

*На правах рукописи*



**Красильников Игорь Викторович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ  
ЖИДКОСТНОЙ КОРРОЗИИ ПЕРВОГО ВИДА ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ  
С УЧЕТОМ ДЕЙСТВИЯ ВНУТРЕННИХ ИСТОЧНИКОВ МАССЫ**

05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (строительство)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново – 2016

Работа выполнена на кафедрах «Строительное материаловедение, специальные технологии и технологические комплексы» и «Химия, экология и микробиология» ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

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

**Логанина Валентина Ивановна**  
Заслуженный изобретатель РФ, доктор технических наук, профессор, заведующая кафедрой «Управление качеством и технология строительного производства», ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» г. Владимир

Защита состоится 28 апреля 2016 г. в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153037, г. Иваново, ул. 8 Марта, 20, ауд. Г-204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета [www.ivgpu.com](http://www.ivgpu.com)  
Автореферат разослан «    » марта 2016 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Н.В. Заянчуковская

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность избранной темы исследований.** Бетон – основа основ строительства, так как является самым распространенным строительным материалом для изготовления конструктивных элементов зданий и сооружений. По данным Росстата за 2013 год в нашей стране объем производства сборных и монолитных бетонных и железобетонных конструкций составил 52 млн. м<sup>3</sup>, с общей стоимостью около 300 млрд. руб. Базируясь на приведенных статистических данных, с экономической точки зрения можно сформулировать актуальность исследований, направленных на обеспечение долговечности бетонных и железобетонных конструкций. Продление срока эксплуатации конструкций на 5 лет дает возможность экономии порядка 20 млрд. рублей ежегодно.

Прогнозирование долговечности конструкции – весьма сложный аналитический процесс, требующий многообразных системных знаний ряда наук: физической химии, электрохимии, термодинамики, теории и кинетики гетерогенных химических процессов, массопереноса в капиллярно-пористых телах.

За 150 лет исследований процессов коррозионной деструкции бетона учеными накоплен большой объем научных знаний о коррозионных процессах, протекающих в бетонах и железобетонах: установлены и исследованы принципиальные схемы химических реакций; даны математические описания некоторых коррозионных процессов; создана система нормативных документов по борьбе с коррозией в строительном комплексе.

Накопленный теоретический и практический материал дает возможность описывать процессы, происходящие при коррозии бетона в форме математических моделей, которые позволят с требуемой точностью рассчитывать долговечность бетонных и железобетонных конструкций.

Прогнозирование долговечности строительных конструкций невозможно без тщательного экспериментального анализа и контроля, а также теоретических разработок, направленных на создание математических моделей процессов, протекающих на стадиях изготовления и эксплуатации.

Потребность в разработке методов расчета долговечности обуславливается необходимостью увеличения сроков эксплуатации зданий и сооружений, а также снижения расходов по их содержанию.

Водная окружающая среда является достаточно распространенной эксплуатационной средой, которая порождает в цементном бетоне массообменные процессы. Для прогнозирования долговечности строительных конструкций, эксплуатирующихся в воде, необходима математическая модель, учитывающая как свойства цементного бетона, так и параметры жидкости.

При прогнозировании долговечности цементных бетонов традиционно опираются на значения концентраций растворенного гидроксида кальция в жидкости пор бетона, т.к. стабильное существование основных минералов цементного камня возможно только в насыщенных (или близких к ним) растворах гидроксида кальция. При этом, после затвердевания, в порах цементного бетона находится перенасыщенный раствор гидроксида кальция. Далее, после начала эксплуатации бетонной конструкции в

жидкой среде, происходит постепенное понижение концентрации гидроксида кальция в порах бетона. При достижении определенных значений концентрации гидроксида кальция начинается процесс разложения высокоосновных соединений цементного камня с выделением гидроксида кальция, впоследствии приводящий к потере прочности и разрушению конструкции. Выделение гидроксида кальция, с физико-математической точки зрения, может быть представлено как возникновение внутреннего источника массы.

Разработка математической модели массопереноса при жидкостной коррозии первого вида с учетом влияния мощности внутреннего источника массы позволит более точно на любом временном этапе определять концентрацию «свободного гидроксида кальция» (по терминологии академика РААСН Федосова С.В.) в порах бетона, а следовательно, и фактическое изменение прочностных характеристик конструкции; прогнозировать сроки эксплуатации, рационально, с требуемой периодичностью проводить ремонтно-восстановительные работы, экономически обоснованно назначать средства защиты от коррозии и устанавливать оптимальные сроки их применения.

**Степень разработанности темы.** Данная диссертационная работа выполнялась в рамках научного направления, связанного с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов массопереноса при коррозии бетона и железобетона, развиваемого в ИВГПУ под общим руководством академика РААСН Федосова С.В. К настоящему времени в рамках данной научной школы разработаны некоторые математические модели процессов коррозии бетона и железобетона в разных средах, предложены пути борьбы с коррозионной деструкцией. Однако исследований процессов массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов первого вида с учетом внутреннего источника массы вещества не проводилось. Все отмеченное и определило цель настоящей работы, которая выполнялась в соответствии с научным направлением, развиваемым на кафедрах «Строительное материаловедение, специальные технологии и технологические комплексы» и «Химия, экология и микробиология» в рамках плана НИР и ОКР ИВГПУ и при поддержке гранта Минобрнауки РФ шифр 91-21-2, 4-109 в области архитектуры и строительных наук.

**Целью диссертационного исследования** является изучение, систематизация и развитие теоретических представлений о процессах массопереноса при жидкостной коррозии цементных бетонов первого вида. Определение основных параметров процесса (коэффициентов массопроводности, массоотдачи, мощности внутреннего источника массы и константы равновесия Генри), анализ динамики и кинетики исследуемого процесса. Моделирование процесса диффузии «свободного гидроксида кальция» в замкнутой системе «жидкость-резервуар» при наличии внутреннего источника массы.

**Задачи диссертационного исследования:**

1. изучение современного уровня развития науки в области коррозии бетона и математического моделирования процессов массопереноса, что позволит проанализировать достижения науки в данной области и сформулировать проблемы, решение которых внесет вклад в развитие инженерных методик расчета при коррозионном массопереносе;
2. разработка физико-математической модели массопереноса в процессах коррозии первого вида цементных бетонов в системе «жидкость-резервуар» при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе, при помощи которой можно рас-

считывать профили концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонной и железобетонной конструкции в любой момент времени, а также определять содержание растворенного гидроксида кальция в жидкой фазе, что в совокупности позволит осуществлять мониторинг процесса массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов;

3. постановка и проведение численного эксперимента с целью изучения влияния параметров процесса (коэффициентов массопроводности, массоотдачи, мощности внутреннего источника массы и константы равновесия Генри) на кинетику и динамику процесса;
4. разработка методики определения мощности внутреннего источника массы вещества в твердой фазе, коэффициентов массопроводности и массоотдачи;
5. постановка и проведение натурного эксперимента для проверки адекватности предлагаемой математической модели и разрабатываемого инженерного метода расчета;
6. разработка рекомендаций по рациональной эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций, подверженных воздействию водной среды.

