

На правах рукописи



ДАНИЛОВ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН ПОВЫШЕННОЙ
СУЛЬФАТОСТОЙКОСТИ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Толыпина Наталья Максимовна

Официальные оппоненты: **Самченко Светлана Васильевна**,
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет», заведующий кафедрой
строительного материаловедения

Красильникова Ирина Александровна,
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «Владимирский
государственный университет имени
Александра Григорьевича и Николая
Григорьевича Столетовых» (ВлГУ)»,
доцент кафедры химии и химических
технологий

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Мордовский
государственный университет им. Н.П.
Огарёва»

Защита состоится «13» октября 2026 года в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 242.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Danilov

Автореферат разослан _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Снижение долговечности бетонных конструкций является одной из основных проблем в практике современного строительства. Существующие эффективные решения, помогающие противостоять развитию коррозии в бетонных конструкциях, в основном ориентированы на высокомарочные бетоны, в то время как вопросы защиты широко распространенных бетонов низких классов прочности с малым расходом вяжущего остаются недостаточно изученными. Растущая агрессивность окружающей среды, обусловленная антропогенной деятельностью, усугубляет эти процессы, что требует разработки эффективных мер защиты строительных изделий и конструкций на основе бетонов, в том числе и низких классов прочности с ограниченным расходом вяжущего, на долю которых приходится около 30 % от общего производства.

Существующие традиционные методы исследований коррозионного повреждения бетона достаточно длительные и трудоемкие, они проводятся в лабораторных условиях с использованием большого количества испытуемых образцов, больших объемов периодически сменяемых агрессивных растворов, что создает определенные трудности при проведении исследований. При исследовании коррозии бетона рационально применение комплексного подхода, сочетающего традиционные и другие современные доступные методы. Особый потенциал имеет ультразвуковая диагностика, которая, несмотря на успешное применение для оценки дефектов и свойств бетона, практически не используется для исследования кинетики коррозии бетона. В этой связи актуальной задачей является разработка рациональных способов обеспечения долговечности цементного бетона с ограниченным расходом вяжущего и необходимость совершенствования методик испытаний коррозионной стойкости.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта № 25/22 в рамках мероприятий Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова на тему: «Высокоэффективные бетоны на основе многокомпонентных минеральных наполнителей».

Степень разработанности темы. Выполнен большой объем теоретических и экспериментальных исследований, установлены закономерности наиболее распространенных коррозионных процессов. В целях борьбы с коррозией реализованы различные способы снижения агрессивного воздействия среды на конструкцию: снижение водоцементного отношения, выбор стойких видов цемента, применение минеральных и органических добавок, и др. Проведенные исследования коррозионной стойкости и эффективные способы первичной защиты распространяются на высококачественные бетоны с низкой проницаемостью. Однако выполненные исследования не охватывают проблему коррозии строительных изделий и конструкций на основе бетона с низким расходом вяжущего, актуальность которой приобретает все более важное значение.

Цель работы. Повышение коррозионной стойкости цементных бетонов с низким расходом вяжущего путем модифицирования минеральными наполнителями и водоредуцирующими ПАВ.

Для достижения цели решались **следующие задачи:**

- исследование влияния вида и дозировок наполнителей на эффективность водоредуцирующих добавок в смесях с низким содержанием вяжущего и свойства композита;
- исследование коррозионной стойкости бетонов, модифицированных минеральными добавками и ПАВ в растворах сульфатов магния и натрия;
- разработка методики исследования кинетики коррозионных процессов в цементных композитах посредством ультразвуковой диагностики;
- получение, анализ и систематизация эмпирических данных о стадиях и продуктах коррозионных процессов в модифицированных бетонах;
- подготовка нормативно-технических документов для промышленной апробации результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Научная новизна работы.

Обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение коррозионностойких бетонов с низким содержанием цемента. Выявлены причины повышения коррозионной стойкости: физический фактор обусловлен уплотнением структуры цементной матрицы бетона за счет снижения водоцементного отношения (на 24-44 %) путем применения суперпластификатора и минеральных модификаторов (40-70 % от массы цемента); химический фактор связан с ослаблением химического взаимодействия цементного камня с агрессивной средой за счет сокращения содержания алюминатной фазы и свободного гидроксида кальция. Установлена функциональная взаимосвязь между дозировками наполнителей, видом агрессивной среды и коэффициентами стойкости бетона.

Уточнен механизм сульфатной и сульфатно-магнезиальной коррозии, предложены зональные модели послойного разрушения бетона. Продвижение зоны сульфатной коррозии вглубь бетона с инертными минеральными добавками сопровождается изменением морфологии кристаллов этtringита от тонковолокнистого до игольчатого, что обусловлено: повышением концентрации гидроксида кальция в жидкой фазе бетона и снижением растворимости гидроалюминатных фаз; снижением интенсивности поступления сульфат-ионов в зону реакции и длительностью процессов. Повышение дозировки активной минеральной добавки золы-уноса приводит к уменьшению размеров волокнистых кристаллов этtringита и снижению кристаллизационного давления, что способствует уменьшению глубины корродированного слоя.

Доказана целесообразность применения для прогнозирования и оценки долговечности бетона метода ультразвуковой диагностики, позволяющей исследовать кинетику коррозии бетона в агрессивных средах. Установлено, что положительная динамика роста скорости прохождения ультразвукового

сигнала в корродированных образцах на начальном этапе связана с процессами гидратации и кольтматацией пор бетона продуктами коррозии, а дальнейшее снижение скорости обусловлено доминированием эффекта разрушения (микротрещинообразования) над эффектом уплотнения. В качестве критерия целесообразно использовать интервал времени от начала испытаний до момента стабильного снижения скорости УЗ-сигнала; чем медленнее протекает коррозия, тем длительнее период до сброса скорости.

Степень достоверности результатов работы обеспечивается применением современных методов исследований на аттестованном оборудовании в соответствии со стандартными и специализированными методиками испытаний, а также сопоставимостью полученных результатов с основными положениями и данными фундаментальных наук.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о механизмах сульфатной и сульфатно-магнезиальной коррозии. Представлены зональные модели поэтапного развития коррозии, выявлены морфологические особенности основных продуктов коррозии. Получены новые эмпирические данные о стадиях и формах основного продукта сульфоалюминатной коррозии – этtringита и дано их теоретическое обоснование. Показана зависимость морфологии кристаллов этtringита от условий образования: вида агрессивного носителя, активности минерального наполнителя и глубины осаждения в корродированной зоне.

