

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»**

На правах рукописи



ПОПОВ ДМИТРИЙ ЮРЬЕВИЧ

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕКСТИЛЬ-БЕТОНА

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
доктор технических наук,
профессор
Лесовик Валерий Станиславович**

Белгород – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	12
1.1 Эволюция бетоноведения.....	12
1.2 Свойства и области применения текстиль-бетона.....	16
1.3 Пути повышения эффективности текстиль-бетона	24
1.4 Структурные деформации вследствие разных видов усадок.....	31
1.4.1 Седиментация	32
1.4.2 Пластическая усадка.....	32
1.4.3 Химическая усадка	34
1.4.4 Аутогенная усадка	37
1.4.5 Усадка при высыхании.....	39
1.4.6 Усадка при карбонизации	40
1.5 Выводы.....	41
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ ..	43
2.1 Методы исследований и оборудование	43
2.2 Применяемые материалы	57
ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ ДЕСТРУКТИВНЫМ ПРОЦЕССАМ.....	67
3.1 Пути повышения сопротивляемости цементной матрицы	67
3.2 Применение суперабсорбирующих полимеров в цементных системах	71
3.2.1 Влияние САП на пластическую усадку цементного теста.....	72
3.2.2 Гидратация и твердение цемента в присутствии САП	77
3.2.3 Реологические и физико-механические свойства цементной системы с добавлением САП	80
3.3 Разработка полиминеральных композиционных вяжущих	83
3.3.1 Обоснование целесообразности применения композиционных вяжущих при создании текстиль-бетона.....	84
3.3.2 Химические и морфологические особенности компонентов полиминеральных КВ.....	87

3.3.3 Технология получения композиционных вяжущих	91
3.4 Характер дефектности структуры гидратированных полиминеральных композиционных вяжущих	95
3.5 Особенности гидратации и твердения полиминеральных КВ	98
3.6 Микроструктура и свойства новообразований КВ	105
3.7 Выводы	107
ГЛАВА 4. СВОЙСТВА ТЕКСТИЛЬ-БЕТОНА, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА	110
4.1 Особенности проектирования бетонной смеси на основе полиминеральных КВ для текстиль-бетона	110
4.2 Структура и свойства матрицы текстиль-бетона	116
4.3 Усадочные деформации текстиль-бетона	122
4.4 Технологическая схема производства изделий и составы текстиль-бетона	126
4.6 Выводы	133
ГЛАВА 5. ВНЕДРЕНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ	135
5.1 Разработка нормативных документов	135
5.2 Внедрение при разработке уникальных архитектурных сооружений	136
5.3 Внедрение при проведении работ по усилению и реконструкции	142
5.4 Техничко-экономическое обоснование	147
5.5 Выводы	149
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	151
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	154
ПРИЛОЖЕНИЯ	167
Приложение А. Протокол испытаний экспериментальных составов	168
Приложение Б. Протокол испытаний рекомендованных составов	171
Приложение В. Титульный лист стандарта организации	174
Приложение Г. Титульный лист рекомендаций по приготовления текстиль-бетона на основе композиционного вяжущего	175
Приложение Д. Свидетельство о регистрации ноу-хау	176

Приложение Е. Протокол о намерениях внедрения результатов диссертационной работы.....	177
Приложение Ж. Справка о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс.....	179

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. Растущий потенциал строительного комплекса Российской Федерации обусловлен применением современных достижений техники и технологий в строительстве и строительном материаловедении. Новый этап развития общества связан с созданием комфортной среды обитания человека, в том числе за счет использования достижений архитектурного материаловедения. Для реализации этого необходимы новые подходы и приемы при проектировании и синтезе строительных материалов, заключающиеся в рациональном выборе сырья и комплекса современных модификаторов, позволяющих достичь заданные физико-механические характеристики изделий. Особое значение этому уделяется при создании тонкостенных армированных композитов, таких как текстиль-бетон, использование которых позволяет сократить энергоемкость и материалоемкость сооружений, расширить области применения бетона и открывает новые возможности в архитектуре при создании пространственных и филигранных форм.

Однако, при изготовлении тонкостенных конструкций из высокомарочных бетонов, возрастает риск деструктивных процессов и образования трещин, в результате усадочных деформаций цементного камня. Это может привести к значительному ухудшению эксплуатационных характеристик конструкций и даже их полному разрушению. В связи с этим актуальным является разработка текстиль-бетонов, в меньшей степени подверженных деструктивным процессам, вызванным усадочными явлениями.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58317X0063), а также в рамках реализации Программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова 2017-2021 года и Программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова до 2021 года.

Степень разработанности темы. В ходе проведенного литературного обзора установлено, что снижение действия усадочных явлений в бетонах, на разных этапах формирования материала, происходит за счет сокращения клинкерной составляющей, использования быстротвердеющих цементов, введения пористых, воздухововлекающих и расширяющих добавок, что приводит к удорожанию и сказывается на физико-механических характеристиках конечных изделий. Установлено, что наибольшее количество деструктивных процессов в цементных бетонах протекает в период гидратации и твердения. Ранее не проводились исследования, связанные с повышением эффективности текстиль-бетонов за счет снижения деструктивных явлений бетонной матрицы посредством использования полиминеральных композиционных вяжущих (КВ) на основе отходов мокрой магнитной сепарации (отходы ММС) железистых кварцитов и опоковидного мергеля, в сочетании с суперабсорбирующими полимерами (САП).

Цель и задачи работы. Повышение эффективности текстиль-бетона за счет снижения деструктивных явлений цементной матрицы.

Для достижения указанной цели решались следующие задачи:

- изучение характера влияния вида и дисперсности САП на пластическую усадку в цементном камне и мелкозернистом бетоне;
- обоснование целесообразности использования и разработка полиминеральных композиционных вяжущих с применением отходов ММС и опоковидного мергеля для приготовления текстиль-бетонов с повышенной сопротивляемостью к деструктивным процессам;
- проектирование составов текстиль-бетонов на основе полиминеральных композиционных вяжущих и САП, с применением расчетно-экспериментальной методики высокоплотных упаковок;
- изучение свойств текстиль-бетонов и исследование влияния компонентов на усадочные деформации в ранние сроки твердения;
- разработка рекомендаций по изготовлению текстиль-бетона и технологической схемы производства изделий на его основе.

Научная новизна работы. Установлен характер влияния вида и дисперсности суперабсорбирующих полимеров на пластическую усадку в цементном камне и текстиль-бетоне, заключающийся в снижении отрицательного капиллярного давления, посредством водоотдачи САП, что приводит к сокращению горизонтальных деформаций еще незатвердевшей системы, при этом, не оказывая химического воздействия на гидратацию. Это позволяет уменьшить количество деструктивных процессов в период схватывания вяжущего и обеспечить качественное формирование структуры материала.

Предложена феноменологическая модель твердения системы полиминерального композиционного вяжущего «портландцемент – опоковидный мергель – отходы ММС», заключающаяся в последовательном росте новообразований системы «клинкерные минералы – опоковидный мергель – кварц различного генезиса – магнетит – гематит – вода – суперпластификатор». Последовательность твердения обусловлена разной интенсивностью и временем взаимодействия минеральной составляющей мергеля, полигенетического кварца и железосодержащих компонентов с продуктами гидратации клинкерных минералов, что объясняет повышение сопротивляемости КВ к деструктивным процессам, вызванных образованием и развитием микротрещин, за счет входящих в состав КВ минеральных компонентов, создающих армирующий эффект, и участвующих в последовательном росте новообразований, отличающихся высокой дисперсностью и плотностью.

Установлен характер синергетического действия полиминеральных композиционных вяжущих и САП на формирование структуры текстиль-бетона, заключающийся в повышении сопротивляемости бетонной матрицы к деструктивным процессам, вызванных пластической усадкой и трещинообразованием в период схватывания и твердения, а также снижении щелочной агрессии по отношению к стеклянным волокнам армирующие сетки, за счет использования разработанных КВ, что в дальнейшем благоприятно сказывается на долговечности текстиль-бетона.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность повышения эффективности текстиль-бетона за счет применения суперабсорбирующих полимеров и

использования полиминеральных композиционных вяжущих, полученных путем совместного помола портландцемента и отходов ММС и последующего введения опоковидного мергеля, используемого в качестве минерального модификатора. Расширены представления об усадочных явлениях в цементных системах и предложена общая модель усадочных деформаций.

Подобран оптимальный вид и дисперсность суперабсорбирующих полимеров, которые обеспечивают минимальное значение пластической усадки и оптимальные физико-механические характеристики текстиль-бетона.

Разработаны составы для приготовления текстиль-бетона на основе полиминеральных композиционных вяжущих и САП, с использованием расчетно-экспериментальной методики высокоплотных упаковок. Разработанные составы полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым СП 96.13330.2016 "СНиП 2.03.03-85 Армоцементные конструкции": классу по прочности на сжатие В30-60, классу по прочности на осевое растяжение Вt1,2-2, классу по средней плотности D2100-2300, маркам по морозостойкости F200-500 и маркам по водонепроницаемости W16-22.

Предложены рекомендации по изготовлению текстиль-бетона и технологическая схема производства изделий на его основе, с учетом технологических особенностей приготовления полиминеральных композиционных вяжущих.

Методология и методы исследований. Методологической основой работы послужили принципы строительного материаловедения, опирающиеся на обобщение, эксперимент, сравнение, применение системного подхода. Исследования проводились в соответствии с действующими ГОСТами и DIN-ами с применением современного оборудования Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова и аналитических методов.

Основные исследования по изучению пластической усадки проводились в специально собранной установке Института строительных материалов Технического университета Дрездена (Германия), с применением современного оборудования. Изучение фазово-структурных изменений проводилось методами рентгенофазового анализа. Выявление динамики тепловыделения производилось на

дифференциальном калориметре. Исследование микроструктурных особенностей – с помощью электронной растровой микроскопии. Расчет высокоплотных упаковок проводился по признанной расчетно-экспериментальной методики высокоплотных зерновых составов, разработанной профессором А.Н. Хархардиным.

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение возможности повышения эффективности текстиль-бетонов за счет снижения деструктивных явлений бетонной матрицы;
- характер влияния вида и дисперсности суперабсорбирующих полимеров на пластическую усадку в цементном камне и текстиль-бетоне;
- феноменологическая модель твердения системы полиминерального композиционного вяжущего «портландцемент – опоковидный мергель – отходы ММС»;
- составы и свойства текстиль-бетонов, полученных на основе полиминеральных композиционных вяжущих и САП, с использованием расчетно-экспериментальной методики высокоплотных упаковок;
- рекомендации по изготовлению текстиль-бетона и технологическая схема производства изделий на его основе с учетом технологических особенностей приготовления композиционных вяжущих.

Степень достоверности полученных результатов обеспечивается применением общепринятых гипотез и допущений, апробированных и стандартизированных методик проведения испытаний с использованием метрологически поверенного лабораторного оборудования, удовлетворительной корреляцией результатов экспериментальных и теоретических исследований, а также их повторяемостью, вероятностно-статистической обработкой экспериментальных данных.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертации докладывались на международных, всероссийских и вузовских конференциях: юбилейная Международная научно-практическая конференция, посвященная 60-летию БГТУ им. В.Г. Шухова «Наукоемкие технологии и инновации», XXI научные чтения (Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014 год); научно-практическая конференция к 85-летию заслуженного деятеля науки РФ, академика РААСН, доктора

технических наук, Баженова Юрия Михайловича «Эффективные строительные композиты» (Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015 год); Международная научно-практическая конференция «Наукоемкие технологии и инновации» (Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2016 год); первый Международный онлайн конгресс «Фундаментальные основы строительного материаловедения» (Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2017 год); VII Международная научная конференция «Задачи и методы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» («Золотовские чтения») (Москва, РААСН, 2018 год).

Разработки были представлены на XIV межрегиональной специализированной выставке «Современный город» (Белгород, Белэкспоцентр, 2017 год).

Исследования были удостоены исследовательского гранта Немецкой службы академических обменов «Deutscher Akademischer Austauschdienst» (DAAD) в 2015 году.

Внедрение результатов исследований. Для внедрения результатов диссертационной работы разработаны следующие нормативные документы: рекомендации по приготовлению текстиль-бетона на основе композиционного вяжущего; стандарт организации СТО 02066339-001-2018 «Текстиль-бетон повышенной сопротивляемости деструктивным процессам». Заключен протокол о намерениях с ООО «Строительная Компания №1» для внедрения разработанных составов текстиль-бетона на ряде строительных площадок по благоустройству городской агломерации Белгородской области, при строительстве здания «Института исследований внешней акустики», а также в рамках реализации проекта «Геосинтезированная архитектурная среда» для возведения «звуковой» перголы.

Теоретические положения и результаты научно-исследовательской работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство».

Публикации. Основные положения диссертационной работы представлены в 19 научных публикациях, в том числе в пяти статьях в журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК; в двух статьях в журналах, индексируемых в международных реферативных базах данных и

системах цитирования Scopus и Web of Science. На составы текстиль-бетонов зарегистрировано ноу-хау (№20180024 от 10.07.2018 г.).

Личный вклад. Автором расширены представления об усадочных явлениях в цементных системах и разработана общая модель усадочных деформаций. Изучена особенность влияния и экспериментально доказана эффективность применения САП. Изучена особенность гидратации и предложена феноменологическая модель твердения разработанных полиминеральных композиционных вяжущих и выявлена тенденция к снижению образования деструктивных процессов в КВ и текстиль-бетоне на его основе. Разработаны составы текстиль-бетонов на полиминеральных композиционных вяжущих с применением САП и определены их свойства. Принято участие в апробации и внедрении результатов работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа изложена на 179 страницах машинописного текста, включающего 69 рисунков, 52 таблицы, 122 наименования литературных источников, семь приложений (на 12 страницах).

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Предшествующее поколение ученых-бетонovedов оставило нам фундаментальное наследие, которое требует дальнейшего развития с учетом эволюции общества. Необходимо не только сохранить достижения, но и реализовать фундаментальные концепции и идеи, заложенные первопроходцами.

1.1 Эволюция бетоноведения

Потребности общества и достижения техники и технологий в строительстве, определяют развитие бетоноведения. Возросшие потребности в жилье способствовали появлению технологий массового жилищного строительства, увеличению промышленного производства строительных материалов, расширению их номенклатуры и повышению требований к эксплуатационным и техническим свойствам изделий. Благодаря разработке химических модификаторов, стало возможным приготовление высокопрочного бетона, что открыло абсолютно новую эру в современном строительстве [1, 2].

Длительное время основными тенденциями бетоноведения считались: повышение прочностных свойств бетона, снижение себестоимости бетонных изделий и конструкций, возможность применения местного сырья и утилизация техногенных отходов, простота и доступность технологий [3].

Развитие рыночной экономики привело к изменению сложившейся тенденции и все больше внимания начало уделяться не экономии какого-либо материала, например, цемента, а получению качественного конкурентоспособного материала. В связи с этим, в настоящее время приоритетными тенденциями бетоноведения являются: повышение эксплуатационных свойств и долговечности изделий, снижения массы от собственного веса, экологическая безопасность, улучшение архитектурно-художественной выразительности [4-6].