**Научная новизна:**

- разработана физико-математическая модель массопереноса «свободного гидроксида кальция» в процессах коррозии бетона I вида в замкнутой системе «жидкость-резервуар» на уровне феноменологических уравнений, базирующаяся на записи краевой задачи нестационарной массопроводности с объемным источником массы вещества в твердой фазе;

- получены аналитические решения задачи массопереноса в процессах коррозии бетона I вида для системы «бетон - жидкость», позволяющие рассчитывать концентрации «свободного гидроксида кальция» в твердой фазе и концентрацию растворенного гидроксида кальция в жидкой фазе, устанавливать продолжительность процесса коррозии бетона I вида;

- предложен метод аппроксимации полученных экспериментальных данных в математическую зависимость, описывающую изменение концентрации «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонного образца;

- разработана новая методика определения характеристик твердой фазы системы, основанная на уравнении массопроводности, с помощью которой из результатов проведенных экспериментальных исследований определены коэффициент массопроводности и мощность внутреннего источника массы.

**Теоретическая и практическая значимость.** Представленная в диссертационном исследовании физико-математическая модель массопереноса «свободного гидроксида кальция» в процессах жидкостной коррозии бетона I вида в замкнутой системе «жидкость-резервуар» при наличии внутреннего источника массы, позволяет рассчитывать динамику полей концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонной конструкции, а также кинетику массопереноса в жидкой фазе, что в совокупности дает возможность в конечном итоге определить продолжительность процесса коррозии бетона I вида.

Разработанная методика определения параметров коррозионного массопереноса (коэффициентов массопроводности, массоотдачи, мощности внутреннего источника массы и константы равновесия Генри) позволила получить объективные численные

значения этих параметров, а, следовательно, применять их при реальных расчетах бетонных и железобетонных конструкций.

Сравнение рассчитанных теоретически, и полученных экспериментально данных, показало адекватность разработанной математической модели реальному физическому процессу.

**Методология и методы диссертационного исследования.** В диссертационной работе проанализированы и систематизированы имеющиеся в российской и зарубежной научно-технической литературе сведения о процессах коррозии и математическом моделировании массообменных процессов. Опираясь на обобщенную информационную базу, был поставлен ряд научных задач, предложены пути их решения и проведена проверка достоверности полученных результатов.

Решение поставленной задачи моделирования процесса массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов для замкнутой системы «жидкость-резервуар» при наличии внутреннего источника массы проводилось методом интегрального преобразования Лапласа.

Полученные численные значения параметров коррозионного массопереноса (коэффициентов массопроводности, массоотдачи, мощности внутреннего источника массы и константы равновесия Генри) – итог результатов длительного эксперимента, проводимого с использованием общепринятых физико-химических методов оценки свойств материалов, с применением стандартных методов и методик ГОСТ. Обработка экспериментальных данных осуществлялась методами математической аппроксимации.

**Положения, выносимые на защиту:**

- физико-математическая модель массопереноса в процессах жидкостной коррозии цементного бетона I вида на уровне феноменологических уравнений;
- аналитические решения задачи массопереноса в процессах коррозии первого вида цементных бетонов в замкнутой системе «жидкость-резервуар» при наличии внутреннего источника массы вещества в твердой фазе;
- методика определения коэффициента массопроводности и мощности внутреннего источника массы вещества;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов жидкостной коррозии цементного бетона I вида.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается использованием методов математического моделирования процессов, апробированных в теории тепломассопереноса; совпадением экспериментальных и расчетных данных в пределах допустимой погрешности.

**Апробация работы и публикации.** Основные положения диссертационных исследований опубликованы в журналах, рецензируемых ВАК Министерства образования и науки РФ: Вестник гражданских инженеров. №2 (37) 2013, Известия КГАСУ №4 (26) 2013, Строительные материалы № 6 2013, Academia. Архитектура и строительство №1 2014, Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология Т. 58. № 1 2015, Приволжский научный журнал № 3 (35) 2015. Доложены на XVI, XIX, XXI, XXII Международной научно-технической конференции «Информационная среда вуза» г. Иваново, 2009-2015 гг.; III Международном семинаре-конкурсе молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей г. Москва, 2012 г.; Международной научно-технической конференции «Архитектура. Строительство. Образование» г. Магнитогорск, 2013г.; II

Международной научной конференции «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения») г. Москва, 2013г.; XVI Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых «Строительство — формирование среды жизнедеятельности» г. Москва, 2013г.; на заседании Круглого стола, посвященного научной школе академика РААСН, д.т.н., профессора С.В. Федосова «Разработка машин и агрегатов, исследование тепломассообменных процессов в технологиях производства и эксплуатации строительных материалов и изделий», Иваново, 2013; VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы строительства» г. Новосибирск, 2013г.; V Межвузовском научном семинаре «Актуальные вопросы общей и специальной химии» г. Иваново, 2013 г.; Международной научно-практической конференция «Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов» г. Йошкар-Ола, 2013 г.; научно-техническом форуме «Перспективные задачи инженерной науки» г. Барселона, 2013г.; Международной научной конференции V Академические чтения, посвященные памяти академика РААСН Осипова Г.Л. «Актуальные вопросы строительной физики. Энергосбережение. Надежность строительных конструкций и экологическая безопасность» г. Москва, 2013г.; Международной межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК - 2014)» г. Иваново, 2014 г.; Международной научно-технической конференции «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» г. Иваново, 2014 г.; XVIII Международном научно-практическом форуме «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX)» г. Иваново, 2015 г.; I Международных Лыковских научных чтениях, посвящённых 105-летию академика А.В. Лыкова «Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе».

