

На правах рукописи



Евсяков Артем Сергеевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОЛЬМАТАЦИИ НА
МАССООБМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ ПРИ
ЖИДКОСТНОЙ КОРРОЗИИ ЦЕМЕНТНЫХ БЕТОНОВ**

05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иваново – 2021

Работа выполнена на кафедре естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет»

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

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

Блиничев Валерьян Николаевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры технологических машин и оборудования ФГБОУ ВО «Ивановский государственный химико-технологический университет».

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

Защита состоится «18» июня 2021 г. в 13:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.355.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, г. Иваново, Шереметевский пр-т, 21, ауд. У-109.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Ивановского государственного политехнического университета www.ivgpu.com

Автореферат разослан « » 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Н.В. Заянчуковская

Научный консультант советник РААСН, доктор технических наук, профессор, директор Института информационных технологий, естественных и гуманитарных наук, заведующий кафедрой естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет» Варвара Евгеньевна Румянцева

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. На изучение коррозии бетона и железобетона и борьбу с ней направлены исследования многих ученых в последние 70 лет. С целью предотвращения коррозионного разрушения предложены различные рекомендации по повышению коррозионной стойкости и долговечности бетонов путем рационального выбора вяжущего и заполнителей; предложены комплексы добавок, улучшающих эксплуатационные характеристики бетонов; разработаны математические модели, прогнозирующие долговечность бетонов в зависимости от агрессивности среды и описывающие процессы массопереноса в капиллярно-пористых телах.

Для оценки глубины коррозионного повреждения предложены различные уравнения для прогнозирования стойкости бетона в агрессивной среде. Эти уравнения учитывают скорость коррозии бетона в начальный период, скорость гетерогенных реакций и характер контроля (кинетический или диффузионный), кинетику внутреннего диффузионного процесса с постоянным коэффициентом диффузии во времени, пористость цементного камня, зависимость коэффициентов массопереноса от структуры и состава бетонов, а также состав и концентрацию агрессивных сред, относительную влажность (степень насыщения) бетона и концентрацию ионов кальция в поровой жидкости бетона, образование кальцита и растворение продуктов гидратации, одновременное воздействие силовой нагрузки и отрицательное воздействие агрессивных сред на бетонные и железобетонные конструкции. На основе теории массообменных процессов предложены уравнения для математического описания кинетических зависимостей процесса коррозии, наиболее часто встречающихся на практике. Эти уравнения описывают экстенсивные и интенсивные процессы ингибирования коррозии бетона. Однако эти модели не в полной мере учитывают процесс кольтматации пор и капилляров бетона, который остается до конца не изученным.

Кольматация пор играет положительную роль, поскольку снижение проницаемости цементного бетона вследствие осаждения в порах нерастворимых продуктов коррозии приводит к замедлению коррозионных процессов.

Степень разработанности темы. Представленная диссертационная работа является продолжением научного направления, связанного с теоретическими и экспериментальными исследованиями процессов массопереноса, протекающих в цементных бетонах при коррозии, развиваемого в ИВГПУ под общим руководством академика РААСН С.В. Федосова. К настоящему времени в рамках данной научной школы разработан комплекс математических моделей для описания процессов коррозии бетонов в разных агрессивных средах, предложены способы борьбы с коррозионной деструкцией строительных материалов.

Теория тепломассопереноса в капиллярно-пористых телах разработана академиком А.В. Лыковым, в его трудах предложена система дифференциальных уравнений для описания этих процессов (уравнения Лыкова), описаны исследования тепло- и влагопереноса в коллоидных капиллярно-пористых телах при фазовых и химических превращениях.

Разработкой математических моделей массообменных процессов занимается С.П. Рудобашта в Российском государственном аграрном университете – Московской сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева; известны работы по развитию теории тепломассопереноса профессора В.Н. Блиничева из Ивановского государственного химико-технологического университета; моделированию коррозии бетона посвящены исследования Латыпова В.М., Анварова А.Р., Луцыка В.Е., Рязановой В.А., Рязанова А.Н. в Уфимском государственном нефтяном техническом университете; Гусева Б.В. в Московском государственном университете путей сообщения; Файвусовича А.С., Рябичевой Л.А. и Сороканича С.В. в Луганском государственном университете им. В. Даля. Фундаментальные исследования коррозионных процессов, протекающих в бетоне, армированном бетоне и железобетоне ведутся в НИИЖБ В.Ф. Степановой, Н.К.

Розенталем; В.П. Селяевым и Т.А. Низиной в Национальном исследовательском Мордовском государственном университете имени Н.П. Огарева, а также С.Н. Леоновичем в БНТУ Республика Беларусь.

Все отмеченное и определило цель настоящей работы, которая выполнялась в соответствии с научным направлением, развиваемым на кафедре естественных наук и техносферной безопасности Ивановского государственного политехнического университета в рамках плана НИР и ОКР ИВГПУ.

Цель диссертационного исследования: установить закономерности протекания массообменных процессов при жидкостной коррозии цементных бетонов с учетом влияния кольматации.

Для достижения цели были определены задачи:

1. Изучить современное состояние науки о коррозии строительных материалов и изделий в средах различной степени агрессивности, установить механизмы коррозии, протекающие в бетоне и железобетоне, степень влияния различных факторов на скорость коррозии бетонных изделий.

2. Разработать математическую модель кольматации пор бетона, основанную на уравнениях массопереноса, которая позволит оценивать глубину коррозионных повреждений бетонов в средах различной степени агрессивности.

3. Получить уравнения для определения скорости продвижения зоны кольматации и толщины слоя кольматанта при коррозии бетона.

4. Установить зависимость скорости закупоривания пор и капилляров и толщины слоя осадка от изменения характеристик массопереноса с учетом порозности слоя кольматанта.

5. Исследовать влияние кольматации пор и капилляров на долговечность цементных бетонов при жидкостной коррозии.

6. Разработать рекомендации по управлению процессами деструкции цементных бетонов при жидкостной коррозии с помощью кольматации пор.

Научная новизна:

- представлена математическая модель, описывающая скорость продвижения зоны осаждения продуктов коррозии в зависимости от условий протекания процесса коррозии;

- получены графические зависимости скорости продвижения зоны кольматации и толщины слоя продуктов коррозии при установленной порозности слоя для случаев линейного и экспоненциального изменения коэффициента массопроводности во времени;

- проведена апробация разработанной математической модели кольматации пор цементных бетонов натурным экспериментом, в результате которого получена информация об элементном составе поверхности образцов после воздействия жидкой среды, позволяющая судить о степени агрессивного воздействия.

Теоретическая и практическая значимость работы. Представленная математическая модель кольматации пор бетона при жидкостной коррозии позволяет рассчитать динамику распространения зоны кольматации по толщине бетона. Математическая модель дает возможность оценивать глубину коррозионных повреждений бетонов в средах различной степени агрессивности. Полученные представления о кинетике и динамике массопереноса с учетом кольматации пор бетона в случае жидкостной коррозии могут быть использованы для управления процессами деструкции цементных бетонов с целью обеспечения требуемой долговечности и для прогнозирования срока службы бетонных изделий или конструкций.

Разработанные рекомендации по повышению долговечности цементных бетонов при жидкостной коррозии с помощью кольматации пор нашли применение в практическом проектировании и строительстве объектов ОАО Проектное-строительное предприятие «СевКавНИПИагропром», при проведении экспертизы промышленной безопасности строительных материалов и изделий на объектах ООО «Научно-производственное предприятие ЭНЕРГОСЕРВИС», внедрены в практическую строительную деятельность ООО «ХолодБизнесГрупп».

Методология и методы диссертационного исследования. В работе обобщены, систематизированы и проанализированы имеющиеся в отечественной и зарубежной научно-технической литературе данные по теме исследования. На основании этого сформулированы задачи, предложены пути их выполнения и проведена проверка достоверности полученных результатов. Для этого использованы методы теоретического и эмпирического уровня исследований.

Полученные результаты и выводы основаны на данных длительного эксперимента, выполненного с применением комплекса взаимодополняющих, высокоинформативных методов исследований, таких как комплексометрия, электронная микроскопия, и статистическая обработка полученных данных, а также на результатах, подтверждены хорошей сходимостью результатов расчетов и экспериментальных данных, а также их корреляцией с известными закономерностями.

Положения, выносимые на защиту:

- разработанная математическая модель процессов кольматации пор бетона, основанная на уравнениях массопереноса, которая позволяет оценивать глубину коррозионных повреждений бетонов в средах различной степени агрессивности;

- уравнения для определения скорости продвижения зоны кольматации и толщины слоя кольматанта при коррозии бетона;

- результаты расчета характеристик массопереноса с учетом кольматации, скорости кольматации и толщины слоя кольматанта при жидкостной коррозии II вида цементных бетонов.

Степень достоверности полученных результатов. Исследования проведены с использованием современных физических, физико-химических и химических методов анализа и математической обработки полученных данных. Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлены применением гостированных методик и соответствием полученных экспериментальных данных физико-химическим представлениям о процессе массопереноса при коррозионной деструкции и результатам проведенных исследований других авторов.

Апробация результатов. Основные положения диссертации опубликованы в 3 статьях в журналах, входящих в международную базу цитирования Scopus; в 1 статье в журнале, входящем в международные базы цитирования Scopus и Web of Science; в 3 статьях в журналах, рецензируемых ВАК РФ.