Новый период в развитии общества, характеризующийся необходимостью создания благоприятных условий для жизнедеятельности человека, и технический

прогресс привели, в последние годы, к появлению новых областей исследований в бетоноведении, направленных на решения конкретных задач, за счет слияния различных научных направлений (рисунок 1.1).



Рисунок 1.1 – Современные области исследования бетоноведения

Для создания комфортной среды обитания человека используются достижения архитектурного материаловедения, направленные на изменение архитектуры и дизайна городской агломерации, колористики окружающей среды, снижения шумовой агрессии и прочего. Наблюдается переход от использования массивного железобетона к более легким тонкостенным бетонным композитам, армированным неметаллическими материалами, расширяющих возможности применения бетона при строительстве объектов сложной конфигурации с повышенной архитектурно-художественной выразительностью и безопасностью [7-10].

Яркими примерами достижений архитектурного материаловедения являются многочисленные всемирно известные здания и сооружения, построенные на основе принципов архитектурной геоники и бионики, основывающиеся на подражании объектам неорганического и органического мира, с применением специальных видов бетонов удовлетворяющих пожеланиям архитекторов [11, 12]. Например, один из домов, построенных по проекту архитектурного бюро «David Jameson Architect» (США), не только с высокой точностью повторяет форму галита, но и называется

«NaCl Residence» (рисунок 1.2, а), а Сиднейский оперный театр в Австралии сильно напоминает моллюска (рисунок 1.2, б).

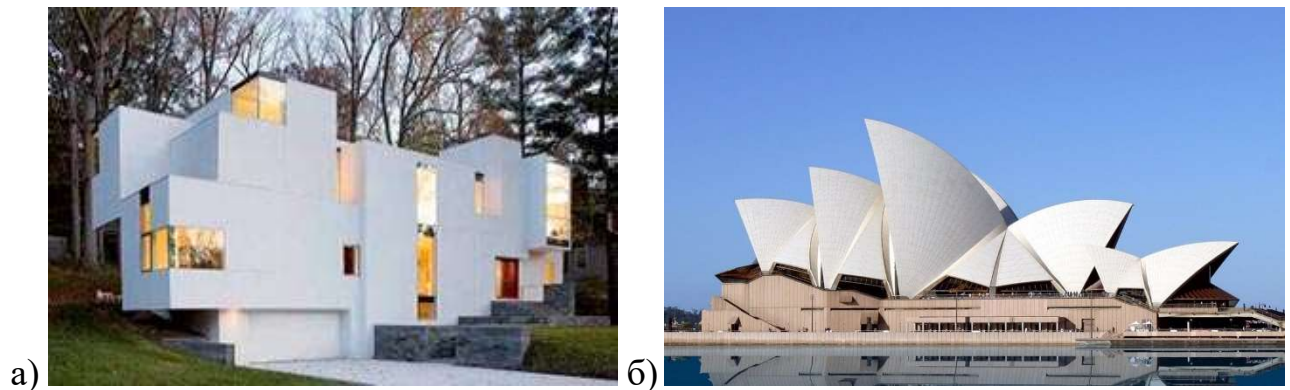


Рисунок 1.2 – Объекты, построенные на основе принципов архитектурной геоники – жилой дом «NaCl Residence» (а), и бионики – Сиднейский оперный театр (б)

Целью зеленого строительства является снижение уровня потребления энергетических и материальных ресурсов на протяжении всего жизненного цикла здания, а также сохранение и повышение качества зданий и комфорта их внутренней среды [13, 14]. Для реализации данной концепции в бетоноведении разрабатываются новые виды бетонных материалов способных решать задачи, связанные с пагубным воздействием строительной деятельности на здоровье человека и окружающую среду, энергосбережением, сокращающие расходы на обслуживание и энергопотребление. Широкое применение находят конструкционные ячеистые бетоны на основе натуральных экологически чистых ингредиентов [15-18].

Основными задачами 3D аддитивных технологий в строительстве является уменьшение человеческих трудозатрат, сроков строительства, расхода материалов, повышение качества строительства, а также облегчение ряда производственных этапов. Для решения этих задач, в бетоноведении, успешно разрабатываются специальные составы бетонных смесей, обеспечивающие возможности печатания материалов и применения технологий [19-21]. Так в городе Ступино Московской области в декабре 2016 года был напечатан первый в России дом по технологии

мобильной 3D-печати, при этом внутри отпечатанный дом ничем не отличается от обычного (рисунок 1.3).

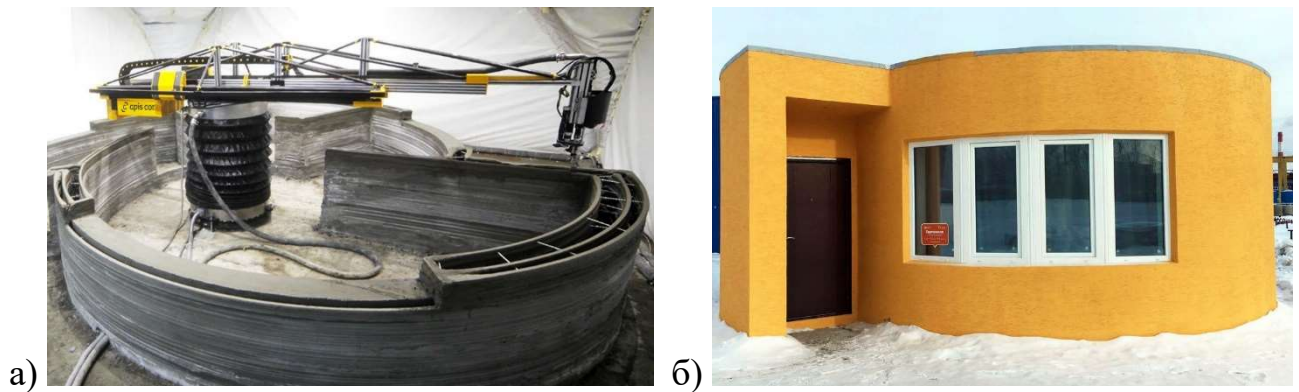


Рисунок 1.3 – 3D аддитивные технологии в строительстве:

а) процесс печатания бетонной смесью, б) внешний вид дома [22]

С учетом достижений техники и технологий, подверглось изменению строительное материаловедение. Ускоренными темпами развиваются знания о материалах и изделиях на их основе, появляются новые системы с общими научными принципами, методами и закономерностями. Трансдисциплинарный и системный подходы к исследованию позволяют проектировать композиционные материалы с заранее заданными свойствами, а также прогнозировать появление новых, пока еще не открытых материалов [23-27]. Появляется широкая номенклатура бетонов на основе новых видов сырья и комплекса современных модификаторов, которые позволяют создавать материалы и изделия, обладающие широким спектром свойств и требуемых характеристик [28-32].

Таким образом, уже сегодня наблюдаются глобальные изменения в бетоноведении, которые формулируют новые принципы и подходы материаловедения и строительства в целом. Бетоноведение является смежной областью научных знаний и дальнейшее её развитие возможно за счет использования трансдисциплинарных подходов к исследованию и проектированию материалов.

1.2 Свойства и области применения текстиль-бетона

Известно, что самым большим недостатком стальной арматуры является ее подверженность к коррозии [33]. В течение длительного времени стальной арматуре искали замену. Это и стало основной задачей, решение которой, привело материаловедов к созданию текстиль-бетона [34, 35].

Текстиль-бетон – относительно новый композиционный материал, состоящий из мелкозернистого бетона и текстильной армирующей сетки. Первые исследования проводились в рамках двух научно-исследовательских программ Немецкого научно-исследовательского фонда в Техническом университете Дрездена и в Рейнско-Вестфальском техническом университет Ахена в период с 1999 по 2011 г. В Дрездене внимание было сосредоточено на использовании текстиль-бетона в качестве материала, для усиления и реконструкции зданий и сооружений. В Ахене на первом месте стояла задача использования текстиль-бетона в качестве основного материала, для создания конструкций и сооружений [36].

В настоящее время создано множество научно-исследовательских площадок и коммерческих фирм, занимающихся изучением, развитием и трансфером знаний и технологий в строительную отрасль. Самым большим является междисциплинарный консорциум «C³ – Carbon Concrete Composite» – это наиболее широкая платформа для обсуждения достижений, реализации идей и переноса знаний о текстиль-бетоне в практику, которая насчитывает более 160 членов [37].

Армирование бетона текстильными материалами дает множество преимуществ, что позволяет изготавливать бетонные элементы достаточно тонкими, поскольку отсутствует риск образования коррозии. Кроме того, текстильная арматура более гибкая и драпируемая, и поэтому форма бетонных элементов может широко варьироваться, что позволяет создавать сложные архитектурные формы и элементы.

Для приготовления текстиль-бетона используются тщательно подобранные составы мелкозернистого бетона, состоящие из заполнителей, вяжущих, минеральных наполнителей, специальных химических добавок, влияющих на реологические

свойства бетонной смеси, и воды. Текстильная сетка применяется в виде сотканых полотен, изготовленных из волокон щелочестойких материалов: AR-стекла, базальта, углерода или комбинации волокон разного происхождения [38]. Текстильная сетка послойно укладывается между слоями бетонной смеси, толщина которых может достигать 3 мм. Этапы создания текстиль-бетона представлены на рисунке 1.4.

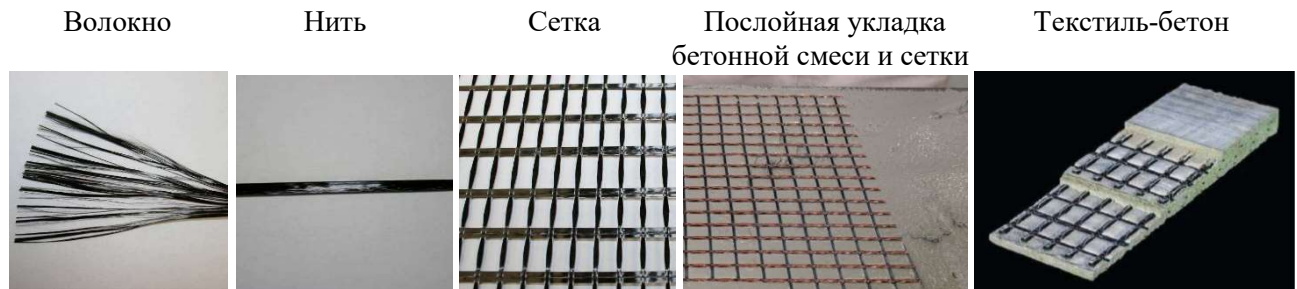


Рисунок 1.4 – Этапы создания текстиль-бетона

Текстиль-бетон, прежде всего, характеризуется своей легкостью и высокой несущей способностью. Благодаря сочетанию свойств бетона и текстильной сетки, композит обладает уникальными возможностями, подчеркивающими его исключительную особенность. За счет высокой прочности на разрыв армирующей сетки, текстиль-бетон обладает высоким пределом прочности при изгибе и является «гибким» материалом (рисунок 1.5).



Рисунок 1.5 – Демонстрация возможностей текстиль-бетона при приложении изгибающей нагрузки

Свойства и технология приготовления текстиль-бетона позволяют успешно использовать его в качестве материала для усиления и реконструкции бетонных и железобетонных сооружений. Существует несколько видов армирования. Армирование стальной арматурой значительно повышает прочностные показатели конструкций, но для защиты стальной арматуры от коррозии, требуется защитный слой бетона не менее 35 мм. Это приводит к толщине конструкции более 90 мм. В бетоне, армированном фиброй, много разноматричных волокон, малая часть которых воспринимает полезную нагрузку. В текстиль-бетоне, армирование может быть направленным и равномерно распределенным. Для защиты армирующей сетки требуется всего лишь слой бетона толщиной в 3 мм. При этом, общая толщина текстиль-бетона, используемого для усиления зданий и сооружений, колеблется от 1 до 1,5 см, что значительно меньше, чем толщина железобетона, используемого в тех же целях (рисунок 1.6) [39, 40].

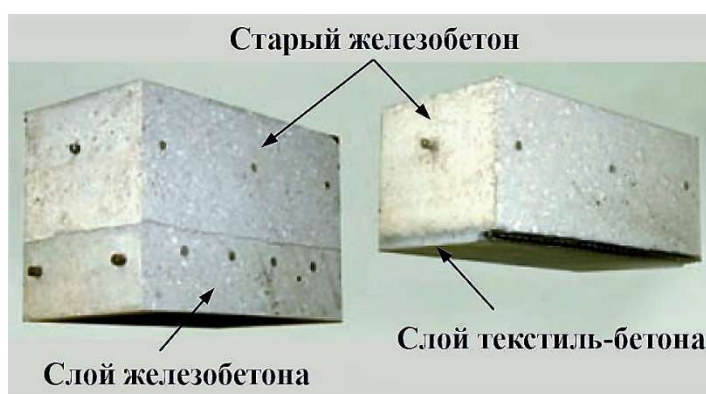


Рисунок 1.6 – Конструктивная особенность усиления железобетоном и текстиль-бетоном

Армированный текстилем бетон характеризуется сдерживающей способностью к образованию и развитию трещин, при этом образовавшиеся волосяные трещины незначительно раскрываются и гаснут. Благодаря этому была доказана пригодность данного материала для использования при реконструкции и усилении бетонных и железобетонных сооружений [41].

Впервые на практике для усиления эксплуатируемых конструкций текстиль-бетон был опробован при реконструкции крыши большой аудитории в

университете прикладных наук в г. Швайнфурт (Бавария, Германия) в 2006 г. Апробация производилась Техническим университетом Дрездена совместно с компанией «Torkret GmbH» (рисунок 1.7) [42].

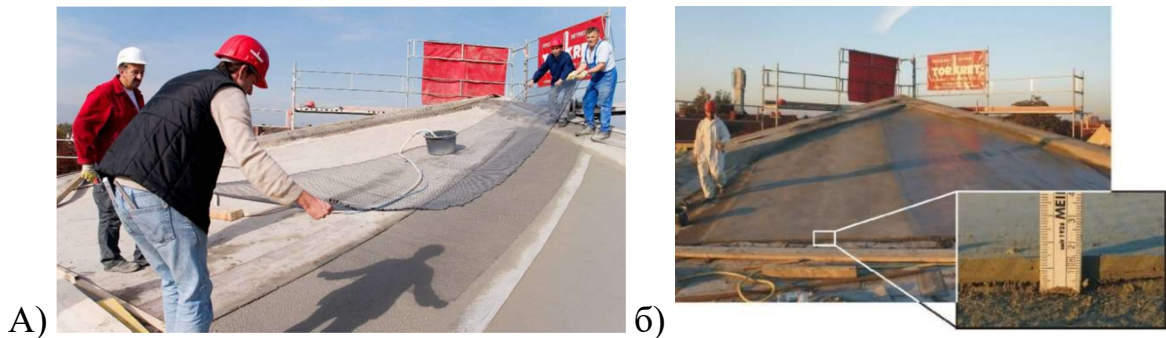


Рисунок 1.7 – Усиление текстиль-бетоном крыши университета:

а) укладка текстиль-бетона, б) демонстрация толщины уложенного слоя [42]

Было достигнуто хорошее сцепление свежесуложенного мелкозернистого бетона с поверхностью старого бетона, предварительно подготовленного для усиления. В качестве армирующего материала использовалась текстильная сетка из углеродного волокна. Полотна сетки укладывались послойно между слоями мелкозернистого бетона толщиной 3 мм, при этом общая толщина текстиль-бетона составила 15 мм (рисунок 1.7, б).

