

На правах рукописи



Красильникова Ирина Александровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НА ДИНАМИКУ И
КИНЕТИКУ МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ЖИДКОСТНОЙ
КОРРОЗИИ ПЕРВОГО ВИДА ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ**

05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (строительство)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2022

Работа выполнена на кафедре «Городское строительство и хозяйство» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Донской государственной технической академии»

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

Официальные оппоненты: **Низина Татьяна Анатольевна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва».

Блиничев Валерьян Николаевич, Заслуженный деятель науки РФ, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов

Защита состоится «13» мая 2022 г. в 10:00 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 <https://ivgpi.com/>

Автореферат разослан « » 2022 г.

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



Л.А. Опарина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Основным конструкционным материалом современного индустриального строительства во всем мире, в том числе и в России, является железобетон. Широкое распространение обусловлено целым рядом его преимуществ: возможность изготовления сборных и монолитных конструкций абсолютно любой пространственной формы; высокая коррозионная стойкость (по сравнению с металлическими и деревянными конструкциями), что позволяет возводить железобетонные конструкции в водной среде или под землей, а кроме этого хорошая сопротивляемость атмосферным воздействиям, высокая прочность, огнеустойчивость, высокая сейсмостойкость, низкая себестоимость.

Наряду со многими положительными свойствами железобетон имеет ряд недостатков, к которым, в первую очередь следует отнести недостаточную химическую стойкость, плохое сопротивление растягивающим напряжениям и значительные трудности, возникающие при необходимости усиления железобетонных конструкций. Опыт эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций показал, что при действии на них агрессивных сред их несущая способность быстро уменьшается, и их дальнейшая эксплуатация становится небезопасной. Поэтому повышение долговечности строительных конструкций, в том числе бетонных и железобетонных, - одна из острейших проблем.

Создаются новые уникальные объекты, эксплуатируемые в экстремальных, в том числе агрессивных по отношению к бетону условиях: промышленные, энергетические, гидротехнические и морские сооружения. В связи с этим к бетону предъявляются повышенные требования коррозионной стойкости и способности длительно защищать стальную арматуру от коррозии. Исследование и повышение коррозионной стойкости бетонов с целью применения бетонов в агрессивных условиях эксплуатации без дополнительной защиты является актуальной в настоящее время задачей.

Математическое моделирование массообменных процессов при коррозионной деструкции цементных бетонов, протекающих по механизму первого вида, представляет, как научный, так и промышленный интерес. Данное обстоятельство продиктовано, необходимостью интеграции математических моделей нестационарных процессов, протекающих при эксплуатации бетонных и железобетонных конструктивных элементов в цифровые имитационные модели жизненного цикла строительного объекта.

Многочисленные исследования жидкостной коррозии первого вида проводились в изотермических условиях при температуре 20 – 25 °С. Однако, огромное количество строительных конструкций зданий и сооружений эксплуатируются в условиях воздействия изменяющихся климатических и технологических температур, при одновременном (постоянном или периодическом) контакте конструкции с жидкостью. К таким конструкциям можно отнести все фундаменты зданий в зимний период времени, в особенности при высоком уровне грунтовых вод; фундаменты и полы производственных зданий с избыточным выделением тепла и влаги, градирни, резервуары и т.д. Все железобетонные конструкции на водных объектах (дамбы, причалы, плотины, пирсы, порты и другие) эксплуатируются в водной среде, температура которой, особенно в климатических условиях России, значительно изменяется в течении года.

Параметры массообменных процессов, в первую очередь коэффициенты массопроводности и массоотдачи имеют существенно разные численные значения при разных температурах. Разработка математической модели неизотермического массопереноса при жидкостной коррозии бетона первого вида позволит прогнозировать динамику и кинетику исследуемого процесса, с учетом меняющейся температуры при эксплуатации строительного объекта.

Степень разработанности темы. Исследования, описанные в диссертационной работе выполнены в рамках научной школы академика РААСН Федосова С.В., результатами исследований которой в первую очередь являются математические модели процессов коррозии бетона и железобетона в разных средах, и основанные на них разработки по снижению потерь от коррозионной деструкции.

Исследованию долговечности бетонов и разработке способов ее повышения посвящены работы В.М. Москвина, В.И. Бабушкина, В.Ф. Степановой, А.Ф. Полака, В.Б. Ратинова, Ф.М. Иванова, П.А.

Михальчук А.Ф. Алексеева, Б.В. Гусева, А.С. Файвусович Н.К. Розенталя, С.С. Каприелова, О.П. Мчедлова-Петросяна, Г.С. Рояка, А.Е. Шейкина, П.Г. Комохова, В.М. Бондаренко, А.М. Подвальный И.Г. Овчинникова, Е.А. Гузеева, О.Г. Ржаницина, В.П. Цернанта, В.И. Соломатова, Ю.М. Баженова, С.В. Федосова, В.П. Селяева, Т.А. Низиной, О.В. Старцева, Е.Н. Каблова, В.Т. Ерофеева, В.Е. Румянцевой, А.В. Ферронской, Т.В. Рубецкой, Г.В. Любарская, Л.М. Добщица, В.М. Латыпова, В.И. Римшина, В.И. Кондращенко, В.Ф. Смирнова, С.Н. Леоновича, А.П. Федорцова, В.В. Яковлева, J. Bensted, K. Dorsch, H. Taylor, H. Kuhl, K. Biehl, D. Miller, J. Stark, R. Oberholster, J. Van Aardt, H. Uchikawa, A. Alum, S.I. Pirt, R.T. Ross, G. Griffin, D.K. Platt, C. Andrade, M. Akijama, F. Xing, L. Bertolint, K. Holschemacher и др.

Решением проблем математического моделирования процессов теплопереноса в системах «твердое тело-жидкость» занимались ученые: А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов, В.В. Красников, С.П. Рудобашта, Э.М. Карташов, А.С. Гинзбург, П.Г. Романков, В.Ф. Фролов, Г.А. Аксельруд, В.Н. Блиничев, К.Н. Белоногов, Б.С. Сажин, А.А. Долинский, Г.С. Шубин, С.В. Федосов, А.А. Титунин, В.Г. Котлов, а также зарубежные исследователи: Т. Шервуд, О. Кришер, Г. Карслоу, Д. Егер, А. Маджумдар, Ч. Струмилло, Л.И. Хайфец и многие другие.

В работах этих ученых процессы коррозии бетона и железобетона в жидких агрессивных средах исследованы достаточно глубоко, существуют несколько фундаментальных теорий, описывающих процессы коррозии бетона и стали, имеется довольно обширный экспериментальный материал, характеризующий общие условия разрушения бетона, стали и железобетона в различных агрессивных средах. Но, в то же время, в литературе встречаются самые противоречивые, взаимоисключающие мнения по основным вопросам коррозии этих материалов. Несовпадение мнений, возможно, связано со следующими причинами: во-первых, для изучения процессов коррозии железобетона необходимо длительное время; во-вторых, значительное различие существующих методов исследований и недостаточная полнота их затрудняют сопоставление результатов, полученных разными исследователями.

Цель диссертационного исследования: установить закономерности массообменных процессов при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом изменений температурных условий эксплуатации конструкций.

Задачи диссертационного исследования:

1. Изучить и оценить современный уровень развития науки о физико-химических процессах при жидкостной коррозии бетона, в том числе аналитические модели оценки долговечности бетона и процессов массопереноса, что необходимо для формулировки проблемы, решение которой внесет вклад в развитие инженерных методик расчета при эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций в жидких средах.

2. Разработать физико-математическую модель нестационарного массопереноса целевого компонента (гидроксида кальция) при жидкостной коррозии первого вида в твердой фазе бетона с учетом изменяющихся температурных условий в процессе эксплуатации, которая позволит прогнозировать динамику (т.е. изменение профиля концентрации по толщине конструкции целевого компонента во времени) и кинетику процесса (т.е. изменение во времени общего количества переносимого вещества).

3. Провести численные эксперименты, показывающие влияние параметров процесса на динамику и кинетику жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов.

4. Выполнить экспериментальные исследования динамики и кинетики жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов, с целью установления воспроизводимости предлагаемой математической модели и разрабатываемого инженерного метода расчета.

5. Определить числовые значения исходных параметров процесса, на основе полученных экспериментальных данных, и установить эмпирическую зависимость параметров процесса от температуры и концентрации переносимого компонента.

6. Разработать и обосновать рекомендации рационального проектирования бетонных и железобетонных конструкций, подверженных при эксплуатации воздействию водной среды и изменяющихся температурных условий.

