

На правах рукописи



Новикова Ульяна Александровна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОРКРЕТ-БЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ
В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ РАСТВОРОВ СОЛЕЙ**

2.1.5 Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Иваново – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Сахалинский государственный университет»

Научный руководитель: **Строкин Константин Борисович**, доктор экономических наук, доцент, советник РААСН

Официальные оппоненты: **Логанина Валентина Ивановна**, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», заведующая кафедрой «Управление качеством и технологии строительного производства»

Ерофеева Ирина Владимировна, кандидат технических наук, ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», заместитель директора института архитектуры и градостроительства

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет»

Защита состоится «29» ноября 2024 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.300.01 при федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ивановский государственный политехнический университет» по адресу: 153000, Иваново, пр. Шереметевский, 21, ауд. У-109.

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

Автореферат разослан « ____ » октября 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Касьяненко Наталья Сергеевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. К современным строительным материалам, конструкциям и технологиям, одновременно со сложившимися нормативами к свойствам направленными на обеспечение качества, безопасности и долговечности, выдвигаются требования к ускоренным и экономным технологиям возведения объектов строительства. Торкретирование - один из прогрессивных способов выполнения безопалубочных бетонных работ в строительстве, которое целесообразно при бетонировании строительных конструкций сложной конфигурации и незначительной толщины, при возведении которых возникают трудности, связанные с уплотнением бетонных смесей вибраторами и требуются значительные затраты на изготовление опалубки. Применение этого метода упрощает транспортирование бетонной смеси от завода к возводимому или ремонтируемому объекту. Особенно эффективно применение торкрет-бетона при сооружении пространственных конструкций покрытий зданий (куполов, оболочек), резервуаров различного типа и назначения, плавательных бассейнов, элементов наружных трехслойных конструкций жилых и производственных зданий с эффективным утеплителем, в качестве облицовки небольших водопропускных сооружений, поверхностей тоннелей, креплении горных выработок и т. п.

Торкретирование получило широкое распространение в нашей стране и за рубежом во второй половине XX века. Изготавливаемые торкрет-бетоны и покрытия из них обладают низкой диффузионной проницаемостью, высокой прочностью, водонепроницаемостью и морозостойкостью, а, следовательно, хорошей коррозионной стойкостью.

В тоже время, с каждым годом растет число повреждений железобетонных конструкций от коррозии, вызванных различными причинами – агрессивным воздействием жидких и газовых сред, ошибками при проектировании и строительстве, аварии и пр. Применение торкретирования для ремонта и усиления поврежденных конструкций является наиболее эффективным, а, нередко, единственно возможным способом.

Современная наука и техника непрерывно и стремительно развиваются, и технологии торкретирования бетонных смесей не является исключением. Актуальными являются как исследования направленные на улучшение технологических и эксплуатационно-технических свойств торкрет-бетона, в том числе долговечности, особенно в условиях воздействия жидких агрессивных сред, так и оптимизации технологии изготовления торкрет-бетонных покрытий. Параметры коррозионного массопереноса, опираясь на которые можно моделировать процессы переноса агрессивных растворов солей и целевых компонентов цементного камня в покрытии из торкрет-бетона, прогнозировать его долговечность в строительном материаловедении ранее не исследованы. Целесообразен поиск решения проблемы прогнозирования долговечности бетонных и железобетонных конструкций в агрессивных жидких средах, поскольку своевременная их защита позволит значительно сократить экономический ущерб от последствий коррозионных разрушений, повысить надежность конструкций, эксплуатируемых в условиях воздействия агрессивных жидкостей, снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций. Необходимо фокусировать исследования на расширении комплекса прочностных и антикоррозионных свойств железобетона в соответствии со множеством вариантов его применения. В связи со всем вышеизложенным, представленная работа является актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Большая заслуга в развитии и внедрении этого прогрессивного способа бетонирования в отечественное подземное строительство принадлежит В.М. Мосткову, труды и исследования которого явились тем фундаментом, на котором успешно развиваются дальнейшие научные изыскательские работы по технологии, конструированию и расчету торкрет-бетонных покрытий.

Значительный вклад в разработку материалов и технологий устройства торкрет-бетонных покрытий в практику строительства внесли работы отечественных ученых Н.А. Агрызкова, С.А. Атманских, С.М. Баева, А.С. Брыкова, И.Л. Воллера, Б.Г. Грязнова, Д.М. Голицинского,

М.В. Тушинского, М.Г. Дюженко, М.И. Карамышева, М.Н. Марчукова, А.Р. Машина, В.Я. Мищенко. Необходимо отметить и работы зарубежных специалистов: Л. Рабцевича, Э. Роттера, Р. Линдера, Ф. Пахера, Л. Мюллера, И. Вебера, Т. Райани, А. Манфреда, П. Бамонте, П. Чой, Дж. Танзаде, К. Палья, П.Б. Трухильо, М. Джолин, Б. Массикотт, Дж. Ванг, Д. Уильям, Г.Д. Пегги, З. Чжан и др.

Фундаментальные исследования коррозионных процессов, протекающих в бетоне и железобетоне ранее проводились научными школами профессора В.М. Москвина, академика РААСН Е.М. Чернышова. В настоящее время продолжают в Научно-исследовательском институте бетона и железобетона им. А.А. Гвоздева академиком МИА В.Ф. Степановой, академиком РААСН С.С. Каприеловым, Н.К. Розенталем; в Московском государственном строительном университете академиком РААСН В.Т. Ерофеевым; научной школой академика РААСН С.В. Федосова в Иванове; в Национальном исследовательском Мордовском государственном университете имени Н.П. Огарева академиком РААСН В.П. Селяевым, советником РААСН Т.А. Низиной; в Российском университете транспорта членом-корреспондентом РАН, президентом Российской инженерной академии Б.В. Гусевым; в Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю.А. академиком РААСН В.В. Петровым; в Донском государственном техническом университете академиком РААСН Л.Р. Маиляном; в Белорусском национальном техническом университете иностранным академиком РААСН С.Н. Леоновичем. Изучением деградационных воздействий в строительстве и ЖКХ, обследованием, проектированием и расчетом энергоэффективных зданий и сооружений занимаются академик РААСН Н.И. Карпенко и чл.-корр. РААСН В.И. Римшин в Научно-исследовательском институте строительной физики РААСН.

Модифицированию структуры бетонов из неорганических вяжущих, ускорению процесса твердения бетонов, улучшению физических, механических и химических свойств композитов на основе цементных бетонов посвящены исследования Ю.М. Баженова, Н.О. Копаницы, М.А. Гончаровой, Д.Н. Коротких, В.С. Лесовика, Н.В. Любомирского, А.С. Брыкова, В.И. Калашникова, С.С. Каприелова, Е.В. Королева, Ю.В. Пухаренко, О.В. Артамоновой, В.В. Строковой, В.И. Логаниной, П.Н. Курочка, Г.В. Несветаева, Р.С. Федюка, И.В. Ерофеевой и др.

Были изучены многие аспекты коррозии бетона, вызванной жидкими и газовыми агрессивными средами, природа поровой жидкости в затвердевшем бетоне, электрохимия стали при наличии агрессивных ионов и т.д. Изучению этих вопросов посвящены работы Ю.М. Баженова, В.И. Бабушкина, О.П. Мчедлова-Петросяна, Г.С. Рояка, Ф.М. Иванова, С.Н. Алексеева, Е.А. Гусева, Б.В. Гусева, В.М. Латыпова, И.Г. Овчинникова.

