

На правах рукописи



**ЧАШИН ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ**

**ПРОЦЕССЫ ДЕСТРУКЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ  
СИСТЕМ ПРИ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

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

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: **Агзамов Фарит Акрамович**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Уфимский государственный  
нефтяной технический университет»,  
профессор кафедры «Бурение нефтяных и  
газовых скважин»

**Аниканова Татьяна Викторовна**  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский Московский  
государственный строительный  
университет», доцент кафедры  
«Архитектурно-строительного  
проектирования и физики среды»

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

Защита состоится «15» сентября 2026 года в 10<sup>00</sup> 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/chashin](https://gos_att.bstu.ru/dis/chashin)

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** Длительная эксплуатация бетонных изделий и конструкций в условиях повышенной температуры (40-95 °С) и влажности (80-100 %) приводит к значительному ухудшению физико-механических свойств бетона, что обусловлено изменением структуры и фазового состава цементной матрицы. Подобные условия наблюдаются при взаимодействии бетонных изделий с горячей водой (паром) в градирнях тепловых и атомных электростанций, в деривационных туннелях и других инфраструктурных объектах. В таких условиях разрушение изделий и конструкций из традиционного бетона может начаться через 3-4 года после начала эксплуатации.

Несмотря на важность и масштабность проблемы, деструкция бетона при водо-тепловом воздействии в строительном материаловедении является малоизученной, хотя этот вид коррозии хорошо исследован специалистами по тампонажным работам. Существующее принципиальное различие между бетонами и тампонажными материалами, технологическими параметрами их производства и эксплуатации, препятствует непосредственному применению достижений в области тампонажных технологий к строительным бетонам. Это обуславливает необходимость проведения исследований, направленных на разработку эффективных методов повышения стойкости бетонных изделий и конструкций, эксплуатирующихся при повышенной температуре и влажности. В условиях современных технологических вызовов значимость данной проблемы будет только возрастать, поскольку бетонные конструкции все чаще используются в экстремальных условиях, где температура и влажность играют существенную роль. В этой связи разработка мер по повышению термовлажностной стойкости цементных бетонов является весьма актуальной задачей.

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.** В области тампонажных технологий исследованы растворы с минеральными добавками, обеспечивающими повышение термической устойчивости. Немногочисленные публикации по деструкции бетона при продолжительном контакте с горячей водой или паром, свидетельствуют о слабой изученности существующей проблемы в строительном материаловедении. Вопросы долговечности строительных изделий и конструкций в ответственных инженерных сооружениях, где наблюдается комплексное воздействие повышенных температур и влажности, остаются открытыми.

**Цель работы.** Исследование механизма процессов термовлажностной коррозии и разработка научно обоснованных рекомендаций по повышению стойкости цементных бетонов к комплексному воздействию повышенной

температуры и влажности.

Для достижения цели решались **следующие задачи:**

- анализ состояния проблемы термовлажностной коррозии бетонов;
- исследование кинетики процессов термовлажностной деструкции цементного камня и бетона с использованием метода ультразвуковой диагностики;
- изучение влияния кремнеземсодержащих минеральных компонентов различной степени кристалличности и масштабного уровня на процессы термовлажностной коррозии;
- разработка рекомендаций по обеспечению термовлажностной стойкости цементных систем;
- изучение влияния рецептурно-технологических параметров на физико-механические характеристики термовлажностостойкого бетона;
- подготовка нормативно-технических документов для промышленной апробации результатов теоретических и экспериментальных исследований.

#### **Научная новизна работы.**

Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены рекомендации по повышению стойкости цементных систем к термовлажностной коррозии. Критериями оценки кремнеземсодержащих компонентов являются содержание в их составе оксида алюминия и активность по СаО. Критерии оценки эффективности бетона для эксплуатации в термовлажностных условиях включают коэффициент термовлажностной стойкости бетона и относительную скорость УЗ-импульса. На основе критериальной оценки предложено применение: в качестве мелкого заполнителя – кварцитопесчаника (фр. 0-5 мм), кварцевого песка (фр. 0,16-0,63 мм); минеральной добавки – доменного гранулированного шлака ( $S_{уд}=3800 \text{ см}^2/\text{г}$ ). Контролируемыми параметрами являются наличие низкоосновных гидросиликатов кальция, интенсивность фазообразования и фазовых превращений.

Установлен характер влияния состава минеральных компонентов на процессы структурообразования и стойкость при термовлажностном воздействии. Показано, что цементные композиты, содержащие минеральные компоненты с повышенным содержанием оксида алюминия, имеют меньшую стойкость при термовлажностном воздействии в отдаленный период за счет межфазовой перекристаллизации гидроалюминатов и гидроалюмосиликатов, приводящей к развитию внутренних напряжений, ослабляющих структуру камня. Рационально применять наполнители и заполнители с минимальным содержанием оксида алюминия (менее 10 %).

Обоснована и экспериментально подтверждена эффективность использования ультразвуковой диагностики для мониторинга кинетики термовлажностной коррозии бетона. Установлено, что скорость прохождения УЗ-импульса находится во взаимосвязи с процессами перекристаллизации. В качестве критерия интенсивности фазообразования за счет взаимодействия

кремнеземсодержащих компонентов с известью рекомендуется использовать относительную скорость УЗ-импульса ( $\Delta V_{\text{отн}}$ ), рациональное значение которой в начальный период твердения (3-4 мес) соответствует  $\Delta V_{\text{отн}} = 1,04-1,09$ .

**Теоретическая и практическая значимость работы.** Расширены теоретические представления о влиянии минеральных наполнителей и заполнителей на процессы фазо- и структурообразования в цементной матрице бетона, а также на кинетику твердения бетона в различных термовлажностных условиях. Установлено, что наиболее интенсивные процессы фазовой и структурной трансформации наблюдаются в течение первых 12 мес твердения в термовлажностных условиях, после чего они переходят в более медленную деструктурирующую фазу.