Научная новизна:

- для бетонных и железобетонных конструкций, подверженных жидкостной коррозии первого вида, сформулирована краевая задача неизотермического массопереноса в системе «цементный бетон - жидкость» на основе нелинейного дифференциального уравнения массопроводности параболического типа с произвольным видом функции начального распределения концентраций и комбинированными граничными условиями первого, второго и третьего рода;

- с помощью комбинированного подхода, реализующего численно-аналитические методы (метод «микропроцессов» и метод интегрального преобразования Лапласа) краевая задача нестационарного массопереноса с переменными массообменными характеристиками сведена к системе краевых задач с кусочно-линейной аппроксимацией параметров процесса в зависимости от температуры и концентрации переносимого компонента;

- получены аналитические решения задачи нестационарного неизотермического массопереноса в процессах коррозии бетона I вида для системы «цементный бетон - жидкость», позволяющие рассчитывать концентрации целевого компонента в твердой фазе, тем самым прогнозировать динамику и кинетику деструктивных процессов цементных бетонов;

- на базе полученных экспериментальных данных установлены эмпирические зависимости коэффициентов массопроводности и массоотдачи от температуры и концентрации переносимого компонента.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследований. Разработанный численно-аналитический метод расчета краевых задач нестационарного неизотермического массопереноса является базой для последующего теоретического анализа явлений диффузии в коллоидных капиллярно-пористых телах с учетом влияния температуры. Предлагаемый, на основе математической модели, метод расчета динамики и кинетики процессов массопереноса позволяет разработать практические рекомендации по мониторингу состояния несущих и ограждающих строительных конструкций, подверженных жидкостной коррозии первого вида при изменяющихся условиях эксплуатации.

Методология и методы диссертационного исследования. Решение поставленной задачи моделирования нестационарного массопереноса целевого компонента в процессах коррозии бетона I вида в системе «цементный бетон - жидкость» с учетом изменяющихся температурных условий в процессе эксплуатации проводилось методами математической физики, включающие теорию операционного исчисления, метод материального преобразования Лапласа

Полученные численные значения параметров массопереноса (коэффициентов массопроводности и массоотдачи) – итог результатов длительного эксперимента, проводимого с использованием общепринятых физико-химических методов оценки свойств материалов, с применением стандартных методов и методик ГОСТ (Приложение 1). Обработка экспериментальных данных осуществлялась методами статистической обработки и математической аппроксимации.

Положения, выносимые на защиту:

- методология и метод численно-аналитического решения задачи нестационарного неизотермического массопереноса в процессах жидкостной коррозии цементного бетона;

- физико-математическая модель нестационарного неизотермического массопереноса в процессах жидкостной коррозии цементных бетонов первого вида при произвольном начальном распределении концентраций и комбинированных граничных условиях;

- аналитические решения задачи массопереноса в процессах жидкостной коррозии первого вида в системе «цементный бетон - жидкость», с изменяющимися коэффициентами и потенциалами переноса;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов жидкостной коррозии цементного бетона первого вида при различных температурах.

Достоверность полученных результатов обусловлена применением научных методов познания, обеспечена проведением исследований с использованием методов математического моделирования процессов, апробированных в теории тепломассопереноса; и подтверждается совпадением экспериментальных и расчетных данных в пределах допустимой погрешности.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертационных исследований опубликованы в журналах, входящих в международную базу цитирования *Scopus Eurasian Chemic-*

Technological Journal, International Polymer Science and Technology, рецензируемых ВАК Министерства образования и науки РФ: Строительные материалы №1,2(2022г.), №7(2021); Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии №3 (2020); Современные проблемы гражданской защиты №1(42) (2022).

Результаты диссертационного исследования доложены на Международной научно-технической конференции “*International Conference on Materials Physics, Building Structures and Technologies in Construction, Industrial and Production Engineering*” (МРСРЕ-2021) г. Владимир, 2021; Международной конференции “*Modelling and Methods of Structural Analysis*», г. Москва, 2021; Международной межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК - 2017)» г. Иваново, 2017 г.; Международной межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые - развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК)» г. Иваново, 2021 г.; 11-й Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» г. Курск, 2021г.; Национальной Научно-технической конференции с международным участием «Эффективные методологии и технологии управления качеством строительных материалов» г. Новосибирск, 2021; Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства» г. Курск, 2021г.; Всероссийская научно-техническая конференция «Цифровые технологии в производстве» г. Кострома, 2020 г.

Внедрение результатов исследований. Результаты диссертационного исследования обеспечили при проектировании железобетонных гидротехнических сооружений применение точных научно обоснованных расчетов долговечности строительных конструкций, с учетом реальных, сезонно изменяющихся, условий эксплуатации. Разработанный численно-аналитический метод неизотермического массопереноса в стенке железобетонной конструкции позволил обосновать применение бетона различных марок по водонепроницаемости по толщине конструктивных элементов, что подтверждается актом внедрения на ООО «Геопроект».

Практические результаты исследований были использованы при проведении обследований, капитальных ремонтов и реконструкции зданий и сооружений компанией ООО «ИСО-Инжиниринг», внедрение результатов исследований и разработок позволило определить причины неоднородности прочностных характеристик бетона в железобетонных конструкциях, длительное время эксплуатируемых в водной или грунтовой среде с циклическими изменениями температуры, определять изменение прочностных характеристик бетона в любой момент эксплуатации конструкции; разработать эффективные мероприятия по обеспечению долговечности повышению коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций, а также технических устройств и материалов (акт о внедрении от 05.12.2021 ООО «ИСО-Инжиниринг», г. Москва).

Публикации. По материалам выполненных исследований опубликовано 17 работ, в том числе в изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus, опубликовано 2 статьи; в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, опубликовано 4 статьи.

Личный вклад автора заключается в выборе объектов, методологии и методов исследований, разработке комплекса теоретических и экспериментальных изысканий; осуществлении постановки и решения краевой задачи массопроводности целевого компонента в массиве железобетонной конструкции эксплуатируемой в среде с переменными потенциалами переноса; выполнении, обработке и анализе основных результатов, практическая реализация которых так же проводилась при непосредственном участии автора. В совместных работах, опубликованных Красильниковой И.А. в соавторстве, автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и их обсуждении.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений; изложена на 170 страницах машинописного текста, содержит 42 рисунка, 9 таблиц и список литературы из 195 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и описана степень разработанности избранной темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, приведены научная новизна, описаны методология и методы исследования, общая характеристика работы, а также научные положения, которые выносятся на защиту, аргументирована теоретическая и практическая значимости результатов исследования.

В первой главе описаны современные научные представления о физико-химических процессах деструкции цементных бетонов. Приводится обзор работ отечественных и зарубежных авторов, посвященные современным представлениям о коррозии бетона. Представлена систематизация видов коррозии бетона. Показано, что за последние пятьдесят лет в нашей стране и за рубежом интенсивно развиваются исследования, имеющие целью создание расчетных методов определения долговечности конструкций.

Задачей исследования коррозионных процессов бетона и железобетона является, в конечном счете, разработка методов расчета (прогноза) долговечности конструкций, т.е. срока их безотказной эксплуатации. Такие расчеты возможны на основании функциональной зависимости глубины поражения бетона от времени воздействия среды и комплексных параметров, учитывающих как свойства исходного материала, так и свойства агрессивной среды.

Обобщая приведенный в данном разделе обзор, можно заключить, что в связи с рядом преимуществ методов основанных на феноменологических уравнениях, по сравнению со статистическими, целью наших исследований явилась разработка метода прогноза долговечности железобетонных конструкций на основе математических моделей массообменных процессов при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов с учетом изменений температурных условий эксплуатации конструкций, базирующаяся на физико-химической сущности процессов коррозии. При этом математическое моделирование целесообразно осуществить на основе общих принципов массопередачи в капиллярно-пористых телах.

Во второй главе представлены применяемые аналитические и численные методы решения нелинейных дифференциальных уравнений массопереноса, описаны методы экспериментальных исследований кинетики и динамики жидкостной коррозии цементных бетонов первого вида.

Обоснован подход к решению нелинейного дифференциального уравнения массопереноса в частных производных численно-аналитический метод «микропроцессов». Особенность метода заключается в том, что весь процесс разделен на n элементарных «микропроцессов», в пределах каждого из которых все параметры фаз могут считаться постоянными, что позволяет нелинейную задачу массопереноса свести к совокупности n линейных задач. Общее время всего процесса определяется суммой непрерывной цепи «микропроцессов». Начальным условием для каждого «микропроцесса», начиная со второго, является конечное распределение концентраций, полученное по результатам расчета предыдущего этапа. Для каждого «микропроцесса» получают аналитическое решение, а затем весь процесс поэтапно суммируется, что легко выполнить с использованием современного программного обеспечения.

Такой подход позволяет проводить расчеты, полагая что температура, концентрация, коэффициенты переноса и физико-химические характеристики системы постоянны для рассматриваемого «микропроцесса», но изменяются скачкообразно при переходе от одного этапа к последующему.

Приведены методики исследования при проведении лабораторных экспериментов. Анализ динамики и кинетики развития процессов коррозии проводился до и после воздействия водной среды методами дифференциально-термического анализа, инфракрасной Фурье-спектрометрии, комплексометрии, а также других исследований, позволяющих судить об изменениях, происшедших в цементном камне и жидкости в результате их взаимодействия.