Современные методы исследований позволяют получить достоверные данные о физико-химических и структурных изменениях, происходящих в торкрет-бетоне при воздействии различных агрессивных сред, спроектировать необходимый комплекс мер как первичной, так и вторичной защиты строительных материалов, изделий и конструкций от коррозии. Тем не менее, массоперенос определяющий коррозионную стойкость и долговечность торкрет-бетонов, не исследован.

Данная работа является продолжением исследований по проблеме долговечности строительных объектов на основе изучения реальных условий работы бетона в конструкциях морских сооружений на побережье о. Сахалин. Коррозионные процессы с трудом моделируются во времени и требуют длительных испытаний, поэтому проверка достоверности предлагаемых методов прогноза долговечности в натуральных условиях является важной составляющей для разработки модели динамики и кинетики процесса коррозии.

Научная гипотеза диссертационного исследования заключается в том, что долговечность торкрет-бетонных покрытий, эксплуатируемых в условиях воздействия растворов солей, определяется как внешними факторами (вид и концентрация раствора, продолжительность его действия), так и внутренними. Торкрет-бетонные покрытия, изготовленные формова-

нием под давлением и уплотнением за счёт энергии удара рационально подобранной бетонной смеси, обладают улучшенными физическими, механическими и химическими свойствами, по сравнению изделиями, произведенными по технологии опалубочного формования. Капиллярно-пористая структура торкрет-бетона, ввиду особенности технологии его изготовления, обладают низкой диффузионной проницаемостью, что ингибирует процессы переноса агрессивных растворов солей и целевых компонентов цементного камня в покрытие из торкрет-бетона, а, следовательно, повышает их коррозионную стойкость.

Цель диссертационного исследования установить закономерности деструкции торкрет-бетонных покрытий в условиях воздействия агрессивных растворов солей, формализация параметров исследуемого процесса коррозии для разработки математической модели его реальной работы в конструкции при расчете срока службы и оптимизации технологий обеспечения долговечности бетона.

Для достижения цели были определены задачи:

1. Изучить уровень развития науки о физико-химических процессах в капиллярно-пористой структуре торкрет-бетона при воздействии жидких агрессивных сред, оценить современные технологии нанесения торкрет-бетонных покрытий, провести мониторинг применяемых модифицирующих ускоряющих и гидрофобизирующих добавок.

2. Выполнить экспериментальные исследования динамики и кинетики коррозии торкрет-бетона при воздействии жидких агрессивных сред; установить численные параметры, определяющие долговечность торкрет-бетонов в условиях воздействия растворов солей.

3. На основе полученных экспериментальных данных определить числовые значения параметров, лимитирующих массоперенос при коррозии торкрет-бетонов: коэффициенты диффузии гидроксида кальция и солей, коэффициенты массоотдачи.

4. Разработать физико-математическую модель нестационарного массопереноса целевого компонента (гидроксида кальция) в жидкость и параллельно протекающего процесса диффузии агрессивных солей из жидкости в торкрет-бетонное покрытие для расчета его долговечности.

5. Провести численные эксперименты, показывающие влияние параметров процесса на динамику и кинетику коррозии железобетонного изделия при наличии на нем торкрет-бетонного покрытия в условиях воздействия растворов солей.

6. Разработать и обосновать рекомендации рационального проектирования и ремонта железобетонных конструкций нанесением торкрет-бетонного покрытия, подверженного при дальнейшей эксплуатации воздействию водной солевой среды.

Научная новизна наиболее существенных результатов:

- установлено влияние физико-химических процессов коррозионного разрушения в растворах сульфата и хлорида натрия некоторых составов торкрет-бетона, наносимых по различным технологиям, определены коэффициенты диффузии катионов кальция, хлорид и сульфат анионов, что в совокупности позволит прогнозировать долговечность торкрет-бетонных покрытий;

- определены концепции долговечности торкрет-бетонных покрытий и прогнозирования срока службы исследуемых материалов в условиях воздействия растворов солей;

- разработана методика прогнозирования временных интервалов, в границах которых обеспечивается защита арматуры бетона, заключающаяся в построении профилей концентраций по толщине образца в условиях активации механизмов проникновения агрессивных солей через защитный слой из торкретбетона к поверхности арматуры и гидроксида кальция из бетона в жидкую агрессивную среду;

- разработана математическая модель массообменных процессов в железобетонной модельной пластине с торкрет-бетонным покрытием, учитывающая физико-химические особенности коррозионного разрушения в условиях воздействия агрессивных растворов солей, позволяющая проводить построение полей концентраций агрессивных солей и гидроксида

кальция, анализировать влияние основных параметров системы на массоперенос, исследовать скорость коррозии.

Теоретическая и практическая значимость результатов исследования. Получены представления о закономерностях протекающих физико-химических превращений в системе «солевой раствор – торкрет-бетонное покрытие», которые могут быть использованы для управления процессами деструкции бетона и арматуры, с целью обеспечения требуемой долговечности и для прогнозирования срока службы изделий.

Результаты исследований коррозии торкрет-бетона в условиях воздействия растворов сульфата и хлорида натрия, в виде коэффициентов массопереноса и массоотдачи, интенсивности поглощения массы дают возможность определять количественное распределение содержания сульфатов и хлоридов, гидроксида кальция по толщине торкрет-бетонного покрытия, прогнозировать срок службы торкрет-бетонных изделий. Установленное распределение пор по размерам некоторых составов торкрет-бетона, наносимых по различным технологиям, а также относительное изменение прочности и массы торкрет-бетонных изделий при длительном воздействии растворов хлорида и сульфата натрия дает представление о степени диффузионной проницаемости и коррозионной стойкости торкрет-бетонов с различным соотношением вида вяжущих, заполнителей, добавок и воды.

Предложенная математическая модель нестационарного массопереноса агрессивных растворов солей и гидроксида кальция в торкрет-бетонном покрытии, учитывающая химические превращения переносимых веществ, позволяет определять теоретическое время достижения агрессивными растворами солей границы покрытия, начала разложения высокоосновных соединений цементного камня и времени достижения агрессивными ионами поверхности арматуры.

Сформулированы рекомендации, которые позволяют оптимизировать технологические решения для обеспечения долговечности торкрет-бетона, что дополняет область проектирования оптимальных технологических решений для обеспечения коррозионной стойкости. Предложенные рекомендации могут быть полезны в практической деятельности, где требуется рациональный подход к выбору технологических решений для создания долговечных конструкций в конкретных условиях эксплуатации.

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 результатах длительного эксперимента, выполненного с применением комплекса взаимодополняющих, высокоинформативных методов исследований: ртутной интрузионной порометрии; дифференциально-термического анализа; титриметрического метода определения катионов кальция; электрометрического метода; комплексонометрического метода определения содержания сульфатов, титрования хлорид анионов азотнокислой ртутью, а также подтверждены высокой сходимостью результатов расчетов и экспериментальных данных и их корреляцией с известными закономерностями.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты исследований влияния физико-химических процессов коррозионного разрушения в растворах сульфата и хлорида натрия некоторых бетонных смесей для нанесения торкрет-бетона;

- методика прогнозирования времени достижения агрессивными растворами солей границы покрытия и поверхности арматуры;

- математическая модель массообменных процессов в железобетонной модельной пластине с торкрет-бетонным покрытием, учитывающая физико-химические особенности коррозионного разрушения в условиях воздействия агрессивных растворов солей.