**Внедрение результатов исследований.** Основные результаты исследований применялись при проведении обследований, капитальных ремонтов и реконструкциях, а также при проектировании новых зданий и сооружений, проводимых ЗАО «Творческая мастерская «Ивремстрой» (акт о внедрении от 28.11.2015, г. Иваново); практические рекомендации по мониторингу и повышению коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций, а также технических устройств и материалов, были использованы при проведении промышленной экспертизы строительных конструкций и сооружений, на производственных объектах ОАО Череповецкий «Аммофос» и ООО «Балаковские минеральные удобрения», что позволило повысить уровень их безопасности в соответствии с Федеральным законом № 116-ФЗ от 21.07.1997 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (акты о внедрении результатов научно-исследовательской работы: ООО «НИУИФ-Инжиниринг» от 12.09.2012, г. Москва; ООО «Балаковские минеральные удобрения» от 19.11.2012, Саратовская обл., г. Балаково); внедрены в учебный процесс кафедры «Химия, экология и микробиология» ФГБОУ ВО ИВГПУ при проведении лекционных и лабораторных занятий по дисциплинам «Защита от коррозии» и «Физико-химические основы коррозии» (акт о внедрении от 05.04.2015, г. Иваново).

**Личный вклад автора.** Автор, совместно с научными руководителем и консультантом, сформулировал цели и задачи, выбрал объекты, методологию и методы

исследований, разработал комплекс теоретических и экспериментальных изысканий; лично осуществлял постановку и решение краевой задачи массопроводности целевого компонента в массиве железобетонной конструкции; обработал и проанализировал основные результаты, практическая реализация которых так же проводилась при непосредственном участии автора. В совместных работах, выполненных в соавторстве с академиком РААСН, доктором технических наук, профессором Федосовым С.В., советником РААСН, доктором технических наук, доцентом Румянцевой В.Е., кандидатом химических наук, профессором Федосовой Н.Л., кандидатами технических наук Хруновым В.А., Касьяненко Н.С., соискателями Шестеркиным М.Е. и Манохиной Ю.В. автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и их обсуждении.

**Публикации.** По материалам выполненных исследований опубликовано 23 работы, в том числе в изданиях, включенных в перечень ВАК Минобрнауки РФ, опубликовано 7 работ.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений; изложена на 162 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 190 наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и задачи исследования, представлены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследований, а также, основные положения выносимые на защиту.

**В первой главе** приводится обзор истории возникновения и развития научных представлений о коррозионных процессах в бетонах, рассмотрены основные способы первичной и вторичной защиты от жидкостной коррозии бетонов, представлены существующие математические модели процессов жидкостной коррозии бетона.

Исследования процессов коррозии в России инициировали Шуляченко А.Р., Чарномский В.И. и Байков А.А. Научные исследования процессов коррозии бетонов в первой половине прошлого столетия проводились учеными Будниковым П.П., Бутом Ю.М., Киндом В.А., Скрамтаевым Б.Г., Шестоперовым С.В., Юнгом В.Н.

Под руководством профессора Москвина В.М. в 50 – 60-х годах прошлого века в нашей стране сложилась научная школа специалистов в области коррозии и защиты бетона и железобетона. Исследования профессора Москвина в дальнейшем были развиты его учениками: Степановой В.Ф., Полаком А.Ф., Ратиновым В.Б., Ивановым Ф.М. и другими учеными.

К настоящему времени в России проведена большая работа по разработке теории коррозионных процессов при действии на бетон различных агрессивных сред и методов прогнозирования долговечности конструкций. Большая роль в этих исследованиях принадлежит Баженову Ю.М., Алексееву А.Ф., Мощанскому Н.А., Мчедлову-Петросяну О.П., Степановой В.Ф., Гусеву Б.В., Розенталю Н.К., Волженскому А.В., Комохову П.Г., Соломатову В.И., Рояку Г.С., Шейкину А.Е., Ферронской А.В. и многим другим.

Анализ современного состояния проблемы моделирования и расчета массообменных процессов при жидкостной коррозии первого вида 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 помогает понять физику происходящего процесса деструкции цементного бетона при воздействии на него агрессивной окружающей среды и дает возможность определять основные параметры процесса, необходимые для проведения математического моделирования.

Однако, в существующих математических моделях никак не учитывается дополнительное выделение «свободного гидроксида кальция» в раствор пор бетона, вызванное той особенностью, что в процессе твердения цементного бетона, раствор гидроксида кальция постепенно становится перенасыщенным. Разработка математической модели массопереноса при жидкостной коррозии первого вида, с учетом влияния мощности внутреннего источника массы позволит более точно на любом временном этапе определять концентрацию «свободного гидроксида кальция» в порах бетона, а следовательно и фактическое изменение прочностных характеристик конструкции, прогнозировать сроки эксплуатации, рационально, с требуемой периодичностью проводить ремонтно-восстановительные работы, экономически обоснованно назначать средства защиты от коррозии и устанавливать оптимальные сроки их применения.

Все вышеизложенное явилось предпосылками при постановке задач исследований данной диссертации.

**Во второй главе** описаны применяемые методы решения дифференциальных уравнений массопереноса, показаны некоторые существующие способы определения характеристик массопереноса.

Дифференциальное уравнение массопереноса вместе с начальными и граничными условиями является математической моделью реального процесса. Решение этой системы позволяет получить распределения концентраций в твердой и жидкой фазах в течении времени и дает анализ кинетики и динамики процесса. С этой точки зрения, аналитическое решение, как самое точное, не может сравниться с эмпирическими методами.

Использование современной компьютерных программ часто позволяет свести сложную нелинейную задачу к нескольким более простым линейным. На этом принципе Рудобаштой С.П. и Федосовым С.В. разработан зональный метод расчета, по которому весь процесс разделен на  $n$  элементарных микропроцессов, в пределах каждого из которых все параметры фаз могут считаться постоянными, и нелинейная задача тепломассопереноса сводится к совокупности  $n$  линейных задач. Необходимо отметить, что зональный метод дает хорошие результаты в случае, если получение численного решения осуществляется в совокупности с методом интегрального преобразования Лапласа. Это обусловлено тем, что в области больших чисел Фурье достаточно точные результаты получаются при использовании всего лишь нескольких первых членов ряда. С уменьшением числа Фурье ( $a$ , следовательно, и времени

процесса) резко возрастает число членов ряда, которое надо учитывать для обеспечения заданной точности расчетов, однако преобразование Лапласа часто дает возможность получить решение в двух формах: при  $Fo > 0,1$  и  $Fo \ll 0,1$ , в этом и заключается преимущество использования этого преобразования.

**В третьей главе** излагаются результаты разработки математической модели массопереноса в процессах коррозии бетона первого вида в замкнутой системе «резервуар-жидкость» с учетом влияния мощности внутреннего источника массы – «свободного гидроксида кальция».