В третьей главе представлена физико-математическая модель нестационарного неизотермического массопереноса в процессах жидкостной коррозии цементных бетонов первого вида при произвольном начальном распределении концентраций и комбинированных граничных условиях.

Гидроксид кальция определяет массоперенос в системе «цементный бетон - жидкая среда», изменения содержания которого в теле бетона приводят к коррозии первого вида, а в конечном

итоге - к негативным необратимым последствиям для долговечности конструкций. Этот процесс обусловлен диффузией «свободного гидроксида кальция» из толщи бетона к его поверхности, граничащей со средой, переходом вещества через границу раздела фаз «твердое тело - жидкость» и распределением в жидкой среде.

Огромное количество строительных конструкций эксплуатируется в неизотермических условиях, что вызвано колебаниями температур в течении суток, года и т.д. Кроме этого на противоположных границах конструкции за частую бывают различные температуры, что вызывает их изменение по толщине конструкции. Общая схема моделируемого процесса показана на рис.1.

Моделирование кинетики и динамики неизотермического нестационарного массопереноса в системе «цементный бетон - жидкость» при коррозии бетона первого вида, параметры процесса которого зависят и от температуры, и от концентрации переносимого компонента можно осуществить опираясь на теорию массопереноса. Предварительно необходимо, с использованием алгебраических уравнений, выполнить переход от температурно-концентрационных зависимостей (C, t) коэффициентов массопроводности и массоотдачи к пространственно-временным (x, τ) .

Согласно теории массопереноса А.В. Лыкова в общем случае для коррозии первого и второго вида диффузия «свободного гидроксида кальция» в пористой структуре бетона описывается нелинейным дифференциальным уравнением массопроводности параболического типа с источником членом:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = \text{div}[k(x, \tau) \text{grad} C(x, \tau)]. \quad (1)$$

Получить аналитическое решение нелинейного дифференциального уравнения крайне затруднительно. Решение описанной выше задачи возможно при сочетании аналитических и численных методов анализа, которым является метод «микропроцессов», положительно зарекомендовавший себя при разработке математических моделей и инженерных методов расчета. Задача одного микропроцесса (временного интервала) будет решаться аналитически. По толщине конструкции, ввиду изменения температуры и концентрации гидроксида кальция будет изменяться и коэффициент массопроводности. В свою очередь изменение коэффициента массопроводности будет влиять на искомые поля концентраций гидроксида кальция. Учесть данный факт при решении дифференциального уравнения принятым численно аналитическим методом можно условно разбивая конструкцию по толщине на концентрационные зоны, в пределах которой значение коэффициента массопроводности в рамках рассматриваемого микропроцесса будет считаться постоянным. В результате этого для i -го микропроцесса задача по расчету распределения концентраций разложится на несколько упрощенных задач, распределенных по концентрационным зонам показанным на рис. 2.

Разделение на зоны следует проводить следующим образом:

- первая зона – слой бетона, находящийся рядом с границей раздела фаз (в дальнейших расчетах все математические выкладки для этой зоны будут с индексом «1»). На границе раздела фаз осуществляется конвективная массоотдача целевого компонента в жидкую фазу, что математически отражается в граничных условиях III рода, а на противоположной границе задействуются граничные условия первого рода;

- промежуточные зоны - внутренние слои бетона не доступные из вне, (в дальнейших расчетах все математические выкладки для этих зон будут с индексом «2»), количество промежуточных зон определяется в зависимости от изменения коэффициента массопроводности по толщине конструкции, с учетом требуемой точности расчета. У левой границы слоя, где устанавливаются

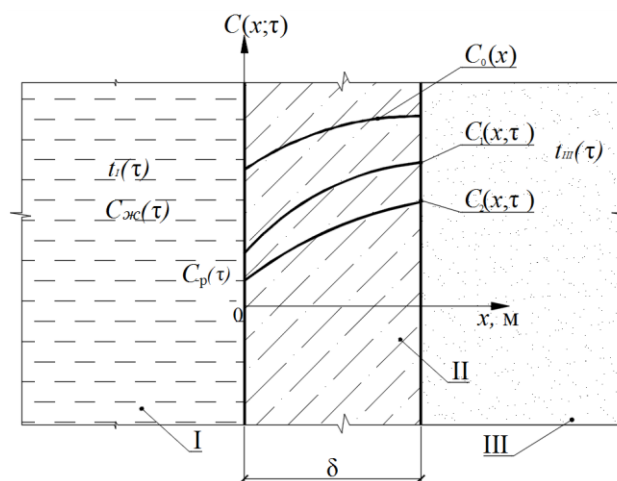


Рис. 1. Общая схема моделируемого процесса
I - жидкость; II - бетон; III – внешняя среда,
 δ - толщина стенки конструкции; t_I и t_{III} – температура жидкости и внешней среды

более низкие концентрации, по сравнению с противоположной границей, за счет градиента концентраций действует поток массы, что математически отражается в граничных условиях II рода, а на противоположной границе задействуются граничные условия первого рода;

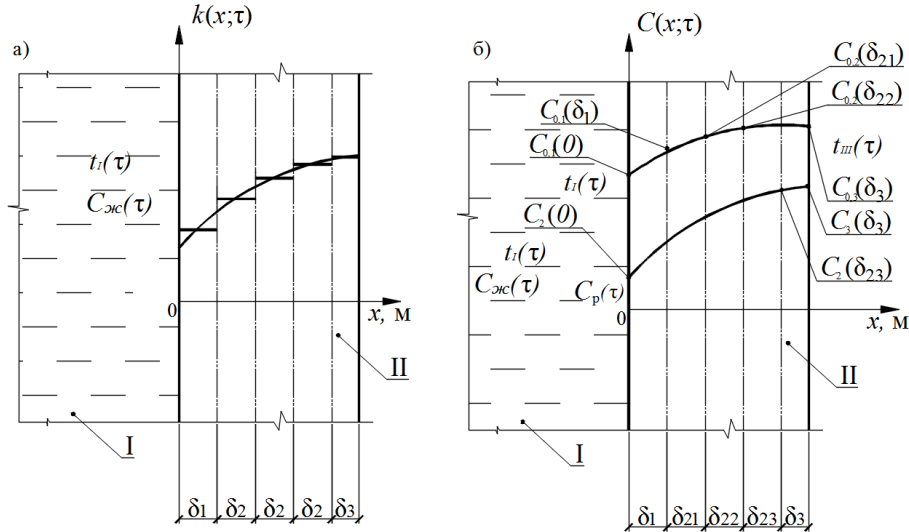


Рис. 2. Схема разделения конструкции на концентрационные зоны

- крайняя зона - слой бетона, находящийся рядом с внешней не жидкой не агрессивной средой, либо на него нанесен слой изоляции (в дальнейших расчетах все математические выкладки для этой зоны будут с индексом «3»). У левой границы слоя, где устанавливаются более низкие концентрации, по сравнению с противоположной границей, за счет градиента концентраций действует поток массы, что математически отражается в граничных условиях II рода, а на противоположной границе ввиду отсутствия массопотока через границу конструкции, контактирующей с окружающей средой применяется “условие непроницаемости”, являющееся частным случаем граничных условий II рода.

Математически, задача массопереноса, лимитируемого внутренней диффузией и внешней массоотдачей, в первой зоне имеет вид:

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

$$\text{начальное условие: } C_1(x, \tau)|_{\tau=0} = C_1(x, \tau) = C_{0,1}(x), \quad (3)$$

$$\text{граничные условия: } C_1(\delta_1, \tau) = C_{\delta_1}, \quad \beta [C_p(\tau) - C_1(0, \tau)] = k \frac{\partial C_1(0, \tau)}{\partial x}. \quad (4)$$

Краевая задача массопроводности в первой зоне (2)-(4) в критериях подобия и безразмерных координатах запишется в виде:

$$\frac{\partial Z_1(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z_1(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}, Fo_m > 0, 0 \leq \bar{x} \leq 1. \quad (5)$$

$$\text{начальное условие: } Z_1(\bar{x}, 0) = Z_{0,1}(\bar{x}), \quad (6)$$

$$\text{граничные условия: } Z_1(1, Fo_m) = Z_{\delta_1}, \quad \frac{\partial Z_1(0, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = Bi_m Z_1(0, Fo_m). \quad (7)$$

Решение задачи (5)-(7) выполнено методом интегрального преобразования Лапласа. Проведя ряд сложных тригонометрических преобразований получено окончательное решение искомой краевой задачи (5)-(7) в безразмерных переменных, позволяющее рассчитывать динамику полей концентраций целевого компонента в неограниченной пластине с массопереносом лимитируемым внутренней диффузией и внешней массоотдачей:

$$Z_1(\bar{x}, Fo_m) = Z_{\delta_1} \frac{Bi_m \bar{x} + 1}{Bi_m + 1} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{Bi_m \sin(\mu_m \bar{x}) + \mu_m \cos(\mu_m \bar{x})}{(Bi_m + 1) \cos \mu_m - \mu_m \sin \mu_m} \exp(-\mu_m^2 Fo_m) \left[\frac{Z_{\delta_1}}{\mu_m} - \int_0^1 Z_{0,1}(\xi) \sin[\mu_m(1-\xi)] d\xi \right]. \quad (8)$$

Корни характеристического уравнения μ_m определяются из уравнения: $tg \mu_m = -\mu_m / Bi_m$. Численным экспериментом проведено исследование динамики полей концентраций на различных

временных этапах. Заметим, что в критериях подобия время отражается в массообменном числе Фурье, следовательно, и рассмотрим, как изменяется поля концентрации при разных его значениях. Кроме этого, следует учитывать специфику первой зоны – массоперенос лимитируется и внутренней диффузией, и внешней массоотдачей, а мерой интенсивности массоотдачи через границу раздела фаз является массообменный критерий Био. На рис. 3 демонстрируются расчетные профили безразмерных концентраций $Z_1(\bar{x}, Fo_m)$ по толщине бетонной конструкции в первой зоне, на левой границе которой происходит массоотдача раствора «свободного гидроксида кальция» в жидкую фазу. Интересно отметить, что в условиях анализируемого расчета при заданных в расчете равномерном начальном распределении концентраций профиль безразмерных концентраций при $Fo_m < 0,1$ распространяется не по всей координате толщине слоя, а следовательно, градиент концентраций, для расчета последующих слоев отсутствует.