Особенно хорошо материал себя зарекомендовал при реконструкции памятника архитектуры – исторического здания в городе Цвикау (Саксония, Германия). В рамках требований по защите памятников архитектуры, стояла задача произвести реконструкцию крыши исторического здания, имеющей цилиндрическую форму. По результатам расчетов, прочность сооружения не соответствовала стандартным нормам DIN 1045-1. Традиционные методы усиления, с применением инъекционного бетона, не подходили, поскольку при этом возрастала толщина отделочного слоя, что утяжеляло всю конструкцию и могло привести к снижению несущей способности всех элементов здания. Другой альтернативный метод заключался в усилении сооружения наклеивающимися пластинами из углепластика, которые увеличивали несущую способность, но при этом существенно затрудняли отделочные работы [43].

По технологии реконструкции следовало сначала удалить штукатурный слой, а затем восстановить несущую способность объекта, с помощью многослойной укладки полотен текстильной сетки (рисунок 1.8, а) и мелкозернистого бетона методом набрызга (торкретирование) (рисунок 1.8, б). Армирование проводилось на внутренней и внешней поверхностях (рисунок 1.8, в), общая толщина текстиль-бетона составляла от 6 до 12 мм.



Рисунок 1.8 – Усиление текстиль-бетоном крыши исторического здания:

а) укладка полотна текстильной сетки, б) нанесение бетонной смеси методом торкретирования, в) наружное усиление [43]

Использование текстиль-бетона вместо старого штукатурного слоя позволило сохранить оригинальную геометрию, форму и изящный стиль крыши исторического здания. Кроме того, применение данного способа усиления и реконструкции было целесообразным с точки зрения требований защиты памятников архитектуры, пожарно-технической безопасности и расчетов прочности конструкции крыши.

Пожалуй, самым эффективным и неоспоримо точным примером демонстрации возможностей текстиль-бетона является применение его при строительстве пешеходных мостов. Первый в мире мост из текстиль-бетона был возведен в 2005 г. в городе Ошатц (Саксония, Германия) (рисунок 1.9, а) [35]. Его размеры – длина 8,66 м и внутренняя ширина 2,50 м. Конструкция состоит из 10 U-образных секций толщиной от 3 см, закрепленных между собой неподвижными стальными стержнями. Вес моста всего лишь 5 т, но его несущая способность составляет 38 т. Обычный железобетонный мост, обладающий такими же несущими способностями, весил бы в 5 раз тяжелее. Вслед за ним осенью 2007 г. в городе Кемптен (Бавария,

Германия) был построен второй, аналогично первому, секционный мост из текстиль-бетона (рисунок 1.9, б) [35, 44]. Его длина составляет 17 м, внутренняя ширина 2 м. Мост состоит из 18 U-образных секций, произведенных заводским путем, каждая из которых весит около 620 кг, также, как и в первом случае, закрепленных между собой стальными неподвижными стержнями. Вес моста составляет 12,8 т. Самый длинный мост в мире из текстиль-бетона длиной 97 м находится в городе Албштадт-Лаутлинген (Баден-Вюртемберг, Германия) (рисунок 1.9, в). Состоит из семи сборных элементов, которые имеют максимальную длину 17,2 м, высоту 43,5 см, ширину 3,21 м [45, 46].



Рисунок 1.9 – Мосты из текстиль-бетона: а) мост в городе Ошатц [35],
б) мост в городе Кемптен [35], в) мост в городе Албштадт-Лаутлинген [45]

Перспективным видется применение текстиль-бетона для создания сэндвич-панелей и фасадных плит [47-49]. Совместной работой Технического университета Дрездена и, их промышленного партнера, компанией «Hering Bau» в 2008 г. были разработаны первые фасадные плиты из текстиль-бетона, площадью 2 м² и толщиной 20 мм, и установлены на здании лаборатории Alfred-Hütter в Дрездене (рисунок 1.10, а).

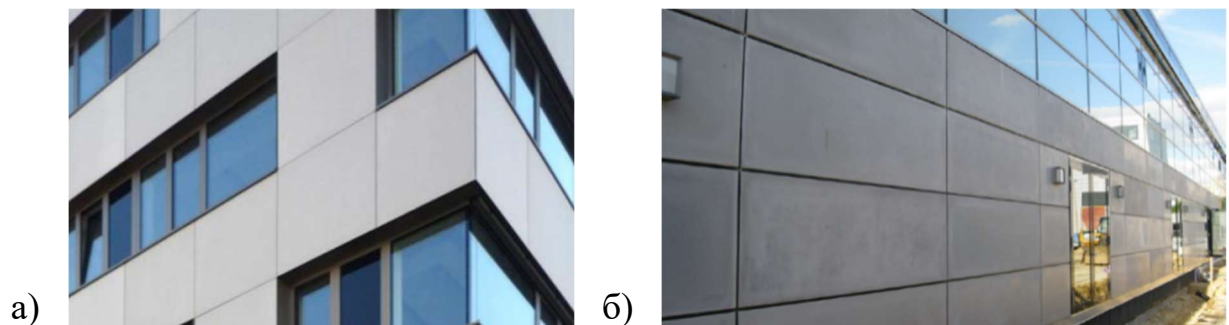


Рисунок 1.10 – Применение текстиль-бетона для отделки фасада здания:
а) фасадные плиты [47], б) сэндвич-панели на здании «Innotex» в г. Ахен [49]

Возможность применения текстиль-бетона в качестве основного конструкционного материала была опробована при строительстве ряда сооружений. Так в Дрездене было возведено сооружение из шести монолитных раковин треугольной формы, толщиной до 40 мм и максимальной длиной ребра 5 м, соединенных между собой (рисунок 1.11, а). Элементы производились путем формования текстиль-бетона [50]. На территории студенческого городка технического университета Ахена была возведена легкая филигранная конструкция в виде развернутых парусов (трехмерных оболочек) (рисунок 1.11, б) [51]. В дальнейшем сооружение приобрело стеклянные стены и коммуникации и стало полноценным зданием. В настоящее время оно используется для проведения семинаров и конференций (рисунок 1.11, в).



Рисунок 1.11 – Сооружения из текстиль-бетона:

- а) в городе Дрезден [50], б) в городе Ахен до остекления [51],
в) остекленное сооружение в городе Ахен [51]

Текстиль-бетон привлек внимание не только инженеров, но также архитекторов и дизайнеров, для воплощения своих идей за счет использования в качестве основного композиционного материала, при создании садово-парковой мебели и малых архитектурных объектов (рисунок 1.12).



Рисунок 1.12 – Малые архитектурные объекты и мебель из текстиль-бетона:
 а) выставочный объект в Техническом университете Хемниц [52], б) арт-объект «Мембранная оболочка» [53], в) садово-парковая мебель из текстиль-бетона [54]

Особый интерес представляет развитие данного направления в современной архитектуре при строительстве объектов сложной конфигурации с повышенной архитектурной выразительностью. Уже сегодня материал успешно используется при создании сложных пространственных форм, что расширяет возможности архитектуры и открывает новые границы совершенства (рисунок 1.13).

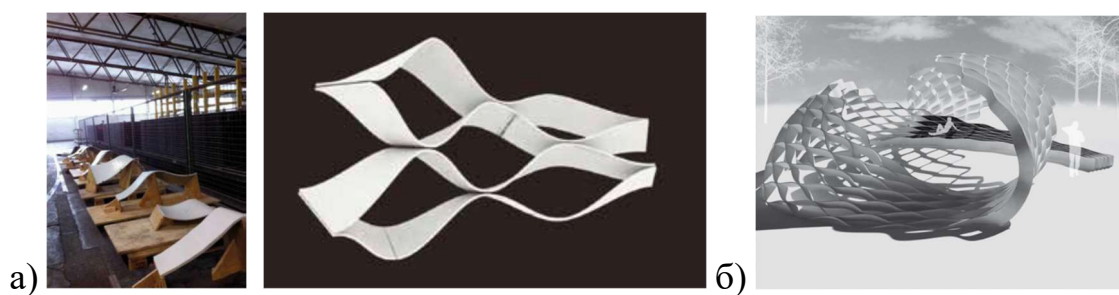


Рисунок 1.13 – Сложные модели форм:
 а) изделия из текстиль-бетона [55], б) проект сооружения будущего [56]

Основной недостаток текстильных армирующих материалов – это сравнительно высокая стоимость, но их ценовое превосходство над сталью,

компенсируется многократной производительностью. Это достигается за счет снижения массы композиционного материала и более высокой прочностью на разрыв [38].

Таким образом, перспективным является применение текстиль-бетона в современной архитектуре в качестве универсального материала для создания нового облика городов, посредством строительства объектов сложной конфигурации с повышенной архитектурной выразительностью, создания малых архитектурных форм, садово-парковой мебели, сэндвич-панелей и фасадных плит, использования в качестве основного композиционного материала для выполнения работ по усилению и реконструкции зданий и сооружений из бетона, и что также позволяет решить такие актуальные задачи, как:

- борьба с коррозией стальной арматуры;
- увеличение прочностных и эксплуатационных характеристик изделий;
- снижение энергоемкости и материалоемкости сооружений;
- сокращение нагрузки на окружающую среду путем уменьшения потребления сырьевых материалов;
- расширение области применения бетона.

Текстиль-бетон может стать одним из главных строительных материалов, используемых при создании комфортной среды обитания человека, что требует глубокого изучения и практической апробации. Будущее этого актуального научного направления связано с внедрением междисциплинарных и трансдисциплинарных подходов [57], использованием новой сырьевой базы (природного и техногенного сырья с высокой свободной внутренней энергией [58]), теории техногенного метасоматоза в строительном материаловедении [59], закона сродства структур [60] и других достижений бетоноведения и смежных наук.

1.3 Пути повышения эффективности текстиль-бетона

Ввиду особенностей применения и приготовления текстиль-бетона, возникают определенные трудности при достижении желаемого качества

композиционного материала. Повышения эффективности текстиль-бетона возможно за счет тщательного изучения ключевых факторов создания данного композиционного материала. Такими факторами являются: разработка высококачественной бетонной основы, выбор армирующих материалов, повышение сцепления текстильных сеток с бетоном, обеспечение условий формирования текстиль-бетона, оптимизация этапов производства материала.

В отличие от традиционных составов, для приготовления текстиль-бетона используются многокомпонентные составы из высококачественных материалов с высоким содержанием цемента, рационально подобранной гранулометрией заполнителей и минеральных наполнителей, и рядом химических добавок, которые придают требуемые реологические свойства бетонной смеси [61] (рисунок 1.14).

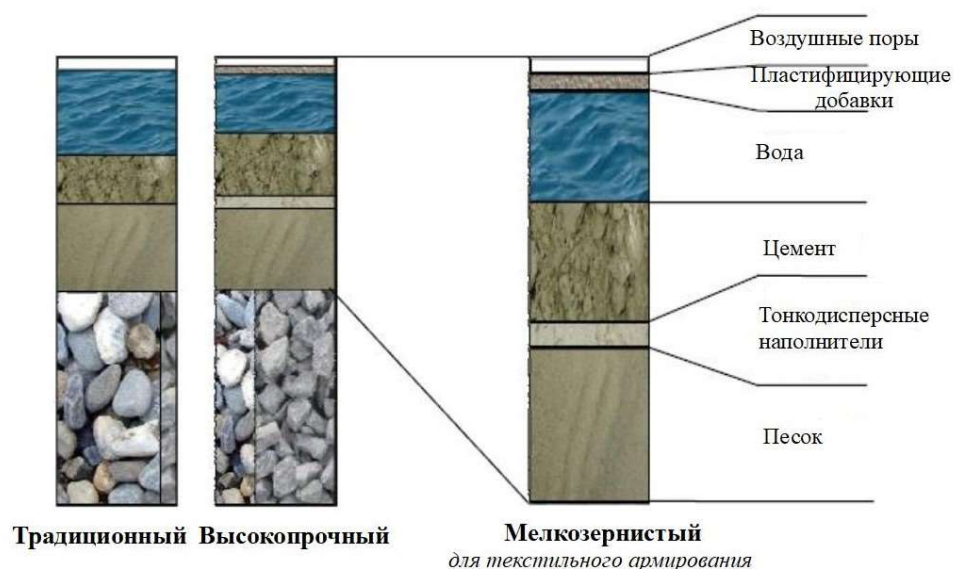


Рисунок 1.14 – Сравнительное соотношение компонентов бетонов [61]

Повышение эффективности текстиль-бетона возможно уже на стадии проектирования бетонной смеси путем выбора правильно расчетно-экспериментальной методики подбора состава, благодаря которой достигается повышения технологических (реология и плотность смеси) и физико-механические цементного камня. При приготовлении бетонной смеси, важно добиться такой консистенции, чтобы, в зависимости от способа производства текстиль-бетона, обеспечить удобство при формировании конечного продукта (рисунок 1.15). Бетонная смесь должна быть

удобоукладываемой и, в некоторых случаях, обладать самоуплотняющимися свойствами [62].



Рисунок 1.15 – Приготовление текстиль-бетона с использованием разных консистенций бетонной смеси [62]

Несущая способность изделий и конструкций из текстиль-бетона, во многом зависит от свойств и характеристик армирующих текстильных материалов, таких как прочность, удлинение при разрыве, модуль упругости, геометрические размеры (длина, диаметр, форма волокна, сетки и т.д.), объемная доля волокна, адгезия к бетонной матрице и т.д. [63-65].

Существует широкая номенклатура текстильных армирующих сеток, различающихся по виду используемого сырья, размеру ячеек, виду переплетения и расходу волокон на 1 м². Для создания текстильных сеток применяются волокна из щелочестойких материалов [66, 67]. Наиболее распространенным сырьем являются углерод, базальт и щелочестойкое AR-стекло (рисунок 1.16) [68].