Известно, что гидроксид кальция находится в порах бетона в концентрации насыщения, зависящей от температуры. Причем, содержание катионов кальция  $Ca^{2+}$  в затвердевшем бетоне весьма высоко, а в порах находится перенасыщенный раствор гидроксида кальция, в котором имеются свободные кристаллы гидроксида кальция, осевшие на поверхности пор. Затем, с началом массообменных процессов бетона и жидкой окружающей среды, концентрация растворенного гидроксида кальция в порах бетона начинает уменьшаться, вызывая, тем самым, растворение свободных кристаллов гидроксида кальция, что на начальных этапах процесса массопереноса позволяет поддерживать концентрацию в порах бетона близкой к концентрации насыщения раствора. Далее при понижении концентрации «свободного гидроксида кальция» ниже определенных значений начинается процесс разложения высокоосновных соединений, также сопровождающийся выделением «свободного гидроксида кальция» в раствор пор бетона, впоследствии приводящий к потере прочности и разрушению конструкции.

Выделение катионов  $Ca^{2+}$  с физико-математической точки зрения может быть представлено как возникновение внутреннего источника массы.

Математически задача массопереноса в системе «бетон-жидкость» в условиях ограниченного объема жидкости с внутренним источником массы может быть представлена системой уравнений:

$$\frac{\partial C(x, \tau)}{\partial \tau} = k \frac{\partial^2 C(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{q_v(x, \tau)}{\rho_{бет}}, \tau > 0, 0 \leq x \leq \delta, \quad (1)$$

$$\text{Начальное условие: } C(x, \tau)|_{\tau=0} = C(x, 0) = C_0, \quad (2)$$

$$\text{Граничные условия: } \frac{\partial C(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$k \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta^* [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)], \quad (4)$$

$$\text{Баланс массы: } -S \cdot \rho_{бет} \cdot k \cdot \frac{\partial C(\delta, \tau)}{\partial x} = V_{ж} \cdot \rho_{ж} \cdot \frac{\partial C_{ж}(\tau)}{\partial \tau}, \quad (5)$$

$$\text{Закон Генри: } C_p(\tau) = a + mC_{ж}(\tau). \quad (6)$$

Для упрощения решений введены безразмерные переменные и критерии подобия, удобные для качественного анализа процессов коррозии, в безразмерном виде задача (1)-(6) запишется так:

$$\frac{\partial Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 Z(\bar{x}, Fo_m)}{\partial \bar{x}^2} - Po_m^*, Fo_m > 0, 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad (7)$$

$$Z(\bar{x}, 0) = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial Z(0, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = 0, \quad (9)$$

$$\frac{1}{Bi_m} \cdot \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}} = [Z_p(Fo_m) - Z(1, Fo_m)], \quad (10)$$

$$-\frac{\partial Z_{жс}(Fo_m)}{\partial Fo_m} = K_m \cdot \frac{\partial Z(1, Fo_m)}{\partial \bar{x}}. \quad (11)$$

Решение системы выполнялось методом интегрального преобразования Лапласа, т.е. исходная система уравнений отображена в область комплексных чисел, в которых было получено решение системы, а затем произведен перевод решения в область оригиналов. И в результате были получены следующие решения:

$$Z(\bar{x}, Fo_m) = \frac{Z_p(0)}{K_m + 1} - 2Bi_m \cdot Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\mu_m \cdot \cos(\mu_m \bar{x})}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m) + 2Po_m^* \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\cos(\mu_m \bar{x}) \cdot \varphi(Bi_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^2 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot \exp(-\mu_m^2 Fo_m), \quad (12)$$

$$Z_{жс}(Fo_m) = Z_{жс}(0) + 2Bi_m \cdot K_m \cdot Z_p(0) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m}{\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1] - 2Po_m^* \cdot K_m \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin \mu_m \cdot \varphi(Bi_m, K_m, \mu_m)}{\mu_m^3 \cdot \psi'(Bi_m, K_m, \mu_m)} \cdot [\exp(-\mu_m^2 Fo_m) - 1], \quad (13)$$

$$\text{где: } \varphi(Bi_m, K_m, \mu_m) = (\mu_m^2 - Bi_m \cdot K_m) \cdot \sin \mu_m - \mu_m \cdot Bi_m \cdot (\cos \mu_m - 1), \quad (14)$$

$$\psi'(Bi_m, K_m, \mu_m) = [\mu_m^2(3 + Bi_m) - Bi_m \cdot K_m] \cdot \sin \mu_m + \mu_m [\mu_m^2 - Bi_m(K_m + 2)] \cdot \cos \mu_m, \quad (15)$$

$$tg \mu_m = \frac{\mu_m \cdot Bi_m}{\mu_m^2 - Bi_m \cdot K_m} - \text{характеристическое уравнение.} \quad (16)$$

Выражения (12) и (13) позволяют в совокупности производить расчеты динамики массопереноса целевого компонента («свободного гидроксида кальция») из внутренних слоев конструкции к границе раздела фаз; а также определить кинетику перехода этого компонента через границу раздела фаз и переход от границы раздела в объем жидкости в резервуаре.

Для большей наглядности изменения динамики и кинетики процесса на рисунках 1 и 2 профили концентраций показаны в зависимости от двух переменных. В целях удобного рассмотрения рисунков начала отсчета осей отличается от общепринятой.

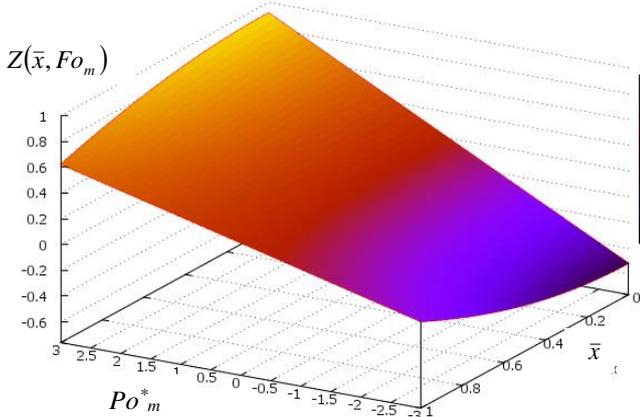


Рисунок 1. Профиль безразмерной концентраций «свободного гидроксида кальция» от модифицированного массообменного критерия Померанцева  $Po_m^*$  при  $Fo_m = 1$ ;  $Bi_m = 1$ ;  $K_m = 0,5$ ;  $Z_p(0) = 0,5$