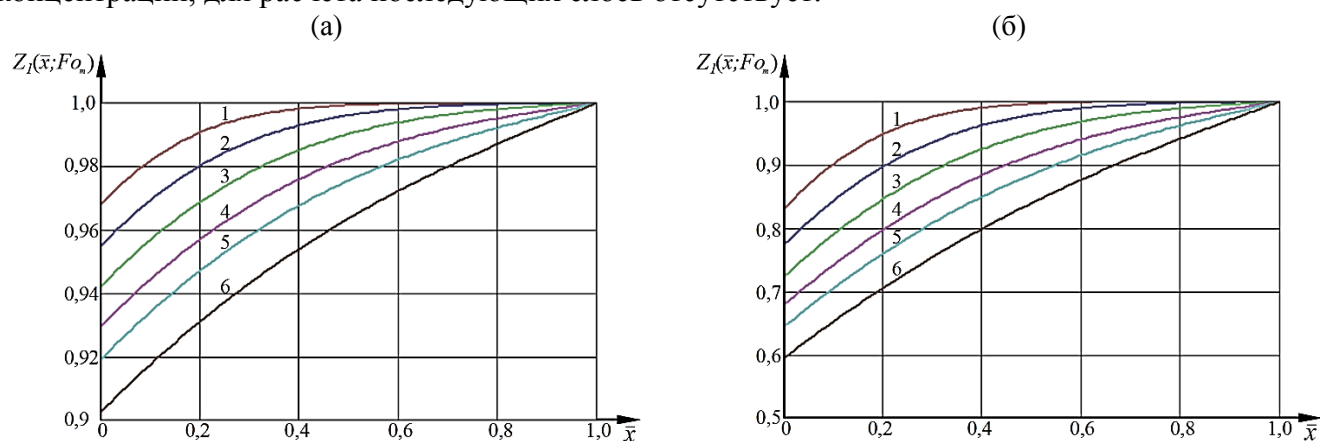


Рис. 3. Изменение безразмерных концентраций $Z_1(\bar{x}, Fo_m)$ по толщине бетонной конструкции в первой зоне, находящейся в контакте с жидкостью при числах Фурье : $Fo_m=1 - 0,03; 2 - 0,06; 3 - 0,1; 4 - 0,15; 5 - 0,2; 6 - 3$; а) $Bi_m = 0,1$; б) $Bi_m = 1$

При исследовании кинетики массопереноса лимитируемого внутренней диффузией и внешней массоотдачей определялись следующие параметры: изменение по времени безразмерной концентрации переносимого компонента на поверхности бетона, изменение по времени средней безразмерной концентрации переносимого компонента в первой зоне, изменение градиента безразмерных концентраций на границе первой и второй зоны. Результаты кинетических расчетов средних безразмерных концентраций первого условного слоя бетона и градиента безразмерных концентраций «свободного гидроксида кальция» на условной границе деления первого и второго слоев при различных значениях массообменного числа Био приведены на рис. 4.

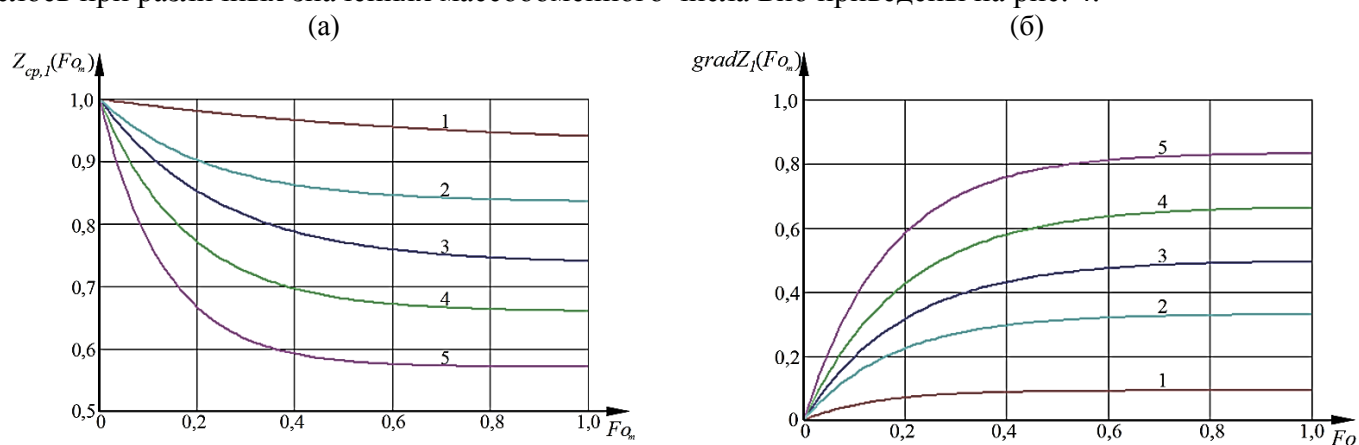


Рис. 4. Кинетический профиль средних безразмерных концентраций в первой зоне(а) и изменение градиента безразмерных концентраций на условной границе деления первого и второго слоев(б) при $Bi_m=1 - 0,1; 2 - 0,5; 3 - 1; 4 - 2; 5 - 5$

Поток массы «свободного гидроксида кальция» на границе условно выделяемых промежуточных слоев определяется градиентом концентраций предшествующего условно выделенного слоя:

$$k_1 \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1} = k_1 \text{grad } C_1(\delta_1, \tau) = k_2 \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1} . \quad (9)$$

Математически задача массопереноса в неограниченной пластине, при наличии с левой стороны пластины потока массы запишется следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial \tau} = k_2 \frac{\partial^2 C_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, 0 \leq x \leq \delta_2, \quad (10)$$

$$\text{начальное условие: } C_2(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = C_2(x, \tau) = C_{0,2}(x), \quad (11)$$

$$\text{граничные условия: } C_2(\delta_2, \tau) = C_{\delta_2}, \quad \rho_{\text{бем}} k_2 \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=\delta_1} = -q_{m1}. \quad (12)$$

Краевая задача массопроводности в промежуточной зоне (10) - (12) в критериях подобия и безразмерных координатах запишется в виде:

$$\frac{\partial Z_2(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z_2(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}, \quad Fo_m > 0, 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad (13)$$

$$\text{начальное условие: } Z_2(\bar{x}, 0) = Z_{0,2}(\bar{x}), \quad (14)$$

$$\text{граничные условия: } Z_2(1, Fo_m) = Z_{\delta_2}, \quad -\frac{\partial Z_2(0, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = Ki_{m1}^*. \quad (15)$$

Решение дифференциального уравнения (13) с неравномерным начальным (14) и граничными условиями (15) следующее:

$$Z_2(\bar{x}, Fo_m) = Ki_{m1}^* (\bar{x} - 1) + 2 \int_0^1 Z_{0,2}(\xi) d\xi + \frac{8}{\pi^2} Ki_{m1}^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{1}{(2m-1)^2} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2m-1)\bar{x}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2m-1)^2 Fo_m\right] + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos\left[\frac{\pi}{2}(2m-1)\bar{x}\right] \cdot \exp\left[-\frac{\pi^2}{4}(2m-1)^2 Fo_m\right] \int_0^1 Z_{0,2}(\xi) \cos\left[\frac{\pi}{2}(2m-1)\xi\right] d\xi. \quad (16)$$

Выражение (16) позволяет рассчитать динамику полей концентраций целевого компонента в неограниченной пластине при наличии потока массы «свободного гидроксида кальция» на границе условно выделяемых промежуточных слоев. Рассмотрим динамику полей концентраций на различных временных этапах, рассчитанную по выражению (16) (рис.5). На левой границе действует поток массы вещества, сформировавшийся от градиента концентраций предшествующего слоя, продвигающийся, с течением времени, к правой границе рассматриваемого слоя.