Результаты исследований доложены на III Международной научно-практической конференции «Повышение надежности и безопасности транспортных сооружений и коммуникаций» г. Саратов, 2017; на XXIV Международной научно-технической конференции «Информационная среда вуза» г. Иваново, 2017; на Международном научно-техническом симпозиуме «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина», на Международном Косыгинском Форуме-2019 «Современные задачи инженерных наук» г. Москва, 2019; на межвузовских научно-технических конференциях с международным участием «Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы» (ПОИСК – 2018, 2019, 2020), г. Иваново; на восемнадцатой международной научно-технической конференции «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» г. Саранск, 2019; на I Всероссийской научной конференции, посвящённой 90-летию выдающегося учёного-материаловеда, академика РААСН Юрия Михайловича Баженова «Строительное материаловедение: настоящее и будущее» г. Москва, 2020.

Внедрение результатов исследований. На основании выполненных исследований разработаны практические рекомендации по управлению коррозионной деструкцией цементных бетонов при жидкостной коррозии с помощью кольматации пор для повышения коррозионной стойкости выпускаемых изделий, которые внедрены ОАО Проектное-строительное предприятие «СевКавНИПИагропром» при проектировании строительства объектов сельскохозяйственного назначения в Северо-Кавказском федеральном округе (акт внедрения № 22 от 20.11.2020 г.).

Практические рекомендации, направленные на повышение коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций, были использованы при проведении экспертизы промышленной безопасности строительных материалов и изделий объектов предприятий опасных производств и других промышленных объектов ООО «Научно-производственное предприятие ЭНЕРГОСЕРВИС». Внедрение результатов научных исследований и предложенных мероприятий при проведении экспертизы строительных объектов позволяет повысить уровень их промышленной безопасности в соответствии с Федеральным законом N 116-ФЗ от 21.07.1997 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (акт внедрения № 65 от 07.12.2020 г.).

Введение гидрофобизаторов, согласно рекомендациям, представленным в диссертационном исследовании, позволяет повысить коррозионную стойкость бетонов и увеличить срок безремонтной службы бетонных изделий в 1,5 раза. Результаты научных исследований внедрены в практическую строительную деятельность и использованы для повышения коррозионной стойкости выпускаемых изделий ООО «ХолодБизнесГрупп» (акт внедрения № 44 от 17.11.2020 г.).

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе кафедры естественных наук и техносферной безопасности ФГБОУ ВО «ИВГПУ» при проведении лекционных и лабораторных занятий для обучения магистрантов 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», «Моделирование процессов коррозии» (акт о внедрении от 01.02.2021 г., ИВГПУ, г. Иваново).

Личный вклад автора. Автор сформулировал цели и задачи, выбрал объекты, методологию и методы исследований, разработал комплекс теоретических и экспериментальных изысканий; проводил разработку математической модели кольтматации пор и капилляров цементных бетонов; лично осуществлял постановку и проведение эксперимента по установлению скорости продвижения фронта кольтматации и образования слоя кольтматанта в капиллярно-пористых телах; обработал и проанализировал основные результаты, практическая реализация которых так же проводилась при непосредственном участии автора. Автор лично участвовал в проведении теоретических и экспериментальных исследований и их обсуждении с научным руководителем.

Публикации. По материалам выполненных исследований опубликовано 16 работ, в том числе в изданиях, включенных в международную базу цитирования Scopus, опубликованы 3 статьи; в изданиях, включенных в международную базу цитирования Web of Science, опубликована 1 статья; в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ, опубликованы 3 статьи.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, 1 заключения, библиографических источников, 7 приложений; изложена на 154 страницах машинописного текста, содержит 39 рисунков, 11 таблиц и список литературы из 273 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, приведена общая характеристика работы, а также научные положения, которые выносятся на защиту, аргументирована практическая и научная значимости диссертационного исследования.

В первой главе проанализированы работы зарубежных и отечественных авторов, посвященные современным представлениям о механизме коррозии строительных материалов (бетона, железобетона, композитных материалов), особенностям

математического моделирования массообменных процессов, протекающих при жидкостной коррозии цементных бетонов, и аспектам прогнозирования долговечности бетонов.

За прошедшие годы были установлены основные механизмы коррозионных процессов, протекающих в бетоне под воздействием сред различной степени агрессивности, установлено влияние агрессивных сред на эксплуатационные характеристики бетонов.

Исследования объяснили основы массообменных процессов коррозии бетонов и условия, которые вызывают и предполагают закономерности их развития. Учеными разработаны методы диагностирования и способы контроля процессов коррозии, в том числе методы математического моделирования процессов коррозионной деструкции и прогнозирования срока службы изделий и конструкций из бетона.

При жидкостной коррозии бетона мельчайшие поры и капилляры заполняются агрессивной средой, которая вступает во взаимодействие с гидроксидом кальция с образованием нерастворимых продуктов реакции. Эти нерастворимые продукты коррозии осаждаются в порах бетона, препятствуя дальнейшему проникновению жидкой среды вглубь бетона. Таким образом, кольматация пор способствует уменьшению проницаемости бетона и торможению коррозионных процессов в нем.

Во второй главе представлены сведения о материалах, которые используются при проведении экспериментальных исследований жидкостной коррозии. Приведены методики получения экспериментальных данных, подготовки образцов к исследованию и последующей обработки результатов.

Исследование массообменных процессов, протекающих в пористой структуре цементного бетона при жидкостной коррозии с учетом процесса кольматации, проводилось на образце толщиной 3 мм и диаметром 2,5 см, состоящем из 30 слоев фторопластовых мембран МФФК-5 (рис. 1), в ячейке для испытания проницаемости мембран (рис. 2). Мембраны предварительно были выдержаны в растворе $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с концентрацией 1,29 г/л в течение 7 суток. Сверху над образцом находился столб 2 %-ого раствора MgCl_2 . Образец выдерживался в ячейке в течение 1 года, после чего мембраны были высушены.

Исследование поверхности мембран проводилось при помощи сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 SBH с приставкой для элементного анализа и распылительной установкой для нанесения углеродного покрытия.

Физико-химический анализ материалов проводился при использовании стандартных методик. Коррозионная стойкость цементного камня исследовалась на образцах-таблетках диаметром 50 мм и толщиной 5 мм, изготовленных из портландцемента марки ПЦ 550-Д-0, с водоцементным отношением В/Ц = 0,3. Марка бетона по водонепроницаемости W4, W6, W8 регулировалась гидрофобизирующей добавкой стеаратом кальция и перед началом эксперимента определялась согласно методике, изложенной в патенте РФ № 2187804 и МИ 2625-2000 РЕКОМЕНДАЦИЯ ГСИ. Материалы цементные. «Методика выполнения измерений водонепроницаемости ускоренным методом».

Образцы из цементного камня помещали на 150 суток в емкости объемом 3000 см³, наполненных растворами 2 %-го MgCl_2 и дистиллированной водой, откуда с периодичностью 7 суток отбирались пробы для титрования, объемом 10 см³. Для

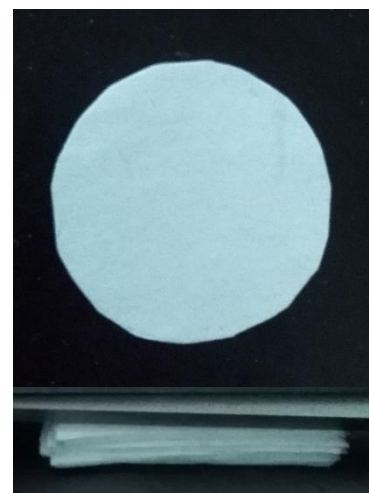


Рис. 1. Вид образца из 30 слоев фторопластовых мембран



Рис. 2. Ячейка для исследования проницаемости мембран

проведения испытаний использовался «Прибор для исследования процессов коррозии строительных материалов» (патент РФ на полезную модель № 4171164, разработанный в рамках научной школы академика РААСН С.В. Федосова).

Количественный анализ ионов кальция в жидкой среде проводился по методу комплексонометрии. Определение содержания хлорид-ионов проводилось согласно методике фототурбидиметрического анализа, описанной в ГОСТ 10671.7-2016 «Реактивы. Методы определения примеси хлоридов».

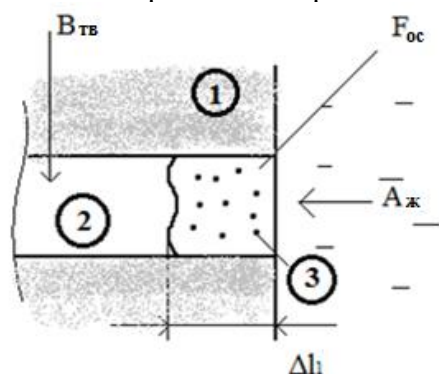


Рис. 2. Пора: 1) бетонная матрица; 2) пора; 3) осадок агрессивным компонентом ($A_{ж} \rightarrow MgCl_2$); в результате этого взаимодействия ионы кальция Ca^{2+} ($R_{ж}$) переходят в жидкую фазу и при этом образуется твердая фаза ($F_{ос}$).