Доказана необходимость применения метода ультразвуковой диагностики для мониторинга процессов термовлажностной деструкции образцов бетона. Установлена взаимосвязь между динамикой скорости ультразвукового сигнала и этапами формирования структуры цементной матрицы бетона, что расширяет понимание механизмов долговременной эксплуатации композита в условиях комплексного влияния влажностных и температурных нагрузок.

Разработаны рекомендации по повышению стойкости цементных систем к термовлажностной коррозии. Предложены сырьевые компоненты для получения наиболее стабильных структур композитов при термовлажностном воздействии: мелкие заполнители на основе кварцитопесчаника и мелкого кварцевого песка; тонкодисперсный доменный гранулированный шлак.

Разработана рецептура мелкозернистого бетона с повышенной термовлажностной стойкостью (В30), с использованием отсева дробления кварцитопесчаника (КвП) и доменного гранулированного шлака, модифицированного суперпластификатором «Полипласт ПК тип S», соответствующий требованиям СП 340.1325800.2017. Разработанный состав термовлажностостойкого бетона не требует принципиального изменения стандартной технологической схемы производства, что облегчает его внедрение в промышленных условиях.

**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 данных 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 математического планирования эксперимента и статистической обработки результатов.

**Положения, выносимые на защиту:**

- результаты исследования структурно-фазовых трансформаций цементного камня при твердении в температурно-влажностных условиях;
- способ мониторинга структурно-механических параметров образцов

цементного камня и бетона при помощи метода ультразвуковой диагностики;

- влияние минеральных добавок на кинетику твердения и структурно-фазовые изменения в цементном камне в термовлажностных условиях;
- зависимость изменения структуры и свойств мелкозернистых бетонов от вида мелкого заполнителя в различных термовлажностных условиях;
- рекомендации по повышению стойкости цементных систем к термовлажностной коррозии;
- взаимосвязь физико-механических характеристик бетона и рецептурно-технологических параметров.

**Степень достоверности полученных результатов** обеспечивается комплексом экспериментальных исследований с соблюдением требований методик и методов, регламентированных нормативными документами, использованием современного высокотехнологичного оборудования и сопоставлением полученных выводов с известными теоретическими положениями.

**Апробация результатов исследований.** Основные положения диссертационной работы были представлены на: VII Международной научно-практической конференции «Наука и инновации в строительстве» (Белгород, 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); XV Международный молодежный форум «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2024); Международного конкурса научно-исследовательских работ «Глобальные научные перспективы и международные вызовы» (Москва 2024); I Всероссийской научно-практической конференции «Молодежь и наука» (Новокузнецк, 2025); Международного конкурса научно-исследовательских работ «Точки роста: Наука для прогресса» (Москва 2025); Международной научно-практической конференции «Современные тенденции развития исследовательских компетенций в условиях инновационного кластера» (Казань, 2025); Международная научно-практическая конференция «Инновационная наука» (Воронеж, 2026).

**Внедрение результатов исследований.** С целью внедрения результатов работы разработан стандарт организации СТО 02066339-082-2025 и технологический регламент на производство мелкозернистого бетона с повышенной термовлажностной стойкостью.

С ООО «ЭрионСтройГрупп» подписан протокол о намерениях производства мелкозернистого бетона с повышенной термовлажностной стойкостью.

Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований используются в учебном процессе при чтении курсов лекций «Вязущие вещества», «Долговечность строительных конструкций» для бакалавров и магистров, обучающихся по направлениям 08.03.01-05 и 08.04.01

(Строительство).

**Публикации.** Основные положения работы изложены в 13 публикациях, в том числе: 3 статьи в российских журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ; 1 статья в издании, индексируемом в базе данных Scopus (Q2); 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 приложения. Диссертация изложена на 175 страницах машинописного текста, содержит 25 таблиц, 99 рисунок, список литературы из 152 источников и 5 приложений.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Исследования, касающиеся деструкции бетона строительных конструкций при продолжительном контакте с горячей водой или паром, немногочисленны, что отражает слабую изученность существующей проблемы. Это во многом связано со сложностью и многообразием физико-химических процессов, протекающих в цементном камне и бетоне при длительном термовлажностном воздействии. Решение проблемы повышения долговечности бетонов, эксплуатирующихся в термовлажностных условиях, представляет собой важное направление в строительном материаловедении, требующее дальнейшего развития и углубленного изучения.

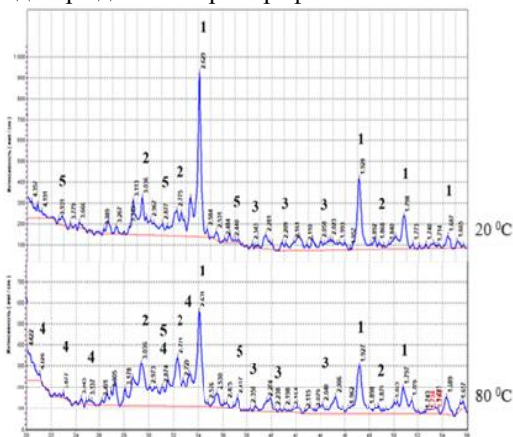
Предложена *рабочая гипотеза*, основанная на том, что образование малорастворимых низкоосновных гидросиликатов позволяет минимизировать деструктивные процессы рекристаллизации и перекристаллизации в цементном камне. В этой связи для повышения термостабильности цементных систем целесообразно использовать кремнеземсодержащие наполнители и заполнители различного состава и степени кристалличности.