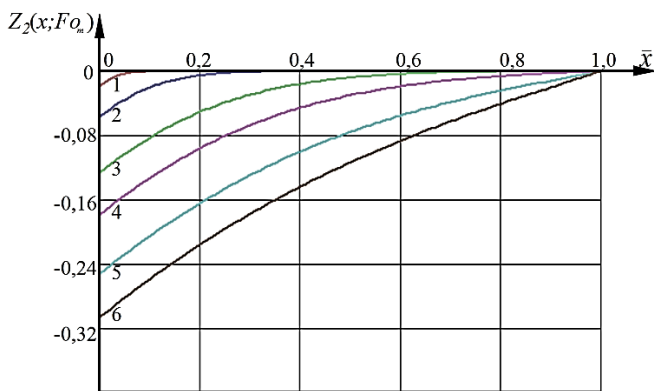


Рис. 5. Профиль безразмерных концентраций $Z_2(\bar{x}, Fo_m)$ по толщине промежуточного слоя, при числах: $Ki_m^* = 0,5$; $Fo_m = 1 - 0,001$; 2 - 0,01; 3 - 0,05; 4 - 0,1; 5 - 0,2; 6 - 0,3

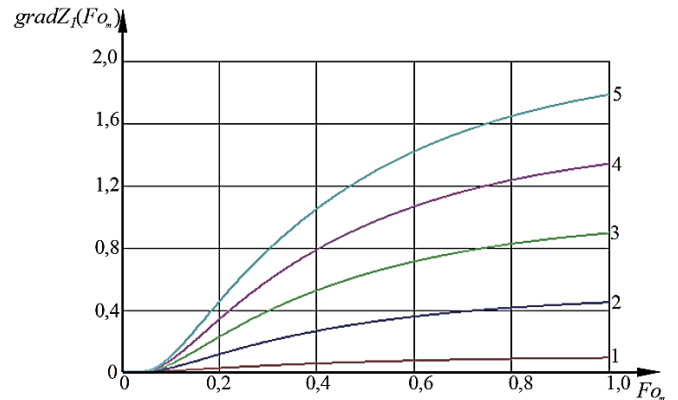


Рис. 6. Изменение градиента безразмерных концентраций на условной границе разделения второго и последующего слоев при числах: $Ki_m^* = 1 - 0,1$; 2 - 0,5; 3 - 1; 4 - 1,5; 5 - 2

При выполнении расчетов следует понимать, что значения массообменного критерия Фурье для разных условных слоев, даже при одинаковом временном шаге по слоям, будут разными, вследствие неравенства толщин слоев и коэффициентов массопроводности. Результаты кинетических расчетов градиента безразмерных концентраций «свободного гидроксида кальция» на условной границе

разделения второго и последующего слоев при различных значениях массообменного модифицированного критерия Кирпичева приведены на рис. 6.

В крайнем слое задача массопереноса, при наличии с левой стороны пластины потока массы и отсутствия массопотока с правой стороны, запишется следующей системой уравнений:

$$\frac{\partial C_3(x, \tau)}{\partial \tau} = k_3 \frac{\partial^2 C_3(x, \tau)}{\partial x^2}, \tau > 0, 0 \leq x \leq \delta_3, \quad (17)$$

$$\text{начальное условие: } C_3(x, \tau)|_{\tau=0} = C_3(x, \tau) = C_{0,3}(x), \quad (18)$$

$$\text{граничные условия: } \left. \frac{\partial C_3(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=1} = 0, \rho_{\text{бем}} k_3 \left. \frac{\partial C_3(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta-\delta_3} = -q_{m3}. \quad (19)$$

Краевая задача массопроводности в крайней зоне (17) - (19) в критериях подобия и безразмерных координатах запишется в виде:

$$\frac{\partial Z_3(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z_3(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2}, Fo_m > 0, 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad (20)$$

$$\text{начальное условие: } Z_3(\bar{x}, 0) = Z_{0,3}(\bar{x}), \quad (21)$$

$$\text{граничные условия: } \frac{\partial Z_3(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = 0, -\frac{\partial Z_3(0, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = Ki_{m2}^*. \quad (22)$$

Решение дифференциального уравнения (20) с неравномерным начальным (21) и граничными условиями (22) следующее:

$$Z_3(\bar{x}, Fo_m) = -\frac{Ki_{m2}^*}{2} \left[(1-\bar{x})^2 - \frac{1}{3} + Fo_m \right] + \int_0^1 Z_{0,3}(\xi) d\xi + \frac{2}{\pi^2} Ki_{m2}^* \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(\pi n \bar{x})}{n^2} \exp(-\pi^2 n^2 Fo_m) + 2 \sum_{m=1}^{\infty} \cos(\pi m \bar{x}) \exp(-\pi^2 m^2 Fo_m) \int_0^1 Z_{0,3}(\xi) \cos(\pi m \xi) d\xi. \quad (23)$$

По мере течения процесса меняется и градиент концентраций на границах слоев, что в разработанной нами модели учитывается массообменным модифицированным критерием Кирпичева, влияние которого на динамику массопереноса крайнего слоя показано на рис. 7. Результаты кинетических расчетов средних безразмерных концентраций «свободного гидроксида кальция» крайнего условного слоя бетона при различных значениях модифицированного массообменного критерия Кирпичева приведены на рис. 8.

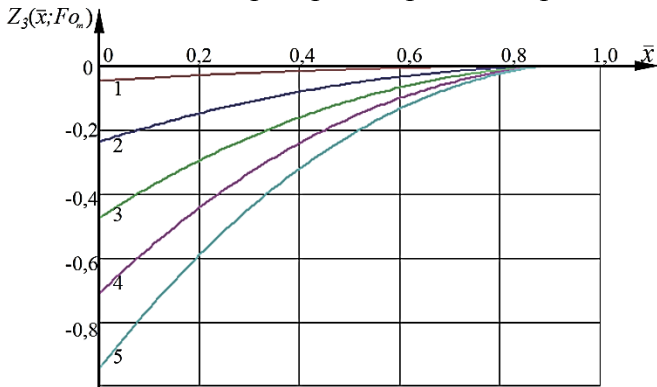


Рис. 7. Профиль безразмерных концентраций $Z_3(\bar{x}, Fo_m)$ крайнего слоя, при числах: $Fo_m=0,3; Ki_{m2}^*=1 - 0,1; 2 - 0,5; 3 - 1; 4 - 1,5; 5 - 2$

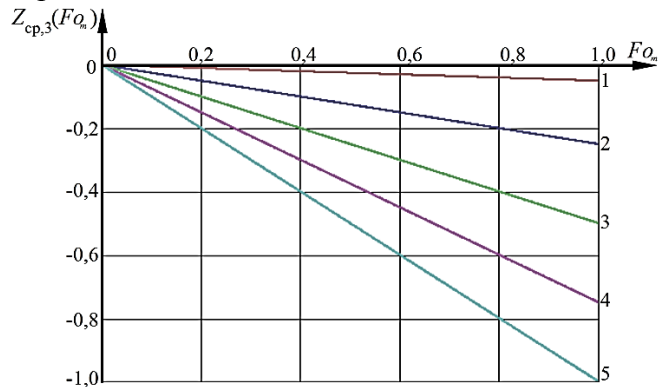


Рис. 8. Кинетический профиль средних безразмерных концентраций в крайнем слое при числах: $Ki_m^*=1 - 0,1; 2 - 0,5; 3 - 1; 4 - 1,5; 5 - 2$

Выражения (8), (16) и (23) позволяют производить расчеты динамики массопереноса «свободного гидроксида кальция» не только для крайней концентрационной зоны в принятой ранее предпосылке разделения бетонной стенки на условные расчетные концентрационные зоны, но и для всей конструкции, при задании на поверхности граничных условий второго рода и условии, что температурно-концентрационная зависимость коэффициента массопроводности позволит, в рамках допустимой погрешности, принять его значение равномерным по толщине конструкции. В противном случае, определение динамики и кинетики массопереноса «свободного гидроксида

кальция» правильно проводить в принятой предпосылке разделения бетонной стенки на условные расчетные концентрационные зоны, с последовательным сложением профилей концентраций в общий профиль.

В четвертой главе излагаются результаты физико-химических исследований твердой и жидких фаз, позволяющие судить об изменениях, произошедших в структуре цементного камня под воздействием реакционной среды.

Исследования проводились на образцах-кубах, изготовленный из портландцемента марки М500, с В/Ц=0,4. Опытный образец состоит из трех плотно подогнанных друг к другу пластин размером 1х3х3 см, в результате получается образец – куб с гранью 3 см. Изготовленные пластины, выдержанные не менее 28 суток после формования, соединялись в образцы-кубы. Пять граней куба, покрывались битумно-полимерной мастикой холодного отверждения. Таким образом, с жидкостью взаимодействует только одна грань куба. Каждый образец из серии погружался в жидкую агрессивную среду объемом 1000 см³. Далее с периодичностью 14 суток отбиралась проба для изучения состава образцов цементного камня и титрования жидкости. В качестве жидкой реакционной среды при изучении массообменных процессов при коррозии первого вида используется дистиллированная вода. Влияние температуры на динамику и кинетику процесса проводились путем установления стационарной температуры водной среды в термостате 4 °С и 25 °С.