Разработана и апробирована методика исследования кинетики коррозии цементных композитов посредством ультразвуковой диагностики, что позволяет снизить трудоемкость исследований и получить более полные данные о кинетике разрушения бетона под воздействием агрессивных сред в комплексе с традиционными методами испытаний, и на этой основе выбирать стойкие составы. Установлены и обоснованы закономерности влияния коррозионных процессов на динамику скорости ультразвуковых импульсов. Разработаны рекомендации по математической обработке данных УЗ-диагностики.

Разработаны и апробированы рецептуры коррозионностойких модифицированных бетонов со сниженным расходом вяжущего за счет усиления водоредуцирующего действия суперпластификаторов путем введения различных минеральных наполнителей (взамен заполнителей), что сопровождается увеличением плотности, прочности и коррозионной стойкости. Разработанные составы модифицированного бетона не требуют принципиального изменения стандартной технологической схемы производства, что облегчает производство в промышленных условиях. Показано, что экономический эффект, заключается в повышении долговечности конструкций и снижении затрат на их ремонт и восстановление впоследствии.

Методология и методы исследования. В работе реализован комплексный методологический подход, включающий анализ мирового научного опыта, разработку способов решения поставленных задач,

проведение экспериментов и интерпретацию полученных результатов с выявлением ключевых закономерностей и формулировкой рекомендаций для дальнейших изысканий. Использовалось современное высокотехнологичное оборудование, а также методы испытаний и анализа, соответствующие требованиям отечественных и международных стандартов. Применялись методы математической и статистической обработки результатов.

Положения, выносимые на защиту:

- особенности кинетики коррозии модифицированного бетона в различных агрессивных средах;
- методика испытаний коррозионной стойкости цементных композитов при помощи ультразвуковой диагностики;
- зональные модели послойного разрушения бетона при сульфатной и сульфатно-магнезиальной коррозии;
- зависимость морфологии кристаллов этtringита от условий образования в корродированной зоне;
- рекомендации по выбору минеральных добавок и их рациональных дозировок для бетона повышенной стойкости;
- взаимосвязь физико-механических характеристик бетона и рецептурно-технологических параметров.

Апробация результатов исследований. Основные положения диссертационной работы были представлены на: VII Всероссийской научно-практической конференции «Инженерное дело на Дальнем Востоке России» (Владивосток, 2023); Международной научно-практической конференции «Инновации в строительстве – 2023» (Брянск, 2023); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященной 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова (Белгород, 2023); XV Международного молодежного форума «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2023); VIII Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 2024); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В. Г. Шухова; XVI Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2024); IX Международный студенческий строительный форум (Белгород, 2024); I Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь и наука» (Новокузнецк, 2025); Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития исследовательских компетенций в условиях инновационного кластера» (Казань, 2025); финалист программы Акселератор 2.10 с проектом «Разработка стойких к коррозии торкрет покрытий» (2025).

Внедрение результатов исследований. С целью внедрения результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-091-2025 и технологический регламент на производство модифицированного бетона с повышенной коррозионной стойкостью.

С ООО «ЭрионСтройГрупп» подписан протокол о намерениях производства модифицированного бетона с повышенной коррозионной стойкостью.

Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе при чтении курсов лекций «Вяжущие вещества», «Долговечность строительных конструкций» для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению «Строительство» (08.03.01-05 и 08.04.01).

Публикации. Основные положения работы изложены в 12 публикациях, в том числе: 4 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; патент РФ №2839780.

Личный вклад. Выполнен комплекс экспериментальных исследований, последующая обработка и анализ полученных результатов. Все разделы диссертационной работы выполнены лично автором. Принято участие в апробации результатов работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, шесть глав, заключение, список литературы и приложений. Диссертация изложена на 187 страницах машинописного текста, содержит 27 таблиц, 77 рисунков, список литературы из 181 источника.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В настоящее время находят достаточно широкое применение бетоны низких классов прочности, которые нередко используются в конструкциях, эксплуатирующихся в постоянном контакте с сухими или обводненными грунтами (элементы фундаментов, дорожные одежды, коллекторы, бетонные желоба для коммуникаций и т.д.). Степень загрязнения грунтовых вод химическими веществами постоянно повышается, источниками являются промышленные предприятия, транспортные средства, кислые атмосферные осадки, техногенные аварии и т.д. Усугубляется агрессивное влияние повышением уровня грунтовых вод и ростом концентрации загрязнений. Это создает опасность преждевременного разрушения изделий в связи с малым количеством цементирующей связки и повышенной пористостью по сравнению с бетонами средних классов.

Современные методы исследования коррозионного повреждения бетона достаточно длительные и трудоемкие, что затрудняет их применение. Это вызывает необходимость поиска новых подходов для исследования деструкции бетона под воздействием агрессивных сред. В настоящее время эффективно используется метод ультразвуковой диагностики для выявления различных структурных дефектов строительных материалов. Однако вопрос о возможности применения метода ультразвуковой диагностики для исследования кинетики коррозии бетона практически не изучен.

Рабочая гипотеза: Универсальным способом повышения коррозионной стойкости бетонов является снижение водопотребности бетонной смеси при помощи суперпластификаторов, что замедляет диффузию агрессивных ионов

вглубь изделий и конструкций из них. Однако такой способ малоэффективен для бетонных изделий низких классов прочности с пониженным расходом вяжущего. Для усиления водоредуцирующего действия суперпластификаторов целесообразно вводить тонкодисперсные минеральные добавки за счет снижения соответствующего количества заполнителей. Это позволит уплотнить цементный камень и повысить коррозионную стойкость.