Достоверность и обоснованность полученных результатов. Исследования проведены с использованием современных физических, физико-химических и химических методов анализа и математической обработки данных. Достоверность и обоснованность полученных результатов обусловлены соответствием применяемых методов поставленным задачам, использованием методик, соответствующих ГОСТ, согласованностью теоретически рассчитанных и экспериментальных данных в пределах допустимой погрешности, а также соответствием полученных экспериментальных данных физико-химическим представлениям о реальной картине процесса деструкции изделий с покрытием из торкрет-бетонов и результатам исследований, полученных другими авторами. Экспериментальное значение исследуемых величин определялось при получении результатов пяти измерений, с доверительной вероятностью 0,92.

Апробация работы: результаты диссертационного исследования представлены и рассмотрены на Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства» г. Курск, 2021 г.; Международной межвузовской научно-технической конференции аспирантов и студентов «Молодые ученые - развитию национальной технологической инициативы (ПОИСК)» г. Иваново, 2021-2024 гг.; 11-й Международной научно-практической конференции «Современные материалы, техника и технология» г. Курск, 2021 г.; IV Всероссийской (национальной) научно-практической конференции «Современные проблемы материаловедения», г. Липецк, 2023 г., IX межрегиональном семинаре «Экологические аспекты современных городов», г. Иваново, 2023 г.; Международной научно-практической конференции «Качество жизни: архитектура, строительство, транспорт, образование», г. Иваново, 2023, 2024 гг.

Внедрение результатов исследований. Рекомендации по повышению долговечности железобетонных конструкций с применением торкрет-бетонных покрытий внедрены компанией АО «Сахалин-Инжиниринг» при выполнении ремонтно-строительных работ. Рациональное проектирование защиты железобетонных конструкций сокращает расходы на ремонтно-восстановительные работы на 17% (акт о внедрении от 25.12.2023, г. Южно-Сахалинск).

Теоретические положения диссертационной работы и результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе кафедры строительства ФГБОУ ВО «Сахалинский государственный университет» при проведении лекционных и лабораторных занятий бакалавров направления 08.03.01 «Строительство» и магистров направления 08.04.01 «Строительство» для обучения по дисциплинам «Строительные материалы, изделия и конструкции», «Тепломассоперенос в строительных материалах», «Железобетонные и каменные конструкции», «Обследование, испытание и реконструкция зданий и сооружений», «Управление жизненным циклом объектов капитального строительства», «Организация ремонтно-восстановительных работ на строительных объектах».

Личный вклад автора. Автор сформулировал цели и задачи, разработал программу и методологию исследований, разработал теоретическую концепцию; организовал и лично участвовал в проведении натурных обследований и экспериментальных изысканиях в лабораториях и на строительных площадках; обработал и проанализировал полученные результаты. Автор лично участвовал в обсуждении результатов исследований с научным руководителем.

Область исследований соответствует **паспорту специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия** в части направления исследований: п.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; п.11. Разработка методов прогнозирования и оценки долговечности строительных материалов и изделий в заданных условиях эксплуатации; п.13. Разработка материалов и технологий для строительства, реконструкции и санации зданий и сооружений в различных климатических условиях с учетом сопротивляемости температурно-влажностным и другим факторам.

Публикации. Результаты исследований, отражающие основные положения диссертационной работы, изложены в 20 научных публикациях, в том числе: 9 статей в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ, из которых 2 статьи в научных журналах, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus, 1 статья в журнале, входящем в Russian Science Citation Index.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и приложений; изложена на 178 страницах машинописного текста, содержит 38 рисунков, 49 таблиц, список литературы из 278 наименования и 5 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы исследования, теоретическая и практическая значимость работы, сформулированы цель и задачи исследования, основные элементы научной новизны, приведена общая характеристика работы, а также научные положения, которые выносятся на защиту, аргументирована практическая значимость, реализация и апробация результатов исследования.

В первой главе представлен литературный обзор работ отечественных и зарубежных авторов, посвященных современным представлениям о механизмах разрушения цементных бетонов. Описаны особенности технологии изготовления торкрет-бетона как покрытия низкой диффузионной проницаемости и приведены модифицирующие добавки бетонных смесей для торкретирования. В зарубежной и отечественной литературе, в основном, описана технология торкрет-бетона с указанием областей его применения, требования к материалам для изготовления торкрет-бетона, указаны основные свойства: прочность, водонепроницаемость. Сведения о коррозионных характеристиках торкрет-бетона практически отсутствуют.

Во второй главе представлены сведения о материалах, которые используются при приготовлении смесей для нанесения торкрет-бетонных покрытий, которые применялись в экспериментальных исследованиях по коррозионной стойкости. Приведены методики получения экспериментальных данных, подготовки образцов к исследованию и последующей обработки результатов.

Исследования проводились на образцах, изготовленных из портландцемента с нормированным составом заполнителей и добавок, с различным водоцементным отношением (см. табл.1). Торкретирование выполнялось мокрым способом послойно. Слои наносились горизонтальными полосами шириной около 1 м, сразу по всей ширине, покрываемой поверхности опалубки с перекрытием соседних. В течение 7 суток после изготовления полученные торкрет-бетонные плиты периодически увлажняли. Затем, выбуривали керны различной формы и размера, в зависимости от вида испытания. После 28 дней первоначального отверждения образцы торкрет-бетона погружали в агрессивные солевые водные растворы сульфата или хлорида натрия, концентрация растворов по массе – 5%.

Для изучения свойств, структуры и состава исследуемых в работе торкрет-бетонов и реакционных сред, до и после их взаимодействия, проведены экспериментальные исследования с применением методов физико-механического и химического анализа: методики определения плотности, водопоглощения, пористости, водонепроницаемости и прочности (при сжатии) бетона; анализ распределения пор по размеру; дифференциально-термический анализ; титриметрический метод определения катионов кальция; электрометрический метод для измерения водородного показателя pH среды; комплексометрический метод определения содержания сульфатов; прямое титрование.

Таблица 1. Расчет соотношения приготовления смеси для нанесения торкрет-бетонного покрытия на 1 м³

Исходные материалы	Расход для изготовления торкрет-бетонной смеси по образцам различных серий, кг				
	А	Б	В	Г	Д
Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н	450	450	450	410	410
Зола уноса ЗУ КУК-Б-1	0	0	0	45	0
Микрокремнезем конденсированный марки МК-85	0	0	0	0	45
Крупный заполнитель – щебень фракции 5-10 мм	910	910	910	910	910
Мелкий заполнитель – песок средней крупности	900	900	900	900	900
Ускоритель твердения (NaAlO ₂ +2CaO·SiO ₂)	10,6	10,6	10,6	10,74	10,74
Водоредуцирующая добавка (суперпластификатор на основе поликарбоновой кислоты)	3,38	3,38	3,38	3,42	3,42
Вода	157,5	202,5	247,5	184,5	184,5
В/Ц	0,35	0,45	0,55	0,45	0,45