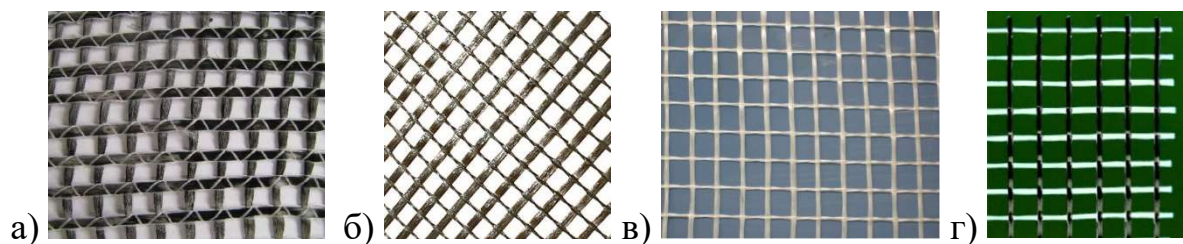


Рисунок 1.16 – Виды текстильных сеток, используемых для создания текстиль-бетона: а) из углеродного волокна, б) из базальтового волокна, в) из волокон щелочестойкого AR-стекла, г) комбинированный текстиль (волокна из углерода и AR-стекла) [68]

Углеродные волокна по прочностным свойствам превосходят волокна базальта и AR-стекла, но их себестоимость в несколько раз выше. Волокна из щелочестойкого стекла имеют высокое удлинение при разрыве от 2 до 3 %, что приводит к высокой гибкости текстиль-бетона [69]. В таблице 1.1 представлено влияние типов армирующих сеток на увеличение несущей способности плиты, армированной текстильной сеткой, при испытании по приведенной схеме (рисунок 1.17).

Таблица 1.1 – Влияние типа армирующей сетки на несущую способность плиты армированной текстильной сеткой [Источник: <https://www.moertelshop.com>]

Тип	Характеристика	Увеличение масса груза, кг
Bewehrung Typ 11	AR-стекло, 120 г/м ² , 2D	9
Bewehrung Typ 33	Базальт, 225 г/м ² , 2D	25
Bewehrung Typ 55	Углерод, 149 г/м ² , 2D	49
Bewehrung Typ 111	AR-стекло+Углерод, 213 г/м ² , 2D	103
Bewehrung Typ 214	Углерод, 356 г/м ² , 2D	197
Bewehrung Typ 2121	Углерод, 580 г/м ² , 2D	200

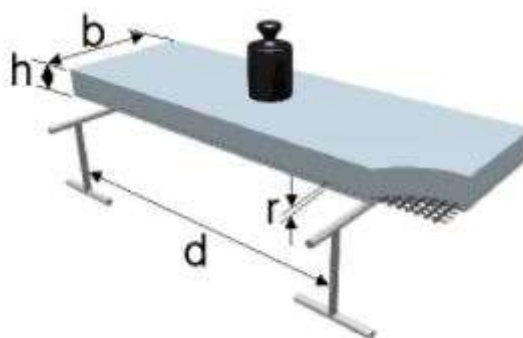


Рисунок 1.17 – Схема испытания плиты, армированной одним слоем текстильной сетки, где $d = 600$ мм, $b = 200$ мм, $h = 15$ мм, $r = 3$ мм

[Источник: <https://www.moertelshop.com>]

Придание максимальной сцепки армирующей сетки с бетоном, является важным фактором обеспечения высокой несущей способности и долговечности текстиль-бетона. Важно, чтобы в момент приложения внешней нагрузки на текстиль-бетон, армирующая сетка совместно воспринимала напряжения с цементной

матрицей. В противном случае, эффективность текстиль-бетона не будет оправдана (рисунок 1.18) [70].



Рисунок 1.18 – Внешний вид образцов после испытаний на разрыв

Сцепление текстильной сетки с бетоном может быть улучшено за счет разнообразных структур и форм нитей. Благодаря специальным технологиям плетения, возможно создание формы нитей, сходную со стальной арматурой периодического профиля, за счет оплетения и обкручивания дополнительными волокнами, которые улучшают сцепление с цементной матрицей [71, 72]. А при использовании технологии фрикционного прядения, возможно создание рыхлой поверхности армирующей сетки. Для этого в качестве сердечника используются высокопрочные нити, которые покрываются оболочкой из полипропиленовых штапельированных волокон, оплетающих сердечник во время процесса прядения. Данная технология также улучшает сцепление армирующих сеток с бетоном [73, 74].

Также, изучалась возможность использования растворов из тонкодисперсных минеральных добавок – микрокремнезема и алюмосиликатов, в качестве пропиток нитей из углеродных волокон, для увеличения адгезии с цементной матрицей. Однако, данная технология повышала сложности при работе с армирующими сетками [75-77].

Для правильной реализации свойств армирующих нитей в бетоне необходимо их ориентировать в направлении действия нагрузки. Поэтому возникает необходимость создания следующего структурного уровня – текстильного полотна. Структуры применяемых полотен также варьируются, могут использоваться как тканые, так и вязаные. Ориентация нитей в полотнах может быть в двух и трех

направлениях действия нагрузок, что обеспечивается использованием армирующих нитей различного типа в структуре одного и того же полотна. Основное назначение таких полотен, как правило, связано с физико-механическими свойствами текстиль-бетона [66, 78, 79].

Важным этапом создания является обеспечение условий формирования текстиль-бетона. Как правило, созданные конструкции из текстиль-бетона или усиленные с помощью него бетонные сооружения, имеют большую площадь открытой поверхности. На ранней стадии твердения, когда цементная матрица еще не набрала необходимой прочности, за счет действия окружающей среды, велико влияние пластической усадки на формирование качественной поверхности материала и прочности в целом. Пластическая усадка цементных материалов вызывает образование трещин на поверхности бетона (рисунок 1.19), что в случае с текстиль-бетоном, из-за тонкости самого композита, может привести к его полному разрушению [80-82].

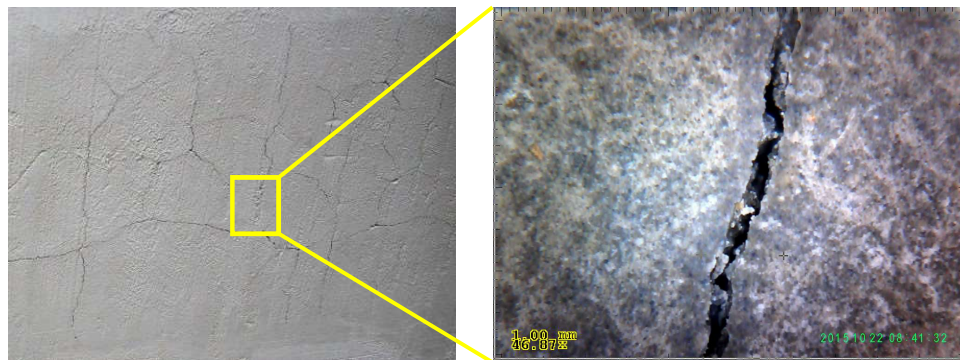


Рисунок 1.19 – Трещины на поверхности текстиль-бетона
в результате действия пластической усадки

Одним из важнейших условий для сокращения пластической усадки и предотвращения трещинообразования текстиль-бетона в раннем возрасте является правильный уход на стадии твердения цементной матрицы. Для снижения усадки выделяют внешние и внутренние методы ухода. Внешний уход подразумевает создание благоприятных тепло-влажностных условий для протекания процесса твердения. Это возможно достичь при использовании водонасыщенных покрытий (влажная мешковина, опилки и т.п.), синтетических защитных покрытий, защиты

свежеотформованной конструкции от прямого воздействия ветра и солнечной радиации, при использовании туманов и т.д. [83].

Внутренний уход подразумевает введение в бетонную смесь специальных компонентов, обеспечивающие необходимый баланс влаги. Такие агенты могут быть либо обычными заполнителями, вводимыми в бетонную смесь в увлажненном состоянии, либо дополнительными компонентами (например, абсорбирующие добавки или специальные наполнители). Внутренний уход, обеспеченный абсорбированной водой, минимизирует пластическую усадку, возникающую вследствие быстрого высыхания поверхности текстиль-бетон, находящегося в неблагоприятных сухих условиях [84-86].

Немаловажным при формировании текстиль-бетона является оптимизация этапов производства материала, заключающаяся в слаженном действии технического коллектива, четко выполняющего необходимые рекомендации по приготовлению. Текстиль-бетон является высокотехнологичным материалом, так как при создании сложных и ответственных конструкциях на его основе используются современные технологии проектирования. Применяются компьютерные технологии, вычислительные программы и программы моделирования. Это позволяет изучить поведение проектируемой конструкции, снизить риски ее использования и улучшить эксплуатационные характеристики [87, 88].

1.4 Структурные деформации вследствие разных видов усадок

Деструктивные процессы в бетонах, такие как возникновение внутреннего напряжения, образование структурных микротрещин, изменение геометрических размеров и прочее, в основном вызваны усадочными явлениями цементного камня, что в большинстве случаев приводит к растрескиванию бетона. Особенно важное значение это имеет для тонкостенных армоцементов и текстиль-бетона.

В настоящее время имеется множество публикаций и работ на тему усадочных явлений в цементных системах [89-93]. Однако, с учетом развития бетоноведения и ростом технических возможностей, расширяются представления о процессах и механизмах образования усадочных деформаций. В связи с этим необходимо структурировать имеющиеся знания и дополнить их свежими результатами исследований.

В ходе проведенного литературного обзора, были расширены представления об усадочных явлениях в цементных системах и, на основании полученных знаний, предлагается общая модель усадочных деформаций бетона вследствие влияния усадочных явлений (рисунок 1.20).

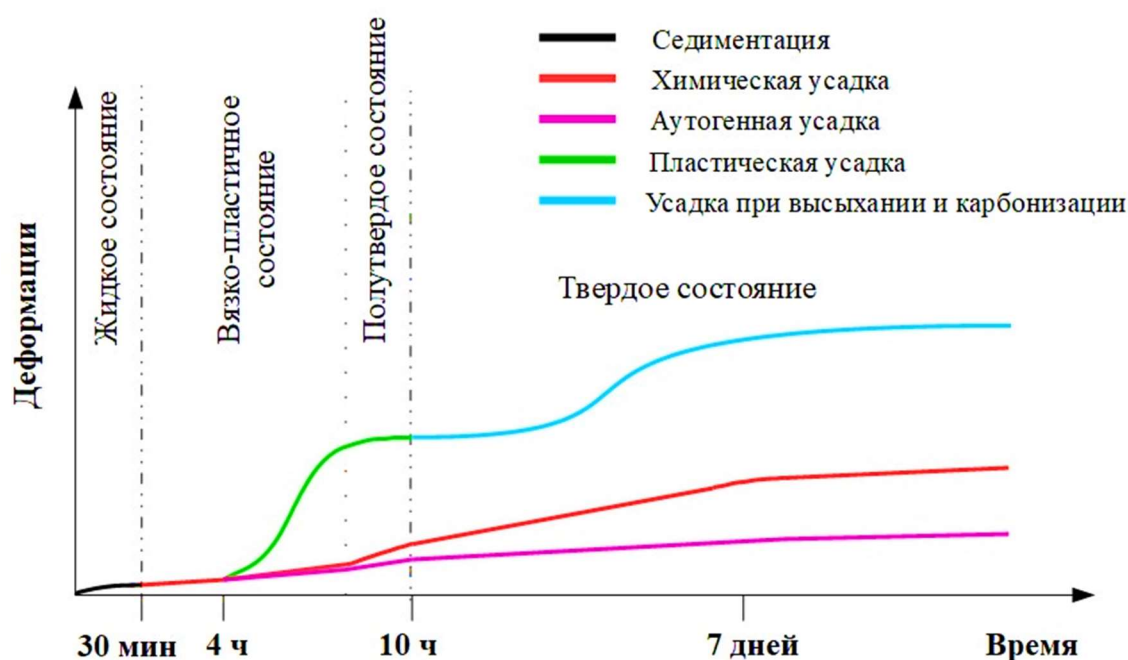


Рисунок 1.20 – Модель развития усадочных деформаций в рядовом бетоне при нормальных условиях окружающей среды

1.4.1 Седиментация

Изначально после укладки бетонной смеси может происходить седиментация – осаждение твердых частиц под влиянием сил тяжести, за счет чего происходит расслоение смеси (более крупные и тяжелые частицы из верхних слоев перемещаются в нижние), при этом верхние слои становятся менее плотными и даже рыхлыми, по сравнению с нижними. Седиментация интенсивно развивается в первый момент после укладки и механического уплотнения бетонной смеси и постепенно затухает в течение 30 мин. При этом, может происходить интенсивное водоотделение, в результате чего, на поверхности смеси образуется слой воды. Однако, этот процесс не приводит к образованию внутренних напряжений, вызывающих деформации, хотя имеет место быть в дисперсных системах.

На седиментацию оказывают влияние: продолжительность вибрирования бетона при укладке; замедленное схватывание, вызванное низкой температурой и добавкой-замедлителем; чрезмерное количество воды; нерационально подобранный зерновой состав; присутствие добавок [94].

1.4.2 Пластическая усадка

Резкое увеличение деформаций приходится на период затвердевания цементной матрицы в промежутке времени примерно с 4 до 10 часов (рисунок 1.20). Эти деформации вызваны пластической усадкой еще незатвердевшей смеси, что приводит к нарушению структуры материала и образованию трещин, а в случае с тонкостенными изделиями из бетона, к их полному разрушению [94-95].

Пластическая усадка является следствием быстрой потери воды с поверхности бетона в результате испарения [96]. Недостаточное отверждение и отсутствие защиты бетонной поверхности, подверженной неблагоприятным условиям окружающей среды (сильный ветер, высокая температура воздуха, низкая влажность), являются основными причинами деформации бетона на ранней стадии твердения, находящегося пока еще в пластическом (незатвердевшем) состоянии. Величина

потери воды с поверхности бетона значительно больше количества влаги, доступной для пополнения потерянной поверхностной влаги. Соответственно, прямым следствием этой диспропорции является физический процесс наращивания капиллярного давления в микропорах, что вызывает сжатие системы, которое, в свою очередь, может привести к образованию трещин [94, 97]. На рисунке 1.21 приведена принципиальная схема механизма образования пластической усадки.