Результаты исследований методами дифференциально-термического анализа позволили построить профили концентраций гидроксида кальция по толщине образца на моменты времени отбора проб (рис. 9). Общие очертания профилей концентраций близки к виду косинусоид, что согласуется с приведенными решениями (8), (16), (23).

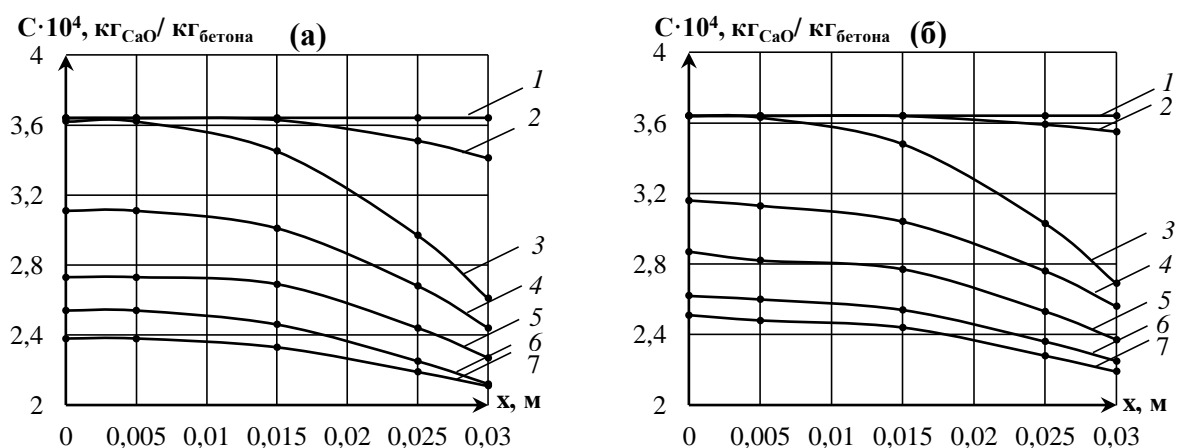


Рис.9. Профили концентраций $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине образца при продолжительности испытаний τ : 1 - 0 сут.; 2 - 1 сут.; 3 - 14 сут.; 4 - 28 сут.; 5 - 42 сут. 6 - 56 сут. 7 - 70 сут. а) 4 °С; б) 25 °С

В начале процесса выщелачивания происходит резкое уменьшение концентраций гидроксида кальция именно в поверхностном слое бетона, а затем, с течением времени фронт потока массы продвигается в глубь и наблюдается снижение градиента.

Кинетика процесса изучалась методом объемного титрования. Данным методом проводился контроль содержания катионов кальция в воде, результаты которого представлены на рис. 10.

Профили концентраций гидроксида кальция по толщине образцов были аппроксимированы уравнениями параболы, что позволило рассчитать значения коэффициента массопроводности k и построить графические зависимости его изменения по толщине образца в разные моменты времени (рис. 11), на основании которых выполнен переход к температурно-концентрационной зависимости (рис. 12).

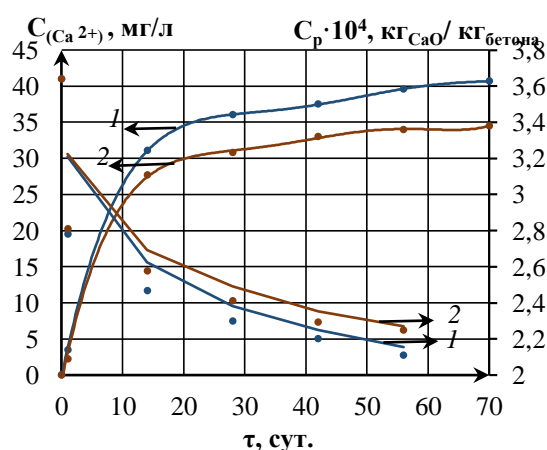


Рис.10. Изменение концентраций катионов Ca^{2+} и равновесной концентрации при температуре водной среды 1 - 4 °С; 2 - 25 °С

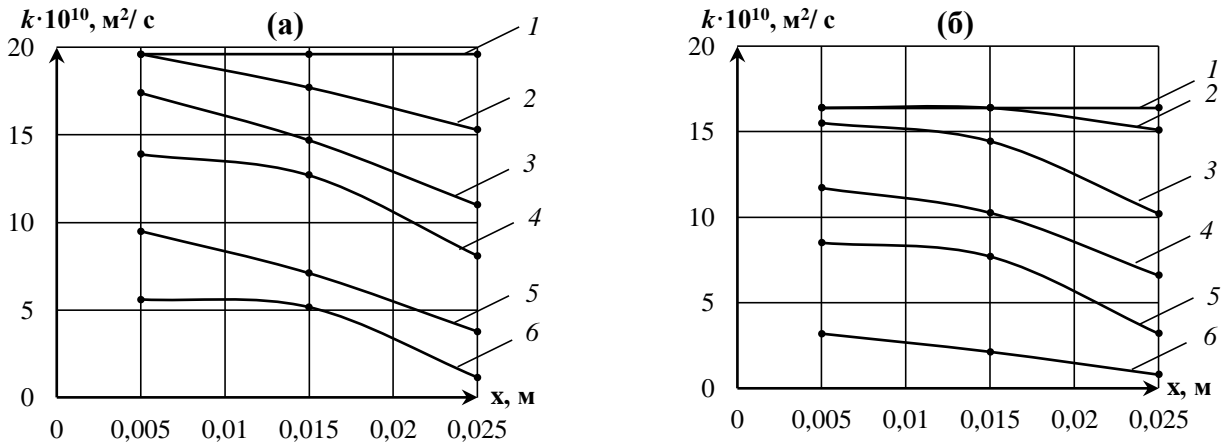


Рис.11. Изменение коэффициента массопроводности по толщине образца при продолжительности испытаний τ : 1 - 0 сут.; 2 - 1 сут.; 3 - 14 сут.; 4 - 28 сут.; 5 - 42 сут. 6 - 56 сут. 7 - 70 сут. а) 4 °С; б) 25 °С

Выполнив аппроксимацию коэффициента массопроводности k от концентрации гидроксида кальция уравнением прямой, получено эмпирическое уравнение, в виде температурно-концентрационной зависимости коэффициента массопроводности:

$$\frac{k(t, C)}{10^{10}} = 11,68 \cdot \frac{C}{10^4} - d \cdot t, \quad (24)$$

где d – коэффициент, равный 5,9 и 1,06 при температуре 4°C и 25 °С соответственно.

Интенсивность перехода вещества из твердой в жидкую фазу характеризует коэффициент массоотдачи β . Коэффициент массоотдачи β , определен нами в зависимости от интенсивности потока массы i и изменения концентрации гидроксида кальция на границе раздела фаз $C(\delta, \tau_i)$. Результаты расчетов, после статической обработки данных представлены графическими зависимостями рис. 13а. В реальных практических расчетах, на основании численно-аналитического метода расчета нестационарного неизотермического массопереноса, возможно изменение параметров процесса перед началом расчета любого микропроцесса, в соответствии с этим, точность расчета будет выше, при наличии концентрационно-температурной зависимости коэффициента массоотдачи. Графически она представлена на рис. 13б.

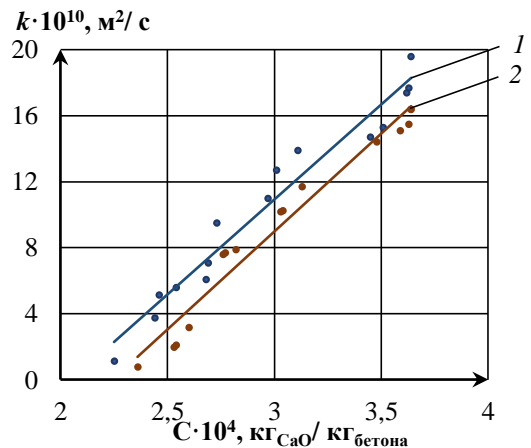


Рис.12. Изменение коэффициента массопроводности k от концентрации гидроксида кальция при температуре водной среды 1- 4 °С; 2 - 25 °С