Получено уравнение кинетики процесса заполнения пор бетона колюматантом. Оно имеет вид:

$$\frac{dl}{d\tau} = \frac{dM_{ос}}{\pi R^2} (1 - \varepsilon_{ос}) \cdot \rho_{ос} \quad (2)$$

Дифференциальное уравнение для определения безразмерной скорости фронта колюматации имеет вид:

$$\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m} = K_{\rho c} \cdot \frac{\partial \theta_B(\bar{R}_x, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{v_{AD}}{(1 - \varepsilon_{ос})} \quad (3)$$

Рассмотрены и графически проиллюстрированы некоторые частные случаи:

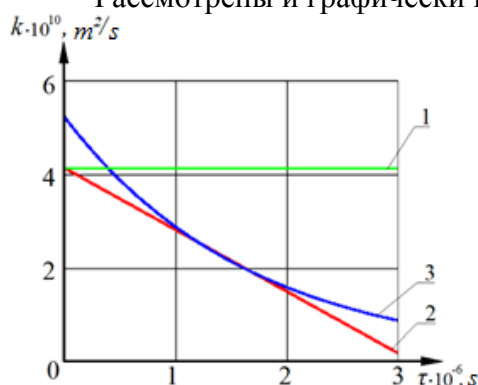


Рис. 3. Частные случаи изменения коэффициента массопроводности k_B в процессе колюматации: 1 – без изменения во времени; 2 – изменение по линейной зависимости; 3 – изменение по экспоненциальной зависимости

циальной зависимостями вида:

$$k_B(\tau) = k_{B0} \cdot (1 - A_0 \tau), \quad (5)$$

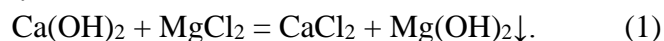
$$k_B(\tau) = k_{B0} \cdot A_1 \cdot \exp(-B_1 \tau). \quad (6)$$

- Для линейной зависимости выражения (3) и (4) преобразуются к виду:

В третьей главе проведена разработка математической модели коррозии цементных бетонов с учетом колюматации пор и капилляров.

Химическое взаимодействие компонентов агрессивной среды, находящихся в жидкой фазе, с растворенным в поровой жидкости гидроксидом кальция, приводящее к появлению слоя колюматанта, протекает как показано на рис. 2.

Типичным примером реакции такого типа является:



Гидроксид кальция ($V_{ж}$) взаимодействует с

1. Физико-механические и массопроводные характеристики материала остаются неизменными во времени процесса: основными такими характеристиками в данном случае являются коэффициенты пористости и плотности материалов бетона и осадка, а также коэффициент массопроводности k_B (прямая 1 рис. 3).

Интегрирование уравнения (3) в пределах от нуля до текущего значения Fo_m и от нуля до $L(Fo_m)$ дает закон продвижения слоя колюматанта в порах бетона при постоянстве значения коэффициента массопроводности:

$$L(Fo_m) = K_{\rho c} \cdot \frac{\partial \theta_B(\bar{R}_x, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{v_{AD}}{(1 - \varepsilon_{ос})} \cdot Fo_m. \quad (4)$$

2. Экспериментально установлено, что коэффициент массопроводности материала в твердой фазе резко снижается во времени процесса. Эти данные можно аппроксимировать линейной или экспонен-

$$\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m} = (1 - \hat{A}_0 Fo_m) \cdot \frac{\partial \theta(\bar{R}_k, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{\nu_{AD} \cdot K_{\rho c}}{(1 - \varepsilon_{oc})}, \quad (7)$$

$$L(Fo_m) = \frac{\partial \theta(\bar{R}_k, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{\nu_{AD} \cdot K_{\rho c} \cdot Fo_m}{(1 - \varepsilon_{oc})} \cdot (1 - 0.5 \hat{A}_0 Fo_m), \quad (8)$$

- Для экспоненциальной зависимости выражения (3) и (4) принимают вид:

$$\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m} = A_1 \cdot \exp(-\hat{B}_1 Fo_m) \cdot \frac{\partial \theta_B(\bar{R}_k, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{\nu_{AD} \cdot K_{\rho c}}{(1 - \varepsilon_{oc})}, \quad (9)$$

$$L(Fo_m) = \frac{\partial \theta_B(\bar{R}_k, Fo_m)}{\partial \bar{x}} \cdot \frac{A_1 \cdot K_{\rho c} \cdot \nu_{AD}}{\hat{B}_1 \cdot (1 - \varepsilon_{oc})} \cdot [1 - \exp(-\hat{B}_1 Fo_m)]. \quad (10)$$

Для наглядной демонстрации влияния коэффициента массопроводности представим профили скорости кольматации $\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m}$ и толщины слоя кольматанта $L(Fo_m)$ от массообменного критерия Фурье Fo_m при одинаковом значении порозности слоя осадка $\varepsilon_{oc} = 0,5$ для каждого частного случая (рис. 4). Здесь кривая 1 показывает результаты расчетов при постоянном во времени коэффициенте массопроводности; кривая 2 – изменение по линейной наклонной зависимости, а кривая 3 – изменение по экспоненциальной зависимости.

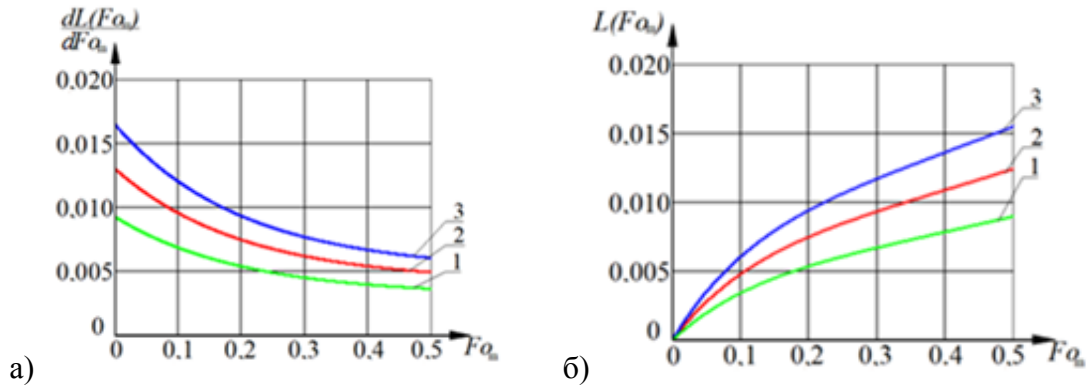
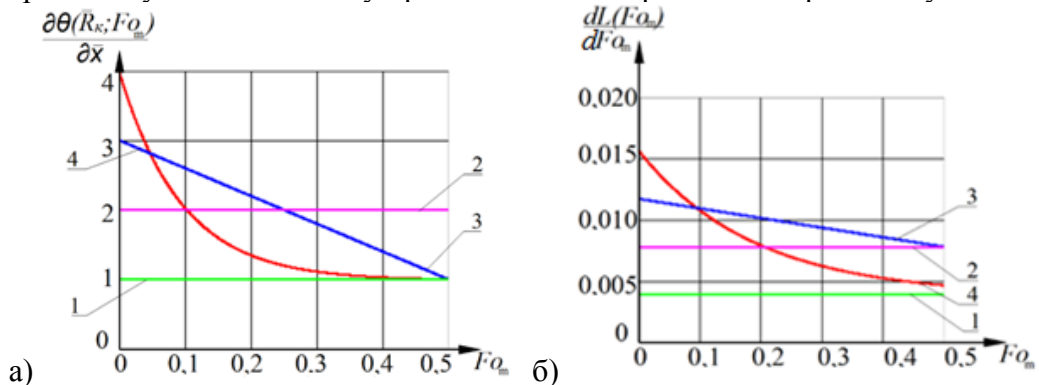


Рис. 4. Зависимость скорости кольматации $\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m}$ (а) и толщины слоя кольматанта $L(Fo_m)$ (б) от массообменного критерия Фурье, Fo_m , при порозности слоя осадка $\varepsilon_{oc} = 0,5$ и при значении коэффициента массопроводности: 1 – постоянном ($k_{\theta 0} = 4,11 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$); 2 – изменяющемся по наклонной линейной зависимости; 3 – изменяющемся по экспоненциальной зависимости

На рис. 5 представлены профили зависимости скорости кольматации $\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m}$ и толщины слоя кольматанта $L(Fo_m)$ от массообменного критерия Фурье Fo_m при порозности слоя осадка $\varepsilon_{oc} = 0,5$ и при изменяющемся значении потока массы $\frac{\partial \theta(\bar{R}_k, Fo_m)}{\partial \bar{x}}$.

Профили показывают, что со временем происходит ослабление потока массы, связанное, очевидно, с увеличением слоя кольматанта. Скорость кольматации при этом также снижается ввиду того, что слой кольматанта частично или полностью закупорил поры и препятствует дальнейшему проникновению агрессивной среды вглубь бетона.



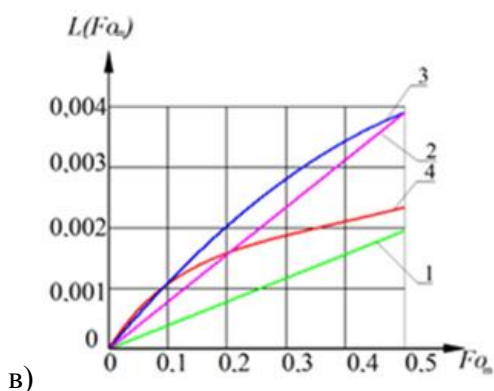


Рис. 5. Зависимость скорости кольматации $\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m}$ (б) и толщины слоя кольматанта $L(Fo_m)$ (в) от массообменного критерия Фурье Fo_m при порозности слоя осадка $\varepsilon_{oc} = 0,5$ и при значении потока массы $\frac{\partial \theta(\bar{R}_k, Fo_m)}{\partial \bar{x}}$ (а): 1,2 – постоянном; 3 – изменяющемся по наклонной линейной зависимости; 4 – изменяющемся по экспоненциальной зависимости

Представленная модель кольматации позволяет прогнозировать скорость коррозии цементных бетонов с учетом движения фронта кольматации и толщины слоя кольматанта. Математическое моделирование дает возможность использовать явление кольматации пор бетона для предотвращения развития коррозионных процессов в дальнейших экспериментальных исследованиях.

Графические зависимости показывают, что скорость кольматации пор бетона при коррозии замедляется с течением времени, что связано с увеличением толщины слоя кольматанта. Из-за кольматации пор коррозия бетона ингибируется, так как проникновение агрессивной среды затруднено.

