

На правах рукописи



Лосева Юлия Валерьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА ПРИ
КИСЛОТНОЙ КОРРОЗИИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ**

05.02.13 - Машины, агрегаты и процессы (строительство)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2017

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

Овчинников Игорь Георгиевич
Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Транспортное строительство», ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина»


Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства»

Защита состоится 19 января 2018 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

Автореферат разослан « » ноября 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Н.В. Заянчуковская

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы исследований. Проблема долговечности строительных материалов из бетона и железобетона в настоящее время является актуальной для строительной индустрии. По данным НИИЖБ ежегодная потеря от разрушения сооружений в результате коррозионной деструкции в России составляет порядка 5 млрд. рублей.

В современных условиях экономического кризиса особенно остро встает вопрос о целесообразности применения эффективных и доступных методов защиты изделий от коррозии в жидких агрессивных средах.

Кислотная коррозия является одним из основных факторов, влияющих на разрушение зданий и сооружений крупных химических предприятий, предприятий нефтегазового комплекса – важных составляющих основных отраслей экономики нашего государства.

Уменьшить расходы на ремонт сооружений можно, повысив качество проектирования и строительства, разработав правильную стратегию эксплуатации и новые методы предотвращения разрушений от коррозии.

Разработка новых инновационных методов предотвращения коррозионных разрушений позволяет сократить расходы на восстановление и ремонт сооружений, а также обеспечивает долговечность их работы.

В настоящее время, при исследовании коррозионной деструкции методы математического моделирования еще не достаточно широко применяются на практике, хотя их преимущества очевидны. Они позволяют с требуемой точностью рассчитать долговечность и надежность строительных изделий, разработать меры по защите от разрушающего воздействия жидкой агрессивной среды, как на стадии их проектирования и изготовления, так и на этапах эксплуатации. Применение математических моделей позволит экономически обоснованно назначать средства защиты и устанавливать сроки их применения.

Целью исследования является изучение механизмов коррозионных процессов и разработка методологических принципов создания инновационных технологий для борьбы с коррозионной деструкцией в жидких кислотных средах.

Известно, что массообменные процессы в железобетонных конструкциях протекают за длительное время (месяцы и годы). При этом коэффициент массопроводности в бетоне на 2-3 порядка ниже, чем в твердых телах химических или текстильных технологий.

При решении задач математической физики методом интегральных преобразований Лапласа, числа Фурье, характеризующие процесс массопереноса, имеют определяющие значения для выбора метода решения и повышения точности результатов. В большинстве характерных для практики случаев значения массообменного критерия Фурье находятся в области более 0,1 и в этих условиях решения краевых задач массопроводности получаются в форме бесконечного ряда Фурье. Негативной особенностью этих решений является то, что с уменьшением числа Фурье возрастает количество членов ряда и снижается точность вычислений (происходит накопление ошибки). Опыт наблюдения за эксплуатацией изделия год и более, показывает, что значение массообменного числа Фурье не превышает 0,1.

Академиком А.В. Лыковым разработаны приближенные аналитические методы

решения краевых задач массопроводности, которые получаются не в форме рядов Фурье и для которых уменьшение значения числа Фурье приводит к повышению точности результатов расчета по полученным решениям.

Вместе с тем, приходится констатировать, что в большинстве работ, посвященных математическому моделированию процессов массопереноса при коррозии бетонов первого и второго вида, решения краевых задач получены именно в форме бесконечного ряда Фурье. Приближенных численно-аналитических решений практически не имеется.

Поэтому всестороннее изучение и прогнозирование развития процессов кислотной коррозии бетона является **актуальной** задачей с научной и практической точек зрения.

Степень разработанности темы. Диссертационная работа является закономерным продолжением научного направления, связанного с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов массопереноса при коррозии бетона и железобетона, развиваемого в ИВГПУ. К настоящему времени в рамках данной научной школы разработан комплекс математических моделей процессов коррозии в нейтральных и агрессивных средах, предложены пути борьбы с коррозионной деструкцией. Фундаментальные исследования в области строительных материалов проводились А.Ф. Полаком, В.М. Москвиным и его учениками Ф.М. Ивановым и С.Н. Алексеевым, в настоящее время ведутся в НИИЖБ В.Ф. Степановой, Н.К. Розенталем, чл.-корр. РАН Б.В. Гусевым, И.Г. Овчинниковым, а также С.Н. Леоновичем в БНТУ, Республика Беларусь. Однако исследований процессов массопереноса при коррозии в системе «кислотная агрессивная среда – бетон» для малых значений времени процесса 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 установление и обобщение закономерностей массопереноса при кислотной коррозии цементных бетонов в жидкой среде, протекающих по механизму второго вида, при малых значениях чисел Фурье. Определение основных параметров (коэффициентов массопроводности, массоотдачи), изучение кинетики и динамики исследуемого процесса. Моделирование диффузии «свободного гидроксида кальция» в гетерогенной системе «твердое тело – жидкая агрессивная среда». Проверка адекватности полученной математической модели реальным физико-химическим процессам. Разработка на основании полученных экспериментальных данных научно обоснованных рекомендаций по повышению коррозионной стойкости железобетонных конструкций к воздействию агрессивных сред и применение их на практике (при проведении обследований строительных объектов).

Задачи диссертационного исследования:

1. Изучение современного уровня развития науки в области коррозии бетона;
2. Разработка физико-математической модели процесса диффузии целевого компонента – «свободного гидроксида кальция» в твердой фазе бетона с учетом химического воздействия жидкой агрессивной среды, которая позволяет получить решения краевой задачи массопереноса в системе «бетон – жидкость» при малых значениях числа Фурье и дает возможность расчета одновременно кинетики и динамики процесса;
3. Постановка и проведение численного эксперимента с целью изучения влияния коэффициентов внутреннего (массопроводности) и внешнего (массоотдачи) массопереноса на кинетику и динамику процесса кислотной коррозии;

4. Постановка и проведение натурального эксперимента для проверки адекватности предлагаемой математической модели и разрабатываемого инженерного метода расчета;

5. Разработка практических рекомендаций для более рациональной эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций при кислотной коррозии цементных бетонов.