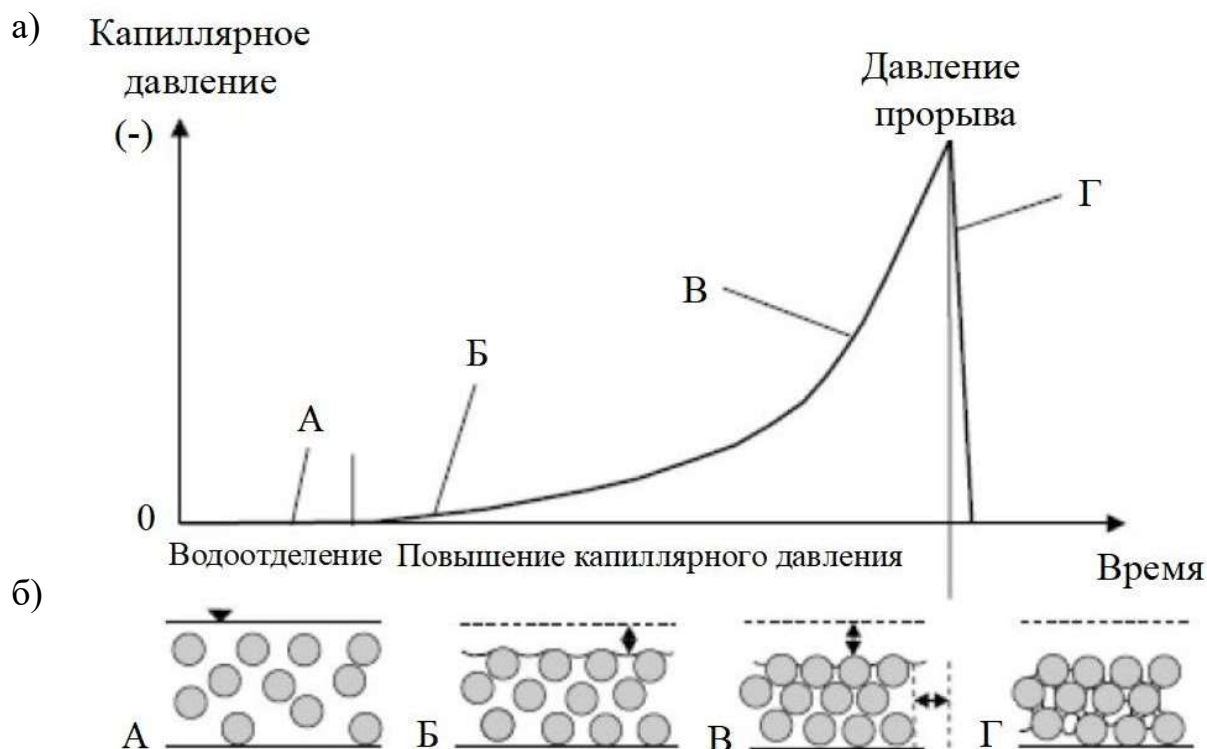


Рисунок 1.21 – Механизм образования пластической усадки:

- а) схема развития отрицательного капиллярного давления в микропорах бетона,
- б) физическое действие отрицательного капиллярного давления и образование пластической усадки [94]

В начальный период, когда система затворена водой и на ее поверхности образована водная прослойка, разница давления между водой и окружающей средой отсутствует. Следовательно, капиллярное давление равно нулю (рисунок 1.21, А). Как только в результате испарения водная пленка с поверхности исчезает, начинают образовываться водные мениски. Капиллярное давление в микропорах бетона принимает отрицательное значение, за счет образования вогнутого мениска

жидкости на разделе двух фаз – воды и воздуха (рисунок 1.21, Б). Образование таких менисков характерно для смачивающих жидкостей. Адгезионные силы и поверхностное натяжение способствуют развитию отрицательного капиллярного давления, которое начинает возрастать обратно пропорционально радиусам, образующих менисков. В результате чего происходит объемное сжатие, приводящее к усадочным деформациям бетона, находящегося в еще пластической фазе (рисунок 1.21, В). Также, повышение отрицательного капиллярного давления приводит к миграции воды к верхним слоям. В момент, когда скорость испарения влаги превышает скорость миграции воды к поверхности бетона, происходит локальное проникновение воздуха в систему. Давление, при котором это достигается, называется критическим или давлением прорыва [95]. После чего происходит резкое понижение капиллярного давления (рисунок 1.21, Г).

Пластическая усадка может представлять серьезную проблему для бетонов с большой открытой поверхностью, способствовать образованию трещин в верхних слоях в еще незатвердевшей цементной системе, тем самым значительно снижать заявленную прочность материала.

1.4.3 Химическая усадка

Взаимодействие цемента с водой сопровождается непрерывным уменьшением количества воды и увеличением объема твердой фазы. При этом возникает контракция – уменьшение абсолютного объема системы «цемент–вода» по сравнению с объемом исходных реагирующих компонентов, в результате чего происходят изменения в поровой структуре материала, а также возникновение внутренних напряжений [91].

Однако, процесс контракции можно разделить на два взаимосвязанных явления принципиально отличающихся друг от друга – химическая усадка и аутогенная усадка.

Химическая усадка в цементных композитах процесс неизбежный. Ле Шателье [89] в 1900 году был первым, кто сообщил о измерениях химической

усадки цемента. Исследованиями [83] установлено, что при полной гидратации цемента химическая усадка может составлять около 7 % от первоначального объема. Однако, сам бетон никогда не проявляет такую высокую деформацию, поскольку в основном изменения объема материала приводят к образованию мельчайших пор в цементном камне. К тому же, изменению объема цементного камня противодействуют крупный и мелкий заполнители, арматура и другие армирующие добавки.

Luga и др. [98] разделяют процесс гидратации и момент затвердевания цементного геля на несколько фаз (рисунок 1.22):

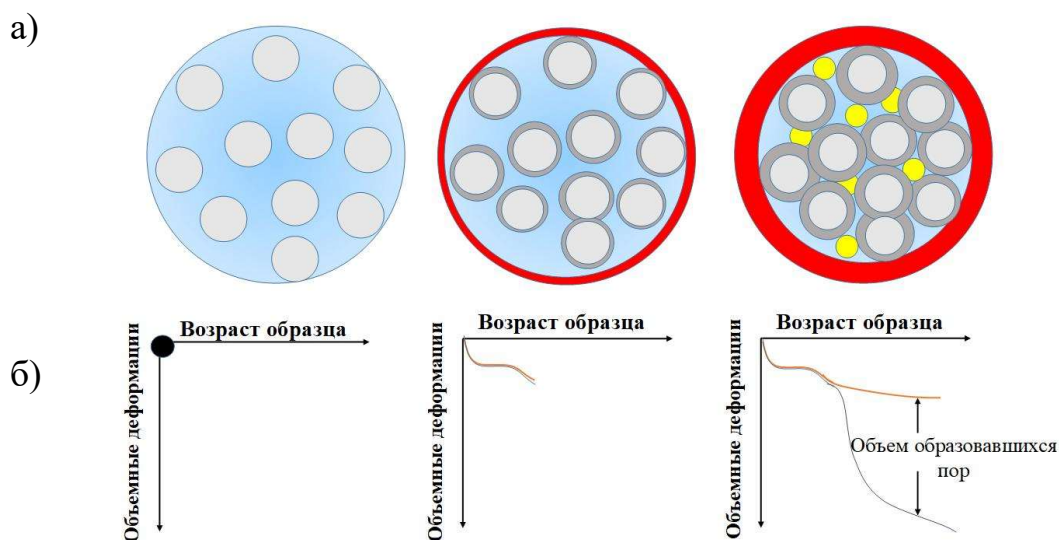


Рисунок 1.22 – Схематическое изображение цементного геля на различных стадиях гидратации (а) и одновременное развитие химической и аутогенной усадки (б)¹ [98]

При смешении цемента с водой, цементный гель можно рассматривать как суспензию частиц цемента в воде (рисунок 1.22, а, слева). В этот момент отсутствуют какие-либо процессы во времени (рисунок 1.22, б, слева), так как практически процесс гидратации еще не начался, и химическая усадка еще не образуется.

¹ На рисунках 1.22, а – вода представлена синим цветом, цементные зерна – светло-серым, продукты гидратации – темно-серым, пустые поры внутри цементной пасты – желтым и аутогенная (объемная) усадка – красным цветом. Величина аутогенной усадки увеличена для наглядности описания этого процесса. На графиках 1.22, б – синей линией представлена химическая усадка и красной линией аутогенная усадка.

В первые часы гидратации цементное тесто все еще пластичное и химическая усадка полностью переходит в объемную (аутогенную) усадку (рисунки 1.22, а, в центре; 1.22, б, в центре). Цементное тесто под собственной массой заполняет пустоты, образовавшиеся в результате уменьшения объема продуктов гидратации.

По мере гидратации, цементное тесто приобретает достаточную жесткость, чтобы сохранить первые зародившиеся пустоты. Наступает период, когда видимые объемные изменения приостанавливаются и аутогенная усадка затухает. В этой фазе поры образуются все активнее не подвергаясь разрушению, вызванному подвижностью смеси. Эта фаза соответствует точке дивергенции между кривыми химической и аутогенной усадок (рисунок 1.22, б, справа). Общий объем пор, создаваемый в этой фазе, соответствует разнице между общим изменением объема (химической усадкой) и внешним изменением объема (аутогенной усадкой).

Исходя из вышеизложенного, следует вывод, что химическая усадка – это общее изменение объема вследствие гидратации цемента, проявляющаяся в виде видимых внешних изменений объема материала, в период начала гидратации цемента и до момента полного затвердевания, и внутренних изменений, в виде образовавшихся пор и пустот.

Значительная величина химической усадки, из-за высокой скорости гидратации цемента в первые часы твердения, вызывает большую аутогенную усадку, и, следовательно, большую общую усадку, что приводит к высокому риску трещинообразования. По данным В.В. Некрасова [99], предельные значения химической усадки для обычных цементов составляют от 5 до 8 мл на 100 г или в среднем от 6 до 7 л на 100 кг цемента. Также, Ю.М. Баженов [92] сообщает, что средний размер химической усадки цементного камня составляет от 7 до 9 мл на 100 г цемента.

Вследствие химической усадки происходит увеличение пористости цементного камня, которая через 28 суток твердения составляет от 4 до 7 % его объема [90].

1.4.4 Аутогенная усадка

Аутогенная усадка впервые установлена и описана более чем шестьдесят лет назад Лайманом [100], когда наблюдалось уменьшение объема бетона без заметного изменения его массы или температуры. Однако, поскольку аутогенная усадка обычного бетона значительно меньше, чем усадка при высыхании, то этому вопросу до начала применения высокопрочного бетона не уделялось особого внимания. После чего было обнаружено, что высокопрочный бетон подвергался аутогенному растрескиванию под сдерживающими факторами. В последние два десятилетия феномен аутогенной усадки изучался с увеличивающейся интенсивностью, что привело к созданию ряда нормативных документов, позволяющих прогнозировать аутогенную усадку в бетонных конструкциях (DIN 1045-1, EN 1992-1-1, JSCE Design Code 2002).

Аутогенная усадка – это внешние макроскопические объемные деформации замкнутой (изолированной) изотермической цементной системы не подверженной воздействию (массообмену) окружающей среды [101].

В первые часы после водозатвердения, аутогенная усадка считается равной химической усадке, то есть, внутренние и внешние изменения объема равны (рисунок 1.22). Это объясняется тем, что цементный материал в жидком состоянии заполняет внутренние пустоты, образовавшиеся вследствие химической усадки, и, тем самым, приводит к внешним объемным изменениям. Однако, после затвердевания цементного материала и образовании твердого скелета продуктов гидратации, наблюдаемые макроскопические объемные деформации всей цементной системы явно меньше, чем изменения внутреннего объема материала.

На сегодняшний день существует несколько предположений о механизме образования аутогенной усадки. Первый объясняет процесс с позиции действия процесса гидратации, в результате которого, под влиянием химической усадки, которая с увеличением степени гидратации цемента увеличивается, происходит увеличение пористости цементного камня. При образовании пор в системе возникает вакуум, под действием которого, в зависимости от условий твердения, они

заполняются водой или воздухом, который в порах бетона имеет относительную влажность около 98 % [90]. Это означает, что в течение всего процесса гидратации не происходит значительного «самовысыхания» и термодинамическое равновесие системы в большей степени не нарушается.

В высокопрочном бетоне количество воды недостаточно для достижения полной гидратации цемента из-за низкого водоцементного отношения ($В/Ц$ ниже 0,4). Этот дефицит свободной воды приводит к значительному снижению относительной влажности в пористой системе. Отсюда следует, что деформации обусловлены образованием менисков внутри цементной системы на границе раздела жидкость–пар вследствие потребления воды в период гидратации [102]. В результате этого явления, сжимающие напряжения одновременно развиваются в твердом каркасе цементной системы, для восстановления равновесия за счет компенсации растягивающих напряжений в жидкой фазе. Это приводит к уменьшению объема всей системы, т. е. к аутогенной усадке.

Так же известен второй механизм, при котором движущей силой является уменьшение расклинивающего давления между частицами геля C-S-H. Красильников К.Г. с соавторами [103] сообщает, о том, что в фазе C-S-H катионы Ca^{2+} являются главными центрами адсорбции для молекул воды, а непрерывный рост усадки цементного камня с уменьшением его влажности – это результат сжатия и сближения слоев C-S-H. Сжатие слоистых кристаллов C-S-H объясняется сокращением длины межслоевых связей O-Ca-O вследствие десорбции молекул воды с межслоевых катионов Ca^{2+} , а также ухода молекул воды из координационных сфер поверхностных катионов Ca^{2+} .

На сегодняшний день неизвестно, насколько первый или второй механизм доминирует в процессе аутогенной усадки. К сожалению, до настоящего времени глубоким изучением вопросом аутогенной усадки занимались эпизодически, вследствие этого, вопрос требует серьезного изучения.

Аутогенная усадка относительно мала по сравнению с усадкой при высыхании обычного бетона. В основном по причинам того, что для придания

необходимой удобоукладываемости обычного бетона используется больше воды, чем требуется для полной гидратации цемента.

1.4.5 Усадка при высыхании

Усадка при высыхании – макроскопическое уменьшение размеров затвердевшего бетона в результате испарения воды или потери влаги во внешнюю среду. Ключевую роль этот процесс играет для бетонов с высоким отношением В/Ц, так как они содержат большее количество несвязанной воды [98].

Свободная влага в цементном камне, находящегося в воздушной среде, уже при давлениях пара, незначительно отличающихся от насыщенного, стремится диффундировать в атмосферу из крупных пор и макрокапилляров для того, чтобы установилось равновесие внутри бетона и относительной влажностью снаружи. Удаление этой воды не сопровождается объемными изменениями цементного камня. Деформации возникают лишь тогда, когда вода начинает испаряться из микропор и капилляров, тогда капиллярные силы становятся ощутимыми. Происходит это в среде с относительной влажностью в пределах от 40 до 98 %, что соответствует обычным условиям службы бетонных и железобетонных сооружений. С появлением капиллярных сил скелет цементного камня оказывается в состоянии всестороннего сжатия и начинает деформироваться. При относительных влажностях среды, приближающихся к 35 %, капиллярные силы постепенно сводятся к нулю. Однако деформированное состояние сохраняется и дальнейшее понижение влажности сопровождается резким повышением скорости усадки цементного камня в результате испарения межкристаллической (адсорбционно-связанной) воды из межслоевых промежутков кристаллических фаз C-S-H и моносульфогидрата [104].

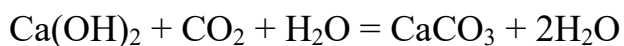
При этом цементный камень в значительной степени деформируется необратимо, что обусловлено: во-первых, образованием и развитием всякого рода разрывов и микротрещин; во-вторых, возникновением и развитием сил межмолекулярного (когезионного) взаимодействия между поверхностями твердых частиц. Немалую роль играет возникновение между кристалликами новых, а также усиление

существующих, контактов срастания – кристаллизационных контактов. Тем более, что при высушивании цементного камня создаются благоприятные условия для возникновения и усиления таких контактов [105].

1.4.6 Усадка при карбонизации

Кроме усадки при высыхании, бетон подвергается усадке при карбонизации. Это явление было обнаружено относительно недавно и, в большинстве имеющихся экспериментальных данных, величина усадки при высыхании включает в себя и усадку при карбонизации бетона. Однако природа усадки при карбонизации и высыхании совершенно различна.

Углекислый газ CO_2 , имеющийся в атмосфере даже при малых концентрациях, вступает во взаимодействие с продуктами гидратации клинкерных минералов. Степень карбонизации увеличивается, с увеличением концентрации CO_2 в воздухе.