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований кольматации пор и продвижения зоны кольматации по толщине капиллярно-пористого тела. На рис. 6-а видно, что на верхнем слое в порах мембраны осадился продукт реакции (1), но уже на втором слое (рис. 6-б) следов кольматанта в порах мембраны не обнаружено. На остальных слоях в порах мембраны осадка также обнаружено не было.

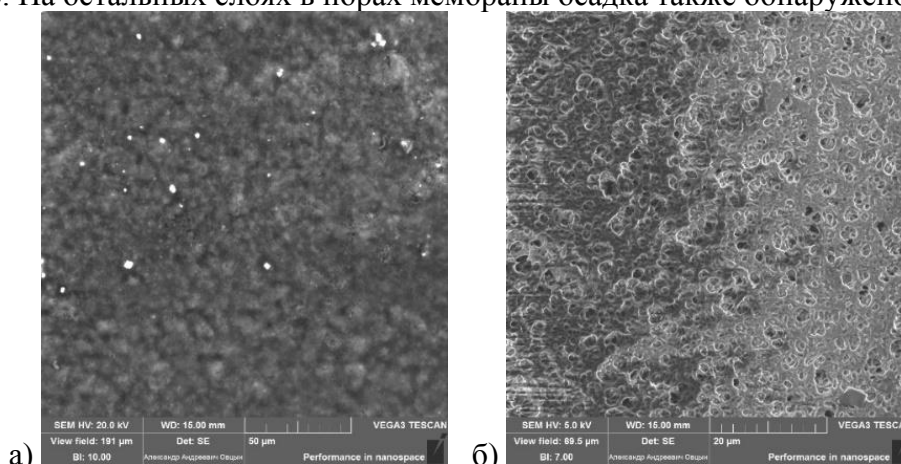


Рис. 6. Снимки поверхности мембран после проведения испытания на проницаемость

Определение элементного состава поверхности каждой мембраны показало, что по толщине образца концентрация хлорид-ионов уменьшается, а концентрация катионов кальция наоборот увеличивается (рис. 7).

На поверхности первого слоя концентрация катионов кальция минимальна (0,44 %), поскольку весь кальций, находящийся в порах мембраны, прореагировал с хлорид-ионами из раствора $MgCl_2$.

Минимальное содержание катионов кальция сохраняется до 5 слоя мембран, затем она постепенно повышается, поскольку вследствие кольматации пор продуктами коррозии проникновение хлорид-ионов по толщине образца замедляется. На поверхности последнего 30-го слоя образца концентрация катионов кальция составила 27,59 %, а концентрация хлорид-ионов – 1,06 %.

Для количественного анализа содержания катионов кальция и хлорид-ионов по толщине образца мембраны замачивались в дистиллированной воде, после чего проводилось титрование проб для определения количества искомых ионов по указанным выше методикам. По полученным данным построены профили концентраций катионов кальция и хлорид-ионов по толщине образца (рис. 8 и рис. 9).

Результаты анализа показывают увеличение концентрации «свободных» ионов Ca^{2+} и снижение концентрации «свободных» ионов Cl^- . Эти данные коррелируют с результатами качественного анализа, представленного на рис. 7.

Качественный и количественный анализ образца, состоящего из мембран, подтверждают гипотезу о предотвращении поступления агрессивной среды вглубь бетона вследствие образования в его порах слоя кольматанта при жидкостной коррозии в хлорид-содержащих средах.

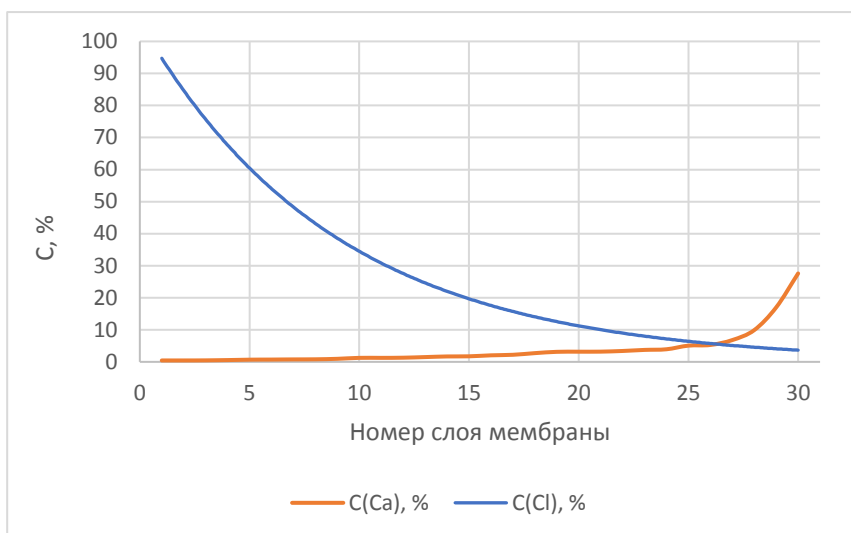


Рис. 7. Изменение концентраций реагирующих ионов по толщине образца

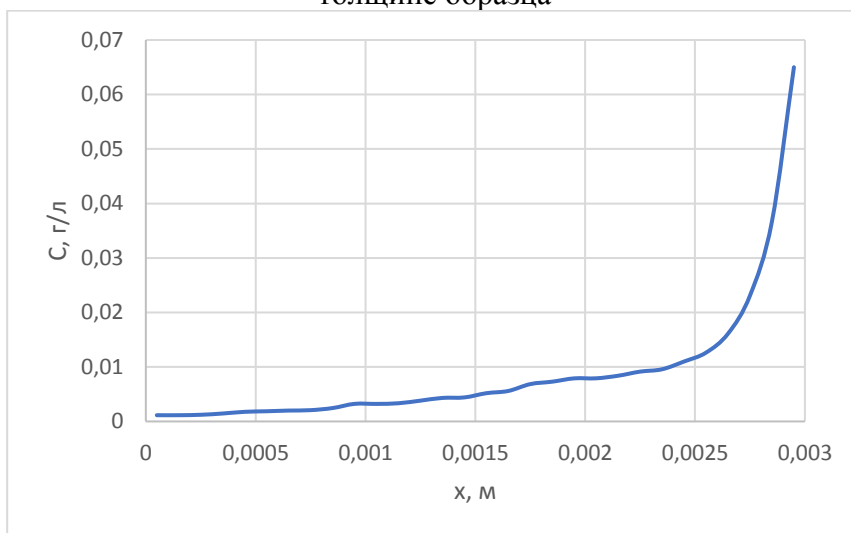


Рис. 8. Изменение концентрации катионов Ca^{2+} по толщине образца

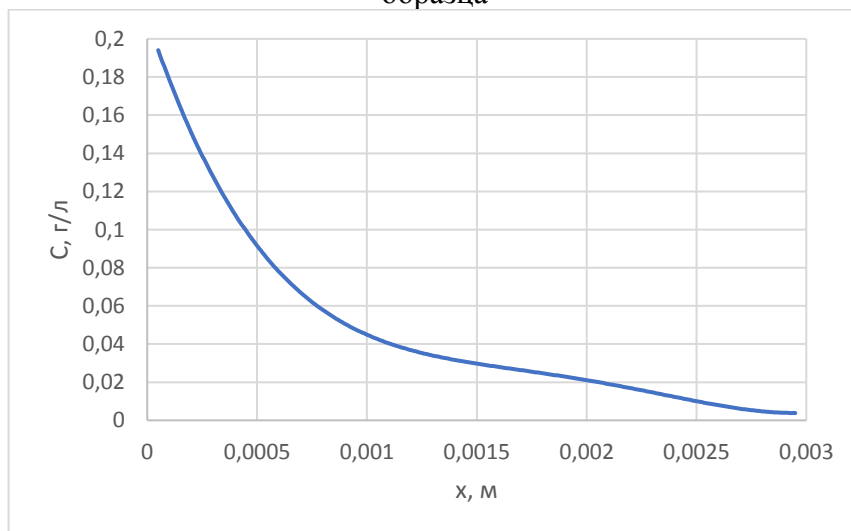


Рис. 9. Изменение концентрации хлорид-ионов по толщине образца

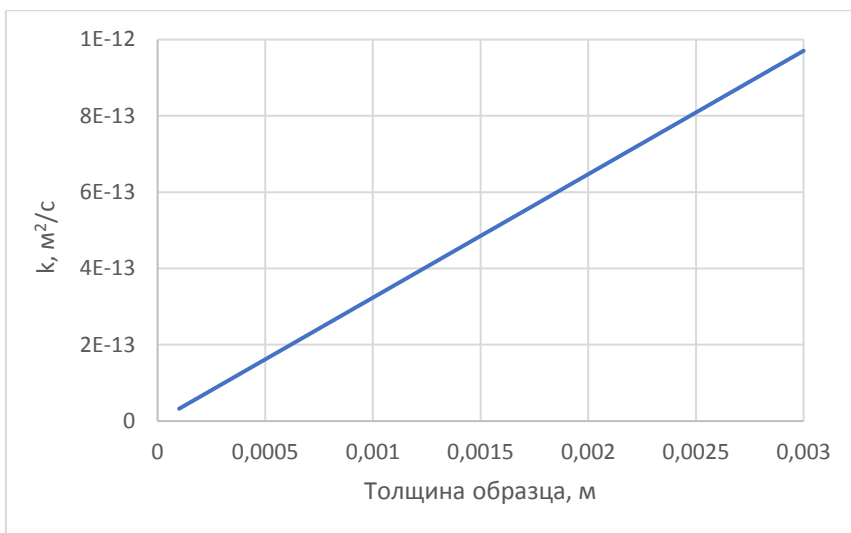


Рис. 10. Изменение коэффициента массопроводности по толщине образца



Рис. 11. Изменение коэффициента массоотдачи по толщине образца

объяснено кольтатирующим эффектом образующихся по реакции (1) продуктов.