Научная новизна:

- разработана математическая модель массопереноса в процессах кислотной коррозии на уровне феноменологических уравнений, базирующаяся на записи краевой задачи нестационарной массопроводности с объемным источником массы вещества, мощность которого в общем случае есть величина, распределённая по координате по произвольному закону;

- разработана математическая модель динамики процесса массопереноса «свободного гидроксида кальция», учитывающая внутреннюю диффузию и внешнюю массоотдачу в жидкую агрессивную среду с учетом химической реакции, на границе раздела фаз;

- получены аналитические решения задачи массопереноса в процессах кислотной коррозии для системы «бетон – жидкость» при малых значениях числа Фурье, позволяющие рассчитывать концентрации «свободного гидроксида кальция» в твердой и жидкой фазах, концентрации продуктов реакций, продолжительность процесса кислотной коррозии;

- определены значения коэффициентов массопроводности и массоотдачи для рассматриваемой системы.

Теоретическая и практическая значимость. Представленная в диссертационном исследовании физико-математическая модель массопереноса «свободного гидроксида кальция» в процессах кислотной коррозии в жидкой фазе в системе «твердое тело – жидкая агрессивная среда» позволяет рассчитывать динамику полей концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонной конструкции, а также кинетику массопереноса в жидкой фазе.

Разработанная на базе математической модели инженерная методика расчета позволяет рассчитывать динамику полей концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонной конструкции, а также кинетику массопереноса в твердой и жидкой фазах, что дает возможность в конечном итоге определить продолжительность процесса кислотной коррозии.

Определены временные зависимости потоков переносимого «целевого» компонента «свободного гидроксида кальция», которые позволяют прогнозировать продолжительность процесса кислотной коррозии цементных бетонов.

Проведенные исследования показали адекватность разработанной математической модели реальному физическому процессу, и дали возможность определить время и условия достижения концентрации вещества в твердой фазе, соответствующей завершению начального периода процесса кислотной коррозии цементных бетонов, когда концентрация «свободного гидроксида кальция» достигает значений начала разложения высокоосновных составляющих бетона.

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 кислотной коррозии цементных бетонов для системы «твердое тело - жидкая агрессивная среда» при наличии внутреннего источника массы проводилось методом интегрального преобразования Лапласа.

Полученные численные значения параметров массопереноса при коррозионной деструкции (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:

- математическая модель массопереноса в процессах кислотной коррозии цементных бетонов на уровне феноменологических уравнений с учетом источника массы, распределенного по произвольному закону по координате;
- аналитические решения задачи массопереноса в процессах кислотной коррозии цементных бетонов для системы «твердое тело – жидкая агрессивная среда», с учетом химической реакции для области малых значений массообменного критерия Фурье;
- результаты теоретических и экспериментальных исследований процессов кислотной коррозии цементных бетонов.

Достоверность полученных результатов обусловлена соответствием разработанной математической модели и полученных экспериментальных данных физико-химическим представлениям о реальной картине процесса массопереноса при коррозионной деструкции и результатам ранее проведенных исследований других авторов. Полученные научные положения и выводы, приведенные в работе, основаны на результатах длительного эксперимента, выполненного с применением комплекса взаимодополняющих, высокоинформативных методов исследований, таких как электро- и комплексометрия, дифференциально-термический анализ, метод инфракрасной Фурье-спектроскопии и их статистической обработки, подтверждены сходимостью результатов вычислительных и экспериментальных данных, а так же их корреляцией с известными закономерностями.

Апробация работы и публикации. Основные положения диссертации опубликованы в рецензируемых научных журналах, рекомендованных для изложения основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук: Вестник гражданских инженеров №1 (26) 2011; Строительные материалы №3 2012; Строительство и реконструкция №1 (45) 2013; Известия КГАСУ. №4 (26) 2013; Известия Вузов. Строительство № 5(665) 2014.

Доложены на XVI, XIX, XXI, XXII Международной научно-технической конференции «Информационная среда вуза» г. Иваново, 2010-2015; научно-технической конференции к 100-летию со дня рождения профессора Полака А.Ф., г. Уфа, 2011; II, III Международном семинаре-конкурсе молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей, г. Москва, 2012; Международной научно-технической конференции «Архитектура. Строительство. Образование», г. Магнитогорск, 2013; на заседании Круглого стола, посвященного научной школе академика РААСН, д.т.н., профессора С.В. Федосова «Разработка машин и агрегатов, исследование тепло-массообменных процессов в технологиях производства и эксплуатации строительных материалов и изделий», г. Иваново, 2013; VI Всероссийской научно-технической конференции «Актуальные вопросы строительства», г. Новосибирск, 2013; V Межвузовском науч-

ном семинаре «Актуальные вопросы общей и специальной химии», г. Иваново, 2013; V Академических чтениях, посвященных памяти академика РААСН Осипова Г.Л. «Актуальные вопросы строительной физики»; межвузовской научно-технической конференции с Международным участием «Молодые ученые развитию промышленно-текстильного кластера» (Поиск-2014), г. Иваново; XVIII Международном научно-практическом Форуме «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы» (SMARTEX), г. Иваново, 2015.

Внедрение результатов исследований. При проведении промышленной экспертизы строительных конструкций и сооружений, а также технических устройств и материалов, были использованы практические рекомендации по мониторингу и повышению коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций, включающие в себя: разработку математической модели коррозионного массопереноса, протекающего по механизму II вида и инженерной методики расчета, позволяющих прогнозировать продолжительность процессов коррозионной деструкции; определение коэффициентов массопроводности и массоотдачи для рассматриваемых систем. Внедрение результатов научных исследований и предложенных мероприятий технической экспертизы производственных объектов происходило 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». Экономический эффект достигается за счет экономии средств на ремонтные работы и составляет 18,7% от стоимости сметных работ (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).

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе кафедры «Химия, экология и микробиология» ФГБОУ ВО ИВГПУ при проведении лекционных и лабораторных занятий для обучения бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство» по дисциплине «Коррозия металлов и способы защиты» и магистров направления подготовки 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» магистерская программа «Антикоррозионная защита оборудования и сооружений» по дисциплинам: «Методы исследования коррозионных процессов оборудования и сооружений», «Физико-химические основы коррозии», «Диагностика коррозионного состояния оборудования и сооружений», «Мониторинг коррозии и защиты от коррозии» (акт о внедрении от 25.03.2017 г., 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, д.т.н., профессором Федосовым С.В., советником РААСН, д.т.н., профессором Румянцевой В.Е., к.х.н., профессором Федосовой Н.Л., к.т.н. Хруновым В.А., Касьяненко Н.С., Шестеркиным М.Е., Красильниковым И.В. и Коноваловой В.С. автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и их обсуждении.

Публикации. По материалам выполненных исследований опубликовано 26 работ, в том числе в научных журналах, рекомендованных для изложения основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук опубликовано 5 статей; получен патент на изобретение РФ №2495962 от 20.10.2013.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений; изложена на 159 страницах машинописного текста, содержит 27 рисунков, 12 таблиц и список литературы из 185 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 проанализированы работы отечественных и зарубежных авторов, касающиеся современных представлений о механизме коррозии бетона и железобетона и определены задачи исследования.

Первые исследования долговечности посвящены сооружениям, эксплуатирующимся в морской воде. В Российской империи большую роль в становлении науки о долговечности сыграли обследования морских железобетонных сооружений, выполненные в течение 1902-1904 гг. А.Р. Шуляченко, В.И. Чарномским, А.А. Байковым.

Особо следует отметить большой вклад в исследования по изучению механизма коррозии профессором В.М. Москвиным. Первые результаты исследований опубликованы в 1952 г. в монографии «Коррозия бетона», развитые в последующем в лаборатории по долговечности и коррозии бетона и железобетона НИИЖБа.

В 1950 – 60-х годах в стране под руководством профессора В.М. Москвина сложилась научная школа специалистов в области коррозии и защиты бетона и железобетона. В эти и последующие годы работами С.Н. Алексеева, В.И. Бабушкина, Ф.М. Иванова, Ю.М. Баженова, Н.А. Мощанского, А.Ф. Полака, В. Б. Ратинова, Т. В. Рубецкой, В.Ф. Степановой, Н.К. Розенталя, Б.В. Гусева, С.Н. Леоновича, И.Г. Овчинникова и других ученых созданы общие теоретические представления о механизме коррозионных процессов в бетоне.

Анализ современного состояния проблемы моделирования и расчета массообменных процессов при кислотной коррозии цементных бетонов показал, что в исследовании данной проблемы достигнуты большие успехи: сформулирована классификация процессов коррозии в бетоне, установлены принципиальные схемы жидкостной коррозии и ее этапы; разработаны способы первичной и вторичной защиты бетона и железобетона от коррозии; на базе эмпирических и феноменологических уравнений разработан ряд математических моделей, позволяющих прогнозировать долговечность конструкций; накоплена большая экспериментальная база, которая 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.

Разработка математической модели массопереноса при кислотной коррозии цементных бетонов, на уровне феноменологических уравнений с учетом источника

массы, распределенного по произвольному закону по координате 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 приведены сведения об исходных материалах, используемых при проведении исследований кислотной коррозии. Представлены методики получения экспериментальных данных, подготовки образцов к исследованию и последующей обработки результатов.

Физико-химический анализ материалов проводился при использовании стандартных методик. Коррозионная стойкость цементного камня исследовалась на образцах-кубах с гранью 3 см, изготовленных из портландцемента марки ПЦ 500-Д-0. Образцы-кубы из цементного камня погружались в раствор HCl с pH = 5, откуда с периодичностью 1 сутки отбирались пробы для титрования.

Для проведения испытаний использовался «Прибор для исследования процессов коррозии строительных материалов» (Патент РФ на полезную модель № 71164). Количественный анализ ионов кальция в жидкой среде проводился по методу комплексонометрии.

Суждение о кинетике и степени развития процессов коррозии проводилось 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.

В третьей главе излагаются результаты разработки математической модели массопереноса в процессах кислотной коррозии бетона (рисунок 1). Известно, что при изготовлении бетонных и железобетонных изделий в бетоне образуется «свободный гидроксид кальция», снижение концентрации которого в теле бетона и является первопричиной коррозии. Процесс кислотной коррозии бетона обусловлен диффузией гидроксида кальция из толщи бетона к его поверхности, граничащей со средой, переходом вещества через границу раздела фаз «бетон – жидкость» и реакцией его с компонентами жидкой агрессивной среды. Математически задача массопереноса в твердой фазе представлена уравнениями:

$$\frac{\partial C_{x,\tau}}{\partial \tau} = k \cdot \frac{\partial^2 C_{x,\tau}}{\partial x^2} + \frac{q_v \cdot x}{\rho_s} \quad \tau \geq 0, 0 \leq x \leq \delta, \quad (1)$$

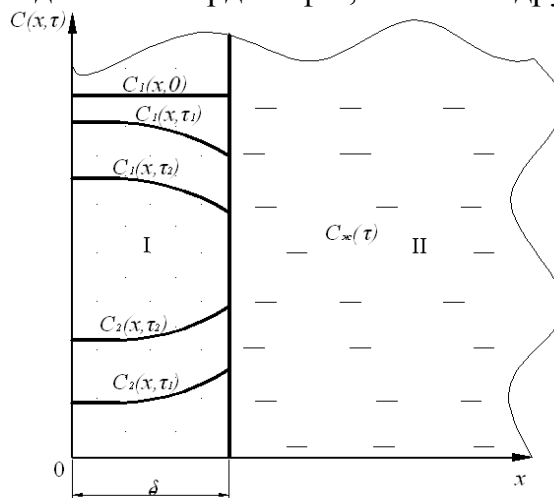


Рис. 1: Профили концентраций компонентов в бетоне. τ_1 и τ_2 ($\tau_2 > \tau_1$) – произвольные моменты времени; $C_1(x, \tau)$ – концентрация гидроксида кальция в бетоне, $C_2(x, \tau)$ – концентрация агрессивного компонента в бетоне.

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

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=0} = 0, \quad (3)$$

$$-k\rho_\delta \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=\delta} = q_n \quad (4)$$

В безразмерных координатах краевая задача массопроводности (1) - (4) имеет следующий вид:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo_m} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \bar{x}^2} + Po_m \bar{x}; \quad Fo_m > 0; \quad 0 \leq \bar{x} \leq 1, \quad (5)$$

Начальные условия:

$$\theta(\bar{x}, Fo_m)|_{Fo_m=0} = \theta_0 \bar{x}, \quad (6)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} \right|_{\bar{x}=0} = 0, \quad (7)$$

$$-\left. \frac{\partial \theta}{\partial \bar{x}} \right|_{\bar{x}=1} = Ki_m. \quad (8)$$

Общее решение системы (5) - (8), полученное методом интегральных преобразований Лапласа, имеет вид:

$$\begin{aligned} \theta(\bar{x}, Fo_m) = & Ki_m (1 - \bar{x}) \operatorname{erfc} \left[\frac{1 - \bar{x}}{2\sqrt{Fo_m}} \right] - 2Ki_m \sqrt{\frac{Fo_m}{\pi}} \exp \left[-\frac{(1 - \bar{x})^2}{4Fo_m} \right] + \\ & + \frac{1}{2\sqrt{Fo_m}} \left\{ \int_0^1 \theta_0(\xi) \exp \left[-\frac{\bar{x} - \xi}{4Fo_m} \right] d\xi + \int_0^1 \theta_0(\xi) \exp \left[-\frac{2 - \bar{x} - \xi}{4Fo_m} \right] d\xi \right\} + \\ & + \sqrt{\frac{Fo_m}{\pi}} \int_0^1 Po_m(\xi) \exp \left[-\frac{\bar{x} - \xi}{4Fo_m} \right] d\xi + \sqrt{\frac{Fo_m}{\pi}} \int_0^1 Po_m(\xi) \exp \left[-\frac{2 - \bar{x} - \xi}{4Fo_m} \right] d\xi - \\ & - \frac{1}{2} \int_0^1 Po_m(\xi) (\xi - \bar{x}) \operatorname{erfc} \left[\frac{(\xi - \bar{x})}{2\sqrt{Fo_m}} \right] d\xi - \frac{1}{2} \int_0^1 Po_m(\xi) (2 - \bar{x} - \xi) \operatorname{erfc} \left[\frac{(2 - \bar{x} - \xi)}{2\sqrt{Fo_m}} \right] d\xi \end{aligned} \quad (9)$$

Полученное решение (9) позволяет находить не только профили безразмерных и размерных концентраций «свободного гидроксида кальция» в толще бетона, но и дает возможность определить значение градиента этой величины на границе раздела фаз. При коррозии железобетонных изделий в кислой среде необходимо значение скорости реакции взаимодействия целевого компонента «свободного гидроксида кальция» и кислоты. Ранее было показано, что на границе раздела фаз выполняется условие:

$$q_v = -\frac{K \cdot C_A}{1 + \frac{K}{\beta c}}. \quad (10)$$

Определив экспериментально значение константы скорости химической реакции, становится возможным просчитать кинетику процесса массопереноса из твердой фазы в жидкость. Кроме того, полученное решение позволяет в дальнейшем определять время

достижения на границе раздела фаз критической концентрации «свободного гидроксида кальция», соответствующей началу разложения высокоосновных компонентов, а значит, и переходить к дальнейшим этапам изучения и моделирования развития коррозионных процессов.

Некоторые результаты расчетов по полученному выражению (9) приведены на рисунках 2-4.

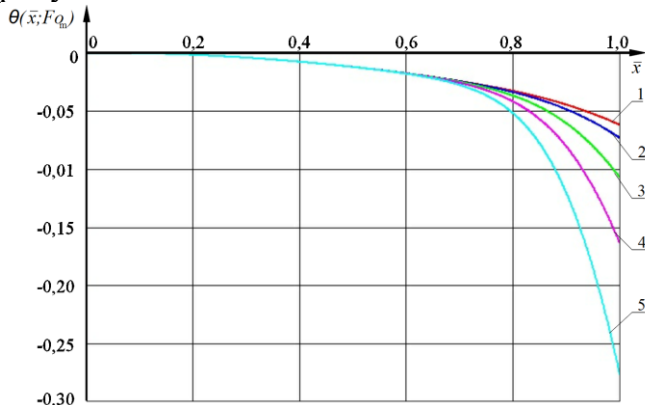


Рис. 2. Влияние Ki_m^* на профили безразмерных концентраций, при $Fo_m = 0.01$, $Po_m^* = -0.1$, $Ki_m^* = 0.1; 0.2; 0.5; 1; 2$

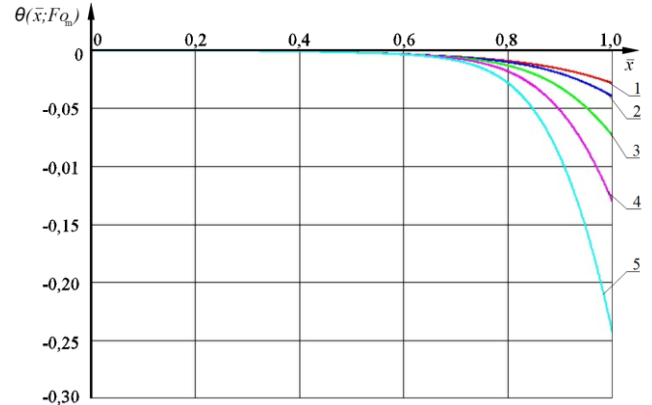


Рис. 3. Влияние Ki_m^* на профили безразмерных концентраций, при $Fo_m = 0.01$, $Po_m^* = -0.1zeta$; $Ki_m^* = 0.1; 0.2; 0.5; 1; 2$

Кривые рисунков 2 и 3 иллюстрируют влияние характера источника массы как динамику внутреннего массопереноса. На первом из них приведены результаты для постоянного источника массы ($Po_m^* = -0,1$). На втором – источник массы распределены по толщине конструкции по линейному закону ($Po_m^* = -0,1zeta$). Отчетливо видно, что

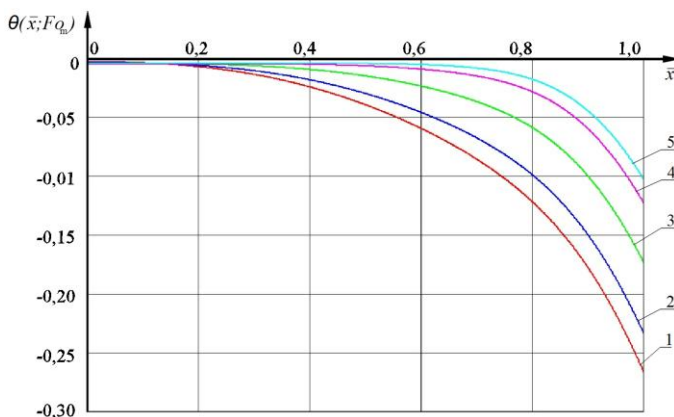


Рис. 4. Влияние внутреннего источника массы (Po_m^*) на профили безразмерных концентраций

$$Fo_m = 0,01; Ki_m^* = 1; \text{ при } Po_m^* :$$

$$Po1(\xi) := -\xi^3, \quad Po2(\xi) := -\xi^2, \quad Po3(\xi) := -1\xi^1, \quad Po4(\xi) := -1\xi^2, \\ Po5(\xi) := -1\xi^3$$

изменение функции источника заметно влияет на профили концентраций вблизи поверхности бетона. Завершается численный анализ рисунком 4, на котором показано влияние характера источника на профили концентраций полученного компонента в бетоне. Кривые рисунка еще раз подтверждают достоверность полученных решений краевых задач массопроводности и перспективу их дальнейшего применения в реализации проблем теоретического и экспериментального исследований процессов коррозии бетона и железобетона в жидкой фазе.

В четвертой главе приведены результаты физико-химических исследований жидкой и твердой фаз, позволяющие судить об изменениях, происшедших в цементном камне вследствие воздействия реакционной среды. В соответствии с методикой проведения исследований, изложенной во второй главе, пластины, составляющие образцы-кубы, подвергались дифференциально-термическому анализу, результаты которого сведены в таблицу 1. Итогом проведенных исследований твердой фазы являются значения концентраций «свободного гидроксида кальция» в трех точках образца (кусочек цементного бетона из центральной части исследуемого образца) для четырнадцати моментов времени.

Таблица 1

Содержание «свободного гидроксида кальция» в порах образцов
цементного бетона

содержание $Ca(OH)_2$ (в пересчете на CaO), %								
Образец	после воздействия водного раствора HCl с $pH = 5$							
	контр	1	2	3	4	5	6	7
внешняя пластина	1,97	1,10	1,10	1,10	1,10	1,10	1,11	1,11
переходная пластина		1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,77	1,78
внутренняя пластина		1,88	1,88	1,88	1,89	1,89	1,90	1,90
		8	9	10	11	12	13	14
внешняя пластина	1,97	1,12	1,12	1,13	1,13	1,14	1,15	1,16
переходная пластина		1,78	1,78	1,79	1,79	1,79	1,80	1,80
внутренняя пластина		1,91	1,91	1,92	1,92	1,93	1,94	1,95

Полученные данные представлены в таблице 2. В результате получены профили концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине образца в кислой среде (рисунок 5).

Таблица 2

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

Время		Концентрация, $кг_{CaO}/кг_{бет} \cdot 10^4$ в точке с координатой		
		$x = 0,005$ м	$x = 0,015$ м	$x = 0,025$ м
τ_0	0 сут	3,618	3,618	3,618
τ_1	1 сут	3,616	3,605	3,572
τ_2	2 сут	3,614	3,590	3,531
τ_3	3 сут	3,612	3,579	3,482
τ_4	4 сут	3,610	3,565	3,459
τ_5	5 сут	3,609	3,551	3,407
τ_6	6 сут	3,608	3,540	3,360
τ_7	7 сут	3,607	3,529	3,305
τ_8	8 сут	3,606	3,517	3,251
τ_9	9 сут	3,605	3,503	3,197
τ_{10}	10 сут	3,604	3,486	3,160
τ_{11}	11 сут	3,603	3,472	3,121
τ_{12}	12 сут	3,602	3,458	3,080
τ_{13}	13 сут	3,601	3,445	3,033
τ_{14}	14 сут	3,6	3,438	2,998

Проведенные методом дифференциально-термического анализа исследования цементобетонных образцов, позволившие определить значения концентраций «свободного гидроксида кальция» для трех координат образца необходимы для аналитического построения профилей концентраций, на основе которых можно определить значения коэффициента массопроводности и мощности внутреннего источника массы. По данным дифференциально-термического анализа во всех пробах

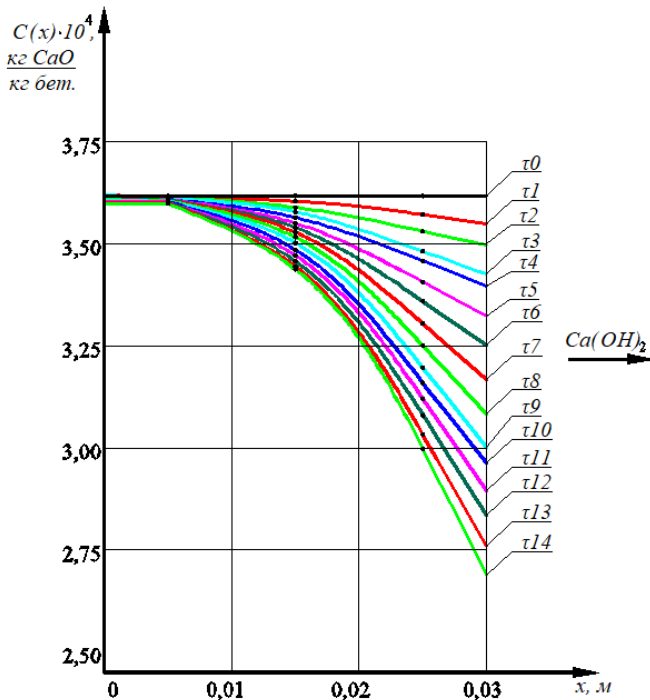


Рис. 5. Профили концентраций «свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ » по толщине образца в водном растворе HCl с $\text{pH} = 5$ при τ : 1-14: с 1 по 14 сутки

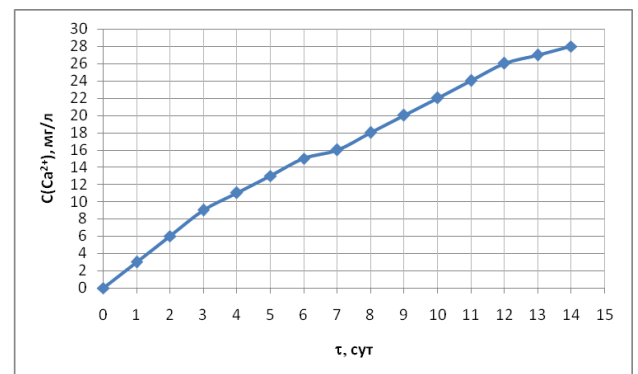
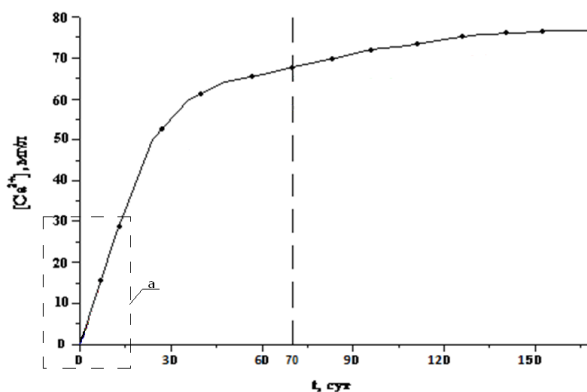