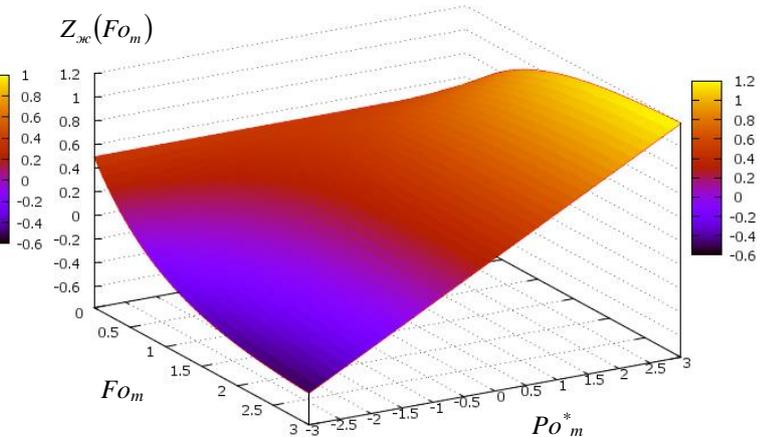


Рисунок 2. Изменение безразмерной концентрации гидроксида кальция в жидкой фазе от модифицированных критерия Померанцева  $Po_m^*$  и критерия Фурье  $Fo_m$  при  $Bi_m = 1$ ;  $K_m = 0,5$ ;  $Z_p(0) = 0,5$

Изменение динамики описываемого процесса при разных значениях критерия Померанцева (т.е. при различной мощности внутреннего источника массы) при числе Фурье  $Fo_m=1$  наглядно отражает рисунок 1. Для демонстрации возможностей разработанной математической модели рассматриваются значения модифицированного массообменного критерия Померанцева как положительные (означающие выделение «свободного гидроксида кальция» в бетоне), так и отрицательные (означающие поглощение «свободного гидроксида кальция» в бетоне, хотя это не свойственно для жидкостной коррозии бетона первого вида). Рисунок 2. иллюстрирует изменение безразмерной концентрации в жидкой фазе от чисел Фурье и Померанцева. Из рисунка видно, как при положительных числах Померанцева безразмерная концентрация гидроксида кальция уменьшается (т.е. в размерных величинах концентрация увеличивается), а при отрицательных числах Померанцева идет процесс поглощения бетоном гидроксида кальция из жидкости.

**В четвертой главе** представлены результаты физико-химических исследований жидкой и твердой фаз, позволяющие судить об изменениях, происшедших в цементном камне вследствие воздействия реакционной среды. При проведении испытаний применялся «Прибор для исследования процессов коррозии строительных материалов», разработанный в рамках научной школы академика РААСН Федосова С.В. Изучение массопереноса в процессах жидкостной коррозии цементных бетонов, проводится на образцах размером 3х3х3 см, которые состоят из плотно подогнанных друг к другу пластин размером 1х3х3 см. Боковые грани пластин, а также торцевая грань нижней пластины, покрываются слоем битумно-полимерной мастики холодного отверждения. Изготовленные образцы (в возрасте не менее 28 суток) погружаются в жидкую среду объемом 1000 см<sup>3</sup>, откуда с периодичностью 14 суток отбираются пробы для титрования, объемом 10 см<sup>3</sup>. В качестве реакционной среды при изучении процесса коррозии первого вида используется дистиллированная вода.

Суждение о кинетике и степени развития процессов коррозии проводится на основании результатов химических анализов жидкой и твердой фаз, а также других исследований, позволяющих судить об изменениях, происшедших в цементном камне и жидкости в результате их взаимодействия. Изучение состава образцов цементного камня после воздействия реакционной среды проводится методами дифференциально-термического анализа, инфракрасной Фурье-спектрометрии, комплексонометрии. Итогом проведенных исследований являются значения концентраций «свободного гидроксида кальция» в твердой фазе в трех точках образца и значения концентрации растворенного гидроксида кальция в жидкости для шести моментов времени. Полученные данные представлены в таблицах 1 и 2.

**Таблица 1. Изменение значений концентраций «свободного гидроксида кальция» в растворе пор образца от времени и координаты**

Время		Концентрация, $\text{кг}_{\text{CaO}}/\text{кг}_{\text{бет}} \cdot 10^4$ в точке с координатой		
		$x=0,005$ м	$x=0,015$ м	$x=0,025$ м
$\tau_0$	0 сут.	3,618	3,618	3,618
$\tau_1$	14 сут.	3,6	3,438	2,998
$\tau_2$	28 сут.	3,068	3,006	2,734
$\tau_3$	42 сут.	2,736	2,716	2,542
$\tau_4$	56 сут.	2,556	2,534	2,382
$\tau_5$	70 сут.	2,477	2,438	2,285

Таблица 2. Значения концентраций гидроксида кальция в жидкости

Время	0 сут.	14 сут.	28 сут.	42 сут.	56 сут.	70 сут.
Концентрация катионов кальция в жидкости $C_{ж}$ , мг/л	0	30,0	33,2	36,3	36,9	37,4

**В пятой главе** разработаны системы уравнений, описывающие динамику коррозионного массопереноса. Функция распределения концентраций, математически описана тремя зависимостями: многочлен  $n$ -ой степени (параболой), тригонометрической функцией (косинусоидой), показательной функцией (экспонентой).

Предложен метод определения коэффициента массопроводности и мощности внутреннего источника массы, основанный на уравнении массопроводности (1). Значение коэффициента массопроводности и мощности внутреннего источника решено находить в каждый момент времени для каждой пластины отдельно. Учитывая, что слагаемое в левой части уравнения массопроводности представляет собой производную первого порядка концентрации переносимого компонента по времени, то приближенно ее можно заменить:

$$\frac{\partial C(x_j, \tau_i)}{\partial \tau} \approx \frac{C(x_j, \tau_i) - C(x_j, \tau_{i-1})}{\Delta \tau}, \quad (17)$$

где  $j = 1, 2, 3$  (первая, вторая или третья пластина); а  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  (момент времени).

Замену первого слагаемого правой части исходного уравнения (1), производим приближенно, принимая в момент времени  $\tau_i$  распределение концентрации по координате в виде параболы  $C(x, \tau_i) = a_{\tau_i} x^2 + b_{\tau_i} x + c_{\tau_i}$ , т.е.:

$$\frac{\partial^2 C(x_j, \tau_i)}{\partial x^2} = 2a_{\tau_i}. \quad (18)$$

Тогда, соответственно, для промежутка времени от  $\tau_i$  до  $\tau_{i+1}$  получены решения, позволяющие рассчитать коэффициент массопроводности и мощность внутреннего источника массы:

$$k(x_j, \tau_{i,i+1}) = \frac{2C(x_j, \tau_i) - C(x_j, \tau_{i-1}) - C(x_j, \tau_{i+1})}{2\Delta\tau(a_{\tau_i} - a_{\tau_{i+1}})}, \quad (19)$$

$$q_v(x_j, \tau_{i,i+1}) = \rho_{бет} \cdot \frac{a_{\tau_i} [C(x_j, \tau_{i+1}) - C(x_j, \tau_i)] + a_{\tau_{i+1}} [C(x_j, \tau_{i-1}) - C(x_j, \tau_i)]}{\Delta\tau(a_{\tau_i} - a_{\tau_{i+1}})}. \quad (20)$$

Результаты расчетов по формулам (19) и (20) представлены на рисунках 3 и 4.