В качестве субъекта исследований использовали порошковые и мелкозернистые бетоны, изготовленные на основе материалов: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ЗАО «Осколцемент» ГОСТ 30108-2020), кварцевый песок фракций 0,16-0,63 и 0,63-2,5 мм (ГОСТ 8736–2014, ООО «Формматериалы»), тонкодисперсный кварц ( $S_{уд}=4000 \text{ см}^2/\text{г}$ ); мелкий заполнитель на основе кварцитопесчаника Лебединского месторождения (г. Белгород) и гранита (АО «Павловск-Неруд», г. Воронеж); зола-уноса Смоленской ГЭС ( $S_{уд}=3780 \text{ см}^2/\text{г}$ ); шлак доменный гранулированный Новолипецкого металлургического комбината ( $S_{уд}=3800 \text{ см}^2/\text{г}$ ); суперпластификатор «Полипласт ПК тип S» (СП 340.1325800.2017). Изготавливали образцы цементного камня, порошкового и мелкозернистого бетона размером 2,5x2,5x10, 3x3x3, 4x4x16 см. После изготовления через 2 сут половину образцов каждого состава помещали в водяную баню LOIP LB-163, где они подвергались испытаниям на термовлажностную коррозию при 80 °С. Контрольные образцы каждого состава твердели в нормальных условиях в

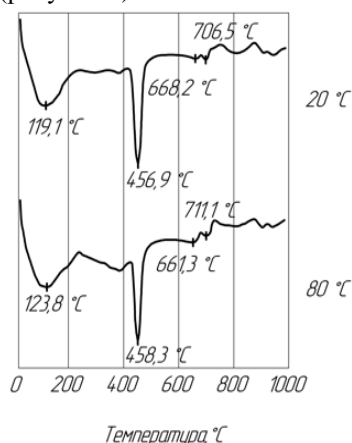
воде при 20 °С. Длительность испытаний – 24 мес.

На первом этапе работы исследовали вопросы термовлажностной деструкции цементного камня. Экспериментально установлено снижение прочности цементного камня практически в два раза при твердении в течение 12 мес в воде (80 °С) по сравнению с нормальными условиями (20 °С), коэффициент термовлажностной стойкости составил 0,47. Для выявления причин деградации цементного камня проводили комплексные исследования при помощи методов РФА, ДТА, РЭМ.

Сравнительный анализ рентгенограмм (рисунок 1) показал, что у образцов цементного камня, твердевших при температуре 80 °С по сравнению с образцами нормального твердения, заметно уменьшается интенсивность дифракционных максимумов  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ( $d=2,63; 1,93 \dots \text{Å}$ ), при этом появляются рефлексы  $\alpha$ -гидрата двухкальциевого силиката  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$  ( $d=4,22; 3,9; 3,54; 3,27 \dots \text{Å}$ ). Снижение содержания  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  в цементном камне, свидетельствует о связывании извести в высокоосновные гидросиликаты кальция. Эти данные подтверждаются термографическим анализом (рисунок 2).

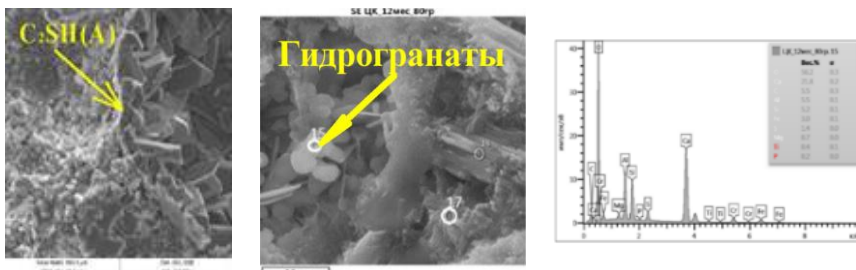


**Рисунок 1 – Рентгенограммы цементного камня, 12 мес:** 1 –  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , 2 –  $\text{C}_2\text{SH}_2$ , 3 –  $\text{C}_3\text{AH}_6$ , 4 –  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ , 5 –  $\text{C}_3\text{ASH}_{12}$



**Рисунок 2 – Дериватограммы цементного камня, 12 мес**

В микроструктуре цементного камня термовлажностного твердения в возрасте одного года обнаружены крупные друзы призматических кристаллов  $\alpha$ -гидрата двухкальциевого силиката  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ , что вызывает значительные местные напряжения и снижение прочности цементного камня (рисунок 3). Локально встречаются гелеобразные продукты, гидросиликаты волокнистой, чешуйчатой и зернистой формы. Выявлены агломерации гидрогранатов (рисунок 3).



**Рисунок 3** – Микроструктура цементного камня термовлажностного твердения (80 °С), гидросиликаты, гидрогранаты, 12 мес

Таким образом, на основе комплексных исследований установлено, что причиной деструкции цементного камня, твердевшего в термовлажностных условиях являются процессы рекристаллизации термодинамически нестабильных частиц гидратов, обусловленные укрупнением кристаллов, и перекристаллизации первичных гидросиликатов в высокоосновный  $\alpha$ -гидрат двухкальциевого силиката. Образование  $C_2SH(A)$ , обладающего плохими вяжущими свойствами, приводит к резкому повышению пористости цементного камня, и, соответственно, падению прочности. Нами предложено такого вида деструкцию называть «термовлажностной коррозией».

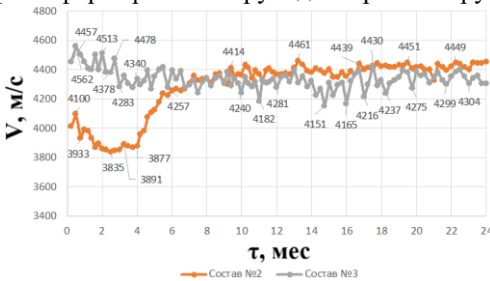
Академик Ребиндер П.А. утверждал, что цементный камень является термодинамически неустойчивой системой. Зоны срастания гидратированных частиц отличаются повышенной растворимостью по сравнению с новообразованиями, которые находятся в более или менее изолированном состоянии. Со временем зоны срастания начинают растворяться, а изолированные частицы увеличиваться в размере. Это приводит к повышению пористости цементного камня и снижению прочности. Чем меньше основность гидратных фаз, тем меньше разница растворимостей и медленнее протекают процессы рекристаллизации, при этом подавляется образование высокоосновного  $C_2SH(A)$ . В этой связи дальнейшие этапы диссертационной работы посвящены повышению термостабильности цементных систем за счет снижения основности гидратных фаз при помощи минеральных компонентов различного состава и степени кристалличности.