Рис. 6. Изменение концентрации ионов Ca^{2+} в растворе HCl с $\text{pH} = 5$

Анализ результатов проведенных комплексных физико-химических исследований подтверждает принятые ранее модельные представления о характере массопереноса в рассматриваемой системе «твердое тело – жидкая агрессивная среда», что позволяет рассчитать по разработанной математической модели характеристики массопереноса «свободного гидроксида кальция» при кислотной коррозии бетона, в результате воздействия агрессивной среды – водного раствора HCl с $\text{pH} = 5$, в соответствии с методиками расчета. Результаты расчетов приведены в таблице 3.

В пятой главе приведены результаты расчетов по разработанной математической модели процесса массопереноса «свободного гидроксида кальция» в процессах кислотной коррозии. Экспериментально рассчитанные значения характеристик массопереноса соответствуют данным литературных источников. Расчеты показывают, что в начальный период времени поток массы вещества максимален, в

зафиксировано резкое уменьшение содержания гидроксида кальция по эндоэффекту при температуре 430-480 °С. Кроме того, комплексометрическим методом объемного анализа проводился контроль содержания катионов кальция в растворе, результаты которого представлены на рисунке 6. Параллельно с этим регистрировалось значение водородного показателя pH с помощью прибора ЭВ-74 согласно методике. Так же для определения возможных продуктов реакции были проведены исследования кислотно-основных свойств методом потенциометрического титрования – pK спектроскопии, результаты которого служат для определения констант диссоциации и поверхностной плотности соответствующих функциональных групп, и как следствие для определения вероятности нахождения тех или иных соединений в объеме раствора.

дальнейшем резко снижается. Резкое изменение всех характеристик массопереноса сменяется вялотекущим процессом, выходящим на постоянные параметры.

Таблица 3

Экспериментально рассчитанные характеристики массопереноса для системы «водный раствор HCl с $pH = 5$ – цементный бетон»

№ п/п	Наименование показателя	τ , сут
		14
1	Плотность потока $Ca(OH)_2$ в образце, $кг/(м^2 \cdot с)$	$1,337 \cdot 10^{-7}$
2	Плотность потока HCl в жидкости, $кг/(м^2 \cdot с)$	$8,671 \cdot 10^{-11}$
3	Коэффициент массоотдачи, $м/с$	$1,601 \cdot 10^{-8}$
4	Коэффициент массопроводности, $м^2/с$	$2,335 \cdot 10^{-9}$
5	Массообменный критерий Кирпичева	2,03
6	Константа скорости химической реакции, $с^{-1}$	0,504

На рисунках 7 и 8 видно, что при переменном значении коэффициента массопроводности и постоянном значении критерия Кирпичева концентрация «свободного гидроксида кальция» на границе образца становится равной нулю на 1006 сутки (2,756 года), что соответствует моменту начала разложения высокоосновных составляющих цементного камня. Это соответствует окончанию первого этапа (стадии) кислотной коррозии цементного бетона.

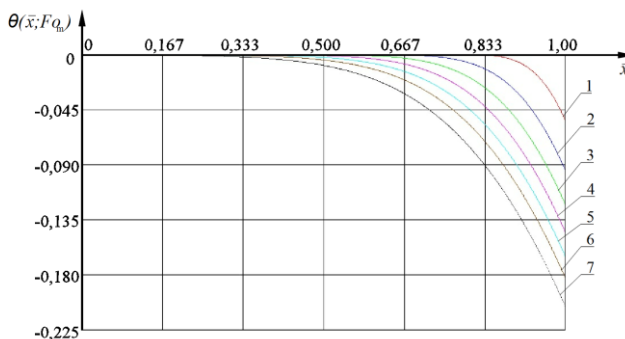


Рис. 7. Профили безразмерных концентраций $Ca(OH)_2$ по толщине образца толщиной 30 мм, при постоянном среднем значении коэффициента массопроводности $k = 2,335 \cdot 10^{-9} (м^2/с)$ и критерия Кирпичева $Ki = 2,03$

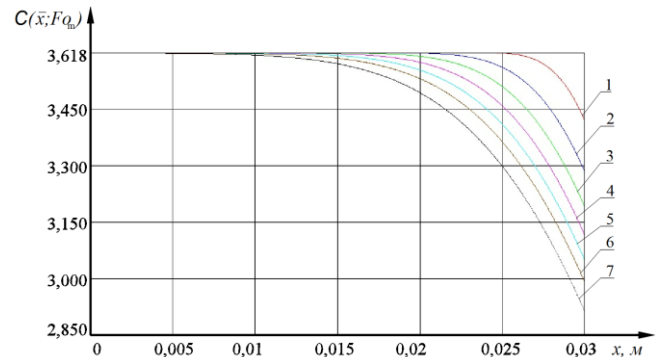


Рис. 8. Профили размерных концентраций $Ca(OH)_2$ по толщине образца толщиной 30 мм, при постоянном среднем значении коэффициента массопроводности $k = 2,335 \cdot 10^{-9} (м^2/с)$ и критерия Кирпичева $Ki = 2,03$

Совместный анализ результатов численного и натурного экспериментов позволяет судить о сходимости полученных данных, что дает возможность использовать разработанную математическую модель и предложенный метод расчета процесса массопереноса при начальном этапе кислотной коррозии цементных бетонов на реальных объектах.

Приведена информация о практическом применении разработанной нами математической модели (1)-(4) при проведении промышленной экспертизы строительных конструкций и сооружений.

В **заключении** приведены итоги выполненного исследования:

1. Проведенный анализ литературных источников показал, что к настоящему времени в строительном материаловедении накоплен большой объем научных данных о коррозионных процессах, протекающих в бетонах: установлены и исследованы принципиальные схемы химических реакций; даны математические описания некоторых коррозионных процессов; создана система нормативных документов по борьбе с коррозией бетона в строительстве. Однако методы математического моделирования на основе законов массопереноса при исследовании процессов коррозии бетона еще не достаточно широко применяются на практике, хотя их преимущества очевидны.