Исходя из концентрации гидроксида кальция в бетоне на границе раздела фаз и в жидкости, определены параметры процесса, характеризующие свойства жидкой фазы: константа равновесия Генри (18 кг воды / кг бет) и модифицированный коэффициент массоотдачи (его величина уменьшается от  $42 \cdot 10^{-9}$  м/с в начале процесса до  $5 \cdot 10^{-10}$  м/с на 70-е сутки). Равновесная концентрация на поверхности твердого тела в поставленной задаче через константу Генри связана пропорциональной зависимостью с концентрацией гидроксида кальция в жидкой фазе.

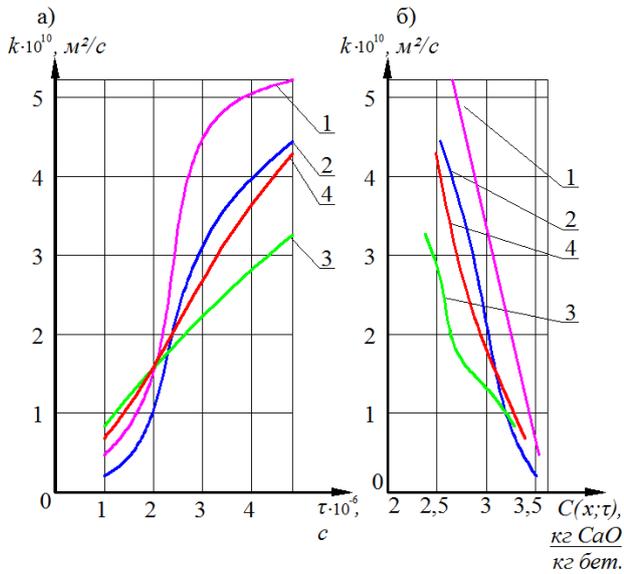


Рисунок 3. Изменение коэффициента массопроводности,  $k$

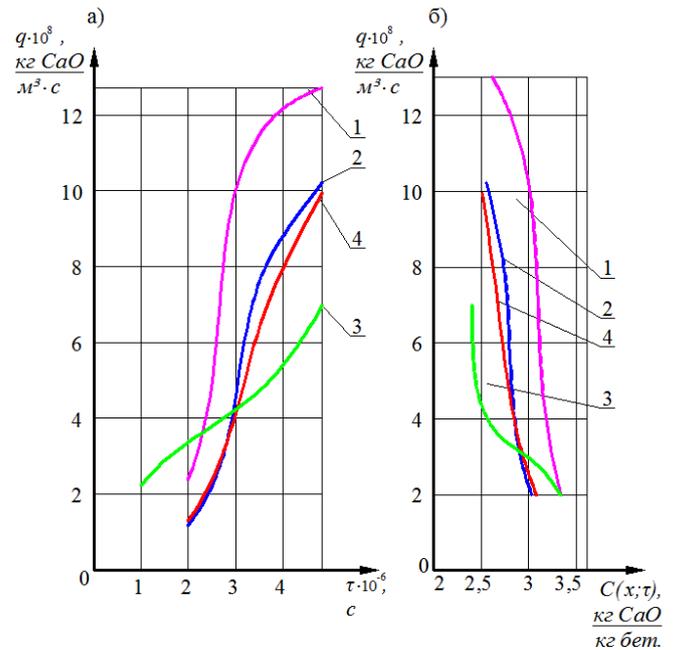


Рисунок 4. Изменение мощности источника массы,  $q_v$

а) времени,  $\tau$ ; б) концентрации гидроксида кальция,  $C$   
1, 2, 3- номера пластин; 4- среднее значение концентрации

По разработанной математической модели, приняв численно рассчитанные параметры процесса массопереноса, были произведены расчеты, по которым построены профили концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине образца и в жидкой фазе. Совместный анализ результатов, полученных из эксперимента и результатов расчета по разработанной математической модели позволяет судить о сходимости полученных данных, что дает возможность применять разработанную математическую модель, для расчетов процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов для реальных объектов.

Опираясь на разработанную модель расчета динамики и кинетики процесса массопереноса при жидкостной коррозии бетона первого вида для ООО «Балаковские минеральные удобрения» и ОАО Череповецкий «Аммофос» был выполнен мониторинг несущих и ограждающих железобетонных конструкций, которые при эксплуатации подвержены постоянному или периодическому воздействию воды (резервуары, отстойники, лотки, полы, фундаменты, стеновые панели и др.). Для данного типа конструкций рассчитано распределение концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине конструкции, а также особое внимание уделено определению изменения во времени концентрации «свободного гидроксида кальция» на поверхности бетона и на границе защитного слоя из бетона, обеспечивающего сохранность арматуры. По результатам проведенных расчетов определен временной интервал, через который концентрация «свободного гидроксида кальция» на поверхности конструкции достигнет значения, соответствующего началу разложения высокоосновных составляющих бетона, а, следовательно, более точно установлен период планового проведения капитального ремонта железобетонных конструкций.

В заключении приведены итоги выполненного исследования:

1. Проведенный анализ научных литературных источников показал, что в строительном материаловедении накоплен огромный теоретический и практический материал о коррозионных процессах, протекающих в бетонах: установлены и исследованы

принципиальные схемы и этапы процессов, разработан ряд математических моделей, основанных на эмпирических или феноменологических уравнениях, дающих возможность рассчитывать процессы, происходящие при коррозии бетона. Однако исследований о влиянии источников массы гидроксида кальция на процесс массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов не проводилось.

2. Проведена физико-математическая постановка задачи, описывающей процесс коррозии бетона дифференциальным уравнением нестационарной массопроводности второго порядка при граничных условиях второго и третьего рода и нестационарных начальных условиях.

3. Разработана математическая модель массопереноса в процессах коррозии первого вида цементных бетонов в замкнутой системе «жидкость-резервуар» при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе на уровне феноменологических уравнений, позволяющая рассчитывать профили концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонной и железобетонной конструкции в любой момент времени, определять содержание растворенного гидроксида кальция в жидкой фазе, вычислять среднее по толщине и объему конструкции и на границе раздела фаз, что в совокупности позволит осуществлять мониторинг процесса массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов.

4. Проведен численный эксперимент, иллюстрирующий влияние критериев подобия (Фурье, Био, Померанцева) и коэффициента, учитывающего характеристики фаз, на интенсивность процесса коррозионного взаимодействия динамики и кинетики в широком диапазоне параметров процесса.