Степень карбонизации также зависит от влажности бетона и относительной влажности окружающей среды. Процесс карбонизации сильно уменьшается при относительной влажности менее 50 %. Это связано с тем, что влага, образующаяся в результате взаимодействия $\text{Ca}(\text{OH})_2$ с CO_2 , стремится диффундировать в атмосферу, с тем чтобы установилось равновесие внутри бетона. Если диффузия протекает медленно, то давление пара в бетоне увеличивается до состояния насыщения и проникание CO_2 в образец приостанавливается [106, 107].

Карбонизация сопровождается увеличением массы и усадкой бетона, которая при карбонизации вызывается растворением кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$ под действием сжимающих напряжений (вызванных действием усадки при высыхании) и отложением CaCO_3 .

Одновременное высыхание и карбонизация приводят к меньшей усадке, чем в случае, когда карбонизация происходит после высыхания, так как в первом случае большая часть процесса карбонизации идет при относительной влажности

больше 50 %, поэтому в таких условиях усадка при карбонизации бетона автоклавного твердения очень мала [108].

Карбонизация бетона приводит также к увеличению его прочности и снижению проницаемости вследствие того, что вода, выделяющаяся при карбонизации, способствует гидратации, а CaCO_3 уплотняет цементный камень [109].

1.5 Выводы

1. В последние годы, с учетом нового периода в развитии общества и технического прогресса, бетоноведение претерпевает колоссальные изменения. За счет слияния различных научных направлений, происходит появление новых областей исследований, направленных на решения конкретных задач. Особое внимание уделяется созданию комфортной среды обитания человека за счет использования достижений архитектурного материаловедения, направленных на изменение архитектуры и дизайна городской агломерации, колористики окружающей среды, снижения шумовой агрессии и прочего. Наблюдается переход от использования массивного железобетона к более легким тонкостенным бетонным композитам, армированным неметаллическими материалами, расширяющих возможности применения бетона при строительстве объектов сложной конфигурации с повышенной архитектурно-художественной выразительностью и безопасностью.

2. Для реализации задач по созданию благоприятных условий для жизнедеятельности человека перспективным является текстиль-бетон, который характеризуется своей легкостью и высокой несущей способностью. Композит уже с успехом применяется в современной архитектуре в качестве универсального материала для создания нового облика городов, посредством строительства объектов сложной конфигурации с повышенной архитектурной выразительностью, создания малых архитектурных форм, садово-парковой мебели, сэндвич-панелей и фасадных плит, использования в качестве основного композиционного материала для выполнения работ по усилению и реконструкции зданий и сооружений из бетона.

3. Повышение эффективности текстиль-бетона возможно за счет: разработки высококачественной бетонной основы, учета свойств и характеристик текстильных армирующих материалов, повышения сцепления текстильных сеток с бетоном, обеспечения условий формирования текстиль-бетона за счет внешнего и внутреннего ухода, оптимизации этапов производства композита и применения, вычислительных программы, программ моделирования и других компьютерных технологий.

4. Расширены представления об усадочных явлениях в цементных системах. Установлено, что резкое увеличение деформаций приходится на период затвердевания цементной матрицы в промежутке времени примерно с 4 до 10 часов. Эти деформации вызваны пластической усадкой еще незатвердевшей смеси вследствие быстрого испарения влаги с поверхности бетона, что приводит к нарушению структуры и образованию трещин, а в случае с тонкостенными изделиями из бетона, к их полному разрушению. Дальнейший рост усадочных деформаций в основном вызван контракцией цементной основы, обусловленной химической и аутогенной усадками, вследствие уменьшения объема продуктов гидратации и последующей усадкой при высыхании и карбонизации. На основании приобретенных теоретических знаний, полученных в ходе проведения литературного обзора, предложена общая модель усадочных деформаций.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Экспериментальные исследования проводились в лабораториях кафедры «Строительного материаловедения, изделий и конструкций» и Центра высоких технологий БГТУ им. В.Г. Шухова, а также Института строительных материалов Технического университета Дрездена (Германия). В работе использовались различные методы исследований, выбор принимался в зависимости от поставленных целей.

2.1 Методы исследований и оборудование

Определение усадочных характеристик цементного теста и текстиль-бетона в ранние сроки твердения выполнялось на специально собранной установке по определению пластической усадки цементных систем, расположенной внутри климатической камеры в лаборатории Института строительных материалов Технического университета Дрездена (рисунок 2.1).

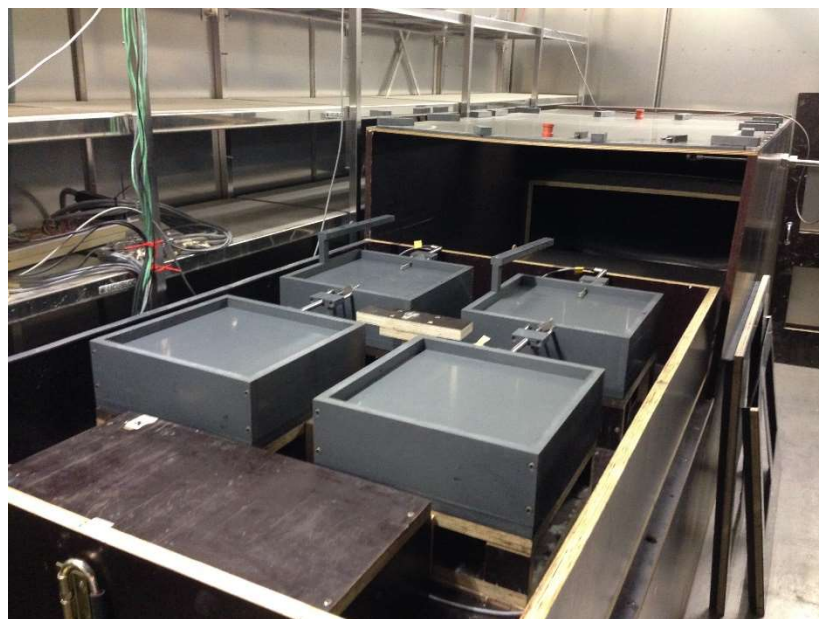


Рисунок 2.1 – Внешний вид установки для определения пластической усадки цементных систем внутри климатической камеры

Экспериментальная установка состоит из четырех пластиковых форм-опалубок с внутренними размерами 300×300×20 мм и оснащена специальными датчиками, необходимыми для выявления физических величин, влияющих на цементную систему в период испытаний. За счет сборной конструкции форм-опалубок, возможно изменение толщины исследуемых образцов. Установка позволяет проводить исследования в задаваемых режимах работы климатической камеры, за счет изменения факторов окружающей среды (температуры и влажности воздуха, скорости ветра) и регистрировать параметры: вертикальные и горизонтальные деформации, капиллярное давление в цементных систем. Для получения более точных результатов, предусмотрено проведение исследований на нескольких образцах одновременно.

Схема расположения исследуемых образцов и позиции измерительных датчиков приведены на рисунке 2.2.

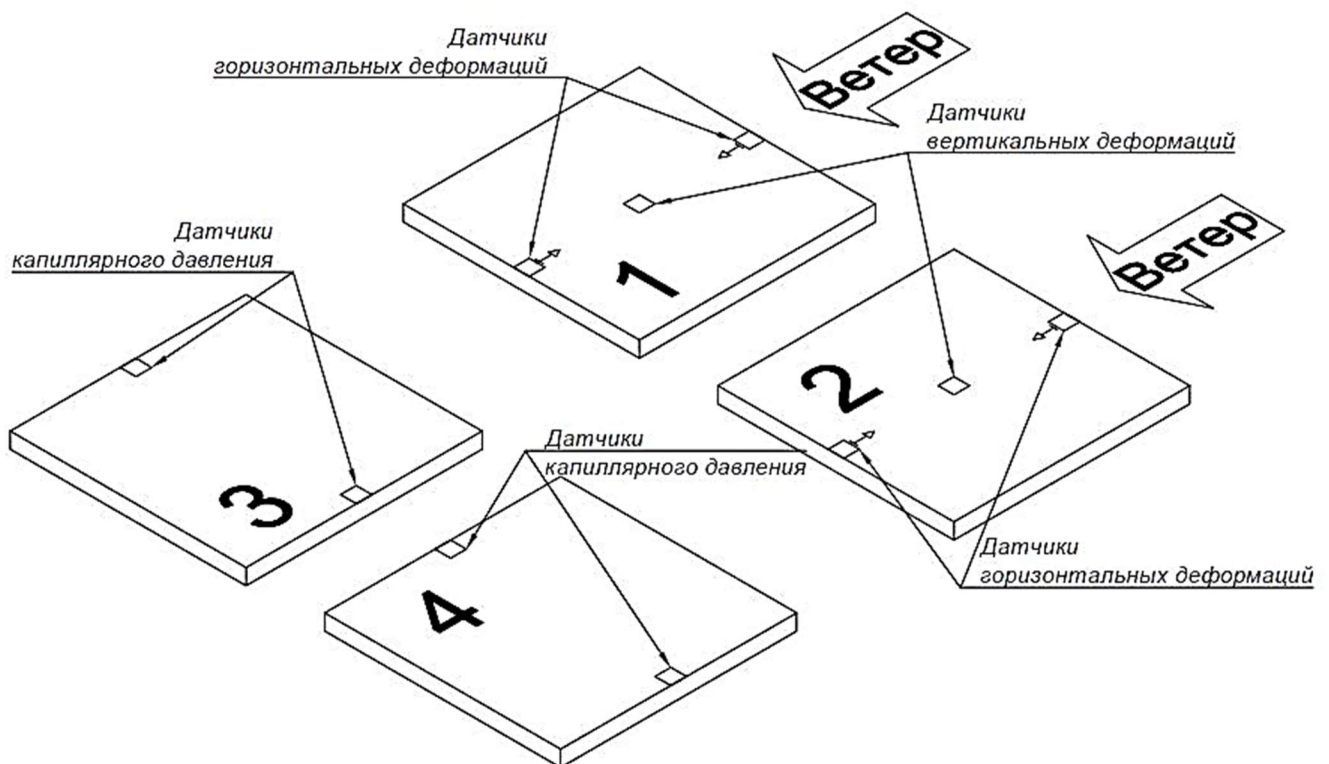


Рисунок 2.2 – Схема расположения исследуемых образцов и позиции измерительных датчиков в экспериментальной установке

Из представленных четырех экспериментальных форм, в формах «1» и «2» производятся измерения вертикальных и горизонтальных деформаций исследуемы образцов (рисунок 2.3), в формах «3» и «4» – измерения роста капиллярного давления (рисунок 2.4). Пары форм «1» и «2», а также «3» и «4» оснащены одинаковыми датчиками и подключены к одному записывающему устройству. Это позволяет проводить измерения в параллельном режиме. Период между двумя последовательными измерениями для каждого датчика составляет 60 секунд.

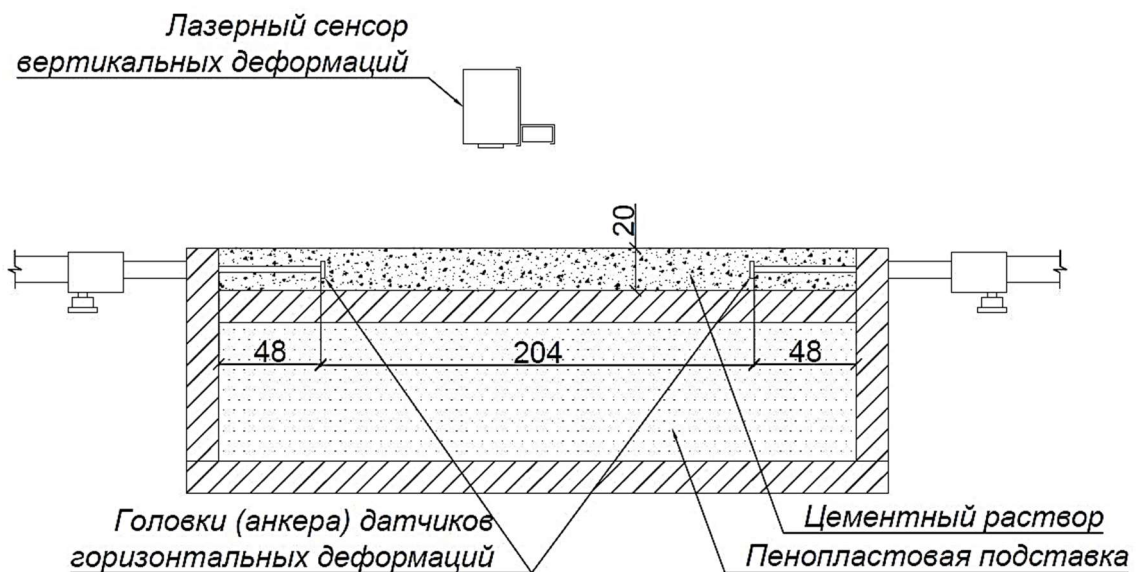


Рисунок 2.3 – Схема расположения датчиков в формах «1» и «2»

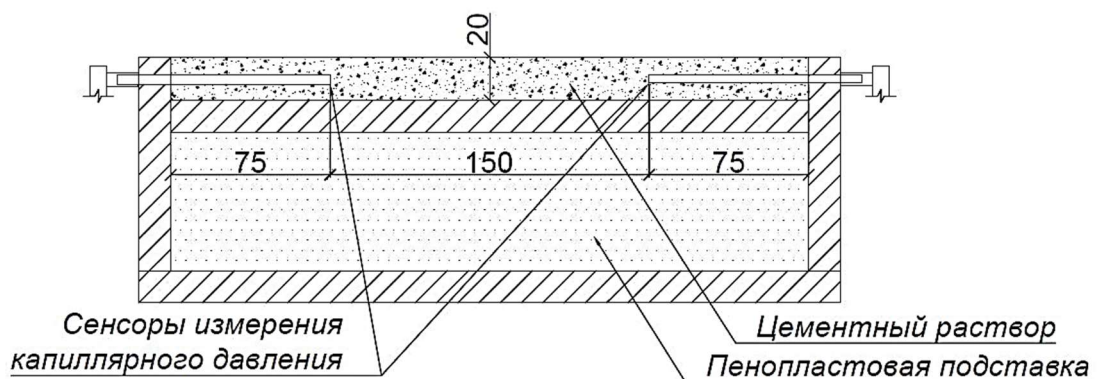


Рисунок 2.4 – Схема расположения датчиков в формах «3» и «4»

Оборудование климатической камеры автоматически поддерживает необходимые условия с относительной точностью (температуры и влажности воздуха).

Мощный промышленный вентилятор, с переключателем скоростей вращения лопастей, внутри камеры, имитирует ветер на поверхности исследуемых образцов.

Расчет высокоплотных зерновых составов. Для обеспечения максимальной прочности и плотности структуры, проектирование составов текстиль-бетонов производилось расчетно-экспериментальным способом с применением методики расчета высокоплотных зерновых составов, разработанной профессором А.Н. Хархардиным [110]. Методика заключается в установлении оптимального зернового состава между заполнителем и наполнителями разной фракции, и подразумевает расчет необходимого количества наполнителя с учетом его физических характеристик и заполняемости заполнителя.

