

**ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**  
**на диссертационную работу Красильникова Игоря Викторовича**  
**«Массоперенос в процессах коррозии бетонов при изменяющихся**  
**параметрах агрессивной среды эксплуатации»**  
**представленную на соискание ученой степени доктора технических**  
**наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия**

**Актуальность темы исследования**

В настоящее время бетон является самым известным и распространенным материалом в строительной индустрии. Многие исследования сфокусированы на расширении комплекса прочностных и антикоррозионных свойств бетона в соответствии со множеством вариантов его применения. Происходящие разрушения в бетоне необратимы и требуют огромных расходов на восстановление. Главным фактором, вызывающим разрушение бетона, является изменение структурно-фазового состава и, как следствие, потеря им прочности из-за действия агрессивной среды, так как около 80 % повреждений обусловлены этим явлением. Синтез физических моделей массообменных процессов при коррозионной деструкции конструктивных элементов, изготовленных из цементных бетонов, эксплуатируемых в разнообразных агрессивных средах необходим для создания цифровых имитационных моделей жизненного цикла строительного объекта, позволит повысить безопасность среды жизнедеятельности человека, а кроме этого, за счет рационального проектирования элементов строительных конструкций, принесет экономический эффект.

Многие исследования посвящены изучению деструкции бетона под воздействием различных сред и разработке способов ослабления и предотвращения коррозионного разрушения бетона. При оценке актуальности диссертационной работы важно знать не только о самой проблеме, но и что нового предполагает внести в ее решение автор.

Все вышеизложенное дает основание утверждать, что научная проблема, сформулированная в диссертации, является актуальной. Автор справился с ее решением, что в дальнейшем позволит объективнее оценивать техническое состояние зданий и сооружений, более рационально подходить к проектированию, снизить затраты на эксплуатацию объектов, повысить уровень безопасности жизнедеятельности, совершенствовать и оптимизировать существующие методы повышения коррозионной стойкости и долговечности бетонных и железобетонных конструкций.

**Структура и содержание работы**

Содержание работы развивается от теоретических построений, обосновывающих выбранные автором теоретические положения и методологию моделирования физико-химических явлений массопереноса для прогнозирования и оценки долговечности бетонов, эксплуатируемых в агрессивных средах с изменяющимися параметрами, к примерам расчета динамики и кинетики массопереноса при газовой, жидкостной и биологической коррозии бетона.

Представленная на отзыв диссертационная работа Красильникова И.В., состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы и 10 приложений. Полный объем работы составляет 418 страниц, в том числе, 40 таблиц и 125 рисунков. Список литературы содержит 441 наименование отечественных и зарубежных изданий.

Во введении обосновывается актуальность решаемой в диссертации проблемы, выбор направлений исследования, сформулированы научная гипотеза и цель работы, поставлены задачи исследования, приведены научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, степень достоверности, публикации и апробация результатов.

В первой главе представлен расширенный литературный обзор по проблемам коррозии бетона, приведено большое количество существующих моделей по оценке долговечности бетона с обозначением их недостатков и принятых допущений. Предложена структурно-методологическая схема исследований, базирующаяся на последовательной идентификации и выявлении наиболее принципиальных отличий условий эксплуатации, влияющих на процессы массопереноса при эксплуатации конструкции.

Во второй главе рассмотрены факторы, определяющих физико-химические явления массопереноса в структуре бетона при воздействии на него агрессивной окружающей среды. Формулируется новый методологический подход к моделированию физико-химических гетерогенных процессов нестационарного массопереноса при коррозии бетона в агрессивной среде с изменяющимися параметрами.

В третьей главе рассмотрены физико-математические модели нестационарного взаимосвязанного массопереноса целевого и агрессивного компонентов для системы «цементный бетон – воздушная агрессивная среда» с изменяющимися параметрами агрессивной среды эксплуатации. Показано, что массоперенос в структуре конструкции, при воздействии агрессивных веществ воздуха может развиваться по трем расчетным схемам (односторонний, двусторонний симметричный и двусторонний асимметричный). Для каждого случая на рассматриваемом микропроцессе получено по два варианта аналитического решения (при больших и малых

значениях критерия Фурье).