По толщине образца происходит линейное увеличение коэффициента массопроводности (рис. 10), что связано с повышением концентрации ионов Ca^{2+} в слоях мембраны (рис. 8).

Уменьшение коэффициента массоотдачи (рис. 11) связано со снижением плотности потока массы переносимых компонентов. При помощи разработанной математической модели кольтатации пор цементных бетонов при жидкостной коррозии определены значения скорости кольтатации и толщины слоя кольтатанта в исследуемом образце.

Полученные при обработке экспериментальных данных значения находятся в рассчитанных по математической модели интервалах значений соответствующих величин, изменяющихся по толщине образца по экспоненциальной зависимости (рис 12 и 13).

Результаты исследований жидкостной коррозии бетона, представленные на рис. 14, показывают, что после 70 суток испытаний концентрация катионов Ca^{2+} в жидкой фазе выходит на постоянные значения, а после 150 суток в исследуемой системе наступает состояние близкое к равновесному.

По полученным в результате количественного анализа данным (рис. 8) произведен расчет значений коэффициентов массопроводности k и массоотдачи β в исследуемой системе. Результаты расчетов приведены на рис. 10 и 11. При пересчете на систему «цементный бетон – 2 %-ый раствор MgCl_2 » получены значения $k = 7,38 \cdot 10^{-14} \text{ м}^2/\text{с}$, $\beta = 6,47 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$.

Полученные данные показывают, что по толщине образца плотность потока массы переносимых компонентов снижается, что согласуется с результатами количественного анализа катионов кальция и хлорид-ионов в слоях мембран (рис. 8 и 9).

Очевидно, что выход «свободного гидроксида кальция» из образца и проникновение хлорид-ионов с увеличением толщины образца затрудняется, что может быть

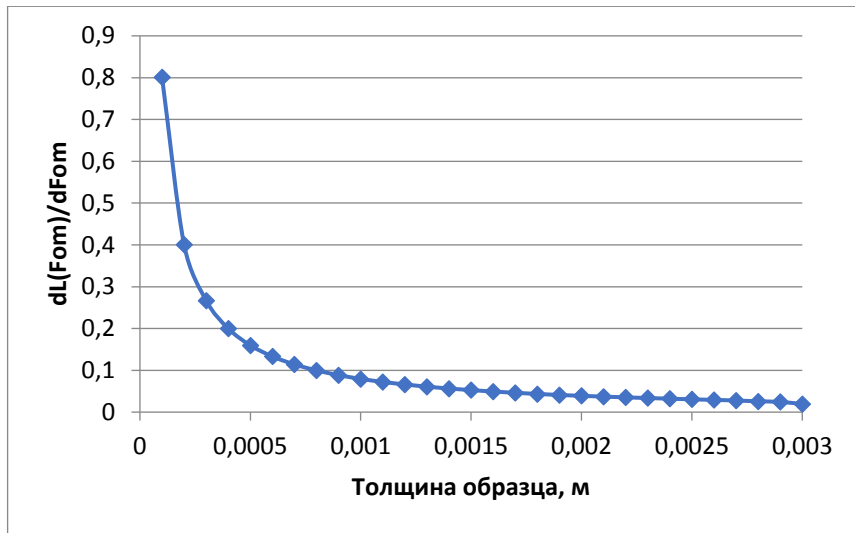


Рис. 12. Изменение скорости кольматации $\frac{dL(F_{om})}{dF_{om}}$ по толщине образца

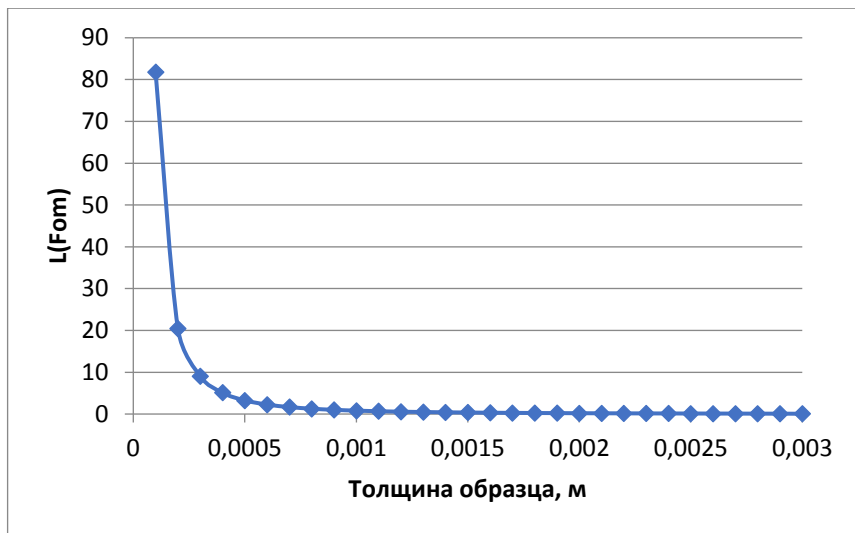


Рис. 13. Изменение толщины слоя кольматанта $L(F_{om})$ по толщине образца

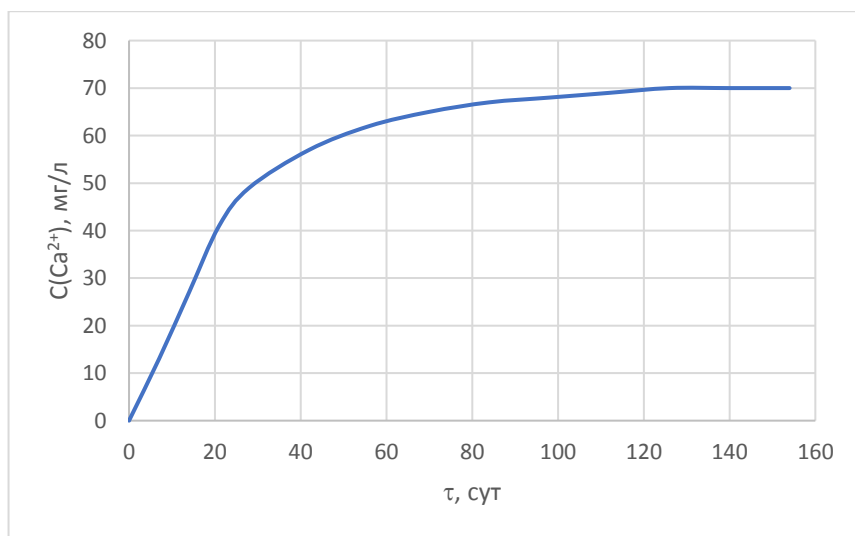


Рис. 14. Кинетическая кривая катионов Ca^{2+} в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ для образца из цементного бетона без добавок

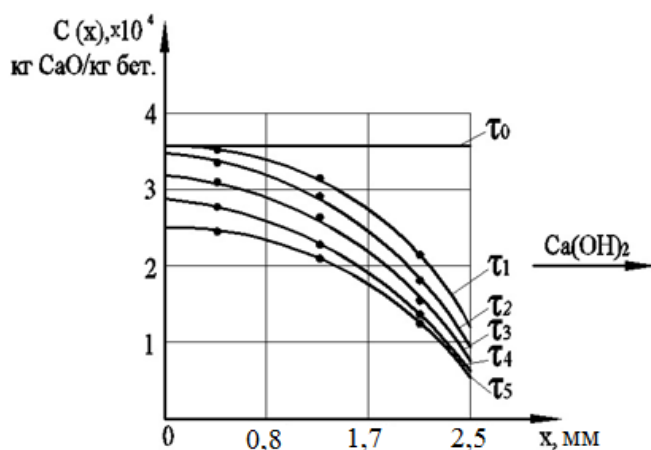


Рис. 15. Профили концентраций $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине образца в 2 %-ом растворе MgCl_2 при τ : 1 – 14 сут; 2 – 28 сут; 3 – 42 сут; 4 – 56 сут; 5 – 70 сут

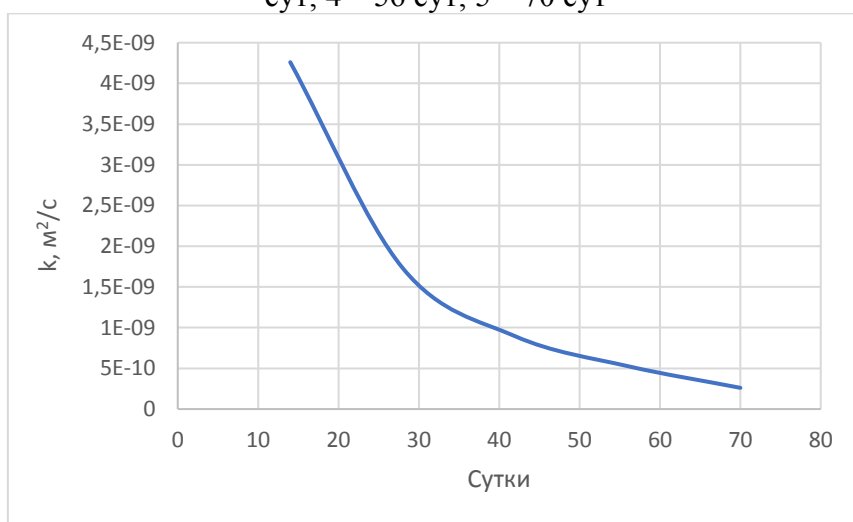


Рис. 16. Изменение значения коэффициента массопроводности в системе «цементный бетон – 2 %-ый раствор MgCl_2 » с течением времени