Чтобы выбрать оптимальную методику расчета составов с учетом всевозможных факторов, влияющих на значение плотности упаковки дисперсной системы, производилось сравнение значений выходного параметра, установленных по предлагаемым теоретическому, экспериментальному и экспериментально-теоретическому расчетам дисперсной системы – кварцевый песок, зола-уноса, микрокремнезем.

Характеристики дисперсных материалов, используемых для проведения расчетов, представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Характеристики используемых материалов

Наименование	Параметры			
	Ист.плот., г/см ³	Нас.плот., г/см ³	Уд.пов., см ² /г	Среднемассовый размер частиц D _[4,3] , мкм
Песок кварцевый	2,63	1,50	Мк = 2,94	1 020
Зола-уноса	2,0	0,84	2 951	38,5
Микрокремнезем	1,69	0,21	53 405	3,3

Расчет плотной упаковки системы Песок – Зола – Микрокремнезем

$$\begin{aligned}
 1. \text{ Песок} \quad \eta_{\text{п}} &= \frac{\gamma_{\text{нас}}}{\rho_{\text{ист}}} = \frac{1,50 \text{ (г/см}^3\text{)}}{2,63 \text{ (г/см}^3\text{)}} = 0,57 \\
 2. \text{ Зола-уноса} \quad \eta_{\text{з}} &= \frac{\gamma_{\text{нас}}}{\rho_{\text{ист}}} = \frac{0,84 \text{ (г/см}^3\text{)}}{2 \text{ (г/см}^3\text{)}} = 0,42 \\
 3. \text{ Микрокремнезем} \quad \eta_{\text{мк}} &= \frac{\gamma_{\text{нас}}}{\rho_{\text{ист}}} = \frac{0,21 \text{ (г/см}^3\text{)}}{1,69 \text{ (г/см}^3\text{)}} = 0,12
 \end{aligned}$$

Теоретический расчет

$$1) \sigma_{\Pi} = \eta_{\Pi} = 0,57$$

$$2) \sigma_{\Pi+3} = \eta_{\Pi} + (1 - \eta_{\Pi}) \cdot \psi = 0,57 + (1 - 0,57) \cdot 0,524 = 0,80 \rightarrow$$

$$^2 \text{ где } \psi \text{ (при } \frac{d \text{ ср.з.}}{d \text{ ср.п.}} = \frac{38,5 \text{ (мкм)}}{1020 \text{ (мкм)}} = 0,037) = 0,524$$

$$3) \sigma_{\Pi+3+\text{МК}} = \eta_{\Pi+3} + (1 - \eta_{\Pi+3}) \cdot \psi = 0,8 + (1 - 0,8) \cdot 0,338 = 0,87 \rightarrow$$

$$\text{где } \psi \text{ (при } \frac{d \text{ ср.мк.}}{d \text{ ср.з.}} = \frac{3,3 \text{ (мкм)}}{38,5 \text{ (мкм)}} = 0,086) = 0,338$$

Экспериментальный расчет

Для определения наполняемости использовалась цилиндрическая форма, где $V_{\text{цил.}} = 63 \text{ см}^3$.

Компоненты в сухом состоянии

Масса песка, находящегося в хорошо уплотненном состоянии в цилиндрической форме, составляет – $m_{\Pi} = 108,81 \text{ (г)}$.

$$1) \sigma_{\Pi} = \frac{\gamma_{\text{нас}}}{\rho_{\text{ср}}} = \frac{1,73 \text{ (г/см}^3\text{)}}{2,63 \text{ (г/см}^3\text{)}} = 0,66 \rightarrow \gamma_{\text{н}} = \frac{m}{V} = \frac{108,81 \text{ (г)}}{63 \text{ (см}^3\text{)}} = 1,73 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{m_{\Pi} \cdot \rho_{\text{ист}}}{m_{\Pi}} = \frac{108,81 \text{ (г)} \cdot 2,63 \text{ (г/см}^3\text{)}}{108,81 \text{ (г)}} = 2,63 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

Необходимое для уплотнения количество золы:

$$m_3 = m_{\Pi} \cdot (1 - \eta_{\Pi}) \cdot \beta_2 \cdot \frac{\eta_{\text{зола}}}{\eta_{\Pi}} = 108,81 \text{ (г)} \cdot (1 - 0,66) \cdot 1 \cdot \frac{0,42}{0,658} = 23,61 \text{ (г)}$$

$\beta_2 = 1$ – для минимального содержания фракций

После уплотнения $m_{\Pi+3} = 121,03 \text{ (г)}$

$$2) \sigma_{\Pi+3} = \frac{\gamma_{\text{нас}}}{\rho_{\text{ср}}} = \frac{1,92 \text{ (г/см}^3\text{)}}{2,52 \text{ (г/см}^3\text{)}} = 0,76 \rightarrow \gamma_{\text{н}} = \frac{m}{V} = \frac{121,03 \text{ (г)}}{63 \text{ (см}^3\text{)}} = 1,92 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{m_{\Pi} \cdot \rho_{\text{ист}} + m_3 \cdot \rho_{\text{ист}}}{m_{\Pi+3}} = \frac{99,34 \text{ (г)} \cdot 2,63 \text{ (г/см}^3\text{)} + 21,69 \text{ (г)} \cdot 2 \text{ (г/см}^3\text{)}}{121,03 \text{ (г)}} = 2,52 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

где $m_{\Pi+3} = 121,03 \text{ (г)}$ содержит: $m_{\Pi} = 99,34 \text{ (г)}$, $m_3 = 21,69 \text{ (г)}$.

Необходимое для уплотнения количество микрокремнезема:

$$m_{\text{МК}} = m_{\Pi+3} \cdot (1 - \eta_{\text{смеси (П+З)}}) \cdot \beta_2 \cdot \frac{\eta_{\text{МК}}}{\eta_{\Pi+3}} = 121,03 \text{ (г)} \cdot (1 - 0,76) \cdot 1 \cdot \frac{0,12}{0,76} = 4,6 \text{ (г)}$$

² ψ – степень заполнения свободного объема в крупной фракции частицами мелкой. Определяется методом дифференцирования табличных значений в зависимости от класса системы и относительного размера мелкой фракции [110].

После уплотнения $m_{п+з+МК} = 116,85$ (г)

$$3) \sigma_{п+з+МК} = \frac{\gamma_{нас}}{\rho_{ср}} = \frac{1,88 \text{ (г/см}^3\text{)}}{2,51 \text{ (г/см}^3\text{)}} = 0,75 \rightarrow \gamma_n = \frac{m}{V} = \frac{118,39 \text{ (г)}}{63 \text{ (см}^3\text{)}} = 1,88 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

$$\rho_{ср} = \frac{m_{п} \cdot \rho_{ист} + m_{з} \cdot \rho_{ист} + m_{МК} \cdot \rho_{ист}}{m_{п+з+МК}} =$$

$$= \frac{98,19 \text{ (г)} \cdot 2,63 \text{ (г/см}^3\text{)} + 16,7 \text{ (г)} \cdot 2 \text{ (г/см}^3\text{)} + 3,5 \text{ (г)} \cdot 1,69 \text{ (г/см}^3\text{)}}{118,39 \text{ (г)}} = 2,51 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

Компоненты в увлажненном водой состоянии

Масса смеси песка и воды, находящейся в хорошо уплотненном состоянии в цилиндрической форме, составляет $m_{п+в} = 121,71$ (г),
где $m_v = 13,52$ (г) и $m_{п} = 108,19$ (г)

$$1) \sigma_{п+в} = \frac{\gamma_{нас}}{\rho_{ср}} = \frac{1,93 \text{ (г/см}^3\text{)}}{2,45 \text{ (г/см}^3\text{)}} = 0,79 \rightarrow \gamma_n = \frac{m}{V} = \frac{121,71 \text{ (г)}}{63 \text{ (см}^3\text{)}} = 1,93 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

$$\rho_{ср} = \frac{m_{п} \cdot \rho_{ист} + m_{в} \cdot \rho_{ист}}{m_{п+в}} = \frac{108,19 \text{ (г)} \cdot 2,63 \text{ (г/см}^3\text{)} + 13,52 \text{ (г)} \cdot 1 \text{ (г/см}^3\text{)}}{121,71 \text{ (г)}} = 2,45 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

Необходимое для уплотнения количество золы:

$$m_{золы} = m_{п+в} \cdot (1 - \eta_{п+в}) \cdot \beta_2 \cdot \frac{\eta_{золы}}{\eta_{п+в}} = 121,71 \text{ (г)} \cdot (1 - 0,79) \cdot 1 \cdot \frac{0,42}{0,79} = 13,59 \text{ (г)},$$

где $\beta_2 = 1$ – для минимального содержания фракций

После уплотнения $m_{п+з+в} = 129,89$ (г)

$$2) \sigma_{п+з+в} = \frac{\gamma_n}{\rho_{ср}} = \frac{2,06 \text{ (г/см}^3\text{)}}{2,40 \text{ (г/см}^3\text{)}} = 0,86 \rightarrow \gamma_n = \frac{m}{V} = \frac{129,89 \text{ (г)}}{63 \text{ (см}^3\text{)}} = 2,06 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

$$\rho_{ср} = \frac{m_{п} \cdot \rho_{ист} + m_{з} \cdot \rho_{ист} + m_{в} \cdot \rho_{ист}}{m_{п+з+в}} =$$

$$= \frac{103,38 \text{ (г)} \cdot 2,63 \text{ (г/см}^3\text{)} + 13,59 \text{ (г)} \cdot 2 \text{ (г/см}^3\text{)} + 12,92 \text{ (г)} \cdot 1 \text{ (г/см}^3\text{)}}{129,89 \text{ (г)}} = 2,40 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

где $m_{п+з} = 121,03$ (г) содержит: $m_{п} = 103,38$ (г), $m_{з} = 13,59$ (г), $m_{в} = 12,92$ (г).

Необходимое для уплотнения количество микрокремнезема:

$$m_{МК} = m_{п+з+в} \cdot (1 - \eta_{п+з+в}) \cdot \beta_2 \cdot \frac{\eta_{МК}}{\eta_{п+з+в}} = 129,89 \text{ (г)} \cdot (1 - 0,86) \cdot 1 \cdot \frac{0,12}{0,86} = 2,54 \text{ (г)}$$

После уплотнения $m_{п+з+МК+в} = 131,77$ (г)

$$3) \sigma_{п+з+МК+в} = \frac{\gamma_{нас}}{\rho_{ср}} = \frac{2,09 \text{ (г/см}^3\text{)}}{2,38 \text{ (г/см}^3\text{)}} = 0,88 \rightarrow \gamma_n = \frac{m}{V} = \frac{131,77 \text{ (г)}}{63 \text{ (см}^3\text{)}} = 2,09 \text{ (г/см}^3\text{)}$$

$$\rho_{\text{ср}} = \frac{m_{\text{п}} \cdot \rho_{\text{ист}} + m_{\text{з}} \cdot \rho_{\text{ист}} + m_{\text{мк}} \cdot \rho_{\text{ист}} + m_{\text{в}} \cdot \rho_{\text{ист}}}{m_{\text{п+з+мк+в}}} =$$

$$= \frac{102,79 (\text{г}) \cdot 2,63 (\text{г/см}^3) + 13,59 (\text{г}) \cdot 2 (\text{г/см}^3) + 2,54 (\text{г}) \cdot 1,69 (\text{г/см}^3) + 12,85 (\text{г}) \cdot 1 (\text{г/см}^3)}{131,77 (\text{г})} = 2,38 (\text{г/см}^3)$$

Экспериментально-теоретический расчет

Компоненты в сухом состоянии

Экспериментальное значение: $\eta_{\text{п}} = 0,66$

1) $\sigma_{\text{п}} = \eta_{\text{п}} = 0,66$

2) $\sigma_{\text{п+з}} = \eta_{\text{п}} + (1 - \eta_{\text{п}}) \cdot \psi = 0,66 + (1 - 0,66) \cdot 0,524 = 0,84 \rightarrow$

где ψ (при $\frac{d_{\text{ср.з.}}}{d_{\text{ср.п.}}} = \frac{38,5 (\text{мкм})}{1020 (\text{мкм})} = 0,037$) = 0,524

Экспериментальное значение: $\eta_{\text{смеси (п+з+в)}} = 0,76$

3) $\sigma_{\text{п+з+мк}} = \eta_{\text{п+з}} + (1 - \eta_{\text{п+з}}) \cdot \psi = 0,76 + (1 - 0,76) \cdot 0,338 = 0,84 \rightarrow$

где ψ (при $\frac{d_{\text{ср.мк.}}}{d_{\text{ср.з.}}} = \frac{3,3 (\text{мкм})}{38,5 (\text{мкм})} = 0,086$) = 0,338

Компоненты в увлажненном водой состоянии

Экспериментальное значение: $\eta_{\text{п+в}} = 0,79$

1) $\sigma_{\text{п+в}} = \eta_{\text{п+в}} = 0,79$

2) $\sigma_{\text{п+з+в}} = \eta_{\text{п+в}} + (1 - \eta_{\text{п+в}}) \cdot \psi = 0,79 + (1 - 0,79) \cdot 0,524 = 0,90 \rightarrow$

где ψ (при $\frac{d_{\text{ср.з.}}}{d_{\text{ср.п.}}} = \frac{38,5 (\text{мкм})}{1020 (\text{мкм})} = 0,037$) = 0,524

Экспериментальное значение: $\eta_{\text{п+з+в}} = 0,86$

3) $\sigma_{\text{п+з+мк+в}} = \eta_{\text{п+з+в}} + (1 - \eta_{\text{п+з+в}}) \cdot \psi = 0,86 + (1 - 0,86) \cdot 0,338 = 0,91 \rightarrow$

где ψ (при $\frac{d_{\text{ср.мк.}}}{d_{\text{ср.з.}}} = \frac{3,3 (\text{мкм})}{38,5 (\text{мкм})} = 0,086$) = 0,338

Результаты расчетов плотной упаковки трехкомпонентной системы представлены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Результаты расчета плотности упаковки

Плотность упаковки	Теоретический	Экспериментальный		Экспериментально-теоретический	
		в сухом состоянии	в увлажненном состоянии	в сухом состоянии	в увлажненном состоянии
σ_1	0,57	0,66	0,79	0,66	0,79
σ_2	0,80	0,76	0,86	0,84	0,90
σ_3	0,87	0,75	0,88	0,84	0,91

Теоретический расчет предполагает использование основных размерных физических величин дисперсных материалов и теоретических коэффициентов степеней заполнения для установления оптимального зернового состава. Это позволяет спрогнозировать, будет ли предлагаемый наполнитель способствовать уплотнению структуры дисперсной системы или приведет к разуплотнению, но не дает фактических значений состояния системы. Экспериментальный расчет позволяет установить фактические значения плотности упаковки дисперсной системы, эффект заполнения от вводимого наполнителя, а также, выявить влияние влажности вводимых наполнителей на значение выходного параметра. Экспериментально-теоретический расчет с использованием значений плотностей упаковки, установленных экспериментально, и величин степеней заполнения, установленных теоретически, также не дает фактических значений состояния системы, но способствует прогнозированию заполняемости дисперсной системы.