Исследовали влияние кварцевого песка различной крупности на процессы фазовой и структурной трансформации цементной матрицы в различных термовлажностных условиях. Установлено, что наибольший коэффициент термовлажностной стойкости у образцов с мелким кварцевым песком ( $K_{\text{терм.ст}}=1,4$ ) по сравнению с крупным ( $K_{\text{терм.ст}}=0,84$ ).

Для изучения кинетики коррозионных процессов использовали импульсный ультразвуковой метод. Скорость прохождения УЗ-импульса в образце представляет собой интегральный параметр, характеризующий комплекс структурно-механических свойств материала. Подъем и периодическое

снижение скорости УЗ-импульса находятся во взаимосвязи с процессами перекристаллизации. Рост скорости УЗ-импульса обусловлен процессами гидратации и пуццолановыми реакциями, снижение – процессами рекристаллизации и перекристаллизации, стабилизация скорости – относительной сбалансированностью структурирующих и деструктивных процессов.

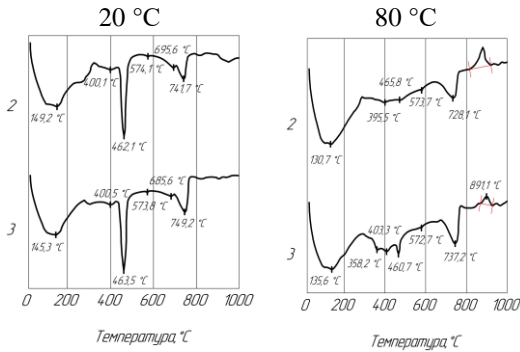
Кривые скорости прохождения УЗ-импульса в образцах отражают развитие деструктивных процессов (рисунок 4). В образце бетона на мелком песке (0,16-0,63 мм) после гидратации (2-3 недели) происходит снижение скорости УЗ-сигнала (1-3 мес), вызванное ростом кристаллической фазы. Последовавший подъем скорости (3-8 мес) говорит об интенсификации взаимодействия с известью. У образца на крупном кварцевом песке наблюдалось продолжительное скачкообразное снижение скорости УЗ-сигнала, свидетельствующее о прогрессировании деструктивных процессов за счет перекристаллизации ранее сформированных метастабильных гидратных фаз и формировании грубодисперсной структуры.



**Рисунок 4** – Кинетика скорости прохождения УЗ-сигнала через образцы, твердевших в воде при температуре 80 °С: 2 – мелкий песок (1:3); 3 – крупный песок (1:3)

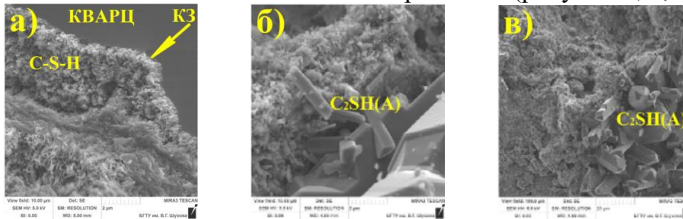
Рентгенофазовый анализ новообразований цементной матрицы образцов (12 мес) проводили с целью уточнения механизма коррозии. Установлено, что в термовлажностных условиях с уменьшением размера зерен песка увеличивается количество термостабильных гидросиликатов кальция низкой основности CSH(B) ( $d=3,07; 2,8; 1,83... \text{Å}$ ). В условиях нормального

твердения фазовый состав продуктов гидратации (12 мес) не зависел от крупности кварцевых зерен, основные гидратные фазы:  $C_2SH_2$ ,  $Ca(OH)_2$ ,  $C_3AH_6$ ,  $C_3ASH_{12}$ . Эти данные подтверждаются результатами ДТА. В термовлажностных условиях (12 мес) интенсивность экзотермического эффекта при 870-891 °С (CSH(B)-фаза) больше в два раза у образца с мелким кварцевым песком, чем с крупным (рисунок 5), при этом смещение максимума эффекта с 891 до 873 °С свидетельствует о снижении основности гидросиликатов.



**Рисунок 5 - Дериватогаммы цементной матрицы бетона (1:3), 12 мес: 2 – мелкий песок (фр. 0,16-0,63 мм); 3 – крупный песок (фр. 0,63-2,5 мм)**

При сравнении микро-структуры цементной матрицы с кварцевым песком различной крупности выявлены следующие особенности. На контакте мелкозернистого кварца с цементной матрицей выделяется узкая зона (0,1-5 мкм) хорошо закристаллизованных упорядоченно расположенных гидросиликатов кальция, что свидетельствует о большой скорости растворения кремнеземистого компонента и его активном участии в гидратации (рисунок 6, а). Тогда как в микроструктуре цементной матрицы бетона на крупном кварцевом песке выявлены друзы кристаллов  $C_2SH(A)$  (2-20 мкм) с малой удельной поверхностью и низким числом контактов срастания (рисунок 6, б,в).



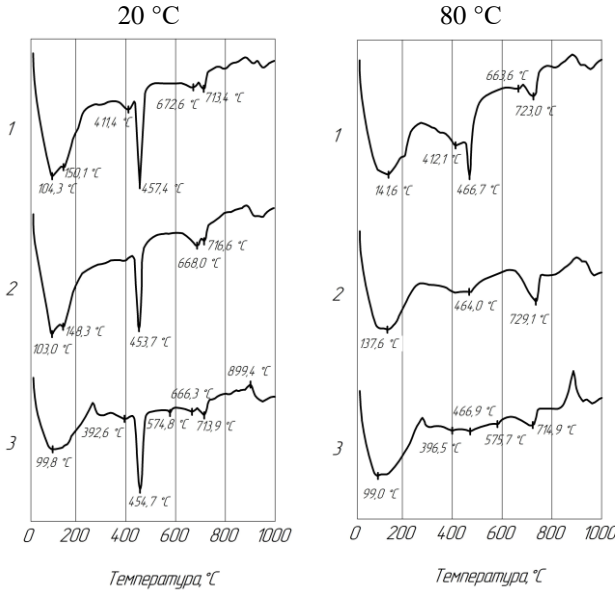
**Рисунок 6 – Микроструктура цементного камня с мелким (а) и крупным кварцевым песком (б, в); 6 мес; 80 °C**

В целом ввод мелкой фракции кварцевого песка позволил замедлить процессы перекристаллизации гидратных фаз и повысить стабильность физико-механических свойств бетона. В период от 12 до 24 мес процессы рекристаллизации в матрице с мелким кварцевым песком идут гораздо медленнее, чем с крупным (по данным ДТА). Полученные результаты являются весомым основанием при выборе кварцевых песков для бетона, предназначенного для термовлажностных условий эксплуатации.