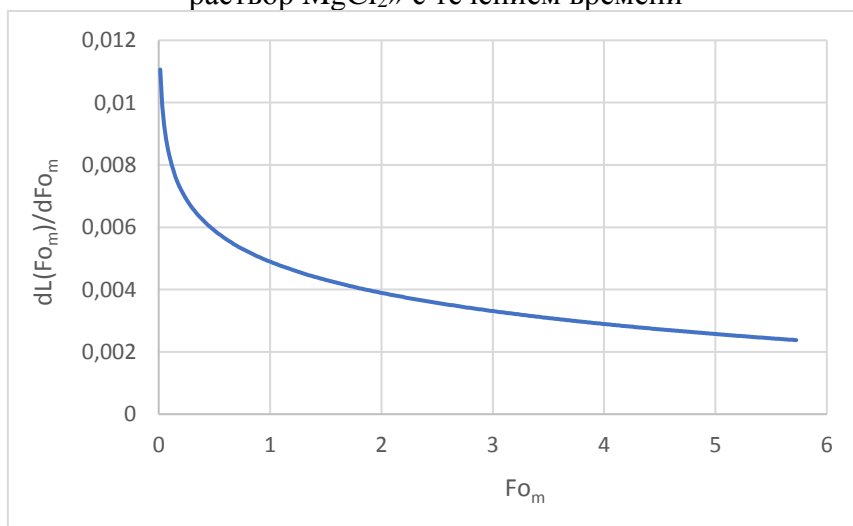


Рис. 17. Изменение во времени скорости кольматации $\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m}$ при жидкостной коррозии бетона в 2 %-ом растворе MgCl_2

рассчитанным по математической модели зависимостям, представленным на рис. 5 (кривая 4).

С помощью математической модели жидкостной коррозии второго вида цементных бетонов произведен расчет профилей концентрации «свободного гидроксида кальция» по толщине образца при коррозии в 2 %-ом растворе MgCl_2 на разных этапах проведения эксперимента (рис. 15).

Полученные профили концентраций позволяют определить градиенты концентраций переносимого компонента на границе раздела фаз и рассчитать для исследуемой системы «цементный бетон – 2 %-ый раствор MgCl_2 » характеристики массопереноса.

На рис. 16 видно, что с течением времени происходит уменьшение коэффициента массопроводности по экспоненциальному закону, что соответствует замедлению массообменных процессов, протекающих в бетоне при жидкостной коррозии, вследствие образования в порах продуктов реакции (1).

С учетом этого по уравнениям (9) и (10) произведен расчет скорости кольматации цементного бетона без добавок и толщины слоя кольматанта при жидкостной коррозии в 2 %-ом растворе MgCl_2 (рис. 17 и 18).

Вид полученных кривых соответствует

Установленные значения скорости кольматации цементного бетона при жидкостной коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ и толщины слоя кольматанта соответствуют прогнозируемым с помощью математического моделирования значениям соответствующих величин, что позволяет судить об адекватности разработанной модели кольматации пор цементных бетонов.

Одним из примеров кольматации пор бетонов является объемная гидрофобизация посредством введения гидрофобизирующих добавок в цементный раствор на стадии изготовления.

Поскольку 2 %-ый раствор $MgCl_2$ является сильноагрессивной средой для цементных бетонов согласно ГОСТ 27677-88, оптимальная концентрация гидрофобизирующей добавки составляет 0,7 % по массе цемента, что соответствует марки бетона по водонепроницаемости W8. В качестве гидрофобизатора использовался стеарат кальция, вводимый в цементную смесь при изготовлении образца.

Результаты исследования коррозии цементного бетона марки по водонепроницаемости W8 в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ (рис. 19) показывают, что в исследуемой системе состояние близкое к равновесному достигается на 40-е сутки проведения испытаний.

Замедление массообменных процессов при жидкостной коррозии гидрофобизированного цементного бетона связано с прекращением поступления «свободного гидроксида кальция» из поровой жидкости образца и затруднением проникания агрессивной среды вглубь бетона вследствие кольматирующего эффекта гидрофобизирующей добавки.

С помощью математической модели жидкостной коррозии второго вида цементных бетонов произведен расчет профилей концентрации «свободного гидроксида кальция» по толщине образца марки бетона по водонепроницаемости W8 при коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ на разных этапах проведения эксперимента (рис. 20). Полученные профили концентраций позволяют определить градиенты концентраций переносимого компонента на границе раздела фаз и рассчитать для исследуемой системы «цементный

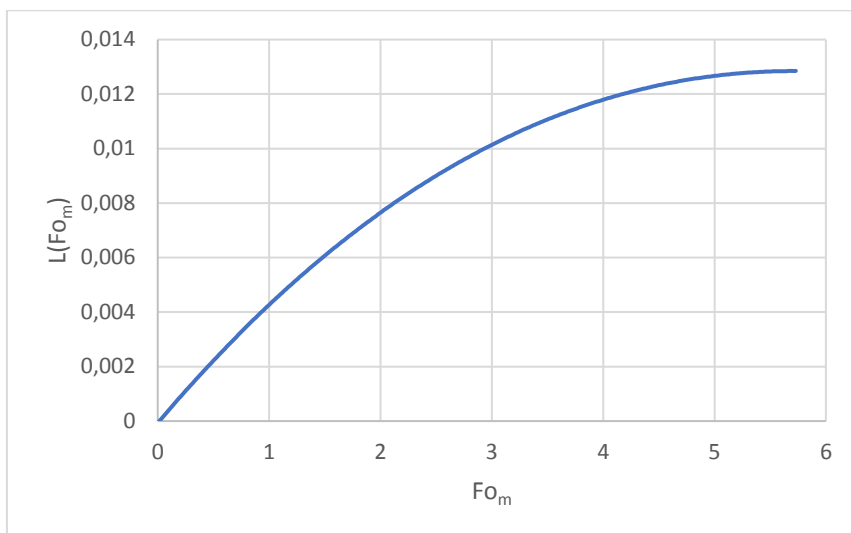


Рис. 18. Изменение во времени толщины слоя кольматанта $L(Fo_m)$ при жидкостной коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ цементного бетона

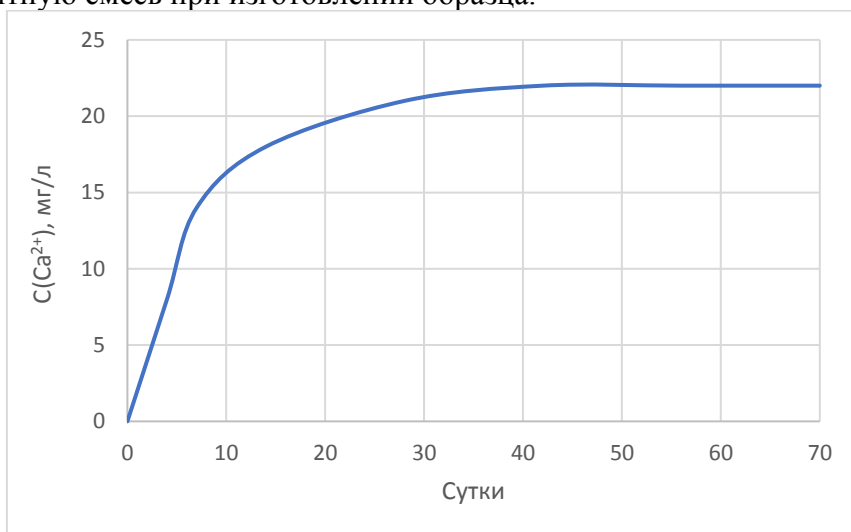


Рис. 19. Кинетическая кривая катионов Ca^{2+} в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ для образца марки бетона по водонепроницаемости W8

бетон марки по водонепроницаемости W8 – 2 %-ый раствор $MgCl_2$ » характеристики массопереноса.

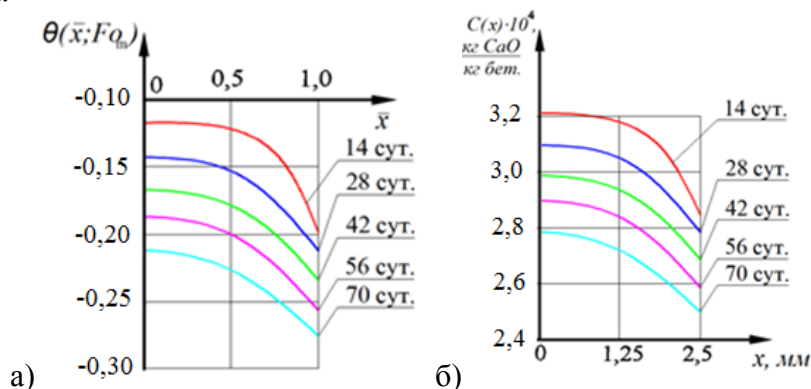


Рис. 20. Профили концентраций «свободного гидроксида кальция» по толщине бетонного образца марки по водонепроницаемости W8 в безразмерных координатах (а) и в координатах с реальными физическими размерами (б)