В четвертой главе рассмотрен нестационарный взаимосвязанный массоперенос целевого и агрессивного компонентов для системы «цементный бетон – жидкая агрессивная среда» с изменяющимися параметрами агрессивной среды эксплуатации, лимитируемый внутренней диффузией, внешней массоотдачей и химическим взаимодействием гидроксида кальция с агрессивными компонентами в капиллярно-пористой структуре бетона. Отдельно изучен массоперенос свободного гидроксида кальция в процессах коррозии бетона в замкнутой системе «емкостное железобетонное сооружение – жидкая агрессивная среда».

Пятая глава посвящена исследованию нестационарного массопереноса в среде с переменными потенциалами и коэффициентами переноса по толщине конструкции. Автором разработан новый подход к решению нелинейной краевой задачи нестационарного массопереноса в среде с переменными потенциалами и коэффициентами переноса на базе численно-аналитического метода микропроцессов, с дополнительным разделением конструкции на участки условно-постоянного коэффициента массопроводности. Применение данного подхода значительно повышает точность расчетов динамики и кинетики нестационарных массообменных процессов для систем «жидкая агрессивная среда – цементный бетон», «воздушная агрессивная среда – цементный бетон», «жидкая агрессивная среда – нарастающая биопленка – цементный бетон».

В шестой главе излагаются длительных лабораторных экспериментов, которыми исследовано влияние температуры на кинетику и динамику нестационарного массопереноса в замкнутой системы «цементный камень – жидкость», изучена коррозия цементного камня в водном растворе соляной кислоты, исследованы особенности массопереноса в системе «гидрофобизированный цементный камень – водный раствор хлорида магния». Для всех рассматриваемых систем определены коэффициенты массопроводности и массоотдачи, интенсивности объемного выделения (поглощения) свободного гидроксида кальция. Разработан метод определения массообменных характеристик цементных бетонов, с учетом перенасыщенности раствора пор гидроксидом кальция.

В седьмой главе приведены некоторые результаты внедрения и практического применения разработанных математических моделей при проектировании железобетонных конструкций, обосновано применение бетона различных марок по водонепроницаемости по толщине конструктивных элементов.

В заключении сформулированы основные результаты и общие выводы по результатам выполненной в диссертации работы.

В целом автором получены существенно новые результаты исследований в области строительного материаловедения по проблемам разработки математических моделей физико-химических, биологических и тепломассообменных процессов, оптимизирующих параметры структуры и свойства строительных материалов и изделий на основе цементных бетонов; разработке и развитию теории разрушения композиционных строительных материалов под действием различных эксплуатационных факторов; разработке новых и совершенствование существующих методов повышения стойкости строительных материалов, изделий и конструкций в условиях воздействия химических и биологических агрессивных сред на всех этапах жизненного цикла; разработке методов прогнозирования и оценки долговечности строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации.

### **Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

В работе поставлена цель исследования, которая направлена на развитие и совершенствование методов моделирования нестационарного массопереноса при физико-химических процессах взаимодействия бетона с жидкими, газовыми и биологически активными агрессивными средами с изменяющимися параметрами и свойствами материала для прогнозирования и оценки надежности и долговечности бетонных и железобетонных конструкций.

Для достижения поставленной цели в диссертации поставлены и решены следующие задачи:

1) изучен и проанализирован современный уровень научных представлений о физико-химических процессах при жидкостной, газовой и биологической коррозиях бетона, в том числе аналитические модели оценки долговечности бетона и процессов массопереноса, сформулирована проблема, решение которой внесет вклад в развитие инженерных методик расчета при эксплуатации бетонных и железобетонных конструкций;

2) разработаны физико-математические модели нестационарного массопереноса целевого (свободного гидроксида кальция) и агрессивного компонентов при взаимодействии бетона с газовой, жидкой и биологически активной агрессивными средами, с учетом изменяющихся в процессе эксплуатации параметров среды и характеристик бетона, которые позволят прогнозировать динамику (т.е. изменение профиля массосодержаний по толщине конструкции во времени) и кинетику процесса (т.е. изменение во времени общего количества переносимого вещества);

3) выполнены численные эксперименты, которые в безразмерных переменных, при различных соотношениях параметров процесса, отраженных в массообменных критериях подобия (Фурье, Био, Кирпичева, Померанцева) для наиболее распространенного интервала их значений показали динамику и кинетику нестационарного массопереноса при физико-химических процессах взаимодействия бетона с жидкими, газовыми и биологически активными агрессивными средами;