2. Разработана математическая модель массопереноса в процессах кислотной коррозии бетона с учетом химического воздействия жидкой агрессивной среды на уровне феноменологических уравнений для малых значений числа Фурье, позволяющая рассчитать концентрацию переносимого компонента («свободного гидроксида кальция») по толщине конструкции, его содержание в жидкой фазе и среднее по толщине и объему конструкции, а также позволяющая определить время достижения на поверхности бетонной конструкции, критической концентрации «свободного гидроксида кальция», приводящей к началу разложения высокоосновных соединений цементных бетонов. На основе математической модели синтезирована инженерная методика расчета, и разработана компьютерная программа для определения времени завершения начального этапа кислотной коррозии цементного бетона.

3. При теоретических и экспериментальных исследованиях установлены значения коэффициентов массопереноса. Показано, что для рассматриваемой системы значение коэффициента массопроводности находится в диапазоне $2,3 \cdot 10^{-9}$ - $2,5 \cdot 10^{-10}$ ($\text{м}^2/\text{с}$); коэффициент массоотдачи в жидкой фазе – в диапазоне $1,5 \cdot 10^{-8}$ - $3,0 \cdot 10^{-8}$ ($\text{м}/\text{с}$).

4. Общность математического описания позволяет распространить разработанную математическую модель и предложенный метод расчета на другие виды бетонов с учетом, определяемых экспериментально зависимостей коэффициентов массопереноса от структуры и состава бетонов, а также от состава и концентрации агрессивных сред.

5. На основании выполненных исследований разработаны практические рекомендации, которые использованы при проведении промышленной экспертизы строительных конструкций и сооружений, а также технических устройств и материалов, использованы практические рекомендации по мониторингу и повышению коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций. Внедрение результатов научных исследований и предложенных мероприятий технической экспертизы производственных объектов происходило 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». Экономический эффект достигается за счет экономии средств на ремонтные работы и составляет 18,7% от стоимости сметных работ.

Принятые обозначения:

$C(x, \tau)$ – распределение концентрации «свободного гидроксида кальция» в бетоне в момент времени τ , в пересчете на CaO , $\text{кг CaO}/\text{кг}$ бетона; C_A – концентрации агрессивного компонента в объеме жидкой фазы и вблизи поверхности раздела фаз, $\text{кг}/\text{м}^3$; k – коэффициент массопроводности в твердой фазе, $\text{м}^2/\text{с}$; β_c – коэффициент массоотдачи в жидкой среде, $\text{м}/\text{с}$; $q_v(x)$ – источник массы вещества в результате химической реакции, $\text{кг}/(\text{м}^3 \cdot \text{с})$; q_n – плотностью потока массы веществ из бетонов в жидкую среду, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; K – константа скорости химической реакции, с^{-1} ; m – константа равновесия Генри, $\text{кг жидкости}/\text{кг}$ бетона; δ – толщина стенки конструкции, м ; x – координата, м ; τ – время, с ; $\rho_{\text{бет}}$, $\rho_{\text{ж}}$ – плотности бетона и воды, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\theta \bar{x}, F_{O_m} = \frac{C(x, \tau) - C_0}{C_0}$ – безразмерная

концентрация переносимого компонента по толщине бетона; $\bar{x} = x/\delta$ – безразмерная координата; $Fo_m = kt/\delta^2$ – массообменный критерий Фурье; $Po_m^* = q_v \cdot \delta^2 / k \cdot C_0 \cdot \rho_{\text{бет}}$ – модифицированный массообменный критерий Померанцева; $Ki_m = \frac{q_n \delta}{k \cdot C_0 \cdot \rho_0}$ – модифицированный критерий Кирпичева; 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. Нестационарный массоперенос в процессах коррозии второго вида цементных бетонов (малые значения числа Фурье) / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, **Ю.В. Манохина** // Вестник гражданских инженеров. – 2011. – № 1 (26). – С. 104-107.

2. Федосов, С.В. Особенности математического моделирования массопереноса при коррозии бетона второго вида. Решение для малых чисел Фурье / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, М.Е. Шестеркин, **Ю.В. Манохина** // Строительные материалы. – 2012. – № 3. – С. 11-14.

3. Федосова, Н.Л. О некоторых особенностях моделирования массопереноса в процессах коррозии первого вида бетона в замкнутой системе «резервуар-жидкость» / Н.Л. Федосова, В.Е. Румянцева, М.Е. Шестеркин, **Ю.В. Манохина** // Строительство и реконструкция. – 2013. – № 1 (45). – С. 86-94.

4. Каюмов, Р.А. 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.

5. Федосов, С.В. Математическое моделирование процессов коррозионной деструкции цементных бетонов, протекающих по механизму II вида, при малых значениях числа Фурье / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, Н.М. Виталова, **Ю.В. Манохина** // Известия Вузов. Строительство. – 2014. – № 5 (665). – С.21-26.

в других изданиях:

6. Румянцева, В.Е. Роль вяжущего в процессе коррозии бетона / В.Е. Румянцева, М.Е. Шестеркин, **Ю.В. Манохина** // Материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». – Иваново: ИГАСУ, 2010. – С. 538-542.

7. Румянцева, В.Е. Применение математического моделирования при изучении коррозионных процессов цементных бетонов II вида / В.Е. Румянцева, Н.Л. Федосова, Н.С. Касьяненко, **Ю.В. Манохина** // Материалы XVII Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». – Иваново: ИГАСУ, 2010. – С. 533-538.

8. Румянцева, В.Е. Защита бетона от жидкостной коррозии // В.Е. Румянцева, **Ю.В. Манохина** // Материалы III межвуз. науч.-практ. семинара, посвященного 45-летию Ивановского института ГПС МЧС России. «Актуальные вопросы общей и специальной химии». – Иваново: ИИГПС, 2011. – С. 26-31.

9. Федосов, С.В. Математическое моделирование процессов коррозии бетона, протекающей по механизму второго вида в жидких агрессивных средах. Решение для малых значений чисел Фурье // С.В. Федосов, Н.Л. Федосова, В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, **Ю.В. Манохина** / Материалы XVIII Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». – Иваново: ИГАСУ, 2011. – С. 515-519.