В качестве субъекта исследований использовали бетоны низких и средних классов, изготовленные на основе материалов: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ЗАО «Осколцемент», ГОСТ 30108-2020), кварцевый песок (ГОСТ 8736–2014, ООО «Пулмаркет»), микрокварц ($S_{уд} = 3866 \text{ см}^2/\text{г}$, ГОСТ 9077-82); молотый известняк ($S_{уд} = 3797 \text{ см}^2/\text{г}$); гранит фр. 2,5-5 мм АО «Павловск-Неруд», г. Воронеж); зола-унос Смоленской ГЭС ($S_{уд} = 2811 \text{ см}^2/\text{г}$); лом из бетона класса В 25, суперпластификаторы «Полипласт ПК тип S» (СП 340.1325800.2017), «Реопласт ПКЭ 3392» (ТУ 5745-002-25842763-2014), «Полипласт Линамикс СП-180» (ТУ 5870-016-58042865-2006).

Составы испытываемых образцов бетона выбраны с целью обеспечить подобие коррозионных процессов в лабораторных условиях реальным (цемент:заполнитель=1:9, 1:8, 1:7, 1:5). Коррозионные исследования проводили по методике, разработанной в БГТУ им. В.Г.Шухова, с учетом рекомендаций ГОСТ 27677-88 (СТ СЭВ 5852-86). Использовали образцы мелкозернистого бетона размером 2,5х2,5х10 и 2,5х2,5х16 см. После 14 сут твердения в воде образцы погружали в 1,5 %-е растворы сульфатов магния и натрия, контрольные образцы продолжали твердеть в нормальных условиях. Образцы через 1, 3, 6 и 12 мес твердения испытывали на прочность на гидравлическом прессе. Рассчитывали коэффициент стойкости ($K_{ст}$) как отношение прочности образцов, твердевших в агрессивной среде, к прочности образцов водного твердения. Параллельно каждые две недели проводили ультразвуковую диагностику посредством прибора «Пульсар-2.2». Для углубленного анализа микроструктуры, морфологии поверхности и фазового состава использовались методы растровой электронной микроскопии (РЭМ) и рентгенофазового анализа (РФА).

Разработана методика исследования кинетики коррозии образцов бетона в лабораторных условиях с помощью ультразвукового метода. Представлена схема прохождения ультразвуковых волн через корродированный образец (рис. 1, рис. 2).



Рис. 1 – УЗ-диагностика орродированного образца

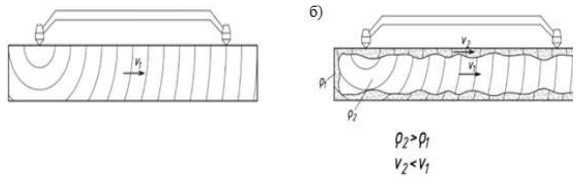


Рис. 2 – Схема распространения ультразвуковых волн в образце бетона:
а) с целостной структурой;
б) с внешним коррозированным слоем

Продольная волна, прошедшая через коррозированный слой бетона, будет запаздывать из-за большей потери энергии, что сопровождается снижением скорости прохождения УЗ-импульса. Для получения достоверных результатов принципиальное значение имеет соотношение площади сечения поврежденной части бетона к внутреннему сечению, незатронутому коррозией. По этой причине, образцы минимального поперечного сечения 2,5х2,5 см, которые дают наименьший разброс данных и проявляют большую чувствительность к изменению прочности при испытаниях на коррозионную стойкость, целесообразно использовать для УЗ-диагностики. Для экспериментальной проверки адекватности ультразвукового метода использовали образцы трех составов (цемент:заполнитель=1:9 (B15), 1:7 (B20), 1:5 (B30)), которые твердели в разных средах.

Установлено, что скорость прохождения УЗ-сигнала в образцах бетона достаточно чувствительна к процессам деструкции под воздействием агрессивных сред, что отражается количественными показателями (рис. 3, рис. 4). Средняя скорость прохождения УЗ-сигнала через образцы представляет собой интегральный показатель, включающий комплекс параметров (прочность, пористость, внутренние напряжения и т.д.). Математическое моделирование с помощью линии тренда подтвердило представленную на рис. 4 зависимость: по мере увеличения расхода вяжущего растут и коэффициенты детерминации R^2 (по скорости УЗ-импульса $V_{уз}$: 1:9 – 0,1366; 1:7 – 0,7397; 1:5 – 0,9209; по прочности на сжатие $R_{сж}$: 1:9 – 0,3113; 1:7 – 0,3846; 1:5 – 0,9706). Это свидетельствует о том, что процессы твердения положительно детерминируются как при помощи УЗ-диагностики, так и при помощи разрушающих методов.

Выявлены и обоснованы закономерности динамики скорости УЗ-сигнала по ходу развития коррозионных процессов в зависимости от состава бетона и среды хранения (рис. 3). Рост скорости УЗ в течение первых месяцев связан с процессами гидратации и кольтатацией поврежденного слоя продуктами коррозии. Снижение скорости УЗ-импульса начинается, когда эффект

разрушения (микротрещинообразования) начинает преобладать над эффектом уплотнения. В качестве критерия целесообразно использовать интервал времени от начала испытаний до момента стабильного снижения скорости УЗ-сигнала; чем медленнее протекает коррозия, тем длительнее период до сброса скорости. Так, у состава 1:5 постоянное снижение скорости наблюдалось приблизительно через 4 мес, у состава 1:7 – через 3 мес. Следует учитывать, что у образцов с повышенной пористостью (1:9) снижение скорости может происходить позднее, так как увеличивается интервал для накопления продуктов коррозии в развитой системе пор до критического значения. Применение ультразвуковой диагностики наряду со стандартными методами испытаний коррозионной стойкости бетона дает новые сведения о процессах микротрещинообразования при деструкции бетона под воздействием агрессивных сред. Достоинством этого метода является также снижение трудоемкости и материалоемкости экспериментальных исследований, поскольку достаточно использование как минимум одного образца в течение всего срока испытаний.