4) проведены экспериментальные исследования динамики и кинетики жидкостной коррозии бетонов с целью установления адекватности предлагаемых математических моделей (верификация математических моделей) и разрабатываемых инженерных методов расчета;

5) на основе полученных экспериментальных данных определены числовые значения исходных параметров процесса и установлены эмпирические законы изменения коэффициентов массопроводности, массоотдачи, интенсивности внутреннего источника массы, параметров равновесия на границе раздела твердой и жидкой фаз, в зависимости от исходного состава бетонной смеси, массосодержания свободного гидроксида кальция и температуры;

6) разработаны и обоснованы рекомендации по совершенствованию существующих методов повышения коррозионной стойкости и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, реализованы результаты исследований на проектируемых, строящихся и эксплуатируемых объектах.

Красильниковым И.В. сформулированы и разработаны следующие научные положения, позволяющие достигнуть поставленную цель:

- обоснована и разработана методология математического моделирования физико-химических явлений массопереноса для прогнозирования и оценки долговечности бетонов, эксплуатируемых в агрессивных средах с изменяющимися параметрами, на основе нелинейного дифференциального уравнения нестационарной массопроводности параболического типа с объемным источником массы вещества в твердой фазе, произвольным видом функции начального распределения массосодержаний и вариативными граничными условиями;

- предложен комбинированный подход к решению нелинейной краевой задачи нестационарного массопереноса в среде с переменными потенциалами основанный на сочетании аналитического метода интегрального преобразования Лапласа и численного методов анализа микропроцессов. При моделировании нестационарного массопереноса в процессах коррозии бетонов при изменяющихся параметрах агрессивной среды эксплуатации, предложено разбить жизненный цикл конструкции на небольшие временные интервалы с постоянными параметрами процесса;

- разработаны математические модели нестационарного массопереноса в процессах коррозии для системы «цементный бетон – воздушная агрессивная среда» с изменяющимися параметрами агрессивной среды эксплуатации, необходимые для оценки долговечности железобетонных конструкций, эксплуатируемых в газовых средах: диффузии агрессивного компонента по толщине конструкции при одностороннем и двухстороннем асимметричном воздействии среды, при больших и малых значений массообменного критерия Фурье, переноса гидроксида кальция по толщине конструкции при его химическом взаимодействии с агрессивным компонентом;

- сформулирована и решена краевая задача нестационарного массопереноса для системы «цементный бетон – жидкая агрессивная среда» с изменяющимися параметрами агрессивной среды эксплуатации, позволяющая рассчитывать массосодержания целевого (свободного гидроксида кальция) и агрессивного компонентов в бетоне при жидкостной коррозии первого, второго и третьего видов, тем самым прогнозировать долговечность бетонов;

- на уровне феноменологических уравнений разработана физико-математическая модель нестационарного массопереноса свободного гидроксида кальция в замкнутой системе «емкостное железобетонное сооружение – жидкая агрессивная среда» при жидкостной коррозии цементных бетонов, с учетом наличия объемных источников выделения (поглощения) свободного гидроксида кальция. Получены аналитические решения задачи нестационарного массопереноса в условиях ограниченного объема жидкости, позволяющие рассчитывать распределение массосодержаний по толщине бетонной стенки емкостного сооружения и концентрацию растворенного гидроксида кальция в жидкости, тем самым прогнозировать динамику и кинетику деструктивных процессов железобетонных конструкций при жидкостной коррозии;

- предложена методология расчета динамики и кинетики нестационарных массообменных процессов, при различных видах коррозии (жидкостная, газовая, биологическая и др.), в среде с переменными потенциалами и коэффициентами переноса по толщине конструкции, синтезированная из методов микропроцессов, зонального и интегрального преобразования Лапласа;

- разработана новая методика определения параметров массообменных процессов при взаимодействии бетона с различными агрессивными средами, с помощью которой из результатов проведенных экспериментальных исследований установлены эмпирические законы изменения коэффициентов массопроводности, массоотдачи, интенсивности внутреннего источника массы, параметров равновесия на границе раздела твердой и жидкой фаз, в зависимости от исходного состава бетонной смеси, массосодержания