Эффективным способом снижения основности гидратных новообразований является применение минеральных добавок (МД). Использовали тонкодисперсный кварц и активные добавки: золу-уноса и доменный гранулированный шлак. Установлено, что введение минеральных добавок (40 %) повышает коэффициент термовлажностной стойкости (12 мес) относительно чистого цементного камня (0,47): у золо-цементного камня – 0,72, шлако-

цементного – 0,69. Образцы с кварцевым наполнителем выдержали 12-месячное испытание, достигнув значения коэффициента стойкости  $K_{\text{терм-ст}}^{12} = 1,15 (>0,8)$ .

При помощи УЗ-диагностики установлено, что деструкция золо-цементного образца сопровождалась периодами интенсивного подъема и снижения скорости УЗ-импульса, через 18 мес образец разрушился. Установлена взаимосвязь между составом новообразований и стойкостью золо-цементного камня.

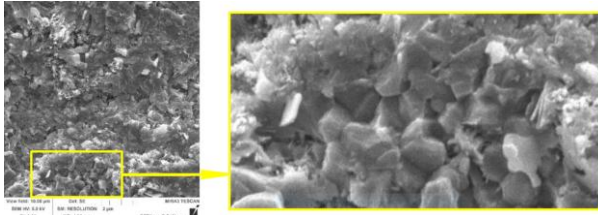


**Рисунок 7 – Дериватограммы цементного камня с добавками (12 мес): 1 – шлак; 2 – зола-уноса; 3 – кварцевый наполнитель**

гидроалюмосиликатной фазы, склонной к быстрой кристаллизации в отдаленные сроки и вызвало большие внутренние напряжения в цементном камне (рисунок 8). Этот факт необходимо учитывать при выборе минеральных компонентов.

Коррозия шлако-цементного камня отличалась относительной сбалансированностью структурирующих и деструктивных процессов. В шлако-цементных образцах, сохраняется значительное количество  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , при этом формируются деструктивные фазы  $\text{C}_2\text{SH}(\text{A})$ . В нормальных условиях вплоть до 12 мес известь связывается медленно и находится в свободном состоянии, основным носителем прочности является двухкальциевый силикат ( $\text{C}_2\text{SH}_2$ ) (рисунок 7).

Несмотря на то, что в термовлажностных условиях свободный  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  полностью связывается в гидросиликаты низкой основности типа  $\text{CSH}(\text{B})$ , гиролита  $\text{C}_2\text{S}_3\text{H}_2$  и афвиллита  $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$  (рисунок 7), это не обеспечило термостабильность цементной системы. Произошло разрушение образца. Причиной послужило повышенное содержание в золе оксида алюминия (19,6%), что привело к образованию гидроалюминатной и

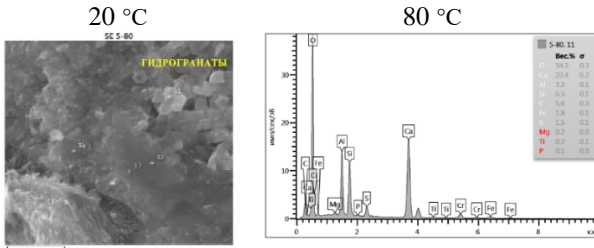


**Рисунок 8** – Микроструктура золо-цементного камня термовлажностного твердения; гидроалюминаты; 24 мес

Противоречивые результаты получены на образцах с кварцевым наполнителем: механическая прочность малых образцов (2,5x2,5x10 см) возростала до 12 мес твердения, а образец 4x4x16 см через 8 мес разрушился. Это связано с тем, что в малых образцах внутренние напряжения быстрее рассеиваются, чем в больших. А причиной послужила высокая активность тонкодисперсного кварца по поглощению извести (резкий подъем скорости УЗ-импульса за 2,5 мес), что спровоцировало интенсивный переход высокоосновных гидросиликатов кальция  $C_2SH_2$  в низкоосновные  $CSH(B)$  и в совокупности с ростом кристаллов и образованием некоторого количества  $C_2SH(A)$  при низком уровне В/Ц (0,26) привело к разрушению.

Для создания бетона, стойкого к термовлажностной коррозии, исследовали влияние заполнителя из метаморфизованного кварцитопесчаника на стойкость мелкозернистого бетона (МЗБ). Гранитный заполнитель использовали в качестве контрольного фактора, так как он традиционно используется в производстве бетонов. У МЗБ (1:3) на заполнителе из кварцитопесчаника коэффициент термовлажностной стойкости составил 1,2-1,3, а на заполнителе из гранита аналогичный показатель значительно ниже – 0,71.

По данным мониторинга скорости прохождения УЗ-сигнала через образцы, твердевшие в воде при 80 °С, установлено, что за весь период испытаний (24 мес) наблюдался рост скорости: у образцов на кварцитопесчанике +Δ538 м/с, на граните – +Δ471 м/с. Продолжительный набор скорости УЗ-сигнала обусловлен тем, что при повышенной температуре минералы заполнителей активно вступают в химическое взаимодействие с гидроксидом кальция, с образованием термически стойких гидросиликатов и гидроалюмосиликатов кальция, которые в разной степени содействуют уплотнению цементной матрицы и контактной зоны. Это подтверждается результатами ДТА. На кривых нагревания отсутствуют эндотермические эффекты портландита, что свидетельствует о связывании его в низкоосновные гидросиликаты кальция  $CSH(B)$  и подтверждается экзоэффектами при  $t=860-900$  °С. Наличие эндозффектов при 720 °С, характерно для низкоосновных гидросиликатов (гиролита  $C_2S_3H_2$ , афвиллита  $C_3S_2H_3$ ).