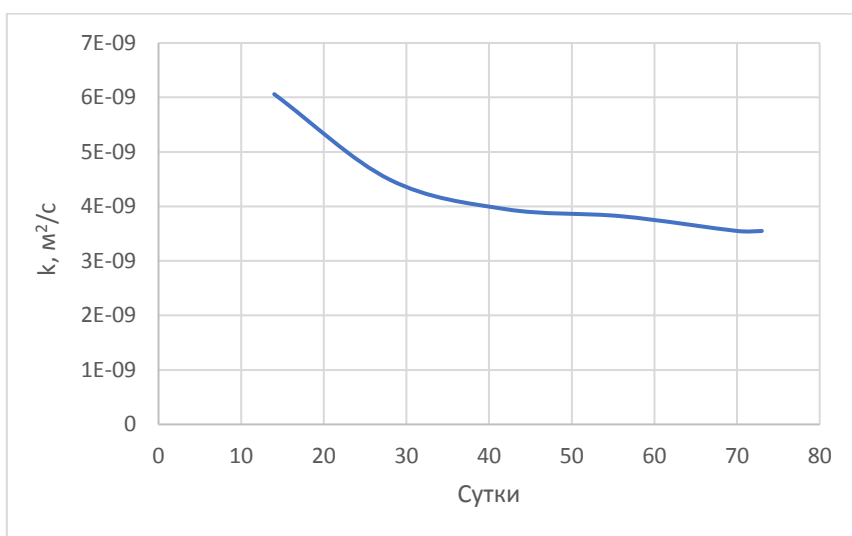


Рис. 21. Изменение значения коэффициента массопроводности в системе «цементный бетон марки по водонепроницаемости W8 – 2 %-ый раствор $MgCl_2$ » с течением времени

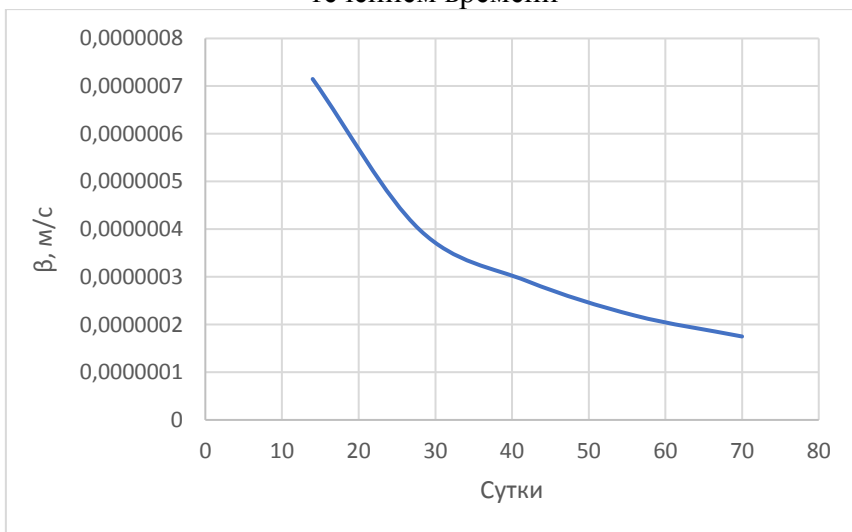


Рис. 22. Изменение значения коэффициента массоотдачи в системе «цементный бетон марки по водонепроницаемости W8 – 2 %-ый раствор $MgCl_2$ » с течением времени

Значения коэффициентов массопроводности и массоотдачи с течением времени уменьшаются (рис. 21 и 22). Резкое изменение значений всех характеристик массопереноса сменяется вялотекущим процессом, постепенно выходящим на постоянные параметры.

Очевидно, что введением гидрофобизаторов и обеспечением кольматации пор бетона можно повышать его коррозионную стойкость и обеспечивать необходимую долговечность бетонных изделий и конструкций в зависимости от агрессивности среды.

Из рис. 21 следует, что коэффициент массопроводности материала в твердой фазе снижается во времени процесса по экспоненциальной зависимости.

С учетом этого по уравнениям (9) и (10) произведен расчет скорости кольматации гидрофобизированных цементных бетонов марки по водонепроницаемости W8 и толщины слоя кольматанта при жидкостной коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ (рис. 23 и 24).

Вид полученных кривых соответствует рассчитанным по математической модели зависимостям, представленным на рис. 5 (кривая 4), что позволяет применять разработанную модель кольматации для описания массообменных процессов, протекающих при жидкостной коррозии гидрофобизированных цементных бетонов.

Имея представления о кинетике массообменных процессов и о механизме естественной кольматации при жидкостной коррозии цементных бетонов, можно не только прогнозировать долговечность бетонов, но и управлять процессами коррозионной деструкции, влияя на скорость коррозии посредством искусственной кольматации пор и капилляров бетона.

В **заключении** приведены итоги выполненного исследования:

1. Аналитический обзор литературных источников показал, что к настоящему времени в строительном материаловедении накоплен огромный теоретический и практический материал о коррозионных процессах, протекающих в цементных бетонах, о влиянии различных факторов на скорость коррозии бетонных изделий, разработаны математические модели для прогнозирования долговечности изделий и конструкций из цементных бетонов. Однако имеющиеся исследования не устанавливают роль кольматации пор и капилляров бетонов в развитии коррозионных процессов.

2. Разработана математическая модель кольматации пор бетона, основанная на уравнениях массопереноса, которая позволяет оценивать глубину коррозионных повреждений цементных бетонов с учетом снижения проницаемости.

3. Получены уравнения для определения скорости продвижения зоны кольматации и толщины слоя кольматанта при жидкостной коррозии цементного бетона; установлена

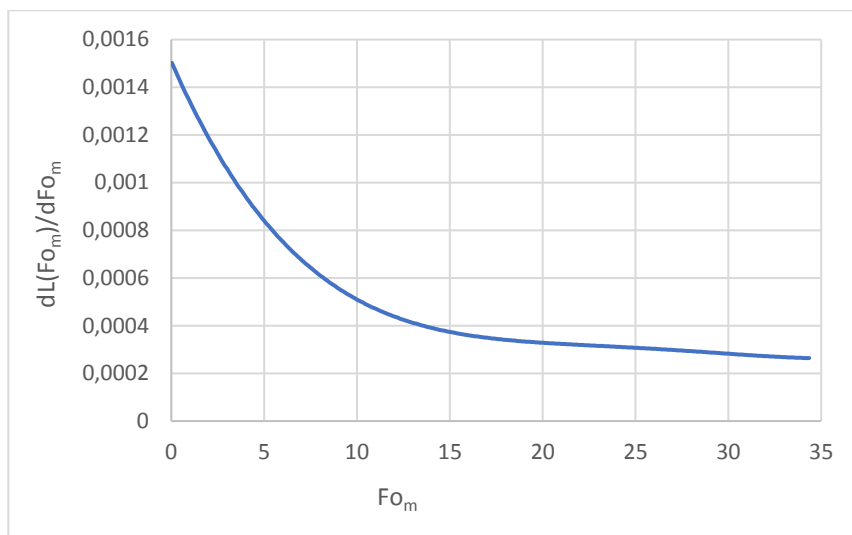


Рис. 23. Изменение во времени скорости кольматации $\frac{dL(Fo_m)}{dFo_m}$ при жидкостной коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ гидрофобизированного цементного бетона марки по водонепроницаемости W8

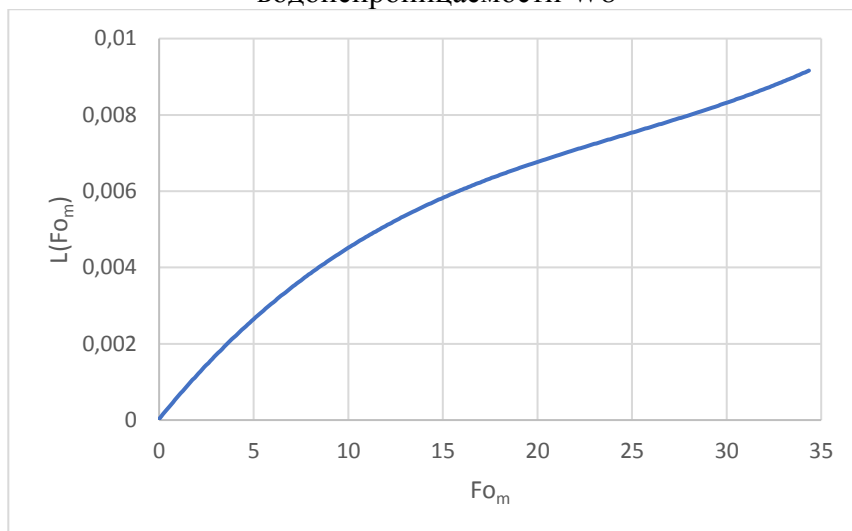


Рис. 24. Изменение во времени толщины слоя кольматанта $L(Fo_m)$ при жидкостной коррозии в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ гидрофобизированного цементного бетона марки по водонепроницаемости W8

зависимость скорости закупоривания пор и капилляров и толщины слоя осадка от изменения характеристик массопереноса с учетом порозности слоя кольматанта. С течением времени происходит замедление массообменных процессов, снижается скорость кольматации пор и увеличивается толщина слоя кольматанта.

4. Проведена апробация разработанной математической модели кольматации натурным экспериментом; получены графические зависимости скорости продвижения зоны кольматации и толщины слоя продуктов коррозии при установленной порозности слоя для случая экспоненциального уменьшения значений коэффициента массопроводности во времени, соответствующие зависимостям, полученным по математической модели.

5. Исследовано влияние кольматации пор и капилляров на долговечность цементных бетонов при жидкостной коррозии в ходе реального физико-химического процесса. Определены параметры массопереноса (коэффициенты массопроводности и массоотдачи), позволяющие судить о влиянии естественной и искусственной кольматации пор на торможение массообменных процессов в цементных бетонах при жидкостной коррозии. Коэффициент массоотдачи для бетона из портландцемента марки ПЦ 500-Д0 в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ составляет $1,53 \cdot 10^{-8}$ м/с, коэффициент массопроводности – $2,61 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Коэффициент массоотдачи для бетона марки по водонепроницаемости W8 в 2 %-ом растворе $MgCl_2$ составляет $1,75 \cdot 10^{-7}$ м/с, коэффициент массопроводности – $3,55 \cdot 10^{-9}$ м²/с. Разработаны рекомендации по управлению коррозионной деструкцией цементных бетонов при жидкостной коррозии с помощью кольматации пор.

