долговечность железобетонных конструкций, эксплуатируемых в жидких агрессивных средах / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, **С.А. Логинова** // Строительные материалы. - 2017. - №12. - С.52-57 (ВАК).

3. Чеснокова, Т.В. Анализ воздействия биологической коррозии / Чеснокова Т.В., **Логинова С.А.**, Киселев В.А. // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. Иваново. - 2018. №2. - С. 98-101 (ВАК).

4. Fedosov S.V. Mathematical modeling of diffusion processes of mass transfer of «free calcium hydroxide» during corrosion of cement concretes / Fedosov S.V., Roumyantseva V.E., Konovalova V.S., **Loginova S.A.** // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. - 2018. - Vol. 14. - No. 3. - Pp. 161-168 (Sc).

5. Чеснокова, Т.В. Изучение грибковой коррозии бетона с помощью модельной среды / Чеснокова Т.В., Румянцева В.Е., **Логинова С.А.** // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. Иваново. - 2019. - №3(59). - С. 85-89 (ВАК).

6. Fedosov, S.V. Mathematical model of concrete biological corrosion / Fedosov S.V., **Loginova S.A.** // Magazine of Civil Engineering. - 2020. - No. 07. - Pp. 130-138 (ВАК, WoS, Sc).

в других изданиях:

7. Румянцева, В.Е. Микробиологическая коррозия бетона и железобетона / В.Е. Румянцева, **С.А. Логинова** // Материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». Иваново: ИВГПУ. - 2014. - С.647-649.

8. Румянцева, В.Е. Математическое моделирование процессов коррозионной деструкции бетона / В.Е. Румянцева, **С.А. Логинова** // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: сб. науч. трудов XII-ой Междунар. науч.- практ. конф. Курск: ЮЗГУ. - 2015. - С.403-406.

9. Румянцева, В.Е. Прогнозирование долговечности бетонных конструкций на основе теории диффузионного массопереноса / В.Е. Румянцева, **С.А. Логинова** // Новые задачи технических наук и пути их решения. Сб. статей Междунар. науч.-практич. конф. Уфа. - 2015. - С.55-57.

10. Федосов, С.В. Массоперенос в процессах коррозии цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **С.А. Логинова** // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе. Первые Междунар. Лыковские науч. чт. Москва. - 2015. - С.118-122.

11. **Логинова, С.А.** Бицидные добавки как способ защиты бетона и железобетона от процессов биокоррозии. /Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного

кластера (ПОИСК - 2016): сб. материалов межвуз. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов. Ч.2. Иваново: ИВГПУ. - 2016. - С.300-301.

12. **Логинова, С.А.** Биологическая коррозия / Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК - 2016): сб. материалов межвуз. науч.-техн. конф. аспирантов и студентов. Ч. 2. Иваново: ИВГПУ. - 2016. - С.217-218.

13. Румянцева, В.Е. Методы защиты поверхности бетона от биоповреждений / В.Е. Румянцева, **С.А. Логинова** // Материалы XXIII Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». Иваново: ИВГПУ. - 2016. - С.383-385.

14. **Логинова, С.А.** Принципы математического моделирования процессов биодеструкции бетона / С.А. Логинова, В.Е. Румянцева, Т.В. Чеснокова // материалы VII Междун. молод. науч. конф. «Молодежь и XXI век». Курск, 2017. С.263-266.

15. Румянцева, В.Е. К вопросам математического моделирования процессов биодеструкции бетона / В.Е. Румянцева, Т.В. Чеснокова, **С.А. Логинова** // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: сб. материалов Всероссийской науч.-техн. конф. Саранск: изд-во Мордов. ун-та. - 2016. - С. 118-123.

16. **Логинова, С.А.** Особенности протекания процессов биокоррозии, ее оценки и прогнозирования / С.А. Логинова, В.Е. Румянцева, Т.В. Чеснокова, Б.Е. Нармания // Сборник материалов XX МНПФ «SMARTEX-2017». Иваново: ИВГПУ. - 2017. - С.168-170.

17. **Логинова, С.А.** Развитие микроорганизмов на поверхности цементного камня / С.А. Логинова, В.Е. Румянцева, Т.В. Чеснокова, В.С. Коновалова, Д.Т. Гиляздинов // Сб. материалов XX МНПФ «SMARTEX-2017» Иваново: ИВГПУ. - 2017. - С. 170-173.

18. Киселёв, В.А. Биологическая коррозия строительных материалов и методы ее обнаружения / В.А. Киселёв, А.В. Тюкин, **С.А. Логинова**, Т.В. Чеснокова // Материалы XXIV Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». Иваново: ИВГПУ. - 2017. - С.73-76.

19. Федосов, С.В. Принципы математического моделирования при бактериальной коррозии цементного камня / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Т.В. Чеснокова, **С.А. Логинова** // Сб. науч. тр. РААСН. Т. 2. М.: Издательство АСВ. - 2018. - С. 487- 492.

Автор выражает глубокую благодарность и признательность за научные консультации, оказанные при проведении теоретических и экспериментальных исследований, а также при обсуждении результатов работы:

**академику РААСН, доктору технических наук, профессору
Сергею Викторовичу Федосову.**