5. При анализе экспериментальных данных полученных методами дифференциально-термического анализа и комплексонометрии, определены фактические значения концентраций «свободного гидроксида кальция» в порах бетона и растворенного гидроксида кальция в жидкости в различные моменты времени.

6. Получены математические зависимости, позволяющие аналитически аппроксимировать и описывать функциями изменение концентраций переносимого компонента «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонного образца в различных временных интервалах.

7. Разработана методика определения характеристик твердой фазы бетона, основанная на уравнении массопроводности, с помощью которой из данных, полученных в ходе проведенного эксперимента, определены коэффициенты массопроводности и мощности внутреннего источника массы. Установлено, что для рассматриваемой системы значение коэффициента массопроводности находится в диапазоне  $2,6 \cdot 10^{-9} \dots 5,1 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ , а мощность внутреннего источника массы (гидроксида кальция) колеблется в пределах  $1,8 \cdot 10^{-8} \dots 12,7 \cdot 10^{-8} \text{ кг CaO}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$ .

8. Определены параметры процесса, характеризующие свойства жидкой фазы: модифицированный коэффициент массоотдачи, равновесная концентрация переносимого компонента на поверхности твердого тела и константа равновесия Генри. Установлено, что для рассматриваемой системы значение модифицированного коэффициента массоотдачи находится в диапазоне  $5 \cdot 10^{-10} \dots 42 \cdot 10^{-9} \text{ м/с}$ . Численно определена константа равновесия Генри, определяющая пропорциональную зависимость между равновесной концентрацией на поверхности бетона и концентрацией гидроксида кальция в жидкой фазе.

9. Проведенное сравнение результатов, полученных экспериментально и рассчитанных теоретически по разработанной математической модели, позволяет судить о сходимости полученных данных, что дает возможность применять математическую модель для расчетов процесса массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов для реальных объектов.

10. На основании выполненных научных исследований разработаны практические рекомендации, которые внедрены при проведении промышленной экспертизы на ОАО Череповецкий «Аммофос» и ООО «Балаковские минеральные удобрения», что позволило повысить уровень их безопасности в соответствии с Федеральным законом № 116-ФЗ от 21.07.1997 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (акты о внедрении результатов научно-исследовательской работы: ООО «НИ-УИФ-Инжиниринг» от 12.09.2012, г. Москва; ООО «Балаковские минеральные удобрения» от 19.11.2012, Саратовская обл., г. Балаково). Основные результаты исследований применялись при проведении обследований, капитальных ремонтов и реконструкциях, а также при проектировании новых зданий и сооружений, проводимых ЗАО «Творческая мастерская «Ивремстрой» (акт о внедрении от 28.11.2015, г. Иваново). Внедрены в учебный процесс кафедры «Химия, экология и микробиология» ФГБОУ ВО ИВГПУ при проведении лекционных и лабораторных занятий по дисциплинам «Защита от коррозии» и «Физико-химические основы коррозии» (акт о внедрении от 05.04.2015, г. Иваново).

#### Принятые обозначения:

$C(x, \tau)$  – распределение концентрации «свободного гидроксида кальция» в бетоне в момент времени  $\tau$ , в пересчете на  $CaO$ , кг  $CaO$ /кг бетона;  $C_{ж}(\tau)$  – концентрация гидроксида кальция в жидкости в момент времени  $\tau$ , в пересчете на  $CaO$ , кг  $CaO$ /кг жидкости;  $C_p(\tau)$  – равновесная концентрация переносимого компонента на поверхности твердого тела, кг  $CaO$ /кг бетона;  $k$  – коэффициент массопроводности в твердой фазе,  $m^2/c$ ;  $\beta_c$  – коэффициент массоотдачи в жидкой среде,  $m/c$ ;  $\beta^* = \rho_{ж} [C_{нж}(\tau) - C_{ж}(\tau)] / \rho_{бет} [C_p(\tau) - C(\delta, \tau)]$  – модифицированный коэффициент массоотдачи в жидкой среде,  $m/c$ ;  $q_v(x, \tau)$  – мощность объемного источника массы вследствие химических или фазовых превращений, кг  $CaO$ /( $m^3 \cdot c$ );  $m$  – константа равновесия Генри, кг жидкости/кг бетона;  $\delta$  – толщина стенки конструкции, м;  $x$  – координата, м;  $\tau$  – время, с;  $\rho_{бет}$ ,  $\rho_{ж}$  – плотности бетона и воды, кг/ $m^3$ ;  $S$  – площадь поверхности резервуара, контактирующая с жидкостью,  $m^2$ ;  $V_{ж}$  – объем жидкости в резервуаре,  $m^3$ ;  $Z(\bar{x}, Fo_m) = [C_0 - C(x, \tau)] / C_0$  – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона;  $Z_p(Fo_m) = [C_0 - C_p] / C_0$  – безразмерная равновесная концентрация на поверхности твердого тела;  $Z_{ж}(Fo_m) = [C_0 - mC_{ж}] / C_0$  – безразмерная концентрация переносимого компонента в жидкой фазе;  $\bar{x} = x / \delta$  – безразмерная координата;  $Fo_m = k\tau / \delta^2$  – массообменный критерий Фурье;  $Ro_m^* = q_v \cdot \delta^2 / k \cdot C_0 \cdot \rho_{бет}$  – модифицированный массообменный критерий Померанцева;  $Bi_m = \beta^* \cdot \delta / k$  – массообменный критерий Био;  $K_m = m \cdot G_{бет} / G_{ж}$  – коэффициент, учитывающий характеристики фаз;  $G_{бет}$  – масса бетонного резервуара, кг;  $G_{ж}$  – масса жидкости в резервуаре, кг;  $\mu_m$  – корни характеристического уравнения; индекс  $m$  в формулах означает принадлежность к массообменным процессам.

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

1. Федосов, С.В. Моделирование массопереноса в процессах коррозии первого вида цементных бетонов в системе «жидкость-резервуар» при наличии внутреннего источника массы в твердой фазе / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, Н.С. Касьяненко // Вестн. гражданских инженеров. - 2013. - №2 (37). С.65-70.

2. Федосов, С.В. Математическое моделирование коррозионного массопереноса гетерогенной системы «жидкая агрессивная среда - цементный бетон». Частные случаи решения / Р.А. Каюмов, С.В.Федосов, В.Е.Румянцева, В.А.Хрунов, Ю.В. Манохина, **И.В. Красильников**// Известия КГАСУ. - 2013. - №4 (26). С.343-348.