свободного гидроксида кальция и температуры;

- для нестационарного массопереноса в гетерогенных системах коррозии «жидкая агрессивная среда – цементный бетон», «воздушная агрессивная среда – цементный бетон», «жидкая агрессивная среда – нарастающая биопленка – цементный бетон» аналитически и графически установлены кинетические зависимости потоков переносимых компонентов (гидроксида кальция и агрессивных веществ), которые позволяют прогнозировать и оценивать по критическим концентрациям время начала гидролиза высокоосновных соединений цементного камня и достижения агрессивным компонентом поверхности арматуры железобетонных конструкций;

- теоретически и экспериментально показано соответствие методологии моделирования, принятых расчетных схем, допущений и аналитических решений реальным физическо-химическим процессам коррозии цементного бетона, что дает возможность определения моментов времени достижения характерных массосодержаний свободного гидроксида кальция в твердой фазе, соответствующей началу разложения высокоосновных минералов цементного камня бетона и оценивать уменьшение механических характеристик бетона;

- на основе разработанных математических моделей и полученных экспериментальных данных предложено оптимизировать структуру железобетонных конструкций, используя бетоны низкой проницаемости только защитном слое, находящемся в контакте с агрессивной средой. Проведенные расчеты диффузии целевого компонента показывают значительное снижение интенсивности процессов коррозии данного конструктивного решения.

Для решения поставленных задач автор достаточно корректно использует известные научные методы обоснования полученных результатов, выводов и рекомендаций. Красильниковым И.В. изучены и критически проанализированы известные теоретические и практические достижения других авторов по вопросам коррозионной деструкции бетонов в средах различной степени агрессивности.

Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечена:

- проведением исследований с использованием современных физических, физико-химических и химических методов анализа; применением методик, регламентированных действующими стандартами; применением поверенного оборудования и математической обработкой данных;

- соответствием полученных экспериментальных данных физико-химическим представлениям о процессе массопереноса при коррозионной деструкции и результатам проведенных исследований других авторов;

- верификацией методологии расчета предложенным численно-аналитическим способом, расчетных схем, уравнений, характеристик процесса для систем «цементный бетон - воздушная агрессивная среда», жидкостной «цементный бетон - жидкая агрессивная среда», биологической «цементный бетон - нарастающая биопленка - жидкая агрессивная среда», доказавшей их соответствие реальному физическо-химическому процессу нестационарного массопереноса;

- успешным внедрением результатов исследований в проектно-изыскательских организациях (ООО «ИСО-Инжиниринг» (г. Москва), ООО «Геопроект» (г. Иваново), ЗАО «Творческая мастерская «Ивремстрой» (г. Иваново)) и на производственных объектах (ОАО Череповецкий «Аммофос» (г. Череповец, Вологодская обл.) , ООО «Балаковские минеральные удобрения» (г. Балаково, Саратовская обл.), АО «Железобетон» (г. Иваново)).

Следует отметить, что диссертационное исследование Красильникова И.В. является логическим продолжением и выполнено в русле научных работ научной школы академика РААСН С.В. Федосова.

### **Достоверность и новизна научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность полученных диссертантом теоретических положений подтверждается использованием фундаментальных положений теории тепломассопереноса, строгой и корректной постановкой задач, четкостью математических формулировок, применением известных многократно апробированных аналитических и численных методов решения краевых задач и подтверждается большим объемом экспериментальных результатов, которые согласованы с известными научными теориями процессов коррозии. Следует так же отметить четкость и логичность при изложении материала диссертационной работы. Диссертация и автореферат изложены хорошим научным языком с малым содержанием опечаток и орфографических ошибок. Хочется отметить, автор сделал обширный литературный обзор, список литературы насчитывает 441 наименований, как отечественных, так и зарубежных авторов.

Главным практическим результатом диссертационной работы является разработка экономически рациональных рекомендаций по повышению долговечности цементных бетонов позволили разработать эффективные мероприятия по обеспечению долговечности и защите бетонных и железобетонных конструкций от коррозии; оптимизировать структуру железобетонных конструкций, не снижая их долговечности уменьшить



себестоимость.