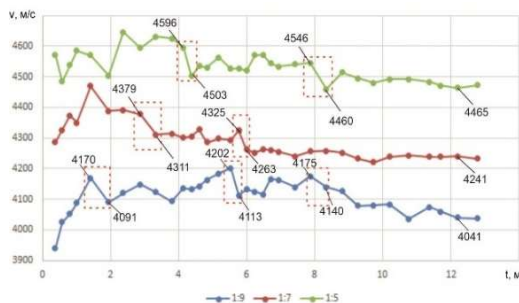


Рис. 3 – Скорость прохождения УЗ-импульса в образцах бетона различного состава, твердевших в 1,5 %-м р-ре MgSO_4

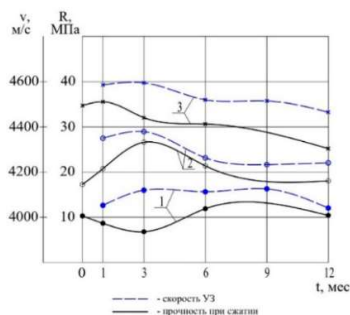


Рис. 4 – Зависимость $R_{сж} - t$ и $V_{уз} - t$ образцов, твердевших в 1,5 %-м р-ре MgSO_4 . Составы: 1–1:9, 2–1:7, 3–1:5

Универсальным средством первичной защиты бетона является уменьшение проницаемости за счет снижения В/Ц. Для повышения водоредуцирующего действия СП в смесях с низким расходом вяжущего вводили тонкодисперсные наполнители взамен заполнителей. Установлено, что применение наполнителей (кварц, известняк) в количестве 20-70 % позволяет добиться существенного снижения В/Ц на 23,6-43,8 % (табл. 1), что способствует росту прочности $R_{сж}^{28}$ на 31-74 %. При этом вид наполнителя не оказывает заметного влияния на водоредуцирующую способность суперпластификатора, но играет значительную роль в процессах структурообразования. Преимущество известнякового наполнителя по

сравнению с кварцевым обусловлено усилением сцепления между частицами известняка с положительно заряженными активными центрами и отрицательно заряженными гидросиликатами кальция.

Таблица 1 - Влияние наполнителей и СП на свойства модифицированных бетонов

№	Ц:Гр:П:Д _м	Д _м , %	СП, %	В/Ц	РК, мм	М _{ц+} , Д _м , кг/м ³	ρ б.см, кг/м ³	R ⁷ , МПа		R ²⁸ , МПа	
								R _{изг}	R _{сж}	R _{изг}	R _{сж}
Тонкодисперсный кварц, S _{уд} =3866 см ² /г											
1	1:3,9:3,9:0,2	20	0,8	0,68	112*	294	2359	2,42	20,14	3,46	25,89
2	1:3,8:3,8:0,4	40	0,8	0,64	111	358	2384	3,84	27,76	3,46	31,94
3	1:3,72:3,72:0,5	55	0,8	0,56	112	406	2444	3,95	32,17	3,90	34,33
4	1:3,65:3,65:0,7	70	0,8	0,51	111	452	2478	4,84	28,40	3,10	33,81
Тонкодисперсный известняк, S _{уд} =3797 см ² /г											
5	1:3,9:3,9:0,2	20	0,8	0,66	112	294	2397	3,92	20,29	3,28	25,37
6	1:3,8:3,8:0,4	40	0,8	0,61	111	357	2430	5,24	23,11	3,74	27,67
7	1:3,72:3,72:0,5	55	0,8	0,55	113	401	2450	1,81	36,75	4,4	38,02
8	1:3,65:3,65:0,7	70	0,8	0,50	110	463	2490	7,63	49,82	7,26	44,04

Обозначения: Ц:Г:П:Дм – соотношение Цемент:Гранит:Песок:Мин.добавка; Дм – дозировка минеральной добавки; СП – дозировка суперпластификатора; В/Ц – водоцементное соотношение; РК – распыл конуса; М_{ц+}Дм – содержание цемента и мин. добавки на 1 м³ смеси; ρ_{б.см} – плотность бетонной смеси; R⁷_{сж} – прочность на 7 суток; R²⁸_{сж} – прочность на 28 суток.

Экспериментальными исследованиями установлено, что стойкость порошково-модифицированных бетонов в агрессивных средах увеличивалась с ростом дозировок наполнителей. Коэффициент стойкости бетона с кварцевым наполнителем (при дозировках 20; 40; 70 %) в растворе сульфата магния составил, соответственно: K_{ст}¹²=0,67; 0,70; 0,89; с известняковым – K_{ст}¹²=0,77; 0,94; 0,97. В менее агрессивном растворе сульфата натрия влияние дозировок наполнителей сказывалось слабее. Коэффициент стойкости увеличивался с ростом содержания кварцевого наполнителя, соответственно: K_{ст}¹² = 0,93; 0,94; 1,00; известнякового: K_{ст}¹²=0,86; 1,11; 1,03.

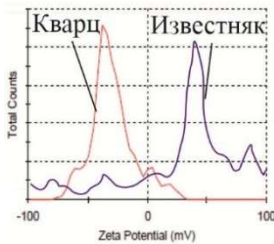


Рис. 5 –
Электрокинетический
потенциал поверхности
частиц наполнителя

В связи с тем, что частицы кварца характеризуются отрицательными электроповерхностными свойствами, а известняка – положительными, то первые должны тормозить диффузию сульфат-ионов, а вторые – наоборот, усиливать (рис. 5). Соответственно, при использовании известнякового наполнителя стойкость

образцов в растворах сульфатов должна быть ниже, чем с кварцевым. Однако, фактически коэффициенты стойкости образцов бетона с молотым кварцем и известняком мало отличались. Это можно объяснить лишь тем, что в цементной матрице бетона с низким расходом вяжущего имеется значительное количество крупных пор, по которым проникают агрессивные ионы вглубь образца, при этом электрокинетические явления играют второстепенную роль. Решающее значение имеют процессы взаимодействия поверхностных слоев наполнителей с цементной матрицей бетона.

На основе результатов электронно-микроскопических исследований предложены зональные модели послойного разрушения бетона при сульфатной и сульфатно-магнезиальной коррозии. Диагностированы зоны преобладающего вида сульфатно-магнезиальной коррозии (рис. 6): I – углекислотная коррозия, слой CaCO_3 ; II – магнезиальная коррозия, слой $\text{Mg}(\text{OH})_2$; III – магнезиальная+сульфатная коррозия, образование преимущественно $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ + MSH-фаза; IV – сульфатная и сульфоалюминатная коррозия, накопление $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$; V – выщелачивание. Границы зон носят достаточно условный характер, так как они постоянно трансформируются в результате постепенного продвижения коррозии вглубь бетона. Для каждой условной зоны продемонстрированы характерные продукты коррозии, представленные новообразованиями различных размеров и морфологии, идентичность которых подтверждена элементным составом.

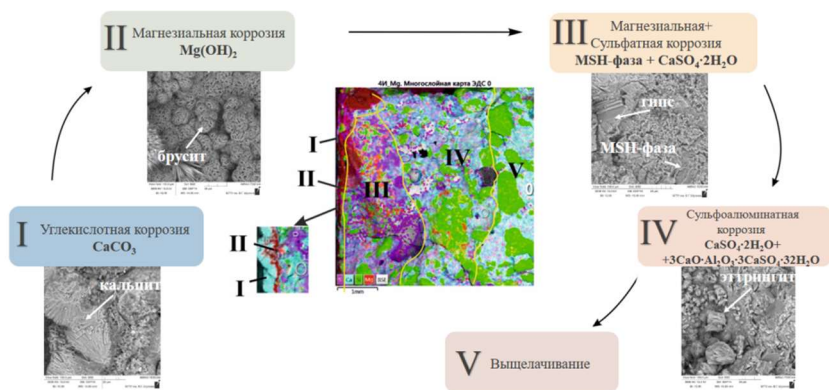
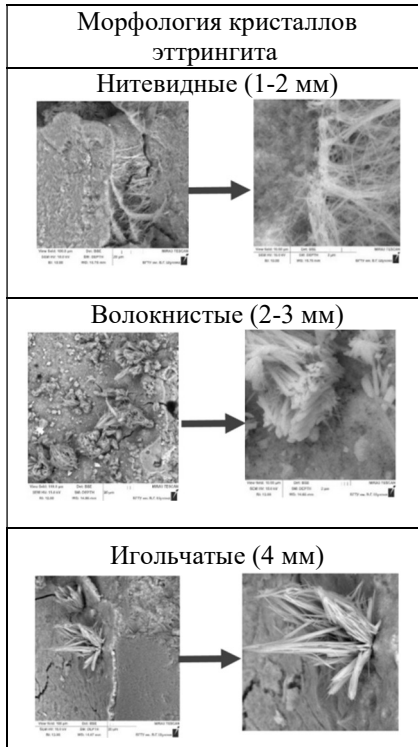


Рис. 6 – Картирование поверхностного слоя (5 мм) корродированных образцов с известняком (40 %)

В условиях сульфатной агрессии зональность развития коррозии имела вид: на поверхности регистрируется тонкий слой карбоната кальция (зона I); далее идет зона сульфатной и сульфоалюминатной коррозии, где осаждается двухводный гипс и гидросульфоалюминат кальция (зона II); затем следует зона выщелачивания (III). Основная масса гипса кристаллизуется близко к

поверхности. Выявлено, что морфология кристаллов этtringита меняется от тонковолокнистого до игольчатого по мере продвижения вглубь зоны коррозии. (табл. 2), что кальция в жидкой фазе бетона и, соответственно, растворимости гидроалюминатных фаз, а также с интенсивностью поступления сульфатов и длительностью процесса коррозии. Полученные

Таблица 2 – Эволюция морфологии кристаллов этtringита



данные углубляют понимание механизмов коррозии и важны для прогнозирования долговечности бетонов.

Посредством УЗ-диагностики в течение 24 мес изучалась кинетика коррозии модифицированного бетона. Результаты показали, что наибольшее сопротивление коррозионному разрушению в растворе сульфата магния наблюдалось у образцов с 40 % кварца и 70 % известняка, что свидетельствует о формировании плотной и равномерной структуры бетона, что в условиях малой концентрации агрессивной среды позволило существенно замедлить процессы коррозии (рис. 7). Точка перегиба кривой скорости УЗ-сигнала, как показателя видимого разрушения у образца бетона с 70 % кварцевого наполнителя наступает через ≈ 7 мес, а с 40 % известняка – через ≈ 12 мес. У образцов с минимальным содержанием наполнителей (20 %) снижение скорости УЗ наблюдается через 3-4 мес. Выявлено, что в растворе сульфата натрия 24-месячные испытания

выдержали составы на известняковом наполнителе при дозировках 40-70 %, на кварцевом – 40 %. На кривых скорости УЗ-импульса прослеживаются периоды подъема, свидетельствующие о частичном восстановлении структуры.

Накопленные массивы данных УЗ-диагностики создали условия для разработки математических моделей, в роли которых могут служить линии тренда, заданные при помощи полиномиальной или степенной функции, а их надежность можно оценить при помощи величины достоверности аппроксимации R^2 . Выявлено, что наиболее рациональной функцией модели для описания кинетики твердения образцов в воде является степенная, а для

кинетики твердения в агрессивных средах – полиномиальная.

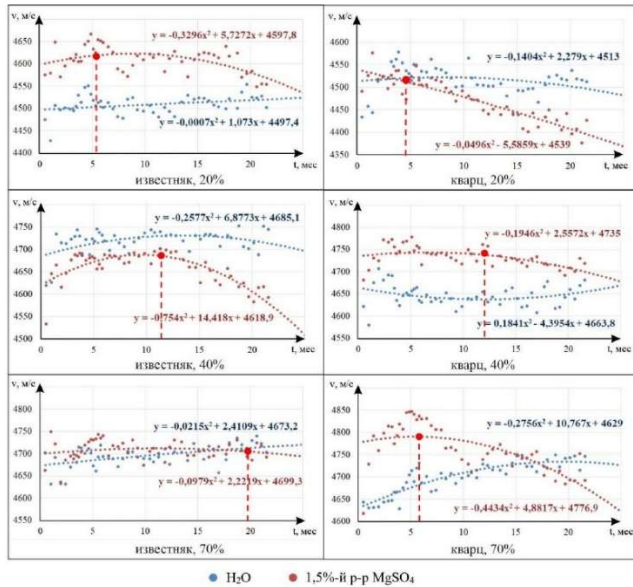


Рис. 7 – Скорость прохождения УЗ-импульса в образцах

Одним из эффективных методов защиты от сульфатной агрессии является введение активных минеральных добавок. Исследованиями установлено, что образцы бетона с добавкой золы-уноса в растворах сульфата магния уступают по стойкости составам с наполнителем из известняка. Коэффициенты стойкости (12 мес) составили: $K_{ст}=0,79$ (20 %); $0,81$ (40 %); $1,04$ (70 %). Это обусловлено тем, что поглощение извести золой ликвидирует кольматирующую пленку из гидроксида магния и усиливает магниезальную коррозию (рис. 8), при этом разложение гидросиликатов кальция происходит достаточно интенсивно независимо от их основности. Установлено, что в растворе сульфата натрия коэффициенты стойкости заметно возрастали с ростом дозировки золы: $K_{ст}=0,79$ (20 %); $0,91$ (40 %); $1,26$ (70 %). Благодаря низкой концентрации извести в жидкой фазе бетона происходит рассредоточенная кристаллизация этtringита. При этом почти в два раза снижается количество этtringита при его синтезе из низкоосновного гидроалюмината C_2AH_8 , по сравнению с образованием из высокоосновных гидроалюминатных фаз. С ростом дозировки золы от 20 до 70 % глубина поврежденного слоя снижается в 1,5-1,8 раза

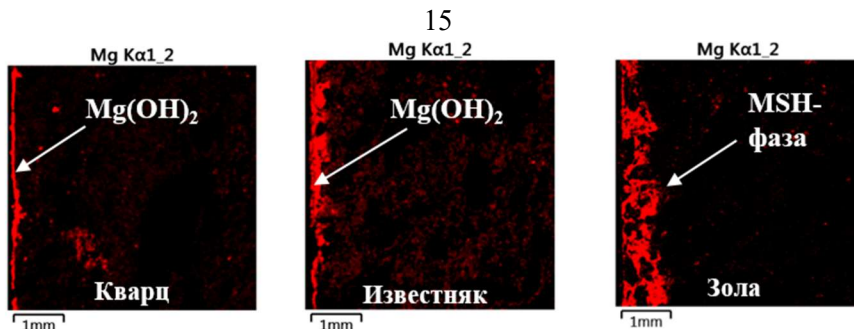


Рис. 8 – Картирование зоны коррозии по Mg, 12 мес

Выявлено, что с повышением дозировки золы от 20 до 70 % наблюдается уменьшение размеров (длины и толщины) волокнистых кристаллов этtringита (рис. 9). При максимальной дозировке золы (70 %) этtringит формируется в виде волокон наноразмерного уровня, как армирующий элемент ослабленной структуры, пронизывающий C-S-H фазу. Обнаружены расщепленные кристаллы этtringита (рис. 10) в виде сферолитов (на глубине ≈ 2 мм), что связано с неравномерным ростом частиц гидросульфаталюминатной фазы в условиях переменного насыщения жидкой фазы ионами SO_4^{2-} .

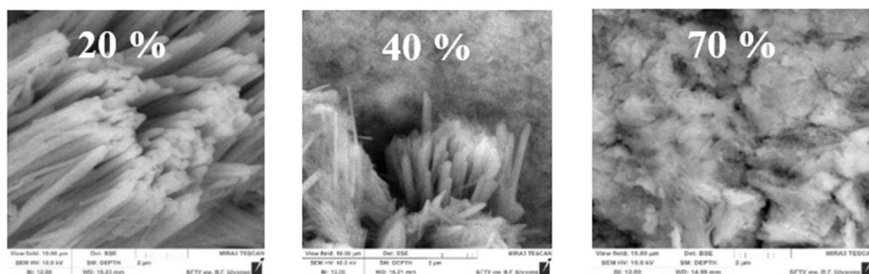


Рис. 9 – Морфология кристаллов этtringита в зависимости от дозировки золы

Результаты мониторинга динамики скорости УЗ-импульса подтвердили особенности структурной трансформации образцов, модифицированных золой. Выявлено, что в растворе сульфата натрия наблюдается постепенное уплотнение структуры образцов в течение всего срока испытаний (24 мес). При этом в растворе сульфата магния отмечаются периоды спада и подъема скорости УЗ-сигнала, отображающие периодичность процессов деструкции и частичного восстановления. Кинетические кривые в агрессивных средах описываются полиномом 6-й степени с коэффициентом $R^2=0,62-0,88$. Проверка по критерию Фишера ($F > F_{1-\alpha(k,n-k-1)}$; $8,1455 > 2,41$) подтвердила надежность модели в целом.

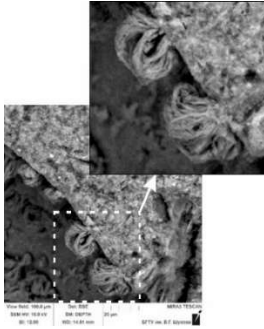


Рис. 10 – Расщепление кристаллов этtringита

($C_3A=4,7\%$). Наряду с модифицированием бетона и снижением водопотребности это внесло дополнительный вклад в повышение стойкости бетона.

Выполненными исследованиями подтверждено, что образцы модифицированного бетона с низким расходом вяжущего 262 кг/м^3 отчетливо показывают превосходство по стойкости относительно образцов бетона с более высоким расходом портландцемента (380 кг/м^3) (рис. 10-11). Существенное влияние оказывает тот факт, что в бетоне с расходом цемента 262 кг/м^3 содержание C_3A снижается на 30% по сравнению с расходом цемента 380 кг/м^3 , что соответствует применению малоалюминатного цемента

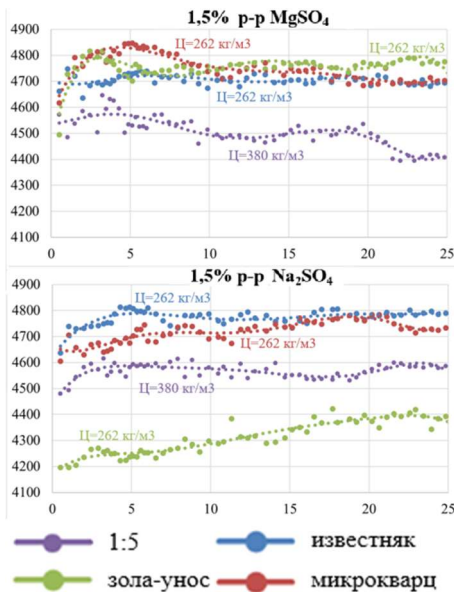


Рис. 11 – Скорость прохождения УЗ-импульса в образцах бетона (70% МД) в зависимости от вида МД и среды хранения

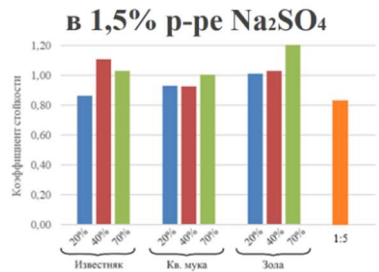
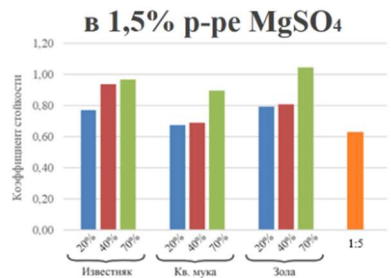


Рис. 12 – Коэффициенты стойкости ($K_{ст}^{12}$) образцов модифицированного бетона (1:8); 1:5 – контрольный состав

Исследуемые виды наполнителей можно расположить в ряд по снижению коррозионной стойкости бетонов на их основе. В растворе сульфата натрия: *зола* → *известняк* → *кварц*. В растворе сульфата магния: *известняк* → *зола* → *кварц*. Важную роль играет количество минерального наполнителя.

В настоящее время возрастает актуальность применения бетонного лома. Использовали в качестве мелкого заполнителя в рециклированных бетонах (1:8) несепарированного бетонного лома, кратковременно обработанного в вибромельнице, что привело к значительному увеличению водопотребности смеси и отрицательно сказалось на прочности бетонных образцов. При этом коэффициенты стойкости рециклированного бетона составили в растворе сульфата натрия $K_{ст}^{12}=0,97$, в растворе сульфата магния $K_{ст}^{12}=0,76$. Полученные данные по стойкости согласуются с результатами испытаний при помощи УЗ диагностики. Использование мелкого заполнителя из бетонного лома, очищенного от пылевидных примесей, в рециклированном бетоне с высоким расходом вяжущего (1:3), повысило стойкость по сравнению с контрольными составами в 1,2 раза в условиях сульфатно-магнезиальной агрессии. Данное преимущество наблюдается благодаря химическому родству гидратных образований на поверхности вторичных заполнителей и цементной матрицей рециклированного бетона, что усиливает контакты срастания.

Разработаны составы модифицированных бетонов повышенной сульфатостойкости и установлены рациональные области их применения. Экономический эффект определяется снижением стоимости сырьевых компонентов и пролонгированной экономией: за счет продления срока межремонтной службы; снижения затрат на ремонтные работы по поддержанию качества и долговечности строительных конструкций; а также сокращением простоев производственных объектов в связи с ремонтными работами. За счет утилизации отходов золы-уноса и бетонного лома попутно решается ряд экологических задач.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Разработано научно обоснованное технологическое решение, направленное на повышение коррозионной стойкости бетонов с низким расходом вяжущего. Повышение коррозионной стойкости обусловлено уплотнением структуры за счет модифицирования минеральными добавками и ПАВ, и более низким содержанием алюминатной фазы и гидроксида кальция в бетоне. Выявлена функциональная взаимосвязь между дозировками наполнителей, видом агрессивной среды и коэффициентами стойкости бетона.

Установлено, что ввод тонкодисперсных наполнителей из известняка и кварца (20; 40 и 70 %) взамен заполнителей в бетонную смесь (1:8) с низким расходом цемента значительно снижает водопотребность при помощи

суперпластификатора (на 23-44 %), что способствует повышению стойкости. Все модифицированные бетоны с минеральными добавками 20-70 % выдержали 12-месячное испытание в 1,5 %-м растворе сульфата натрия, сохранив значение коэффициента стойкости $K_{ст}^{12} > 0,8$. В растворе сульфата магния $K_{ст}^{12}$ ниже в 1,07-1,28 раза, испытание выдержали бетоны с добавками кварца и известняка 40-70 % ($K_{ст}^{12} > 0,8$).

На основе электронно-микроскопических исследований предложены зональные модели послойного разрушения бетона при сульфатной и сульфатно-магнезиальной коррозии. Диагностированы зоны преобладающего вида коррозии бетона, для каждой условной зоны выявлены характерные продукты коррозии, их морфологические особенности, проведена идентификация. Показана зависимость морфологии кристаллов этtringита от условий образования: вида агрессивного носителя, активности минерального наполнителя и глубины осаждения в корродированной зоне.

Показано принципиальное отличие продуктов коррозии в образцах бетона, модифицированного активной минеральной добавкой (золой-уноса). При испытании в растворе сульфата натрия с повышением дозировки золы от 20 до 70 % наблюдалось уменьшение размеров (длины и толщины) кристаллов этtringита, при этом глубина поврежденного слоя снижалась в 1,5-1,7 раза, а коэффициенты стойкости возрастали в 1,2-1,6 раза. Показано, что в растворе сульфата магния у образцов с золой 40 и 70 % $K_{ст}^{12}$ ниже в 1,21-1,27 раза, чем в растворе сульфата натрия.

Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена целесообразность применения ультразвуковой диагностики для исследований кинетики коррозии бетона в агрессивных средах. Выявлены и обоснованы закономерности динамики скорости прохождения УЗ-сигнала в образцах по ходу развития коррозионных процессов. В качестве критерия целесообразно использовать интервал времени от начала испытаний до момента стабильного снижения скорости УЗ-сигнала, чем медленнее протекает коррозия, тем длительнее период до сброса скорости. Установлено, что для математического описания кинетических кривых средней скорости прохождения УЗ-импульса через образцы, твердевших в агрессивных средах, целесообразно использовать полиномиальную функцию, а твердевших в воде – степенную. Их надежность можно оценить при помощи величины достоверности аппроксимации R^2 .

Установлено, что образцы модифицированного бетона с низким расходом вяжущего (40-70 % МД, $\rho = 262 \text{ кг/м}^3$) превосходят по стойкости образцы бетона с расходом вяжущего $\rho = 380 \text{ кг/м}^3$ (коэффициент стойкости $K_{ст}^{12}$ выше на 0,1-0,4). Повышение стойкости обеспечивается модифицированием бетона минеральными добавками и ПАВ, а также снижением содержания C_3A в бетоне на 30 %. Наполнители по убыванию стойкости бетонов на их основе можно расположить в ряд (в растворе сульфата натрия): зола $\rightarrow$ известняк $\rightarrow$ кварц; в растворе сульфата магния:

известняк → зола → кварц. На этой основе предложены составы модифицированных бетонов повышенной коррозионной стойкости с пониженным расходом вяжущего.

Установлено, что применение заполнителя из бетонного лома в рециклированных бетонах с низким расходом вяжущего существенно повышает водопотребность, снижает прочность при сохранении умеренной стойкости. При этом в бетонах с высоким расходом вяжущего мелкий заполнитель из бетонного лома дает преимущество перед традиционным заполнителем, стойкость повышается в 1,2 раза. Это обусловлено влиянием химического сродства гидратных образований на поверхности заполнителей лома и цементной матрицей рециклированного бетона, что усиливает сцепление и снижает проницаемость контактных слоев.

Экономический эффект обусловлен снижением стоимости сырьевых компонентов и пролонгированной экономией, обусловленной продлением срока межремонтной службы; снижением затрат на ремонтные работы по поддержанию качества и долговечности строительных конструкций (например, восстановление защиты от коррозии, гидроизоляции, отделки и т. п.); а также сокращением простоев производственных объектов в связи с ремонтными работами.

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения в практику деятельности предприятий по производству железобетонных изделий, а также могут быть использованы в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистрантов по направлению «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований: дальнейшие исследования будут направлены на повышение коррозионной стойкости рядовых и малоцементных бетонов за счет применения вяжущих различных типов, поиска новых водоредуцирующих добавок для снижения водопотребности цементных систем, расширения номенклатуры минеральных наполнителей.

СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК

1. Толыпина, Н. М. Влияние микронаполнителей на эффективность суперпластификаторов и прочность бетонов с низким содержанием цемента / Н. М. Толыпина, Е. Н. Хахалева, **Д. Ю. Данилов**, Д. Ю. Чашин // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В. Г. Шухова. – 2023. – № 8. – С. 8–15. – DOI 10.34031/2071-7318-2023-8-8-8-15.

2. Толыпина, Н. М. Ультразвуковая диагностика деструкции бетона под воздействием агрессивных сред / Н. М. Толыпина, **Д. Ю. Данилов** // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2024. – Т. 21, № 4(98). – С. 628–638. – DOI: 10.26518/2071-7296-2024-21-4-628-638. (K2).

3. Толыпина, Н. М. Обоснование возможности применения ультразвукового диагностирования для исследования коррозионного разрушения бетона / Н. М. Толыпина, **Д. Ю. Данилов**, Д. А. Толыпин // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2024. – Т. 20, № 4(38). – С. 103-111. – EDN YZFCJA. (K3).

4. Толыпина, Н. М. Сульфатно-магнезиальная коррозия модифицированного бетона / Н. М. Толыпина, **Д. Ю. Данилов** // Цемент и его применение. – 2025. - №2. – С. 48-54. (K2).

В изданиях, включенных в базу РИНЦ

5. **Данилов, Д.Ю.** Сравнительная оценка технических свойств бетонов в зависимости от расхода вяжущего / **Д. Ю. Данилов**, Д. Ю. Чашин, С. С. Чуев // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова – Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. – С. 55-58.

6. **Данилов, Д.Ю.** Загрязнение окружающей среды - причина преждевременного разрушения бетона / **Д. Ю. Данилов**, Д. Ю. Чашин // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова – Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. – С. 51-55.

7. **Данилов, Д.Ю.** Водоредуцирующее действие суперпластификаторов в бетонных смесях с минеральными добавками / **Д. Ю. Данилов**, Д. А. Толыпин // XV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» – Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. – С. 13-17.

8. **Данилов, Д.Ю.** Применение ультразвукового метода для контроля деструкции бетона / **Д. Ю. Данилов**, Е. Н. Хахалева // Наука и инновации в строительстве : Сборник докладов VIII Международной научно-практической

конференции – Белгород: Изд-во БГТУ, 2024. – С. 335-338.

9. **Данилов, Д.Ю.** Принцип действия ультразвукового метода для диагностики бетона / **Д.Ю. Данилов** // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Сборник докладов, Белгород, 20–21 мая 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 33-36.

10. **Данилов, Д.Ю.** Применение минеральных добавок для модифицирования бетона / **Д.Ю. Данилов** // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Сборник докладов, Белгород, 20–21 мая 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 37-40.

11. **Данилов, Д.Ю.** Оценка влияния агрессивных сульфатных сред на бетонные образцы посредством ультразвуковой диагностики / **Д. Ю. Данилов, Д. Ю. Чашин, Д.А. Толыпин** // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XVI Международного молодежного форума, Белгород, 30–31 октября 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 19-24.

12. **Данилов, Д.Ю.** Исследование эффективности применения бетонного лома в качестве заполнителя бетонной смеси / **Д.Ю. Данилов** // Образование. Наука. Производство: Сборник докладов XVI Международного молодежного форума, Белгород, 30–31 октября 2024 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – С. 15-19.

Объекты интеллектуальной собственности

13. Пат. 2839780. Смесь для производства мелкозернистого бетона повышенной термической стойкости // Н.М. Толыпина, Д.Ю. Чашин, **Д.Ю. Данилов, Д.А. Толыпин**; заявитель и патентообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение Высшего профессионального образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». – № 2024134988. Заявл. 22.11.2024. Оpubл. 12.05.25.

ДАНИЛОВ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ

**МОДИФИЦИРОВАННЫЙ БЕТОН ПОВЫШЕННОЙ
СУЛЬФАТОСТОЙКОСТИ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 01.07.2026 г. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,35. Тираж 100 экз. Заказ № 72

Отпечатано в Белгородском государственном
технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46