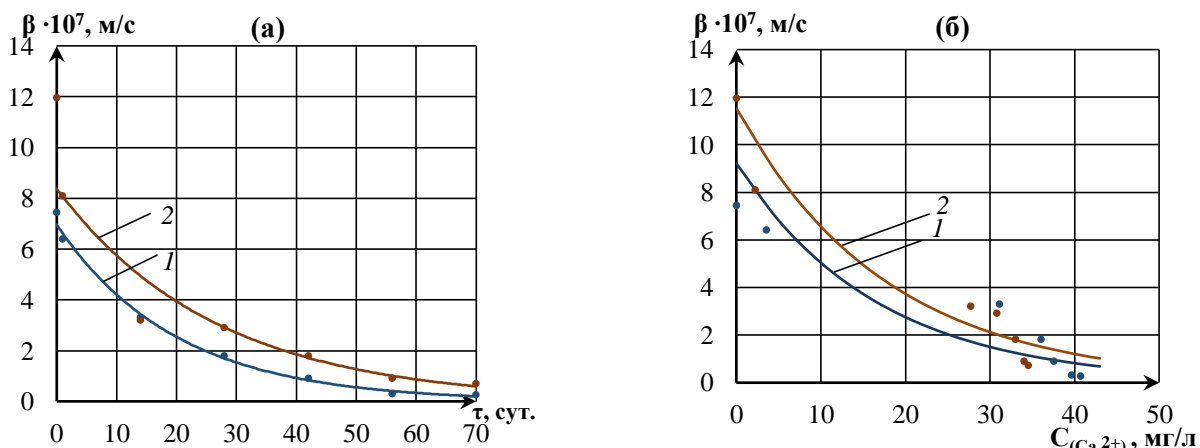


Рис.13. Изменение коэффициента массоотдачи β по времени процесса (а) и от концентрации гидроксида кальция (б) при температуре водной среды 1- 4 °С; 2 - 25 °С

Выполнив аппроксимацию коэффициента массоотдачи β от концентрации катионов кальция уравнением экспоненты, получено эмпирическое уравнение, в виде температурно-концентрационной зависимости коэффициента массоотдачи:

$$\frac{\beta(t, C_{Ca^{2+}})}{10^7} = h \cdot t \cdot \exp(-0,064C_{Ca^{2+}}), \quad (25)$$

где h – коэффициент, равный 2,3 при 4 °С и 0,466 при 25 °С.

В пятой главе приведены результаты расчетов на основе разработанной математической модели неизоэтермического массопереноса «свободного гидроксида кальция» в процессах коррозии бетона первого вида железобетонных конструкций градирни, эксплуатируемой с циклически меняющимися (в течении года) температурными условиями внешней среды. Для установления срока службы железобетонных стенок и днища бассейна градирни были выполнены расчеты по разработанной математической модели нестационарного неизоэтермического массопереноса, с учетом орошения конструкций внутренней плоскости стенки градирни оборотной водой температурой 30°С и циклически меняющимися (в течении года) температурными условиями внешней среды эксплуатации. Расчет производился в соответствии с предлагаемой методикой с разбивкой стенки по толщине на 5 условных слоев: первый, 3 промежуточных слоя и крайний. Расчет выполнялся методом «микропроцессов» при чередующихся температурах наружной среды летнего и зимнего времени, с уточнением коэффициентов массопереноса на каждом микропроцессе. Результаты расчетов полей концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине стенки через 5, 10, 15, 25 и 30 лет эксплуатации показаны на рис. 14а. Еще одна положительная особенность разработанной модели – возможность изменять материал по толщине конструкции. Поэтому нами было предложено использовать бетон повышенной водонепроницаемости (W10) только для защитного слоя, а в остальной части применять бетон с более низкой маркой по водонепроницаемости (W4).

Был выполнен расчет неизоэтермического массопереноса, с учетом значительно изменяющегося по толщине стенки коэффициента массопроводности (рис. 14б). Анализ расчета полей концентраций показывает достаточную эффективность применения бетона с маркой по водонепроницаемости W10 только в защитном слое бетона. Экономический эффект достигается за счет рационального расположения бетона различных марок по толщине конструкции, в соответствии с особенностями массообменных процессов. Сметная стоимость строительно-монтажных работ на строительство 12-гранной башенной градирни площадью орошения 1600м.кв. в ценах 4 квартала 2021 года на 468 000 рублей ниже, чем без внедрения предложенных выше рекомендаций.

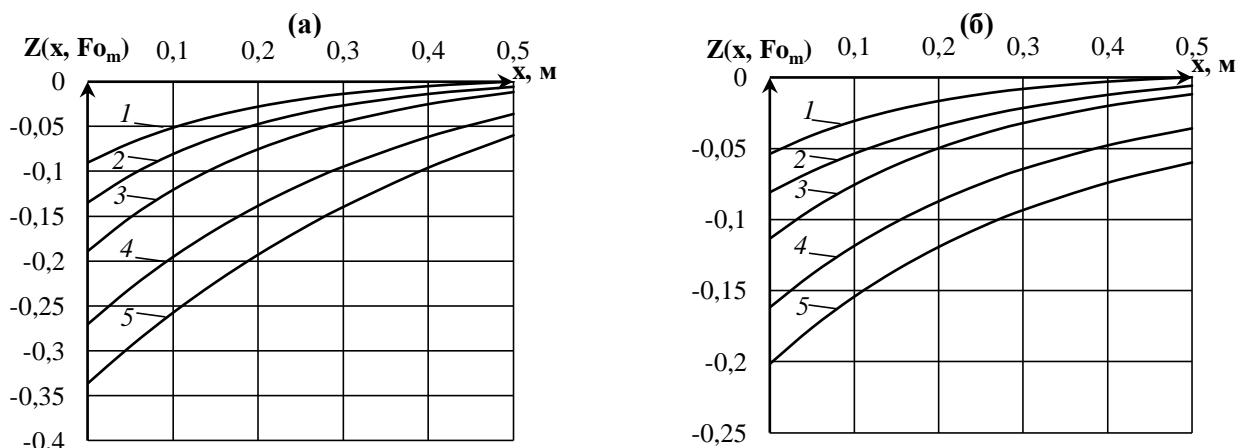


Рис. 14. Изменение безразмерных концентраций при расчете по неизоэтермической модели в стенке водосборного бассейна градирни однородного состава бетона (а) и с бетоном защитного слоя повышенной водонепроницаемости (б) после 1-5, 2-10, 3-15, 4-25 и 5-30 лет эксплуатации

В заключении приведены итоги выполненного исследования:

1. Выполненный анализ научно-технической литературы по проблемам долговечности бетонных и железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивной среде показал, что существуют несколько фундаментальных теорий, описывающих процессы коррозии бетона, имеется довольно обширный экспериментальный материал, характеризующий общие условия разрушения бетона в различных агрессивных средах. Но большинство исследований жидкостной коррозии первого вида проводились, как правило, в изотермических условиях при температуре 20 – 25 °С, что не

совпадает с реальными условиями эксплуатации, так как огромное количество строительных конструкций зданий и сооружений эксплуатируются в условиях воздействия изменяющихся климатических и технологических температур.

2. Сформулирована краевая задача неизотермического массопереноса в системе «цементный бетон - жидкость» на основе нелинейного дифференциального уравнения массопроводности параболического типа с произвольным видом функции начального распределения концентраций и комбинированными граничными условиями первого, второго и третьего рода;

3. Разработана методология синтеза и решения нелинейной краевой задачи неизотермического массопереноса на базе численно-аналитического метода «микропроцессов», позволившая свести решение нелинейной краевой задачи с неравномерным начальным условием к системе последовательных линейных краевых задач.

4. Получены аналитические решения задачи нестационарного неизотермического массопереноса в процессах коррозии системы «цементный бетон - жидкость», позволяющие рассчитывать концентрации целевого компонента в твердой фазе, тем самым прогнозировать динамику и кинетику деструктивных процессов цементных бетонов.

5. Проведены численные эксперименты, которые в безразмерных переменных характеризуют влияние массообменных критериев подобия (Фурье, Био, Кирпичева) на динамику и кинетику жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов.

6. На базе длительного эксперимента, проводимого с использованием общепринятых физико-химических методов оценки свойств материалов, определены фактические значения концентраций «свободного гидроксида кальция» в порах бетона и растворенного гидроксида кальция в жидкости в различные моменты времени. Отмечено, что на начальных этапах коррозии первого вида выщелачивание гидроксида кальция при температуре +4 идет интенсивнее чем при +25°C, по мере развития процесса градиенты концентраций при разных температурах выравниваются.

7. Для рассматриваемой системы установлены численные значения коэффициентов массопроводности и массоотдачи цементного бетона. Определено, что коэффициент массопроводности на начальных этапах коррозии первого вида равен $19,4 \cdot 10^{-10}$ и $16,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ при температурах +4 и +25°C соответственно, а коэффициент массоотдачи равен $7,8 \cdot 10^{-7}$ и $12 \cdot 10^{-7} \text{ м/с}$ при температурах +4 и +25°C соответственно.

8. Установлены температурно-концентрационные эмпирические зависимости изменения коэффициентов массопроводности и массоотдачи на отрезке температур от +4...+25°C.

9. На основании выполненных научных исследований разработаны практические рекомендации обеспечившие более точные инженерные расчеты динамики и кинетики коррозии бетона с учетом изменяющихся температурных условий в процессе эксплуатации, что позволило определять сроки между ремонтными работами в процессе эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций, а предложенный численно-аналитический метод расчета позволил научно обосновать применение бетона различных марок по водонепроницаемости, что подтверждается актом внедрения на ООО «Геопроект».