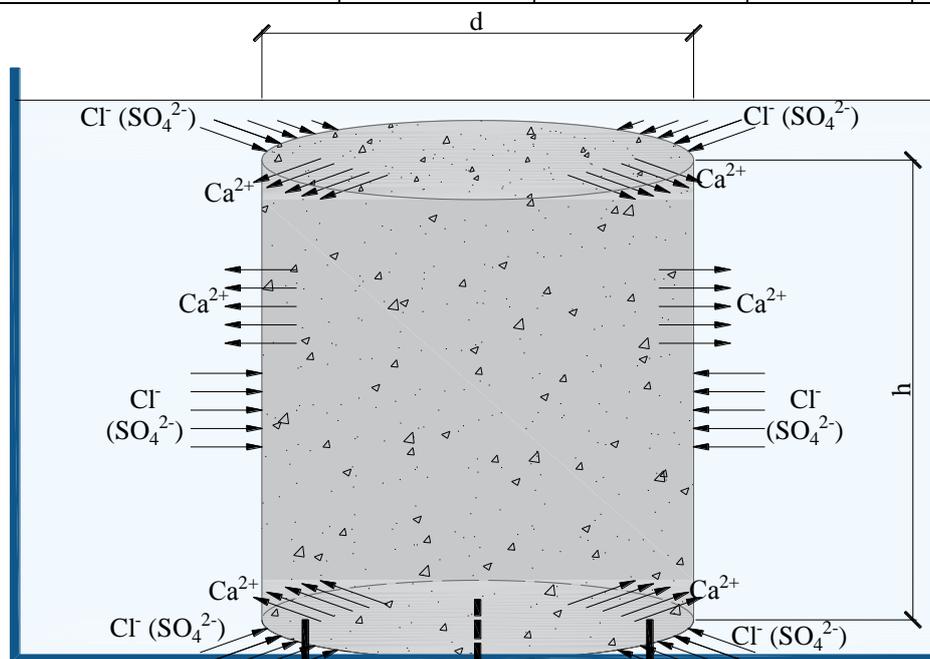


Рис. 1. Схема исследуемого образца в агрессивной среде

В третьей главе представлены результаты экспериментальных исследований воздействия агрессивных растворов на образцы из торкрет-бетона. В данных исследованиях все растворы обновлялись еженедельно, концентрация сульфата и хлорида натрия поддерживалась на постоянном уровне.

Распределение пор по размерам различных торкретбетонных смесей, измеренное с помощью ртутного поромера (пороизоэтра) AutoPore 9620, показано на рисунке 2. Установлено, что смешанные бинарные связующие с добавлением золы или кремнезема имеют более мелкую структуру пор по сравнению с обычными связующими, изготовленными только на портландцементе с ускорителем твердения. Общий объем пор образцов различного состава распределен следующим образом: В>Б>А>Г>Д. Смеси, изготовленные с соотношением В/Ц 0,35, обладают наименьшим объемом внедренных пор, а смеси, содержащие 10% кремнезема, имеют большой объем мелких пор.

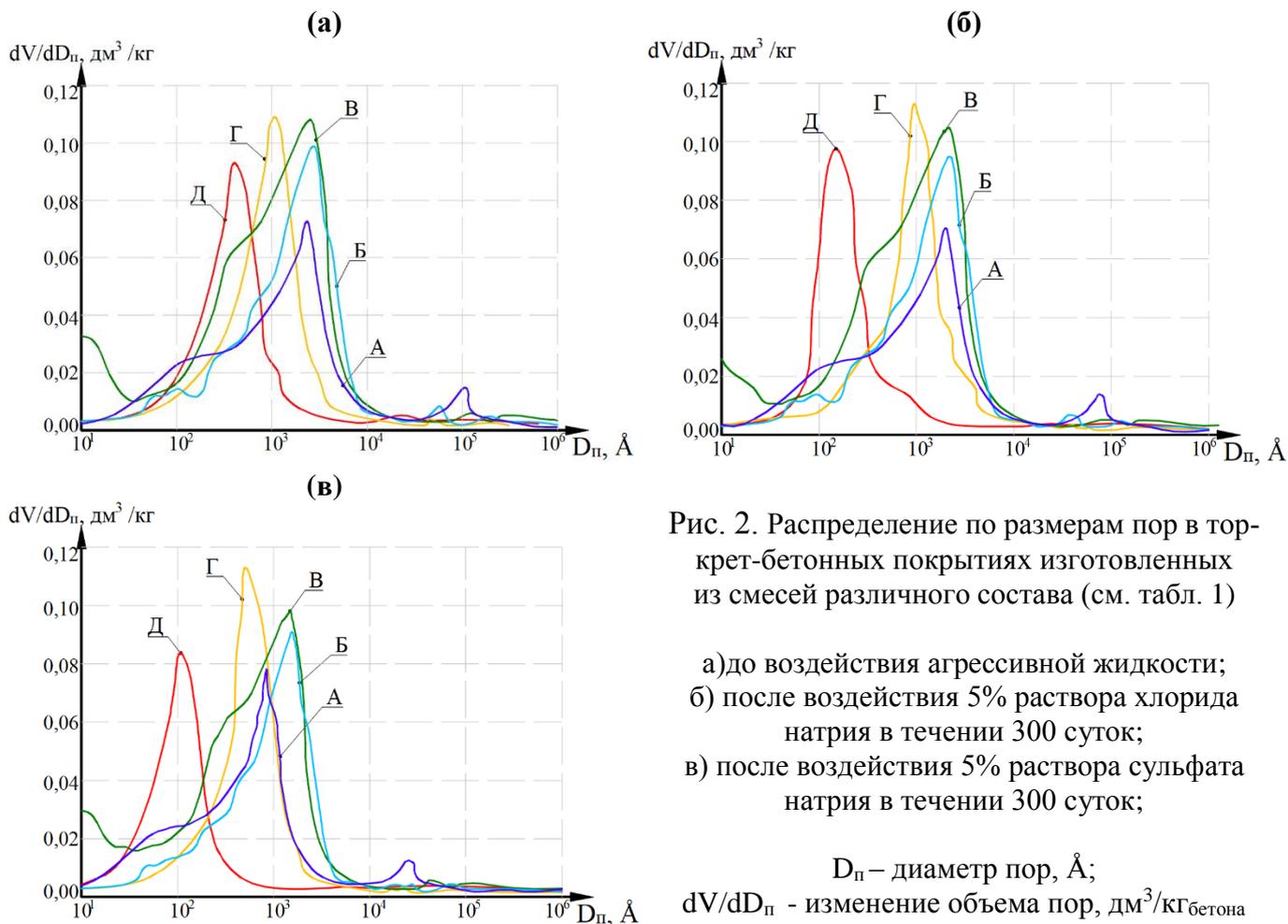


Рис. 2. Распределение по размерам пор в торкрет-бетонных покрытиях изготовленных из смесей различного состава (см. табл. 1)

- а) до воздействия агрессивной жидкости;
- б) после воздействия 5% раствора хлорида натрия в течении 300 суток;
- в) после воздействия 5% раствора сульфата натрия в течении 300 суток;

$D_{п}$ – диаметр пор, Å;

$dV/dD_{п}$ - изменение объема пор, $dm^3/kg_{бетона}$

После 10 месяцев погружения в растворы сульфата и хлорида натрия, с концентрацией по массе 5%, все образцы торкрет-бетона остались визуально неповрежденными, кроме образцов серии «Д», содержащих кремнезем. Поверхность образцов, модифицированных золой уноса, визуально, имела наименьшие изменения, по сравнению с образцами до воздействия агрессивной среды. Добавление золы-уноса в качестве частичной замены портландцемента, оказалось действенной контрмерой для снижения деструкции поверхности.

В целом, на всех образцах торкрет-бетона, погруженных в растворы агрессивных солей, наблюдалась потеря прочности, что указывало на развитие деструкции (таблица 2). Максимальная потеря прочности наблюдалась у образцов, содержащих 10% кремнезема в качестве частичной замены портландцемента. Полученный результат явился прогнозируемым, потому что образование таумасита, наряду с этtringитом и гипсом, серьезно ухудшило коррозионную стойкость. В тоже время, частичная замена портландцемента золой уноса показывает более высокую коррозионную стойкость при сульфатном или хлоридном воздействии, по сравнению с другими смесями. Таким образом, использование диоксида кремния в качестве частичной замены портландцемента не подходит для торкрет-бетона в средах, содержащих сульфаты.

Таблица 2. Относительное изменение массы и прочности образцов при сжатии

Серия образцов	Класс бетона по водонепроницаемости	Изменение массы, % в 5%-м растворе		Изменение прочности при сжатии, % в 5%-м растворе	
		Na ₂ SO ₄	NaCl	Na ₂ SO ₄	NaCl
А	W14	1,052	0,739	-5,576	-2,864
Б	W12	1,579	1,225	-7,205	-4,362
В	W10	2,156	1,801	-9,928	-7,205
Г	W14	0,617	0,425	-1,852	-0,719
Д	W12	-0,719	-0,223	-15,443	-10,727

В четвертой главе приведены итоги экспериментальных исследований массопереноса при коррозии образцов изготовленных из торкрет-бетона и помещенных в растворы сульфата и хлорида натрия, с начальной концентрацией растворов по массе – 5%. Исследования проведены на образцах цилиндрической формы диаметром 70 мм, толщиной 20 мм.

Кинетика процесса изучалась методом объемного титрования. Данным методом проводился контроль содержания катионов кальция в растворах, результаты которого представлены на рис. 3. Полученные данные позволили определить по общепринятым методикам коэффициенты массопереноса гидроксида кальция для рассматриваемой системы (см.табл. 3).

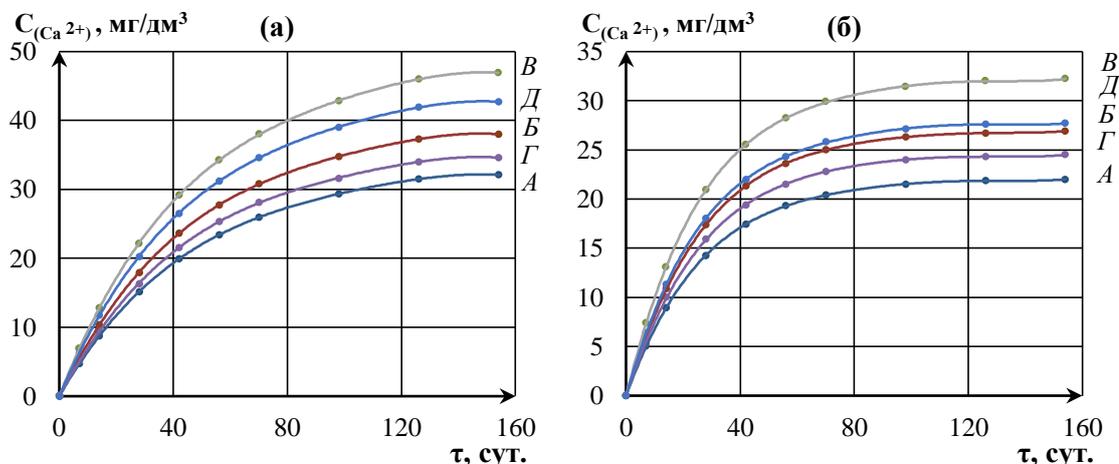


Рис.3. Изменение концентраций катионов Ca^{2+} при погружении образцов в раствор хлорида (а) и сульфата (б) натрия для различных образцов

Таблица 3. Экспериментально рассчитанные характеристики массопереноса гидроксида кальция из торкрет-бетона

Наименование параметра массопереноса	Значения в образцах серий				
	А	Б	В	Г	Д
На 30 сутки					
Коэффициент массоотдачи, м/с	$7,03 \cdot 10^{-8}$	$4,13 \cdot 10^{-8}$	$2,89 \cdot 10^{-8}$	$2,17 \cdot 10^{-8}$	$1,74 \cdot 10^{-8}$
Коэффициент массопроводности, м ² /с	$3,5 \cdot 10^{-11}$	$4,63 \cdot 10^{-11}$	$5,89 \cdot 10^{-11}$	$3,65 \cdot 10^{-11}$	$5,3 \cdot 10^{-11}$
Интенсивность объемного поглощения свободного $Ca(OH)_2$ в результате химических реакций, кг $Ca(OH)_2/(m^3 \cdot c)$	$7,93 \cdot 10^{-9}$	$6,57 \cdot 10^{-9}$	$6,59 \cdot 10^{-9}$	$4,37 \cdot 10^{-9}$	$5,28 \cdot 10^{-9}$
На 160 сутки					
Коэффициент массоотдачи, м/с	$7,15 \cdot 10^{-8}$	$3,98 \cdot 10^{-8}$	$2,91 \cdot 10^{-8}$	$2,19 \cdot 10^{-8}$	$1,75 \cdot 10^{-8}$
Коэффициент массопроводности, м ² /с	$3,06 \cdot 10^{-11}$	$4,1 \cdot 10^{-11}$	$4,95 \cdot 10^{-11}$	$3,82 \cdot 10^{-11}$	$4,7 \cdot 10^{-11}$
Интенсивность объемного поглощения свободного $Ca(OH)_2$ в результате химических реакций, кг $Ca(OH)_2/(m^3 \cdot c)$	$11,4 \cdot 10^{-9}$	$9,09 \cdot 10^{-9}$	$8,84 \cdot 10^{-9}$	$6,76 \cdot 10^{-9}$	$7,26 \cdot 10^{-9}$

Одновременно с катионами кальция отслеживалось изменение концентраций хлоридов, сульфатов в реакционной среде (таблицы 4 и 5). Кроме этого, учитывалось, что скорость коррозии образцов определяется диффузией сульфатов и хлоридов. Метод определения диффузионной проницаемости торкрет-бетона для хлоридов основан на аналогии между диффузионным потоком вещества и электрическим током в теле бетона. Результаты определения диффузионной проницаемости для хлоридов водонасыщенных образцов торкрет-бетона приведены таблице 6. Диффузионная проницаемость торкрет-бетона для хлоридов и сульфатов со временем по мере гидратации цемента и уплотнения бетона снижается. Полученные результаты коррозионных испытаний позволяют рассматривать торкрет-бетон в качестве эффективной защиты бетонных и железобетонных конструкций от коррозии.

Таблица 4. Изменение концентрации хлорид анионов в жидкой фазе для системы «раствор NaCl – торкрет-бетон», г/дм³

Серия образцов	Продолжительность взаимодействия, сутки									
	0	7	14	28	42	56	70	98	126	154
А	31,4	28,7	27,2	25,6	24,2	23,5	23	22,5	22,2	22
Б	31,4	24,4	23,4	22,3	21,3	20,7	20,3	19,8	19,6	19,4
В	31,4	21,9	21	20	19,2	18,8	18,4	18	17,8	17,6
Г	31,4	23,2	22,3	21,2	20,3	19,7	19,3	18,9	18,7	18,5
Д	31,4	20,2	18,9	18	17,3	17	16,6	16,2	16,1	16

Таблица 5. Изменение концентрации хлорид анионов в жидкой фазе для системы «раствор Na₂SO₄ – торкрет-бетон», г/дм³

Серия образцов	Продолжительность взаимодействия, сутки									
	0	7	14	28	42	56	70	98	126	154
А	35,3	32,3	30,6	28,8	27,2	26,4	25,9	25,3	25	24,7
Б	35,3	27,4	26,3	25,1	23,9	23,3	22,8	22,3	22	21,8
В	35,3	24,6	23,6	22,5	21,6	21,1	20,7	20,2	20	19,8
Г	35,3	26,1	25,1	23,8	22,8	22,1	21,7	21,2	21	20,8
Д	35,3	22,7	21,2	20,2	19,4	19,1	18,7	18,2	18,1	18

Таблица 6. Коэффициенты диффузии (м²/с) сульфат и хлорид анионов

Серия образцов	SO ₄ ²⁻		Cl ⁻	
	На 30 сут	На 160 сут.	На 30 сут	На 160 сут.
А	3,3·10 ⁻¹²	2,7·10 ⁻¹²	4,5·10 ⁻¹²	3,8·10 ⁻¹²
Б	4,2·10 ⁻¹²	3,5·10 ⁻¹²	7,1·10 ⁻¹²	5,7·10 ⁻¹²
В	5,8·10 ⁻¹²	4,6·10 ⁻¹²	11,6·10 ⁻¹²	8,9·10 ⁻¹²
Г	1,2·10 ⁻¹²	1,1·10 ⁻¹²	1,3·10 ⁻¹²	1,2·10 ⁻¹²
Д	10,5·10 ⁻¹²	7,8·10 ⁻¹²	18,7·10 ⁻¹²	13,4·10 ⁻¹²

В пятой главе диссертации, на основании математической модели массообменных процессов в железобетонного изделия с торкрет-бетонным покрытием, представлен метод расчета полей концентраций свободного гидроксида кальция и агрессивных анионов по толщине покрытия из торкрет-бетона.

С точки зрения теории тепломассопереноса в условиях воздействия растворов солей на торкрет-бетонное покрытие происходят следующие процессы: диффузия свободного гидроксида кальция в торкрет-бетонном покрытии к границе раздела твердой и жидкой фаз; массоперенос через границу раздела фаз; конвективная массоотдача от границы раздела фаз в объем жидкой среды; диффузия солей из объема жидкой окружающей среды к поверхности конструкции; конвективный массоперенос солей через границу раздела фаз; диффузия солей от границы раздела по толщине покрытия из торкрет-бетона; химическое взаимодействие солей с составляющими цементного камня (см. рис.4).

Массоперенос гидроксида кальция и растворов агрессивных солей, либо их ионов, для расчетной схемы рис. 4. на *i*-м микропроцессе в системе «жидкая агрессивная среда → торкрет-бетонное покрытие» с внутренним источником массы описывается линейным дифференциальным уравнением второго порядка в частных производных:

$$\frac{\partial C_T(x,\tau)}{\partial \tau} = k_T \frac{\partial^2 C_T(x,\tau)}{\partial x^2} + \frac{q_{v,T}(x)}{\rho_T}, \quad \frac{\partial C_A(x,\tau)}{\partial \tau} = k_A \frac{\partial^2 C_A(x,\tau)}{\partial x^2} + \frac{q_{v,A}(x)}{\rho_T}, \tau > 0, 0 \leq x \leq \delta, \quad (1)$$

$C_T(x,\tau)$ – распределение концентраций гидроксида кальция в торкрет-бетонном покрытии для момента времени τ , (в пересчете на CaO), кг CaO /кг бетона; $C_A(x,\tau)$ – распределение концентраций агрессивных солей в торкрет-бетоне для момента времени τ кг соли/кг бетона

(кг иона/кг бетона); k_T и k_A – коэффициент массопроводности гидроксида кальция и агрессивных солей, либо их ионов, соответственно в торкрет-бетоне, m^2/c ; $q_v(x, \tau)$ – мощность объемного источника массы гидроксида кальция в торкрет-бетонном покрытии, вследствие химических превращений, $kg\ CaO/(m^3 \cdot c)$; $q_{v,A}(x, \tau)$ – мощность объемного источника массы вследствие химических превращений, $kg\ соли/(m^3 \cdot c)$; x – координата, m ; τ – время, c ; ρ_T – плотность торкрет-бетона, kg/m^3 ; δ – толщина торкрет-бетонного покрытия.

Начальное распределение концентраций гидроксида кальция и агрессивных солей в торкрет-бетоне $C_{0A}(x)$ на в общем виде на i -м микропроцессе принимаем неравномерным, полученное из результатов расчета ($i-1$)-го микропроцесса, описываемое какой-либо математической функцией:

$$C_T(x, 0) = C_{T0}(x), C_A(x, 0) = C_{A0}(x). \quad (2)$$

На левой границе торкрет-бетонного покрытия градиент концентраций отсутствует, а на правой происходит конвективная массоотдача:

$$\frac{\partial C_T(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial C_A(0, \tau)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$k_T \frac{\partial C_T(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta_T [C_{p,T}(\tau) - C_T(\delta, \tau)]; \quad k_A \frac{\partial C_A(\delta, \tau)}{\partial x} = \beta_A [C_{p,A}(\tau) - C_A(\delta, \tau)], \quad (4)$$

где $C_{p,T}$ – равновесная концентрация гидроксида кальция на поверхности торкрет-бетона, $kg\ CaO/kg\ бетона$; β_T – коэффициент массоотдачи гидроксида кальция в жидкой среде, m/c ; $C_{p,A}$ – равновесная концентрация агрессивных солей на поверхности торкрет-бетона, $kg\ соли/kg\ бетона$; β_A – коэффициент массоотдачи агрессивных солей в жидкой среде, m/c .

Для получения аналитических решений, справедливых для целой группы подобных явлений, решение системы уравнений (1)-(4) выполнено в виде функциональных зависимостей между определяемыми и определяющими критериями подобия и безразмерными величинами, удобными для анализа динамики и кинетики процессов коррозии:

$$\Theta(\bar{x}, Fo_m) = \frac{C_T(x, \tau) - C_{p,T}}{C_{T0}}, \quad \bar{x} = \frac{x}{\delta}, \quad Fo_m = \frac{k_T \tau}{\delta^2}, \quad Bi_m = \frac{\beta_T}{k_T} \delta, \quad Po_m^*(\bar{x}) = \frac{q_{T,v}(x) \cdot \delta^2}{k_T \rho_T C_{T0}}, \quad (5)$$

$$\Omega(\bar{x}, Fo_{mA}) = \frac{C_A(x, \tau) - C_{A,p}}{C_{A,p}}, \quad Fo_{mA} = \frac{k_A \tau}{\delta^2}, \quad Bi_{mA} = \frac{\beta_A}{k_A} \delta, \quad Po_{mA}(\bar{x}) = \frac{q_{v,A}(x) \cdot \delta^2}{k_A \rho_T C_{A,p}}. \quad (6)$$

В зависимостях (5) и (6) обозначено: $\Theta(\bar{x}, Fo_{mA})$ – безразмерная концентрация гидроксида кальция в торкрет-бетоне; Fo_{mA} – массообменный критерий Фурье при диффузии гидроксида кальция; $Po_m(\bar{x})$ – модифицированный массообменный критерий Померанцева при диффузии и химических превращениях гидроксида кальция; Bi_m – массообменный критерий Био при диффузии гидроксида кальция. $\Omega(\bar{x}, Fo_{mA})$ – безразмерная концентрация агрессивных солей в торкрет-бетоне; Fo_{mA} – массообменный критерий Фурье при диффузии агрессивной соли; $Po_{mA}(\bar{x})$ – модифицированный массообменный критерий Померанцева при диффузии агрессивной соли; Bi_{mA} – массообменный критерий Био при диффузии агрессивной соли.