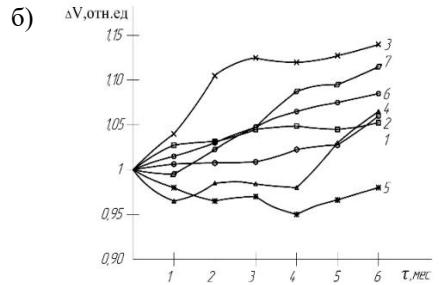
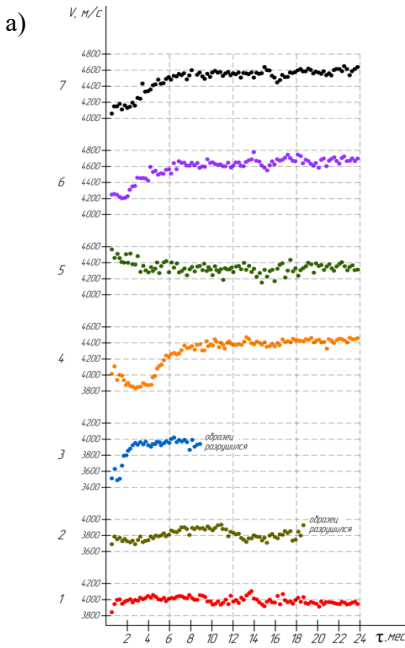


**Рисунок 9** – Микроструктура цементного камня МЗБ на основе гранита, 24 мес, 80 °С, гидрогранаты

В связи с увеличенным количеством оксида алюминия (15,6 %) в граните при длительном твердении в термовлажностных условиях он связывается преимущественно в гидрогранаты, которые, несмотря на устойчивость, могут снижать прочность из-за усиления неоднородности структуры (рисунок 9). В основном микроструктура цементной матрицы (при 80 °С) представлена поликристаллическими участками с крупными кристаллами гидросиликатов кальция и переходными гелеобразными зонами между ними. В течение длительного твердения (24 мес) увеличивается степень кристалличности новообразований также и при твердении в нормальных условиях.

Наиболее интенсивная трансформация структурно-механических свойств и фазового состава цементной матрицы наблюдаются в течение первого года твердения, а после перетекает в более медленную фазу (рисунок 10,а). В качестве критерия интенсивности структурно-фазовой трансформации бетона за счет взаимодействия кремнеземсодержащих компонентов с известью рекомендуется использовать относительную скорость  $\Delta V_{\text{отн}} = V^t/V^0$ , как отношение скорости прохождения УЗ-импульса через образец в текущем времени к скорости перед испытанием. Предельный рост относительной скорости УЗ-импульса в начальный период (3-4 мес) в образцах на тонкодисперсном кварце составил  $\Delta V_{\text{отн}} = 1,15$ . Медленная трансформация в золо- и шлакоцементных образцах при  $\Delta V_{\text{отн}} = 1,05-1,06$ . Для стабильных структур рационально  $\Delta V_{\text{отн}} = 1,08-1,12$  – составы с кварцитопесчаником и гранитом (рисунок 10,б).

Исследовали активность по СаО минеральных наполнителей и заполнителей при повышенной температуре (метод Запорожца). Полученные результаты согласуются с исследованиями термовлажностной стойкости. Активность мелких заполнителей снижается в ряду: кварцитопесчаник → мелкозернистый кварц → гранит → крупнозернистый кварц. Наибольшая активность по СаО у кварцитопесчаника (0-5 мм) – 12,73 мг/г. У наполнителей активность по СаО убывает в ряду: зола → кварц → шлак. Наибольший показатель активности у золы (38,74 мг/г). Сравнительный анализ активности минеральных заполнителей и наполнителей рационально использовать для их обоснованного выбора.



**Рисунок 10** – Результаты УЗ исследований: а) скорость прохождения УЗ-сигнала через образцы, твердевшие в воде при температуре 80 °С в течение 24 мес; б) изменение относительной скорости УЗ-импульса на начальном этапе твердения. Составы: 1 – ПЦ:шлак (100:40); 2 – ПЦ:зола (100:40); 3 – ПЦ:пылевидный кварц=(100:40); 4 – ПЦ:мелкий песок (1:3); 5 – ПЦ:крупный песок (1:3); 6 – ПЦ:гранит (1:3); 7 – ПЦ:кварцитопесчаник (1:3)

На основе проведенных исследований разработаны рекомендации по обеспечению долговечности цементных систем при эксплуатации в условиях повышенной температуры и влажности, включающие ряд критериев:

- коэффициент термовлажностной стойкости бетона должен превышать  $K_{ст} \geq 0,8$  по результатам годовых испытаний. Чем выше коэффициент, тем более стабильна система;

- необходимо увеличивать содержание низкоосновных гидросиликатов кальция. Рекомендуется вводить в качестве кремнеземсодержащих компонентов мелкозернистый кварцевый песок, мелкий заполнитель из кварцитопесчаника, минеральные добавки в количестве 30-40 %;

- при выборе минеральных добавок или заполнителей целесообразно применять разновидности с минимальным содержанием оксида алюминия (до 10 %);

- рациональный выбор минеральных наполнителей и заполнителей рекомендуется осуществлять с учетом показателя активности по СаО (метод Запорожца при 80 °С): для мелких заполнителей активность 7 - 15 мг/г, для наполнителей – 20 - 40 мг/г.

- для оценки интенсивности фазообразования и фазовых превращений, вызванных взаимодействием кремнеземсодержащих компонентов с известью рекомендуется использовать относительную скорость УЗ-импульса

$\Delta V = V^1/V^0$ . Оптимальное значение в начальный период (3-4 мес) для стабильных структур соответствует  $\Delta V = 1,04-1,09$ .

Для разработки рациональных составов МЗБ с повышенной термо-влажностной стойкостью использовали метод математического планирования эксперимента. В качестве варьируемых факторов выбраны В/Ц, содержание суперпластификатора (СП) и доля шлакового наполнителя, контролируемым параметром был предел прочности при сжатии. Обработка данных выполнена в программе SigmaPlot с построением уравнений регрессии и номограмм.

Анализ полученных данных выявил зависимость прочности при сжатии от расхода шлакового наполнителя (МД) при изменении водоцементного отношения и химического модификатора.

Уравнение регрессии предела прочности при сжатии имеет вид:

$$y = 32,67 + 2,8x_1 + 0,66x_2 - 0,72x_3 - 7,73x_1^2 + 1,46x_2^2 + 0,39x_3^2 - 0,06x_1x_2 + 0,75x_1x_3 + 0,81x_2x_3. \text{ Среднеквадратическое отклонение} - R^2 = 0,97.$$

На основе полученных моделей разработана рецептура мелкозернистого бетона (В 30) для эксплуатации в условиях повышенных температур и влажности (патент РФ № 2839780). Бетон по своим характеристикам (В30, W8, F300) соответствует требованиям СП 340.1325800.2017 «Конструкции железобетонные и бетонные гидротехнических сооружений. Правила проектирования».

Экономический анализ показал незначительную разницу в стоимости между стандартным (6615,05 руб/м<sup>3</sup>) и термовлажностойким (6585,30 руб/м<sup>3</sup>) бетоном (В 30). Однако, ключевыми преимуществами такого решения является продление срока межремонтной службы с 3–4 до 7–10 лет и минимизации простоев во время ремонта, значительное сокращение материальных затрат на ремонт и вторичную защиту, что обеспечивает существенную финансовую выгоду в долгосрочной перспективе.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

**Итоги выполненного исследования.** Исследованы механизмы процессов термовлажностной коррозии и на этой основе разработаны рекомендации по повышению стойкости цементных бетонов к комплексному воздействию повышенной температуры и влажности. Рекомендуются: вводить мелкозернистый кварцевый песок (фр. 0,16-0,63 мм), мелкий заполнитель из кварцитопесчаника (фр. 0-5 мм), молотый доменный гранулированный шлак ( $S_{уд} = 3800 \text{ см}^2/\text{г}$ ); применять разновидности с минимальным содержанием оксида алюминия (до 10 %); рациональный выбор минеральных наполнителей и заполнителей осуществлять с учетом активности по СаО (метод Запорожца при 80 °С); учитывать рациональное значение относительной скорости УЗ-импульса на начальной стадии твердения ( $\Delta V_{отн} = 1,04-1,09$ ). В качестве критерия термостабильности использовать коэффициент термовлажностной стойкости бетона ( $K_{терм-ст}^{12} \geq 0,8$ ).

Теоретически обоснована и экспериментально доказана необходимость

мониторинга процессов термовлажностной деструкции образцов бетона с использованием метода ультразвуковой диагностики. Контроль средней скорости прохождения УЗ-импульса в образцах позволяет отслеживать изменения интегрального параметра, как совокупности структурно-механических характеристик материала, отражающих динамику развития структурирующих и деструктурирующих процессов и на этой основе выбирать стойкие составы к термовлажностной коррозии.

На основе комплексного анализа гидратных новообразований (РФА, ДТА, РЭМ) подтверждено, что причиной падения прочности цементного камня, твердевшего в термовлажностных условиях являются процессы рекристаллизации термодинамически нестабильных частиц гидратов коллоидальных размеров с увеличением крупности кристаллов и перекристаллизации первичных гидросиликатов в высокоосновный  $\alpha$ -гидрат двухкальциевого силиката, что сопровождается резким повышением пористости цементного камня и, соответственно, падением прочности.

Установлены закономерности формирования новообразований и структуры цементной матрицы в термовлажностных условиях в зависимости от крупности частиц кварцевого песка. Использование мелкого песка 0,16-0,63 мм позволяет замедлить процессы перекристаллизации гидратных фаз, тем самым повысить долговечность и стабильность физико-механических свойств бетона ( $K_{\text{терм.ст}}^{12} = 1,4$ ). Образцы бетона с крупным кварцем (фр. 0,63-2,5 мм) подвержены существенным деструктивным изменениям ( $K_{\text{терм.ст}}^{12} = 0,84$ ). Этот факт является весомым основанием при выборе кварцевых песков.

Установлено, что мелкие заполнители из кварцитопесчаника и гранита принимают активное участие в процессах гидратации и твердения цементной матрицы бетона в термовлажностных условиях. Целесообразно использовать кварцитопесчаник, обладающий повышенной активностью по поглощению извести, что способствует формированию термодинамически устойчивых продуктов твердения и позволяет считать его ценным сырьем для изготовления бетона, стойкого к термовлажностной коррозии ( $K_{\text{терм.ст}}^{12} = 1,33$ ).

Расширены теоретические представления о влиянии минеральных наполнителей на процессы структурообразования и кинетику твердения цементной матрицы в условиях повышенных температур и влажности. Установлено, что динамика твердения шлако-цементного камня характеризуется относительной вариабельностью структурирующих и деструктивных процессов ( $K_{\text{терм.ст}}^{12} = 0,69$ ,  $\Delta V_{\text{отн}} = 1,05$ ). У золо-цементного камня после развития структурирующих процессов последовала деградация и разрушение в отдаленные сроки ( $K_{\text{терм.ст}}^{12} = 0,72$ ,  $\Delta V_{\text{отн}} = 1,06$ ), что обусловлено повышенным содержанием в золе оксида алюминия (19,6 %). Показано, что в цементном камне с тонкодисперсным кварцем высокая интенсивность фазообразования и фазовых превращений привела к разрушению ( $\Delta V_{\text{отн}} = 1,14$ ). Установлено принципиальное отличие процессов фазо- и структурообразования в цементном камне в условиях повышенной

температурно-влажностной нагрузки от процессов в нормальных условиях.

Разработана рецептура мелкозернистого бетона (В 30) для эксплуатации в условиях повышенных температур и влажности (патент РФ №2839780). Экономический эффект от внедрения обусловлен продлением межремонтного периода (с 3–4 до 7–10 лет) и снижением материальных затрат при выполнении ремонтных работ, что обеспечивает существенную финансовую выгоду в долгосрочной перспективе. Разработан пакет нормативных документов для практического использования мелкозернистого бетона, стойкого к термовлажностной коррозии. Теоретические положения и результаты экспериментальных исследований **рекомендованы** для внедрения на предприятиях по производству мелкозернистого бетона и внедрены в учебный процесс.

**Перспективы дальнейших исследований** следует рассматривать в направлении расширения номенклатуры вяжущих, минеральных наполнителей и заполнителей, суперпластификаторов для бетонов, стойких к термовлажностной коррозии. В дальнейшем разработать критерии для рационального выбора минеральных кремнеземистых добавок с различным химико-минералогическим составом.

## **СПИСОК НАУЧНЫХ ТРУДОВ, В КОТОРЫХ ИЗЛОЖЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ РАБОТЫ**

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

1. *Толыпина, Н.М.* Деградация цементного камня в условиях повышенной температуры и влажности / Н.М. Толыпина, **Д.Ю. Чашин** // Вестник ГГНТУ. Технические науки. – 2024. – Т. XX, – №3 (37). – С. 109-117. (RSCI).
2. *Толыпина, Н.М.* Термическая стойкость цементных систем с активными минеральными добавками / Н.М. Толыпина, Ш.М. Рахимбаев, **Д.Ю. Чашин** // Вестник МГСУ. – 2025. – Т. 20. – Вып. 2. – С. 291–305. – DOI: 10.22227/1997-0935. 2025.2.291-305. – DOI: 10.22227/1997-0935. 2025.2.291-305. (RSCI).
3. *Толыпина, Н.М.* Влияние крупности частиц кварца на деградацию цементного камня в условиях повышенной температуры и влажности / Н.М. Толыпина, Ш.М. Рахимбаев, **Д.Ю. Чашин** // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2025. – № 5. – С. 8–17. – DOI: 10.34031/2071-7318-2025-10-5-8-17. (RSCI).

### ***В изданиях, индексируемых в базе данных Scopus***

4. *Tolykina, N.M.* Cement Paste Degradation in Hot Water / N.M. Tolykina, **D.Y. Chashin.**, R.S. Feduk // JOM: The Minerals, Metals & Materials Society. – 2025. – Vol. 77. – 8. doi: 10.1007/s11837-025-07498-6. (Scopus Q2).

*В изданиях, включенных в базу РИНЦ*

5. **Чашин, Д.Ю.** Особенности фазообразования в цементных системах при повышенных температурах и влажности / **Д.Ю. Чашин, Е.Н. Хахалева, Н.М. Тольпина** // VII Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в строительстве», посвященная 170-летию В. Г. Шухова – Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. – С. 237–241.

6. **Чашин, Д.Ю.** Минеральные наполнители для повышения термической стойкости материалов на цементной основе / **Д.Ю. Чашин, Д.Ю. Данилов, Н.М. Тольпина** // Международная научно-практическая конференция – Брянск: Изд-во БГИТУ, 2023. – С. 86–88.

7. **Чашин, Д.Ю.** Термическая деструкция бетона при повышенных температурах / **Д.Ю. Чашин, Д.Ю. Данилов, Н.М. Тольпина** // VII Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию В. Г. Шухова – Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. – С. 209–213.

8. **Чашин, Д.Ю.** Процессы старения и рекристаллизации цементного камня / **Д.Ю. Чашин, Д.Ю. Данилов, Н.М. Тольпина** // XV Международный молодежный форум – Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. – С. 62–65.

9. **Чашин, Д.Ю.** Первичная защита бетона при воздействии повышенных температур и влажности / **Д.Ю. Чашин, Е.Н. Хахалева** // VIII Международная научно-практическая конференция «Наука и инновации в строительстве», посвященная 70-летию со дня образования БГТУ им. В.Г. Шухова – Белгород: Изд-во БГТУ, 2024. – С. 385–389.

10. **Чашин, Д.Ю.** Твердение шлако-цементного камня в нормальных и термовлажностных условиях / **Д.Ю. Чашин, Д.Ю. Данилов, Д.А. Тольпин**. // X Международный студенческий строительный форум - 2024 – Белгород: Изд-во БГТУ, 2024. – С. 384–387.

11. **Чашин, Д.Ю.** Процессы деструкции в цементном камне при термовлажностном воздействии среды / **Д.Ю. Чашин, Д.Ю. Данилов, Д.А. Тольпин**. // X Международный студенческий строительный форум - 2024 – Белгород: Изд-во БГТУ, 2024. – С. 388–391.

12. **Чашин, Д.Ю.** Деструкция цементного камня при воздействии повышенных температур и влажности / **Д.Ю. Чашин, Д.Ю. Данилов**. // Международная научно-практическая конференции «Современные тенденции развития исследовательских компетенций в условиях инновационного кластера» - 2025 – Уфа: Изд-во Аэтерна, 2025. – С. 35–38.

13. **Чашин, Д.Ю.** Деструкция цементного камня при термовлажностном воздействии / **Д.Ю. Чашин**. // Международная научно-практическая конференция «Инновационная наука» – 2026 – Уфа: Изд-во Аэтерна, 2026. – С. 107–108.

**Объекты интеллектуальной собственности**

14. Пат. 2839780. Смесь для производства мелкозернистого бетона повышенной термической стойкости // Н.М. Толыпина, **Д.Ю. Чашин**, Д.Ю. Даниилов, 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.

**ЧАШИН ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ****ПРОЦЕССЫ ДЕСТРУКЦИИ ЦЕМЕНТНЫХ СИСТЕМ ПРИ ТЕРМОВЛАЖНОСТНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наукПодписано в печать 22.05.2026 г. Формат 60×84/16.  
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ № 65Отпечатано в Белгородском государственном  
технологическом университете им. В.Г. Шухова  
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46