3. Федосов, С.В. Теоретические и экспериментальные исследования процессов коррозии первого вида цементных бетонов при наличии внутреннего источника массы / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников**, Н.С. Касьяненко // Строительные материалы. - 2013. - № 6. с. 44-47.

4. Федосов, С.В. Теоретические исследования влияния мощности внутреннего источника массы на процесс массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников** // Academia. Архитектура и строительство. - 2014. - № 1. С. 102-105.

5. Федосов, С.В. Исследование диффузионных процессов массопереноса при жидкостной коррозии первого вида цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников**, Н.Л. Федосова // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. - 2015. - Т. 58. № 1. С. 99-104.

6. Федосов, С.В. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов. малые значения чисел Фурье, с внутренним источником массы / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, **И.В. Красильников** // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. - 2015. - Т. 58. № 1. С. 97-99.

7. Румянцева, В.Е. Сравнительный анализ уравнений распределения температур по толщине железобетонной панели в процессах тепловлажностной обработки / В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников**, С.С. Лавринович, Н.М. Виталова // Приволжский научный журнал. - 2015. - № 3 (35). С. 70-76.

*в других изданиях:*

8. Влага в наружных ограждающих конструкциях / А.В. Гушин, **И.В. Красильников**, С.С. Лавринович // Сборник материалов XVI междунар. науч.-техн. конф. “Информационная среда вуза”, ИГАСУ, Иваново, - 2009, - С. 98-100.

9. Особенности тепловлажностной обработки для сборного железобетонного домостроения / А.В. Гушин, С.С. Лавринович, **И.В. Красильников** // Сборник материалов XVI междунар. науч.-техн. конф. “Информационная среда вуза”, ИГАСУ, Иваново, - 2009, - С. 96-98.

10. Прогнозирование долговечности строительных материалов / Н.Л. Федосова, В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников**, Ю.В. Манохина // Сборник материалов XIX междунар. науч.-техн. конф. “Информационная среда вуза”, ИГАСУ, Иваново, - 2012, - С. 779-788.

11. Классификации процессов коррозии в бетоне / Н.Л. Федосова, В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников**, Ю.В. Манохина // Сборник материалов XIX междунар. науч.-техн. конф. “Информационная среда вуза”, ИГАСУ, Иваново, - 2012, - С. 852-856.

12. Частные случаи решения краевой задачи массопроводности в процессах коррозии цементных бетонов II вида / Н.Л. Федосова, В.Е. Румянцева, Ю.В. Манохина, М.Е. Шестеркин, **И.В. Красильников** // Сборник материалов XIX междунар. науч.-техн. конф. “Информационная среда вуза”, ИГАСУ, Иваново, - 2012, - С. 775-779.

13. Научные основы математического моделирования коррозионного массопереноса цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников**, Ю.В. Манохина // Сборник докладов III международного семинара-конкурса молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей: сборник докладов. СПб: Издательство "АлитИнформ", - 2012. - С. 93-97.

14. Математическое моделирование начальных периодов коррозионного разрушения первого вида цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников**, Ю.В. Манохина, В.А. Хрунов // Архитектура. Строительство. Образование: материалы междунар. науч.-практ. конф. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г. И. Носова, - 2013. - С. 210-221.

15. **Красильников И.В.**, Построение приближенного профиля концентраций переносимого компонента по толщине образца в процессах коррозионного массопереноса на основе экспериментальных данных // Разработка машин и агрегатов, исследование тепломассообменных процессов в технологиях производства и эксплуатации строительных материалов и изделий: сб. научных тру-

дов по материалам круглого стола, посвященного научной школе академика РААСН, д.т.н., профессора С.В. Федосова. Иваново: ПресСто, – 2013. - С. 114-117.

16. **Красильников, И.В.** Теоретическое исследование процесса коррозии первого вида цементных бетонов путем математического моделирования // Строительство — формирование среды жизнедеятельности: сборник докладов Шестнадцатой международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых (24-26 апреля 2013 г., Москва); М-во образования и науки Росс. Федерации, ФГБОУ ВПО «Моск. гос. строит. ун-т». Москва: МГСУ. – 2013 - С. 1079-1085.

17. Экспериментальное определение характеристик массопереноса диффузионных процессов при коррозии бетона / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников**, Н.С. Касьяненко // Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов. Материалы международной научно-практической конференции. Йошкар-Ола. - 2013. - С. 340-345.

18. Экспериментальные исследования изменения мощности внутреннего источника массы в процессе массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов / В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников** // Молодые ученые – развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК-2014): сборник материалов межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов с международным участием. Ч. 2. – Иваново: Иванов. гос. политехн. ун-т, - 2014. - С. 218-219.

19. Теоретические исследования динамики и кинетики процесса массопереноса при коррозии бетона первого вида в замкнутой системе «жидкость-резервуар» с учетом нелинейности кривой равновесия / В.Е.Румянцева, **И.В. Красильников**, М.Е. Шестеркин // Международная научно-техническая конференция «Проблемы ресурсо- и энергосберегающих технологий в промышленности и АПК» (ПРЭТ-2014): сборник трудов (секционные доклады) / Иван. гос. хим.-технол. ун-т. Иваново, - 2014. - С. 149-154.

20. Математическое моделирование коррозионного массопереноса при наличии внутреннего источника массы / В.Е.Румянцева, **И.В. Красильников** // Сборник материалов XXI междунар. науч.-техн. конф. “Информационная среда вуза”, ИВГПУ, Иваново, - 2014, - С. 775-779

21. Экспериментальные исследования динамики диффузионных процессов массопереноса при коррозии бетона / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников** // Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы (SMARTEX-2015): сборник материалов XVIII международного научно-практического форума. – Иваново: ИВГПУ, 2015. - С. 264-270.

22. Теоретические исследования влияния особенностей динамики и кинетики массопереноса на процессы жидкостной коррозии I вида цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников** // Актуальные проблемы сушки и термовлажностной обработки материалов в различных отраслях промышленности и агропромышленном комплексе: сборник научных статей Первых Международных Лыковских научных чтений/ РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева, ЗАО «Университетская книга», Курск, - 2015. - С. 275-277.

23. Исследования влияния коэффициента массоотдачи на процессы жидкостной коррозии I вида цементных бетонов / В.Е. Румянцева, **И.В. Красильников** // Сборник материалов XXII междунар. науч.-техн. конф. “Информационная среда вуза”, ИВГПУ, Иваново, - 2015, - С. 736-740.

*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*

*Роберту Мишаевичу Алояну;*

*- советнику РААСН, доктору технических наук, доценту*

*Варваре Евгеньевне Румянцевой.*