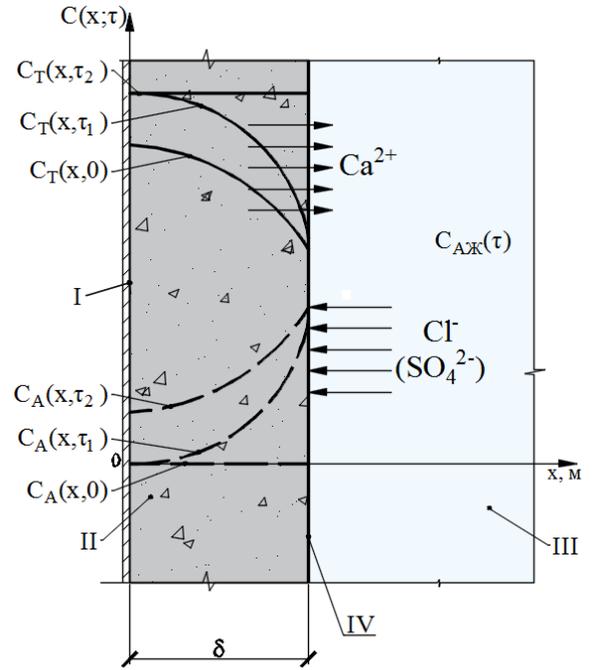


Рис.4. Общая схема системы «жидкая агрессивная среда → торкрет-бетонное покрытие»

I – арматура; II – торкрет-бетон; III – жидкая среда; IV – граница раздела фаз

Диффузия свободного гидроксида кальция и агрессивных солей будет отличаться значениями коэффициентов диффузии и начальным распределением, мощность источника массы гидроксида кальция и агрессивной соли будут связаны константой скорости химической реакции.

Решение систем уравнений (1)-(6), позволит установить аналитическую зависимость распределения полей концентраций свободного гидроксида кальция и агрессивных солей по толщине торкрет-бетонного покрытия. Аналогичные задачи решены научной школой академика РААСН С.В. Федосова.

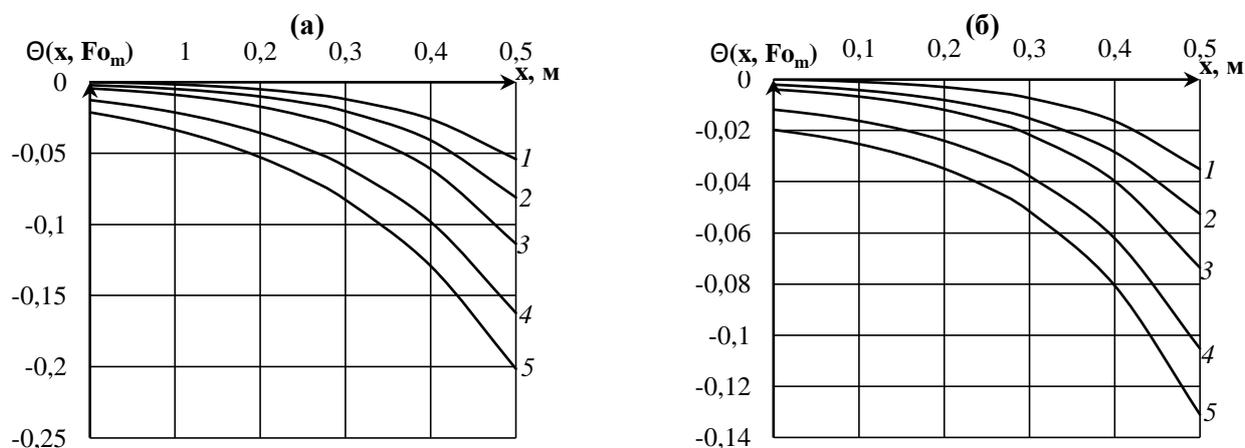


Рис. 5. Изменение безразмерных концентраций гидроксида кальция при расчете стенки портового сооружения из торкрет-бетона, изготовленного из смеси серий «А» (а) и «Д» (б) после 1-5, 2-10, 3-15, 4-25 и 5-30 лет эксплуатации

Полученные результаты расчета концентраций свободного гидроксида кальция показывают низкую интенсивность массопереноса, по сравнению с другими видами бетонов, что позволяет рассматривать торкрет-бетон в качестве эффективной защиты бетонных и железобетонных конструкций от коррозии.

Проверку адекватности математической модели нестационарного массопереноса «жидкая агрессивная среда → торкрет-бетонное покрытие», которая позволяет рассчитать изменение полей концентраций гидроксида кальция и агрессивных анионов солей, выполняли на основании данных полученных из эксперимента, результаты которого приведены в главе 4. Задаваясь аналогичными временными интервалами и полученными параметрами массопереноса, выполнены расчеты изменения полей концентраций по толщине образца и в агрессивном растворе. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений показало, что относительная погрешность предложенной математической модели не превышает 7%, следовательно, по ней можно проводить построение полей концентраций агрессивных солей и гидроксида кальция.

В заключении указаны основные выводы по результатам проведенных теоретических и экспериментальных исследований:

1. Проведенный анализ научной литературы о физико-химических процессах в капиллярно-пористой структуре торкрет-бетона при воздействии жидких агрессивных сред показал, что к настоящему моменту хорошо исследованы особенности технологий торкретирования сухим и мокрым способами, установлены оптимальные соотношения исходных материалов, определено влияние модифицирующих ускоряющих и гидрофобизирующих добавок. Все исследования затрагивают только физические и механические свойства торкрет-бетона в процессе твердения и после его окончания, но изменения этих свойств при эксплуатации в агрессивных растворах солей не рассмотрены, а, следовательно, не выяснена долговечность торкрет-бетонных покрытий.

2. По изменениям концентраций катионов кальция, сульфат и хлорид анионов, относительно изменению массы и прочности образцов при сжатии установлена диффузионная проницаемость торкрет-бетонных покрытий для сульфатных и хлоридных сред. На всех образцах торкрет-бетона, погруженных в растворы хлорида и сульфата натрия, зафиксировано снижение прочности, что указывало на износ и повреждения. Определены процентное изменение массы и прочности при сжатии образцов, подверженных действию растворов хлорида и сульфата натрия. Наибольшие изменения зафиксированы в растворе сульфата натрия: относительное увеличение массы образцов (2,2%) у торкрет-бетонов с В/Ц= 0,55, а изменение предела прочности при сжатии (на 15%) у образцов с микрокремнеземом МК-85.

3. Установлено, что образцы, модифицированные золой уноса, продемонстрировали лучшую устойчивость к повреждению поверхности по сравнению с другими образцами. Повышение содержания оксида алюминия на 2,5-3% в образцах с золой уноса не способствовало образованию этtringита. В условиях сульфатной коррозии торкрет-бетона, наихудшая коррозионная стойкость отмечается у образцов, модифицированных кремнеземом, так как содержание оксида кремния в образцах данной серии больше на 6 %, по сравнению с другими образцами, что благоприятствовало образованию таумасита. Выявлено, что, использование диоксида кремния в качестве частичной замены портландцемента не эффективно для торкрет-бетона в средах, содержащих сульфаты.

4. Результаты исследования по водонепроницаемости показывают, что для рассматриваемых составов марка находится в интервале W10-W14, что в совокупности с другими результатами коррозионных испытаний позволяют оценивать торкрет-бетон материалом особо низкой проницаемости и применять для эффективной защиты бетонных и железобетонных конструкций от коррозии.