6. На основании выполненных исследований разработаны практические рекомендации по управлению коррозионной деструкцией цементных бетонов при жидкостной коррозии с помощью кольматации пор для повышения коррозионной стойкости выпускаемых изделий, которые внедрены ОАО Проектное-строительное предприятие «СевКавНИПИАгропром» при проектировании строительства объектов сельскохозяйственного назначения в Северо-Кавказском федеральном округе (акт внедрения № 22 от 20.11.2020 г.).

Практические рекомендации, направленные на повышение коррозионной стойкости бетонных и железобетонных конструкций, были использованы при проведении экспертизы промышленной безопасности строительных материалов и изделий объектов предприятий опасных производств и других промышленных объектов ООО «Научно-производственное предприятие ЭНЕРГОСЕРВИС». Внедрение результатов научных исследований и предложенных мероприятий при проведении экспертизы строительных объектов позволяет повысить уровень их промышленной безопасности в соответствии с Федеральным законом N 116-ФЗ от 21.07.1997 «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» (акт внедрения № 65 от 07.12.2020 г.).

Введение гидрофобизаторов, согласно рекомендациям, представленным в диссертационном исследовании, позволяет повысить коррозионную стойкость бетонов и увеличить срок безремонтной службы бетонных изделий в 1,5 раза. Результаты научных исследований внедрены в практическую строительную деятельность и использованы для повышения коррозионной стойкости выпускаемых изделий ООО «ХолодБизнесГрупп» (акт внедрения № 44 от 17.11.2020 г.).

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе кафедры нанотехнологий, физики и химии ФГБОУ ВО ИВГПУ при проведении лекционных и лабораторных занятий для обучения магистрантов 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», «Моделирование процессов коррозии» (акт о внедрении от 01.02.2021 г., ИВГПУ, г. Иваново).

Перспективы дальнейшей разработки тематики: разработанная и апробированная реальным физико-химическим процессом математическая модель кольматации пор цементных бетонов при жидкостной коррозии дает возможность определять коррозионную стойкость бетонных изделий и конструкций и разрабатывать практические рекомендации по управлению процессами коррозионной деструкции. Полученные представления о влиянии кольматации на диффузионные процессы, протекающие при коррозии цементных бетонов в жидких средах, позволят расширить математический аппарат, базирующийся на уравнениях теории массопереноса, для прогнозирования долговечности бетонов в средах различной степени агрессивности.

Принятые обозначения:

x – координата, м; τ – время, с; $C(x, \tau)$ – концентрация «свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ » в бетоне в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , в пересчете на CaO (кг CaO /кг бетона); C_0 – концентрация «свободного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ » в бетоне в начальный момент времени в произвольной точке с координатой x , в пересчете на CaO (кг CaO /кг бетона); ε_{oc} – порозность слоя осадка, характеризующая объем пустот в слое осадка; R – радиус поры, м; R_k – обозначение поверхности конструкции (границы раздела фаз), через которую происходит перенос массы целевого компонента из твердой фазы в жидкую; k_e – коэффициент массопроводности компонента $\text{В}_{\text{ТВ}}$ (гидроксида кальция в бетоне), $\text{м}^2/\text{с}$; $\rho_{\text{бет}}$ – плотность бетона, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\hat{n} = \frac{S_{\text{пов}}}{\pi R^2}$ – число пор, приходящееся на определенную поверхность; ν_{AD} – стехиометрический коэффициент, зависящий от протекающей реакции; $K_{\rho c} = K_{\rho} \cdot C_{v.o.}$ – коэффициент плотности; $\hat{A}_0 = \frac{A_0 \cdot \delta_{\text{бет}}^2}{k_{B0}}$; $\hat{B}_1 = \frac{B_1 \cdot \delta_{\text{бет}}^2}{k_{B0}}$; A_I, B_I – экспериментально определяемые коэффициенты экспоненты; $\delta_{\text{бет}}$ – толщина слоя бетона, м; $Fo_m = \frac{k\tau}{\delta^2}$ – массообменный критерий Фурье; $\bar{x} = \frac{x}{\delta}$ – безразмерная координата; $\theta(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C(x, \tau) - C_0}{C_0}$ – безразмерная концентрация.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

публикации, включенные в международную базу цитирования Scopus:

1. Monitoring of the Penetration of Chloride Ions to the Reinforcement Surface Through a Concrete Coating During Liquid Corrosion / S.V. Fedosov, V.Eu. Roumyantseva, I.V. Krasilnikov, V.S. Konovalova, **A.S. Evsyakov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2018. – Vol. 463. – 042048.
2. The role of colmatation in liquid corrosion of hydrophobized concrete / S.V. Fedosov, V.E. Rumyantseva, V.S. Konovalova, **A.S. Evsyakov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 896. – 012096.
3. Pore Colmatation in Case of Liquid Corrosion of Concrete / S.V. Fedosov, V.E. Rumyantseva, V.S. Konovalova, **A.S. Evsyakov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 911. – 012002.

публикация, включенная в международные базы цитирования Web of Science и Scopus:

4. Mathematical modeling of the colmatation of concrete pores during corrosion / S.V. Fedosov, V.Eu. Roumyantseva, I.V. Krasilnikov, V.S. Konovalova, **A.S. Evsyakov** // Инженерно-строительный журнал. – 2018. – № 7 (83). – С. 198-207.

публикации, включенные в перечень, определенный ВАК Минобрнауки РФ:

5. Кольматация: явление, теория, перспективы применения для управления процессами коррозии бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, **А.С. Евсяков** // Строительные материалы. – 2017. – № 10. – С. 10-17.
6. Моделирование динамики массопереноса в процессах жидкостной коррозии цементных бетонов с учетом явления кольматации / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, **А.С. Евсяков**, Н.С. Касьяненко // Строительные материалы. – 2020. – № 6. – С. 27-32.

в других изданиях:

7. Влияние кольматации пор цементного камня на жидкостную коррозию гидрофобизированных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, И.В. Караваев, **А.С. Евсяков** // Повышение надежности и безопасности транспортных сооружений и коммуникаций: сборник трудов III Международной научно-практической конференции. – Саратов, 2017. – С. 485-489.
8. К вопросам теории кольматации цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, **А.С. Евсяков** // Информационная среда вуза. – 2017. – Т. 1. – № 1. – С. 403-407.
9. Влияние кольматации пор цементного камня на жидкостную коррозию гидрофобизированных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, И.В. Караваев, **А.С. Евсяков** // Техническое регулирование в транспортном строительстве. – 2018. – № 6 (32). – С. 44-48.
10. **Евсяков, А.С.** Перспективы применения кольматации для управления процессами коррозии бетонов / **А.С. Евсяков** // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2018): сборник материалов всероссийской (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2018. – С. 302-303.
11. Кольматация пор цементных бетонов при гидрофобизации / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, И.В. Красильников, В.С. Коновалова, **А.С. Евсяков** // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования Российской академии архитектуры и строительных наук по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2018 году: сборник научных трудов РААСН. Т. 2. – М.: Издательство АСВ, 2019. – С. 563-572.
12. Управление процессами массопереноса при коррозии цементных бетонов / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, И.В. Караваев, **А.С. Евсяков** // Энергоресурсоэффективные экологически безопасные технологии и оборудование: сборник научных трудов Международного научно-технического симпозиума «Вторые международные Косыгинские чтения, приуроченные к 100-летию РГУ имени А. Н. Косыгина» на Международном Косыгинском Форуме-2019 «Современные задачи инженерных наук». – Москва, 2019. – С. 14-18.
13. Управление коррозионной деградацией цементных бетонов с помощью гидрофобизирующих добавок / И.В. Караваев, В.С. Коновалова, **А.С. Евсяков** // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2019): сборник материалов всероссийской (с международным участием) молодёжной научно-технической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2019. – Часть 2. – С. 170-173.
14. Долговечность цементных бетонов при жидкостной коррозии с учетом кольматации пор / С.В. Федосов, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, **А.С. Евсяков** // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы восемнадцатой международной научно-технической конференции. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, 2019. – С. 347-353.
15. **Евсяков, А.С.** Влияние кольматации на процессы массопереноса в капиллярно-пористом теле / **А.С. Евсяков** // Молодые ученые – развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК–2020): сб. материалов Национальной молодёжной научно-технической конференции. – Иваново: ИВГПУ, 2020. – С. 195-198.
16. Долговечность цементных бетонов при жидкостной коррозии с учетом кольматации пор / В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова, **А.С. Евсяков** // Строительное материаловедение: настоящее и будущее: сборник материалов I Всероссийской научной конференции, посвящённой 90-летию выдающегося учёного-материаловеда, академика РААСН Юрия Михайловича Баженова (г. Москва, 1–2 октября 2020 г.) / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Национальный исследовательский Московский

государственный строительный университет, институт строительства и архитектуры. –
Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2020. – С. 140-144.

Научно-информационное издание

Евсяков Артем Сергеевич

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (строительство)

**Исследование влияния кольматации на массообменные процессы, протекающие при
жидкостной коррозии цементных бетонов**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидататехнических наук

Подписано в печать **29.04.2021**. Формат 60 × 84 ¹/₁₆. Бумага писчая.

Усл. печ.л.1,00.Уч.-изд.л. 1,03. Тираж 100 экз. Заказ 4893

ФГБОУ ВО«Ивановский государственный политехнический университет»

Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики и финансов
ФГБОУ ВО «ИГХТУ»

✉153000, г. Иваново, Шереметевский пр., 7