Расчетами показан немалый экономический эффект от внедрения результатов научных исследований и предложенных мероприятий по предотвращению коррозионной деструкции армированных бетонов.

### **Публикации, отражающие основное содержание работы**

Все основные результаты диссертации, выносимые автором на защиту, опубликованы в ведущих рецензируемых научных журналах, внесенных в перечень журналов и изданий, утвержденных ВАК РФ, а также докладывались на научных конференциях международного и всероссийского уровня. По теме диссертации опубликовано 97 работ, в том числе 9 статей в изданиях, индексируемых в международных базах данных Web of Science, Scopus; 26 научных статей в изданиях, рекомендуемых ВАК Минобрнауки РФ; опубликована 1 монография.

### **Замечания по диссертационной работе**

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В проведенных экспериментальных исследованиях рассматривали цементный бетон, полученный из портландцемента только одной марки – ЦЕМ I 42,5 (М500). Однако, логичным было рассмотреть цементные бетоны, полученные на основе различных марок цемента и изучить влияние марки цемента на характеристики массообменных процессов при различных видах коррозии.

2. Можно ли распространить предлагаемые математические модели нестационарного массопереноса свободного гидроксида кальция и агрессивного компонента для системы «цементный бетон – жидкая агрессивная среда» на цементные бетоны, полученные на основе других марок цемента?

3. В представленных экспериментальных данных не представлено определение вида и размера пор в испытываемых образцах? Как это учитывается и объясняется в рамках предлагаемого математического моделирования?

4. Реальный физическо-химический процесс коррозии цементного бетона, состоит из ряда последовательных и параллельных микропроцессов. Установлено ли каким образом происходит деление на «микропроцессы»? Что дает возможность определения моментов времени достижения характерных массосодержаний свободного гидроксида кальция в твердой фазе, соответствующей началу разложения высокоосновных минералов цементного камня бетона и как при этом оценивать уменьшение механических характеристик бетона?

**Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней**

По тематике, предмету, научной новизне и методам исследования диссертация Красильникова Игоря Викторовича соответствует паспорту специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия, в том числе направлениям исследований: «2. Разработка математических моделей физико-механических, физико-химических, биологических, гидромеханических и тепломассообменных процессов, оптимизирующих параметры структуры, режимы изготовления и свойства строительных материалов и изделий. 4. Разработка и развитие теории формирования прочности и разрушения композиционных строительных материалов под действием различных эксплуатационных факторов. 10. Разработка новых и совершенствование существующих методов повышения стойкости строительных материалов, изделий и конструкций в условиях воздействия физических, химических и биологических агрессивных сред на всех этапах жизненного цикла. 11. Разработка методов прогнозирования и оценки долговечности строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации».

В соответствии с п. 9 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г.) диссертационная работа Красильникова Игоря Викторовича оценивается как научно-квалификационная работа, в которой содержится решение задачи по формированию научных основ и экспериментальных обоснований совершенствования методов моделирования нестационарного массопереноса при физико-химических процессах взаимодействия бетона с жидкими, газовыми и биологически активными агрессивными средами с изменяющимися параметрами и свойствами материала для прогнозирования и оценки надежности и долговечности бетонных и железобетонных конструкций.

Представленные в работе исследования достоверны, выводы и рекомендации обоснованы. По объему, новизне и значимости полученных

результатов диссертационная работа Красильникова Игоря Викторовича на тему: «Массоперенос в процессах коррозии бетонов при изменяющихся параметрах агрессивной среды эксплуатации» удовлетворяет требованиям ВАК Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, предъявляемым к диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук, а ее автор – Красильников Игорь Викторович, заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия.

### **Официальный оппонент**

профессор кафедры «Химия и химическая технология материалов»  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования "Воронежский государственный технический  
университет (ВГТУ)",

д.т.н. (05.23.05. – Строительные материалы и изделия),

доцент



Артамонова Ольга Владимировна

20.12.2023

Почтовый рабочий адрес:

394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84

Мобильный телефон: 8-920-218-03-30

Рабочий телефон: 8 473 271-76-17,

Электронная почта: ol\_artam@rambler.ru

Подпись Артамоновой О.В.

заверяю, проректор по науке и инновациям

ФГБОУ ВО «Воронежского государственного

технического университета»



Алексей Викторович

Башкиров