5. Исследована кинетика и динамика массопереноса свободного гидроксида кальция в торкрет-бетонных образцах различного состава. Определены коэффициенты массопроводности и массоотдачи, интенсивность объемного поглощения гидроксида кальция, вследствие химических реакций. Коэффициент массопроводности гидроксида кальция в торкрет-бетонах находится в интервале от $3 \cdot 10^{-11}$ до $6 \cdot 10^{-11} \text{ м}^2/\text{с}$; интенсивность объемного поглощения свободного гидроксида кальция в торкрет-бетонах в начале процесса находится в интервале от $4,4 \cdot 10^{-9}$ до $8 \cdot 10^{-9}$ кг CaOH/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$), а при достижении равновесного состояния системы от $6,8 \cdot 10^{-9}$ до $11,4 \cdot 10^{-9}$ кг CaOH/($\text{м}^3 \cdot \text{с}$); коэффициент массоотдачи гидроксида кальция на торкрет-бетонных покрытиях находится в интервале от $1,75 \cdot 10^{-8}$ до $7,15 \cdot 10^{-8} \text{ м/с}$. Рассчитаны коэффициенты диффузии водонасыщенных образцов торкрет-бетона в растворах хлорида и сульфата натрия.

6. Сформулирована краевая задача массопереноса свободного гидроксида кальция и агрессивных солей по толщине торкрет-бетонного покрытия, решение которой позволило разработать методику прогнозирования временных интервалов, в границах которых обеспечивается защита арматуры бетона, заключающуюся в построении профилей концентраций по толщине образца в условиях активации механизмов проникновения агрессивных солей через защитный слой из торкретбетона к поверхности арматуры и гидроксида кальция из бетона в жидкую агрессивную среду.

7. Проверена адекватность разработанной математической модели массообменных процессов в железобетонной модельной пластине торкрет-бетонного покрытия, учитывающей физико-химические особенности коррозионного разрушения в условиях воздействия агрессивных растворов солей. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений показало, что относительная погрешность предложенной математической модели не превышает 7%, следовательно, по ней можно проводить построение полей концентраций агрессивных солей и гидроксида кальция, анализировать влияние основных параметров системы на массоперенос, исследовать скорость коррозии.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий и международные реферативные базы данных и системы цитирования, рекомендованных ВАК РФ

1. Румянцева, В.Е. Исследование влияния температуры на интенсивность массопереноса при коррозии первого вида цементных бетонов / Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А., **Новикова У.А.**, Касьяненко Н.С. // Современные проблемы гражданской защиты. №1. 2022. С. 24-31.
2. Румянцева, В.Е. Определение влияния вязкости насыщающей жидкости на физико-механические характеристики цементного камня различной пористости/ Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А., Строкин К.Б., **Новикова У.А.** // Современные проблемы гражданской защиты. №2. 2022. С. 143-152.
3. Румянцева, В.Е. Прогнозирование долговечности железобетонной башенной градирни, с учетом циклически изменяющихся параметров среды эксплуатации / Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А., **Новикова У.А.**, Строкин К.Б. // Современные проблемы гражданской защиты. 2022. № 3 (44). С. 89-98.
4. Румянцева, В.Е. Трансформация прочности бетона при эксплуатации конструкции в агрессивной воздушной среде с изменяющимися параметрами / Румянцева В.Е., Красильников И.В., **Новикова У.А.**, Красильникова И.А., Строкин К.Б. // Современные проблемы гражданской защиты. 2023. № 3 (48). С. 158-168.
5. Красильников, И.В. Управление долговечностью сооружений из бетона и железобетона (на примере железобетонной башенной градирни)/ Красильников И.В., **Новикова У.А.**, Строкин К.Б., Красильникова И.А. // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Прикладная экология. Урбанистика. 2022. № 3 (47). С. 66-81.
6. Румянцева, В.Е. Моделирование массопереноса агрессивных растворов солей в торкрет-бетонном покрытии / Румянцева В.Е., Красильников И.В., **Новикова У.А.**, Красильникова И.А., Строкин К.Б. // Современные проблемы гражданской защиты. 2024. № 2 (51). С. 116-128.
7. **Новикова, У.А.**, Исследование деструкции торкрет-бетона как защитного покрытия конструкций строительных объектов текстильной отрасли / **Новикова У.А.**, Строкин К.Б., Красильникова И.А. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2024. №1(409). С.180-186. (*Scopus, Chemical Abstracts*).
8. **Новикова, У.А.**, Коррозионная стойкость торкрет-бетона в условиях воздействия растворов солей/ **Новикова У.А.**, Строкин К.Б., Красильникова И.А. // Строительные материалы. 2024 №3. С. 31-36. (*Chemical Abstracts, Russian Science Citation Index*)
9. Румянцева, В.Е. Изменение несущей способности строительных конструкций предприятий текстильной и легкой промышленности / Румянцева В.Е., Красильников И.В., Красильникова И.А., **Новикова У.А.**, Строкин К.Б. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2023. №2(404). С.218-227. (*Scopus, Chemical Abstracts*).

Прочие издания

10. Красильников, И.В. Методика экспериментального определения феноменологического коэффициента диффузии. Красильников И.В., Красильникова И.А., **Новикова У.А.** // В сборнике: современные материалы, техника и технология. Сборник научных статей 11-й Международной научно-практической конференции. Курск, 2021. С. 229-233.
11. Красильников, И.В. Пример практической реализации математической модели коррозионного массопереноса. Красильников И.В., Красильникова И.А., **Новикова У.А.**, Строкин К.Б. В сборнике: Инженерные и социальные системы. Сборник научных трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2021. С. 19-30.
12. Красильников, И.В. Способ аппроксимации аналитическими уравнениями экспериментальных данных о динамике массопереноса в теле строительных конструкций. Красильников И.В.,

Красильникова И.А., **Новикова У.А.**, Строкин К.Б. В сборнике: Инженерные и социальные системы. Сборник научных трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2021. С. 11-18.

13. Красильников, И.В. Условия стабильного существования высокоосновных соединений цементного камня / Красильников И.В., Красильникова И.А., **Новикова У.А.** // В сборнике: Актуальные вопросы науки, нанотехнологий, производства. сборник научных статей Международной научно-практической конференции. Курск, 2021. С. 147-149.

14. **Новикова, У.А.** Изучение кинетики массопереноса при жидкостной коррозии бетона первого вида и определение параметров жидкой фазы / **Новикова У.А.**, Красильников И.В., Строкин К.Б. // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2021. № 1. С. 357-359.

15. Строкин, К.Б. Об определении коэффициента теплоотдачи в процессах тепловлажностной обработки железобетонных конструкций на основе теории подобия / Строкин К.Б., Красильников И.В., **Новикова У.А.** // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2021. № 1. С.392-393.

16. Румянцева, В.Е. Моделирование изменения прочностных свойств бетона при его коррозии в воздушной среде /Румянцева В.Е., Красильников И.В., Строкин К.Б., Красильникова И.А., **Новикова У.А.**// В сборнике: Современные проблемы материаловедения. Сборник научных трудов IV Всероссийской научно-практической конференции. Липецк, 2023. С. 168-182.

17. Красильников, И.В. Химико-минералогические особенности цементного камня / Красильников И.В., **Новикова У.А.**, Строкин К.Б. // В сборнике: Экологические аспекты современных городов. Сборник материалов IX межрегионального семинара. Иваново, 2023. С. 34-36.

18. **Новикова, У.А.** Основные аспекты прогнозирования долговечности железобетонных конструкций/ **Новикова У.А.**, Красильников И.В., Строкин К.Б. // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2023. № 1. С. 379-381.

19. **Новикова, У.А.**, Основные принципы получения бетонов низкой диффузионной проницаемости/ **Новикова У.А.**, Красильников И.В., Строкин К.Б. // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). 2022. № 1. С. 325-326.

20. Красильников, И.В. Об исследовании пористой структуры цементного камня / Красильников И.В., Щаницына А.М., **Новикова У.А.** // В сборнике: Инженерные и социальные системы. Сборник научных трудов института архитектуры, строительства и транспорта ИВГПУ. Иваново, 2022. С. 18-23.