10. Федосов, С.В. Массоперенос при жидкостной коррозии I вида цементных композитов // С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **Ю.В. Манохина** / Сб. материалов науч.-техн. конф. к 100-летию со дня рождения профессора А.Ф. Полака. «Проблемы прочности и долговечности бетона и железобетона». – Уфа: УГНТУ. БашНИИстрой, 2011. – С.230-233.

11. Федосов, С.В. Математическое моделирование процессов массопереноса при жидкостной коррозии I и II вида цементных бетонов // С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **Ю.В. Манохина** / Сб. докладов II Междунар. семинара-конкурса молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей. – СПб: Изд-во «АлитИнформ», 2011. – С.115.

12. Шертаев, Е.Т. Актуальные проблемы обеспечения долговечности строительных конструкций // Е.Т. Шертаев, Н.Т. Шертаева, В.Е. Румянцева, Н.Л. Федосова, **Ю.В. Манохина** / Тр.

Междунар. науч.-практ. конф. «Ауезовские чтения-10. 20-летний рубеж: Инновационные направления развития науки, образования и культуры, посвященные 20-летию Независимости Республики Казахстан». – Шымкет, 2011. – С. 150-153

13. Федосов, С.В. Коррозионный массоперенос в гетерогенной системе «жидкая агрессивная среда – цементный бетон» // С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **Ю.В. Манохина** / Сб. материалов IV Академ. чтений, посвященных памяти академика РААСН Г.Л. Осипова, к 20-летию воссоздания РААСН. «Актуальные вопросы строительной физики – энергосбережение, надежность, экологическая безопасность». – М: РААСН, 2012. – С. 119-122.

14. Румянцева, В.Е. Прогнозирование коррозионной стойкости цементных бетонов в жидких агрессивных средах путем математического моделирования процессов массопереноса // В.Е. Румянцева, **Ю.В. Манохина** / Материалы IV межвуз. науч.-практич. семинара. «Актуальные вопросы общей и специальной химии». – Иваново: ИИГПС, 2012. – С. 77-82

15. Федосова, Н.Л. Прогнозирование долговечности строительных материалов / Н.Л. Федосова, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, **Ю.В. Манохина** // Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». – Иваново: ИГАСУ, 2012. – С. 779-788.

16. Федосова, Н.Л. Классификации процессов коррозии в бетоне / Н.Л. Федосова, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, **Ю.В. Манохина** // Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». – Иваново: ИГАСУ, 2012. – С. 852-856.

17. Федосова, Н.Л. 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 // Материалы XIX Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». – Иваново: ИГАСУ, 2012. – С. 775-779.

18. Федосов, С.В. Научные основы математического моделирования коррозионного массопереноса цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, **Ю.В. Манохина** // Сб. докладов III Междунар. семинара-конкурса молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей. – СПб: Изд-во «АлитИнформ», 2012. – С. 93-97.

19. Федосов, С.В. Математическое моделирование процессов массопереноса при жидкостной коррозии I и II видов цементных бетонов // С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, **Ю.В. Манохина** / Сб. докладов III Междунар. семинара-конкурса молодых ученых и аспирантов, работающих в области вяжущих веществ, бетонов и сухих смесей. – СПб: Изд-во «АлитИнформ», 2012. – С.103-113

20. Румянцева, В.Е. Математическое моделирование начальных периодов коррозионного разрушения первого вида цементных бетонов / В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, **Ю.В. Манохина**, В.А. Хрунов // Материалы Междунар. науч.-практ. конф. «Архитектура. Строительство. Образование». – Магнитогорск: Изд-во МГТУ им. Г. И. Носова, 2013. – С. 210-221.

21. Румянцева, В.Е. Разработка математических моделей жидкостной коррозии цементных бетонов на основе теории массопереноса // В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, **Ю.В. Манохина** / Сб. материалов VI Всероссийской науч.-технич. конф. (70 НТК ИГАСУ). «Актуальные вопросы строительства». – Новосибирск: ИГАСУ (Сибстрин), 2013. – С. 226-233.

22. Румянцева, В.Е. Предотвращение аварий зданий и сооружений, вызванных разрушением бетона и железобетона // В.Е. Румянцева, В.А. Хрунов, **Ю.В. Манохина** / Сб. тр. Междунар. науч.-техн. конф. «Разработка эффективных авиационных, промышленных электротехнических и строительных материалов и исследование их долговечности в условиях воздействия различных эксплуатационных факторов». – Саранск: МГУ им. Н.П. Огарева, 2013. – С. 240-244.

23. Румянцева, В.Е. Аспекты математического моделирования процессов коррозии цементных бетонов, протекающих по механизму II вида, при малых значениях числа Фурье // В.Е. Румянцева, Н.С. Касьяненко, **Ю.В. Манохина** / Материалы XXI Междунар. науч.-техн. конф. «Информационная среда вуза». – Иваново: ИГАСУ, Иваново: ИВГПУ, 2014. – С. 553-557.

24. Каюмов, Р.А. Прогнозирование долговечности бетонных и железобетонных резервуаров для хранения нефти методом математического моделирования процессов коррозионной деструкции цементных бетонов // Р.А. Каюмов, В.Е. Румянцева, **Ю.В. Манохина** / Сб. материалов межвуз. науч.-технич. конф. аспирантов и студентов с Междунар. участием. В 2-х томах. «Молодые ученые развитию промышленно-текстильного кластера (ПОИСК-2015)». – Иваново: ИВГПУ, 2015. – Т.2. – С. 261-262.

25. Румянцева В.Е. Некоторые актуальные вопросы процессов коррозии бетона в агрессивных средах // В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, Н.С. Касьяненко, **Ю.В. Манохина** / Сб. материалов XVIII Междунар. науч.-практич. форума. «Физика волокнистых материалов: структура, свойства, наукоемкие технологии и материалы. SMARTEX – 2015». – Иваново: ИВГПУ, 2015. – С. 251-255.

26. Пат. №2495962 Российская Федерация, МПК С23С 22/13 (2006.01). Раствор для холодного фосфатирования стальной арматуры / В.Е. Румянцева, Ю.А. Щепочкина, К.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, М.Е. Шестеркин, Ю.В. Манохина; заявитель и патентообладатель В.Е. Румянцева; заявл. 17.07.2012; опубл. 20.10.2013, Бюл. № 29.

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, профессору

Варваре Евгеньевне Румянцевой.