10. Практические результаты исследований были использованы при проведении обследований, капитальных ремонтов и реконструкции зданий и сооружений компанией ООО «ИСО-Инжиниринг», внедрение результатов исследований и разработок позволило определить причины неоднородности прочностных характеристик бетона в железобетонных конструкциях, длительное время эксплуатируемых в водной или грунтовой среде с циклическими изменениями температуры, определять изменение прочностных характеристик бетона в любой момент эксплуатации конструкции; разработать эффективные мероприятия по обеспечению долговечности повышению коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций, а также технических устройств и материалов (акт о внедрении от 05.12.2021 ООО «ИСО-Инжиниринг», г. Москва).

Перспективы дальнейшей разработки тематики: полученные представления о процессах, жидкостной коррозии бетона по механизму первого вида и математическая модель неизотермического массопереноса, могут быть использованы в цифровых имитационных моделях жизненного цикла на этапе эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций в агрессивных средах. Развитие темы исследования может быть продолжено в изучении влияния температуры на интенсивность других видов коррозии, а кроме этого в расширении спектра исследования видов бетонов, в том числе высокопрочных, многофункциональных и бетонов низкой проницаемости.

Принятые обозначения:

$C(x, \tau)$ – распределение концентраций «свободного гидроксида кальция» в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , кг $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{кг}$ бетона; $C_{0,1}(x)$ и $C_1(x, \tau)$ – распределение концентраций гидроксида кальция в поровой структуре бетона в начале и конце i -го «микропроцесса» по толщине первой концентрационной зоны, кг $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{кг}$ бетона; $C_{0,2}(x)$ и $C_2(x, \tau)$ – распределение концентраций гидроксида кальция в поровой структуре бетона в начале и конце i -го «микропроцесса» по толщине промежуточной концентрационной зоны, кг $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{кг}$ бетона; $C_{0,3}(x)$ и $C_3(x, \tau)$ – распределение концентраций гидроксида кальция в поровой структуре бетона в начале и конце i -го «микропроцесса» по толщине крайней концентрационной зоны, кг $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{кг}$ бетона; $C_p(\tau)$ – равновесная концентрация гидроксида кальция в жидкости на поверхности цементного бетона, кг $\text{Ca}(\text{OH})_2/\text{кг}$ бетона; $k(x, \tau)$ – коэффициент массопроводности (диффузии), изменяющийся по толщине стенки по заданному математическому закону от координаты и времени, $\text{м}^2/\text{с}$; k_1 , k_2 и k_3 – коэффициент массопроводности, имеющий фиксированное значение по толщине первой, промежуточной и крайней концентрационных зон, $\text{м}^2/\text{с}$; β – коэффициент массоотдачи в жидкой среде, $\text{м}/\text{с}$; q_{m1} и q_{m2} – плотность потока массы «свободного гидроксида кальция» на границе условно выделяемых промежуточных слоев и на границе промежуточного и крайнего слоя соответственно, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; δ_1 , δ_2 и δ_3 – толщина первой, промежуточной и крайней концентрационных зон, м ; $\rho_{бет}$ – плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\bar{x} = x/\delta$ – безразмерная координата; $Fo_m = k\tau/\delta$ – массообменный критерий подобия Фурье, $Bi_m = \beta\delta/k$ – массообменный критерий подобия Био; $Ki_m^* = q_m\delta/C_3k\rho_{бет}$ – модифицированный массообменный критерий подобия Кирпичева; $Z_1(\bar{x}, Fo_m)$, $Z_2(\bar{x}, Fo_m)$ и $Z_3(\bar{x}, Fo_m)$ – распределение безразмерных концентраций гидроксида кальция в поровой структуре бетона по толщине первой, промежуточной и крайней концентрационных зон; $q_v(x, \tau)$ – мощность объемного источника массы вследствие химических или фазовых превращений, $\text{кг Ca}(\text{OH})_2/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; x – координата, м ; τ – время, с .

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

публикации, включенные в перечень, определенный ВАК Минобрнауки РФ:

1. Развитие математических моделей, описывающих процессы коррозии в бетонных и железобетонных конструкциях. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., **Красильникова И.А.** // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. № 3. С. 85-93.
2. Математическое моделирование массопереноса в системе цементный бетон - жидкая среда, лимитируемого внутренней диффузией переносимого компонента при жидкостной коррозии первого вида. Федосов С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., **Красильникова И.А.** // Строительные материалы. 2021. № 7. С. 4-9.
3. Федосов, С.В., Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А. Математическое моделирование нестационарного массопереноса в системе «цементный бетон-жидкая среда», лимитируемого внутренней диффузией и внешней массоотдачей/ С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В.Красильников, **И.А. Красильникова** // Строительные материалы. 2022. № 1-2. С. 134-140.
4. Исследование влияния температуры на интенсивность массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов. Румянцева В.Е., Красильников И.В., **Красильникова И.А.**, Новикова У.А., Касьяненко Н.С. // Современные проблемы гражданской защиты. №1. 2022. С. 55-64.

публикации, включенные в международную базу цитирования Scopus:

5. Sorptive and separation properties of ultrafiltration membranes on the basis of sulfonate-containing polyamide with respect to bovine serum albumin. Smirnova N.N., Fedotov Y.A., **Nebukina (Krasilnikova) I.A.** // Eurasian Chemico-Technological Journal. 2013. Т. 15. № 1. P.51-56.
6. Modified ultrafiltration membranes based on sulphonate-containing polyamide with controllable sorption and partitioning properties. Smirnova N.N., **Nebukina (Krasilnikova) I.A.** International Polymer Science and Technology. 2015. Т. 42. № 4. P. T39-T45.

в других изданиях:

7. **Красильникова, И.А.** Моделирование процесса адсорбции на границе раздела "твердое тело-раствор". / **Красильникова И.А.** // Молодые ученые - развитию текстильно-промышленного кластера (ПОЙСК). 2017. № 2. С. 87-89.
8. Анализ влияния коэффициента массоотдачи на интенсивность массообменных процессов при жидкостной коррозии бетонов первого вида. Румянцева В.Е., Красильников И.В., Строкин К.Б., Гундин С.А., **Красильникова И.А.** // В сборнике: Эффективные методологии и технологии управления качеством строительных материалов. сборник научных трудов по материалам национальной Научно-технической конференции с международным участием. Новосибирский государственный

аграрный университет; Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет; Российская академия естественных наук. Новосибирск, 2021. С. 153-156.

9. Методика определения параметров массопереноса (на примере жидкостной коррозии бетона) Красильников И.В., **Красильникова И.А.** // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2021. № 1. С. 324-326.

10. Системы аварийной защиты от срывов станций биохимической очистки сточных вод. **Красильникова И.А.**, Красильников И.В. Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2021. № 1. С. 199-202.

11. О влиянии температурных криогенных колебаний на деструкцию строительных конструкций. Красильников И.В., **Красильникова И.А.** // В сборнике: Инженерные и социальные системы. Сборник научных трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2021. С. 31-42.

12. Пример практической реализации математической модели коррозионного массопереноса. Красильников И.В., **Красильникова И.А.**, Новикова У.А., Строкин К.Б. В сборнике: Инженерные и социальные системы. Сборник научных трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2021. С. 19-30.

13. Способ аппроксимации аналитическими уравнениями экспериментальных данных о динамике массопереноса в теле строительных конструкций. Красильников И.В., **Красильникова И.А.**, Новикова У.А., Строкин К.Б. В сборнике: Инженерные и социальные системы. Сборник научных трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2021. С. 11-18.

14. Методика экспериментального определения феноменологического коэффициента диффузии. Красильников И.В., **Красильникова И.А.**, Новикова У.А. // В сборнике: современные материалы, техника и технология. Сборник научных статей 11-й Международной научно-практической конференции. Курск, 2021. С. 229-233.

15. Интеграция критериев подобия в дифференциальные уравнения взаимосвязанного нестационарного тепломассопереноса. Красильников И.В., **Красильникова И.А.** // В сборнике: современные материалы, техника и технология. сборник научных статей 11-й Международной научно-практической конференции. Курск, 2021. С. 225-229.

16. Тепломассоперенос в капиллярно-пористых телах в среде с переменными потенциалами. Красильников И.В., **Красильникова И.А.** // В сборнике: современные материалы, техника и технология. сборник научных статей 11-й Международной научно-практической конференции. Курск, 2021. С. 221-225.

17. Условия стабильного существования высокоосновных соединений цементного камня. Красильников И.В., **Красильникова И.А.**, Новикова У.А. // В сборнике: Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства. сборник научных статей Международной научно-практической конференции. Курск, 2021. С. 147-149.

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;

- члену-корреспонденту РААСН, доктору технических наук, профессору

Варваре Евгеньевне Румянцевой.

Научно-информационное издание

Красильникова Ирина Александровна

Специальность 05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (строительство)

Исследование влияния температуры на динамику и кинетику массообменных процессов при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук