

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

д.т.н., профессора Несветаева Григория Васильевича  
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**

Долговечность железобетонных конструкций при их контакте с различными агрессивными средами в значительной степени зависит от интенсивности коррозионного массопереноса, а многообразие факторов, влияющих на сложный физико-химический процесс, особенно при изменяющихся параметрах агрессивной среды, усложняет выявление закономерностей развития коррозионных процессов и деградации бетона, в связи с чем исследования закономерностей процессов массопереноса в указанных условиях весьма актуальны для прогноза долговечности железобетонных конструкций, поэтому актуальность диссертационной работы Красильникова Игоря Викторовича сомнений не вызывает.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования динамики и кинетики массопереноса в поровой структуре бетона и закономерностей развития коррозионных процессов с целью прогнозирования долговечности и надежности железобетонных конструкций актуальны как с научной, так и с практической точек зрения. Обоснованный выбор способов первичной защиты железобетонных конструкций от коррозии на стадии проектирования позволит значительно сократить экономический ущерб, повысить надежность конструкций, снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций. Физико-математические модели массообменных процессов в железобетонных конструкциях, эксплуатируемых в воздушных, жидких и биологических агрессивных средах обеспечивают возможность создания цифровых имитационных моделей жизненного цикла строительного объекта на этапе эксплуатации.

Все вышеизложенное дает основание утверждать, что исследования, которым посвящена диссертационная работа Красильникова И.В., являются актуальными, важными и значимыми для соответствующих областей науки, промышленности и строительства.

### **Общая характеристика, структура и содержание работы**

Диссертация 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 из 441 наименования.

Структура работы согласуется с целью и задачами диссертационного исследования.

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, сведения о публикациях, апробации и внедрении результатов исследования.

**В первой главе** проведен литературный обзор по тематике исследования. Описаны классификации коррозионных процессов в бетоне и физико-химические особенности наиболее распространенных видов коррозии. Приведены существующие физико-математические модели процессов коррозии и оценки стойкости бетонов, в том числе показано, что изменяющиеся параметры агрессивной среды эксплуатации в достаточной мере не учитывает ни одна модель. 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** выполнена систематизация факторов, определяющих физико-химические явления массопереноса в структуре бетона при эксплуатации. Формулируется новый методологический подход к моделированию физико-химических гетерогенных процессов нестационарного массопереноса при коррозии бетона в агрессивной среде с изменяющимися параметрами и предлагается комбинированный метод решения нелинейных задач массопереноса.

**В третьей главе** смоделирован нестационарный массоперенос целевого и агрессивного компонентов для системы «цементный бетон – воздушная агрессивная среда» с изменяющимися параметрами агрессивной среды эксплуатации. Отдельно рассмотрен массоперенос агрессивного компонента в капиллярно-пористой структуре бетона при одностороннем и двухстороннем воздействии среды и изучены закономерности изменения массосодержания свободного гидроксида кальция в капиллярно-пористой структуре бетона при его взаимодействии с агрессивным компонентом. Решение каждой задачи, с учетом принятого разделения на микропроцессы, получено для больших и малых значений массообменного критерия Фурье. Выполнена проверка адекватности разработанных математических моделей на основе экспериментальных данных из литературных источников.

**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. Дополнительно выполнено моделирование нестационарного массопереноса в замкнутой системе типа «емкостное железобетонное сооружение – жидкая агрессивная среда», необходимое для прогнозирования долговечности резервуаров хранения жидкостей, некоторых конструкций гидротехнических сооружений и лабораторных исследований массопереноса гетерогенной системы «цементный бетон - жидкая агрессивная среда», которые, как правило, проходят в условиях стационарных жидкостей с замкнутой системой.

**В пятой главе** 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 позволяет учитывать изменения параметров массопереноса, зависящих от многих факторов, в том числе от массосодержания целевого и агрессивного компонентов и температуры. Возможность дифференцировать коэффициенты переноса по толщине конструкции в рамках даже одного микропроцесса значительно повышает точность расчетов динамики и кинетики нестационарных массообменных процессов при коррозии бетона.

**В шестой главе** приведены результаты длительных лабораторных исследований влияния 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». Предложен численный метод решения нелинейного дифференциального уравнения нестационарной массопроводности для определения массообменных характеристик цементных бетонов, с учетом перенасыщенности раствора пор гидроксидом кальция, с помощью которого определены значения коэффициента массопроводности и интенсивности объемного выделения (поглощения) свободного гидроксида. Установлены аппроксимирующие эмпирические выражения для коэффициентов массопроводности и массоотдачи, интенсивности объемного выделения (поглощения) свободного гидроксида кальция.

**В седьмой главе** представлена реализация математических моделей нестационарного массопереноса при коррозии бетона для расчета долговечности железобетонных конструкций резервуаров для длительного хранения воды. Продемонстрирована реализация методологии решения нелинейной краевой

задачи нестационарного массопереноса для системы «жидкая агрессивная среда – цементный бетон» в среде с переменными потенциалами и коэффициентами переноса при проектировании железобетонных днища и стенок башенной градирни. Выполнен расчет кинетики изменения концентраций гидроксида кальция и коэффициента стойкости бетона на протяжении 60 лет эксплуатации на поверхности конструкции и на границе защитного слоя арматуры конструкций перекрытия отбельного цеха отделочного производства тканей

**В заключении** сформулированы основные выводы и результаты исследования.

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

Автор диссертационной работы в исследованиях опирается на целенаправленный анализ источников как отечественной, так и зарубежной науки в области долговечности конструкций из бетона и железобетона и процессов массопереноса в капиллярно-пористых телах при их взаимодействии с жидкими и газовыми средами. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, достаточно обоснованы, подкреплены теоретическими и экспериментальными исследованиями. Автором достаточно полно реализован комплексный подход при решении поставленных задач.

Для прогнозирования и оценки долговечности бетонных и железобетонных конструкций с учетом фактических или проектных изменений условий эксплуатации на протяжении всего жизненного цикла, автором предложена и обоснована методология физико-математического моделирования нестационарного массопереноса целевого (гидроксида кальция) и агрессивного компонентов при изменяющихся параметрах агрессивной среды эксплуатации. В диссертации Красильникова И.В. разработаны физико-математические модели нестационарного массопереноса целевого (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, что особенно важно, характеристик бетона, которые позволят прогнозировать как динамику, так и кинетику исследуемого процесса.

Математическое моделирование нестационарного массопереноса в поровой структуре бетонов при процессах коррозии в условиях изменяющихся параметрах агрессивной среды эксплуатации выполнено на основе математического аппарата методов математической физики, включающих теорию операционного исчисления, метод интегрального преобразования Лапласа, теории тепломассопереноса, метод микропроцессов академика РААСН С.В. Федосова. Сформированные в работе научные положения, выводы и

рекомендации не противоречат общепринятым теоретическим положениям строительного материаловедения и результатам исследований российских и зарубежных авторов. Их обоснованность не вызывает сомнений и подтверждается достаточным объемом исследований с использованием современных методов и инструментальных средств измерения, программных комплексов в соответствии с российскими стандартами. Диссертационная работа построена методически рационально, а решение научной проблемы выполнено на высоком научном и профессиональном уровне.

Результаты теоретических и экспериментальных исследований прошли апробацию в рамках российских и международных научно-технических конференций. Обоснованность и достоверность выводов и рекомендаций подтверждается также большим количеством публикаций в журналах, индексируемых в системах цитирования РИНЦ, ВАК, RSCI, Web of Science, Scopus.

Изложенное выше позволяет констатировать, что основные научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, в достаточной мере обоснованы.

#### **Новизна и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций**

Научная новизна диссертационного исследования Красильникова Игоря Викторовича заключается в следующем:

- предложен новый методологический подход для математического моделирования физико-химических явлений массопереноса при прогнозировании и оценки долговечности бетонов, эксплуатируемых в агрессивных средах с изменяющимися параметрами, базирующаяся на нелинейном дифференциальном уравнении нестационарной массопроводности параболического типа с объемным источником массы вещества в твердой фазе, произвольным видом функции начального распределения массосодержаний и вариативными комбинациями граничных условий;
- предложен оригинальный подход к решению нелинейной краевой задачи нестационарного массопереноса в среде с переменными потенциалами основанный на сочетании аналитического метода интегрального преобразования Лапласа и численных методов анализа микропроцессов;
- предложено разбить жизненный цикл конструкции на небольшие временные интервалы с постоянными параметрами процесса при моделировании нестационарного массопереноса в процессах коррозии бетонов при изменяющихся параметрах агрессивной среды эксплуатации;
- созданы и апробированы 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;
- создана и апробирована 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;
- синтезирована из методов микропроцессов, зонального и интегрального преобразования Лапласа 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;
- разработан метод определения параметров массообменных процессов при взаимодействии бетона с различными агрессивными средами, с помощью которого из результатов проведенных экспериментальных исследований установлены эмпирические законы изменения коэффициентов массопроводности, массоотдачи, интенсивности внутреннего источника массы, параметров равновесия на границе раздела фаз, в зависимости от массосодержания свободного гидроксида кальция и температуры;
- аналитически и графически установлены кинетические зависимости потоков переносимых компонентов (гидроксида кальция и агрессивных веществ) при коррозионном нестационарном массопереносе в гетерогенных системах «жидкая агрессивная среда – цементный бетон», «воздушная агрессивная среда – цементный бетон», «жидкая агрессивная среда – нарастающая биопленка –

цементный бетон», которые позволяют прогнозировать и оценивать по критическим концентрациям время начала гидролиза высокоосновных соединений цементного камня и достижения агрессивным компонентом поверхности арматуры железобетонных конструкций.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечена научно-обоснованной стратегией теоретических, аналитических и экспериментальных исследований.

Выполненные автором верификации математических моделей показали 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 изменение прочностных и деформационных 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.

Параметрическая идентификация моделей проведена с использованием комплекса стандартных физико-химических методов анализа. Экспериментальные исследования массопереноса при жидкостной коррозии цементного камня проводились с использованием общепринятых физико-химических методов оценки свойств жидкой и твердой фаз, с применением стандартных методов и методик ГОСТ. Обработка экспериментальных данных осуществлялась методами статистической обработки и математической аппроксимации.

Сформулированные автором научные положения, выводы и практические рекомендации, выносимые на защиту, базируются на большом количестве экспериментальных исследований, выполненных на современном лабораторном и промышленном оборудовании. Обработка экспериментальных данных осуществлялась методами математической аппроксимации, численный эксперимент поставлен с использованием методов математического моделирования процессов, апробированных в теории тепломассопереноса. Как итог, в работе имеет место хорошее согласование экспериментальных и расчетных данных в пределах допустимой погрешности.

#### **Значение диссертации для науки и практики**

В работе приведены результаты разностороннего анализа и созданы основы для развития теоретических и прикладных вопросов прогнозирования и оценки долговечности бетонных и железобетонных конструкций с учетом фактических

или проектных изменений условий эксплуатации на протяжении всего жизненного цикла на основе разработки и применения математических моделей процессов нестационарного массопереноса целевого (гидроксида кальция) и агрессивного компонентов при взаимодействии конструкций из цементных бетонов с агрессивными средами.

Изложены разработанные автором научные положения и результаты теоретических и экспериментальных исследований, совокупность которых позволяет считать её существенным научным достижением, имеющим фундаментальный характер, поскольку внедрение в современную науку и строительную практику методов моделирования нестационарного массопереноса при физико-химических процессах взаимодействия бетона с жидкими, газовыми и биологически активными агрессивными средами с изменяющимися параметрами и свойствами материала создает основы нового направления в прикладной науке.

В диссертации изложены проблемы методологии, сформулирована концепция, разработаны научные положения и приведены результаты исследований массопереноса в процессах коррозии бетонов при изменяющихся параметрах агрессивной среды эксплуатации, необходимые как для прогнозирования и оценки надежности и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, так и для оптимизации их структуры.

Практическая значимость состоит в создании основанных на разработанных математических моделях долговечности бетона алгоритмов расчета железобетонных конструкций, рекомендациях по совершенствованию и оптимизации существующих методов повышения коррозионной стойкости и долговечности бетонных и железобетонных конструкций. Результаты исследований реализованы на проектируемых, строящихся и эксплуатируемых объектах. Результаты исследований успешно внедрены в проектно-исследовательских организациях: ООО «ИСО-Инжиниринг» (г. Москва), ООО «Геопроект» (г. Иваново), ЗАО «Творческая мастерская «Ивремстрой» (г. Иваново); а также на опасных производственных объектах: ОАО Череповецкий «Аммофос» (г. Череповец, Вологодская обл.), ООО «Балаковские минеральные удобрения» (г. Балаково, Саратовская обл.); предприятию строительной индустрии АО «Железобетон» (г. Иваново).

### **Замечания по содержанию и оформлению диссертационной работы**

По диссертационной работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В табл. 1.3 и табл. 6.2 диссертации представлены названия минералов клинкера, например, алит, но приведены формулы гидратированных минералов. К тому же, гидросиликаты кальция, например, по Тейлору, включают несколько групп с различной степенью основности. Насколько это может повлиять на результаты, представленные в работе?



2. В табл. 3.4 и 3.5 диссертации представлены данные о бетонах, имеющих практически одинаковые показатели пористости как бетона, так и цементной матрицы, но различающиеся по величине коэффициента диффузии более чем в 2 раза. Чем обусловлено такое различие?

3. По рис. 1.2 и табл. 2.1 – целесообразно было бы на основе данных Ф.М. Иванова и В.М. Москвина получить аналитическую зависимость изменения прочности бетона от изменения концентрации гидроксида кальция для применения при решении задач.

4. Перекристаллизация высокоосновных гидросиликатов кальция с выделением гидроксида кальция начинается при снижении показателя рН ниже некоторых значений. На практике оценка коррозионного повреждения часто производится именно по величине рН. Было бы целесообразно рассмотреть вопросы взаимосвязи изменения рН с изменением концентрации гидроксида кальция.

5. Чистоклинкерные и цементы с АМД изначально имеют различную концентрацию гидроксида кальция. Насколько это может отразиться на расчетном аппарате?

6. В табл. 6.6 диссертации полный объем пор и водопоглощение по массе цементного камня не соответствуют друг-другу.

7. В работе встречаются термины «свободный гидроксид кальция» и «гидроксид кальция». В чем разница?

Высказанные замечания не влияют на общее положительное впечатление от рецензируемой работы, выполненной на весьма высоком научном и методологическом уровне, и не снижают научную и практическую значимость диссертационной работы. Диссертация хорошо структурирована, логически соответствует достижению поставленных целей, хорошо иллюстрирована, изложена терминологически грамотным языком.

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

Актуальность, научная новизна и достоверность основных выводов и научных положений диссертации, научная ценность и практическая значимость диссертационной работы Красильникова И.В. несомненны и обоснованны. Диссертация соответствует требованиям «Положения...» ВАК к докторским диссертациям по рассматриваемой специальности. Высказанные замечания не носят критический характер и не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, выполненной на высоком научно-методологическом уровне.

Автореферат составлен с соблюдением установленных требований, а его содержание отражает основные разделы и положения диссертации. Результаты проведенных исследований в должной мере опубликованы.

Содержание диссертации является последовательным и логичным, разделы являются необходимыми и достаточными для достижения поставленной цели и решаемых задач. Работа является самостоятельным научным трудом, соответствующим по стилю написания и содержанию диссертационным работам. Выводы по диссертации доказательны, вытекают из результатов проведенных научных исследований.

Проведенный анализ диссертационной работы Красильникова Игоря Викторовича позволяет сделать вывод о том, что работа соответствует всем критериям п. 9-11, 13, 14 «Положения о порядке присуждения учёных степеней», утверждённого Постановлением Правительством РФ от 24.09.2013г. № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук, и в соответствии с п.9 «Постановления...» в ред. от 26.10.2023 является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны.

На основании вышеизложенного считаю, что автор диссертации Красильников Игорь Викторович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия.

Официальный оппонент,  
 профессор кафедры «Технология строительного производства»  
 Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
 высшего образования «Донской государственный технический университет»,  
 доктор технических наук (05.23.05 - Строительные материалы и изделия),  
 профессор

25.01.2024

Несветаев Григорий Васильевич

Почтовый рабочий адрес:  
 344000, г. Ростов-на-Дону, Площадь Гагарина д.1  
 Тел.: 89604426959  
 E-mail: nesgrin@yandex.ru

Подпись Несветаева Г.В. заверяю:  
 Ученый секретарь Ученого совета  
 ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет»

Анисимов Владимир Николаевич