При вводе микрокремнезема в дисперсную систему, находящуюся в сухом состоянии, наблюдаем снижение значения плотности упаковки. Это объясняется сложностью уплотнения данным наполнителем, так как он имеет очень низкое значение насыпной плотности.

В увлажненном состоянии компонентов, уплотняемая система имеет большее значение плотности упаковки, чем значение дисперсных систем в сухом состоянии. В результате увлажнения изменяется состояние поверхности дисперсных фаз, а именно, поверхностного натяжения частиц, в результате чего, при уплотнении дисперсной системы, соприкосновение частиц друг с другом приводит к скольжению, что способствует лучшему уплотнению и заполнению пространства между крупными и мелкими компонентами.

С учетом анализа полученных результатов, в дальнейшем использовался экспериментальный расчет для определения плотности упаковки дисперсной системы и вычисления необходимого количества уплотняющего наполнителя.

Важным при формировании плотной упаковки дисперсной системы является последовательность введения наполнителей. Переход от большего значения

размера частиц к меньшему, позволяет последовательно формировать структуру, сокращая объем пустого пространства между частицами и равномерно заполнять его.

Следующим этапом изучения данной методики являлось установление влияния увлажнения дисперсной системы на плотность упаковки и соотношение в ней компонентов. Значения плотностей упаковки, полученных с применением экспериментального расчета, представлены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения плотностей упаковки с учетом влияния различных сред

№	Среда	Последовательность введения наполнителей*	Плотность упаковки	Содержание компонентов, % (п – з – мк) ³
1	воздух	п	0,654	78,99 – 17,55 – 3,46
		п+з	0,766	
		п+з+мк	0,754	
2	вода	п	0,788	87,03 – 10,73 – 2,24
		п+з	0,854	
		п+з+мк	0,872	
3	раствор	п	0,796	87,09 – 10,83 – 2,08
		п+з	0,865	
		п+з+мк	0,881	

Увлажнение дисперсной системы приводит к повышению заполняемости, в результате скольжения поверхности компонентов. Уже на стадии формирования упаковки крупным наполнителем, увлажненного водой, наблюдается повышение плотности на 20 %. В результате последовательного введения наполнителей, плотность упаковки системы «песок-зола-микрокремнезем» повышается на 15 %. При этом меняется соотношение компонентов системы в сторону увеличения содержания крупного наполнителя. Так количество песка увеличилось примерно на 10 %, а содержание золы-уноса и микрокремнезема уменьшилось на 39 и 35 % соответственно.

³ п – песок, з – зола, мк – микрокремнезем

Использование пластификатора также способствует повышению значения плотности упаковки дисперсной системы. На стадии формирования упаковки крупным заполнителем, увлажненного раствором воды и пластификатора, наблюдается повышение плотности почти на 22 % в сравнении с сухими компонентами. Дальнейшее последовательное введение наполнителей приводит к повышению плотности упаковки почти на 17 %. Однако ввиду того, что действие пластификаторов обусловлено электростатическим и стерическим взаимодействием с цементом, эффективность применения в системе инертных компонентов не столь велика. Значение плотности упаковки системы «песок-зола-микрокремнезем» в увлажненном раствором воды и пластификатора состоянии на 1 % превышает значение плотности упаковки системы увлажненной водой.

Таким образом, путем сравнения результатов полученных с применением методик расчета высокоплотных дисперсных систем, установлен наиболее подходящий способ вычисления фактических значений плотности упаковки дисперсной системы, позволяющий определить необходимое количество вводимого наполнителя мелкой фракции с учетом его физических характеристик. Выявлена влияние влажности дисперсной системы на значение плотности упаковки при последовательном введении наполняющих компонентов. Установлено, что увлажнение приводит к увеличению содержания крупного заполнителя и суммарному сокращению мелких наполнителей.

Таким образом, для эффективного применения расчетно-экспериментальной методики высокоплотных зерновых составов, рекомендуется использовать экспериментальный расчет, позволяющий установить фактическое значение плотности упаковки с учетом влажности дисперсной системы и вычислить необходимое количество вводимого наполнителя.

Выявление динамики тепловыделения. Для установления характера влияния компонентов композиционного вяжущего и суперабсорбирующих полимеров, процесс гидратации изучался с точки зрения динамики тепловыделения выраженной зависимостью $dQ/dt=f(t)$ и общего количества выделившегося тепла,

описывающегося функцией $Q=f(t)$, в течение 72 часов, с использованием дифференциального калориметра (рисунок 2.5).



Рисунок 2.5 – Дифференциальный калориметр ToniCAL

Прибор ToniCAL представляет собой дифференциальный калориметр теплового потока для оценки характеристик схватывания гидравлических связующих строительных материалов.

С помощью ПК с программным обеспечением, прибор в режиме онлайн напрямую определяет количество выделяющегося тепла (Дж/г) в зависимости от времени.

Определение значения pH водных вытяжек проб цементного камня.
Подготовлены пробы цементного камня измельчали в фарфоровой ступке таким образом, чтобы порошок проходил через сито с ячейками 0,20 мм без остатка. Из порошка готовили водную вытяжку объемом не менее 20 мл, обогащая измельченный цементный камень дистиллированной водой при отношении по массе равном 1:4. При этом использовали дистиллированную воду со значением $pH = 6,15$ при удельной проводимости $\lambda = \pm 5 \mu S$, измеренной при частоте 50 Hz и температуре 22,5 °C.

Приготовленную бетонную суспензию выдерживали сутки при температуре 22 ± 3 °C периодически тщательно перемешиваясь в течение двух минут. Пробы хранились в закрытых сосудах во избежание карбонизации. Водные вытяжки

отстаивались и фильтровались непосредственно перед испытанием через бумажный фильтр средней плотности.

Измерения производились с использованием рН-метра рН-150 МИ.

Гранулометрия вяжущих систем и используемого сырья проводилась с использованием лазерного анализатора размеров частиц ANALYSETTE 22 NanoTec plus (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 – Лазерный анализатор размеров частиц
ANALYSETTE 22 NanoTec plus

Данный прибор проводит полностью автоматический анализ с наглядным отображением результатов на экране. Для получения максимальной точности результатов, возможны повторные измерения с настройкой длительности диспергирования ультразвуком, числа измерений и временных интервалов. В качестве растворителя используется дистиллированная вода, измерения проводятся диапазоне от 0,01 до 2000 мкм, технология с использованием трех лазеров для прямого и обратного рассеяния, особенно высокая точность измерения за счет анализа 165 каналов.

Определение пуццолановой активности минеральных добавок проводилось по традиционной методике по поглощению добавкой извести из известкового раствора. Методика проведения эксперимента заключалась в следующем: 2 г добавки (навеска добавки высушенная при 105 °С и измельченная в керамической ступке до удельной поверхности $\approx 550 \text{ м}^2/\text{кг}$) переносили в градуированный цилиндр (емкостью 100 см³), в который затем добавляли 100 мл насыщенного

раствора извести (с концентрацией CaO 1,05-1,15 г/л) и содержимое энергично взбалтывали. Через двое суток из цилиндра для титрования отбирали 50 мл раствора. Титровали 0,05 N HCl с индикатором метилоранж. Титрования проводили каждые два дня. После титрования в цилиндр добавляли раствор извести (50 мл).

Активность минеральных добавок определялось количеством оксида кальция, которое поглощает 1 г добавки за 30 суток по формуле:

$$\text{CaO} = 768 \cdot A \cdot T / B, \quad (2.1)$$

где A – количество соляной кислоты, израсходованной на титрование в мл; T – титр соляной кислоты (содержание HCl в г/мл); B – количество отобранного из колбы раствора в мл.

Однако эксперимент проводился до тех пор, пока количество гидроксида кальция, поглощенное добавкой, не перестало изменяться.

Консистенция бетонной смеси, используемой в приготовлении текстиль-бетона методом ламинирования, определялась по EN 1015-03:2007 при помощи вибрационного столика и кольца.

Для бетонных смесей, используемых в приготовлении текстиль-бетона по методу литья, в условиях густого армирования текстильной сеткой, определялось значение формуемости, на приборе показанном на рисунке 2.7.

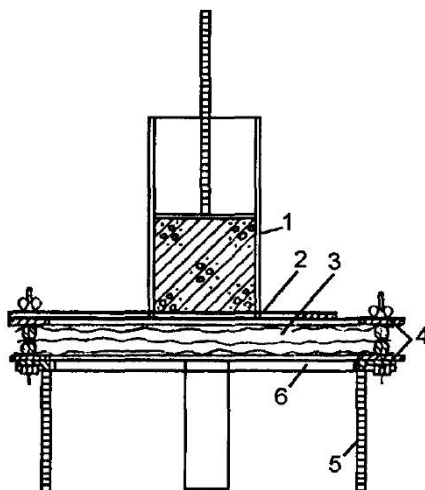


Рисунок 2.7 – Прибор для определения формуемости:

- 1 – стальной цилиндр, 2 – задвижка, 3 – армирующая сетка, 4 – фиксирующие рамки, 5 – захваты для крепления прибора к стандартной форме 15×15×15 см,
6 – пластинка из оргстекла

Для определения формуемости прибор закрепляется с помощью лапок на обычной форме размером $15 \times 15 \times 15$ см, установленной на вибростоле. В металлический цилиндр помещается навеска бетонной смеси массой 300 г, которая позволяет определить формуемость на проход и по расплыву при различном армировании. Поместив смесь, закрывается нижнее отверстие цилиндра. После этого задвижка вынимается и включается вибратор. Отрезок времени, необходимый для вытекания навески бетонной смеси из цилиндра, соответствует моменту, когда уровень смеси выравнивается с нижним краем цилиндра, определяет формуемость.

Определение пористости (воздухосодержания) бетонной смеси использовалось для установления эффективности применяемой расчетно-экспериментальной методики проектирования высокоплотных зерновых составов, используемой для приготовления текстиль-бетона, и проводилось по ГОСТ 10181-2014 с применением поромера КП-133 (объем чаши 2 л) (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 – Поромер КП-133

Методика заключается в расчетно-экспериментальном определении объема вовлеченного воздуха уплотненных бетонных смесей на плотных заполнителях.

Определение физико-механических характеристик образцов цементного камня проводилось согласно европейским нормам контроля по EN 169-1-2005, а мелкозернистого бетона, используемого для приготовления текстиль-бетона, по ГОСТ 10180-2012.

Химический состав проб используемого сырья (цементов, отходов ММС и минеральных наполнителей) проводился с использованием рентгенофлуоресцентного спектрометра серии ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции.

В одном приборе методом рентгеновской флуоресценции (XRF) можно определить элементный состав проб, и методом рентгеновской дифракции (XRD) – фазовый состав проб. ARL9900 может определять до 83 элементов (от В до U, №5 – № 92 в периодической таблице) от уровня ppm до 100 %.

По методике химического анализа отложений, при пересчете химического состава материала на прокаленное вещество, определялось содержание основных оксидов в пробе опоковидного мергеля.

Микрофотосъемка используемого сырья, изучение структуры проб цементного камня и мелкозернистого бетона, а также **энерго-дисперсионная рентгеновская спектроскопия** производились на растровом сканирующем электронном микроскопе высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU.

2.2 Применяемые материалы

В работе использовались следующие материалы:

1. Вяжущие: портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н, от производителя ОАО «Верхнебаканский цементный завод» и портландцемент СЕМ 42,5 N от производителя Lafarge Zementwerke GmbH (Австрия);
2. Заполнитель: кварцевый песок Подгоренского месторождения Воронежской области;
3. Наполнители: зола-уноса Новотроицкой ТЭС и микрокремнезем МК-85 от поставщика ООО «СтроКорпорация 74»;
4. Минеральные добавки: отходы мокрой магнитной сепарации (ММС) железистых кварцитов Лебединского горно-обогатительного комбината и опоковидный мергель Хворостянского месторождения Белгородской области;

5. Пластифицирующие добавки: Glenium 51, от производителя BASF, и Реопласт ЛС 01, от ООО «Реопласт»;
6. Суперабсорбирующие полимеры марки Floset двух модификаций: В3 и 129 ХВ4N;
7. Армирующая текстильная сетка из щелочестойкого AR-стекла;
8. Стекловолокно (ровинги).

Вяжущие. Для разработки композиционных вяжущих и составов текстиль-бетона, использовался портландцемент без минеральных добавок нормального твердения марки ЦЕМ I 42,5Н (ГОСТ 30515-2013, ГОСТ 31108-2016) от производителя ОАО «Верхнебаканский цементный завод», г. Новороссийск.

В исследованиях по изучению пластической усадки цементного камня применялся портландцемент без минеральных добавок нормального твердения марки СЕМ 42,5 N от производителя Lafarge Zementwerke GmbH (Австрия).

Характеристика используемых цемента приведены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 – Химический состав цемента

Производитель	Компонент, %								
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	прочее
ОАО «Верхнебаканский цементный завод»	62,53	21,77	4,88	4,02	3,52	1,22	0,87	0,33	0,86
Lafarge Zementwerke GmbH	62,3	20,4	4,9	3,1	2,8	4,2	0,5	0,1	1,7

Таблица 2.5 – Минералогический состав клинкера (из документов о качестве)

Производитель	Компонент, %			
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
ОАО «Верхнебаканский цементный завод»	62,0	15,0	4,1	15,0
Lafarge Zementwerke GmbH	69,6	8,7	4,6	12,2

Заполнитель. В рамках диссертационной работы использовался фракционированный обогащённый кварцевый песок двух фракций, Подгоренского месторождения Воронежской области, соответствующий ГОСТ 8736-93, ГОСТ 8735-88. Характеристики песков приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Характеристика песков

Группа песка	Модуль крупности	Частные остатки на ситах, % по массе					Проход через сито с сеткой 0,14, % по массе
		2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Крупный	2,9	0	0,1	94,8	4,4	0,7	0
Мелкий	1,7	0	0	4,3	62,1	32,8	0,8

Вычисления связанные с подбором методики расчета высокоплотных дисперсных систем, обеспечивающей наиболее подходящий способ вычисления фактических значений плотности упаковки дисперсной системы и позволяющий определить необходимое количество вводимого наполнителя мелкой фракции с учетом его физических характеристик, осуществлялись с применением песка модуля крупности 2,9. Это было обусловлено большей разницей среднего размера частиц с используемыми наполнителями, что позволяет демонстрировать лучшую наглядность эффекта уплотнения, чем на песке меньшего модуля крупности.

Песок модуля крупности 1,7 использовался для приготовления текстиль-бетонов по двум технологиям, так как меньший размер заполнителя позволяет достичь лучшее сочетание реологических и физико-механических характеристик конечного композита.

Наполнители. Основной целью использования в работе минеральных наполнителей является уплотнение структуры текстиль-бетона. Исходя из этого выбор пал на следующие материалы.

Зола-уноса. Ранее при использовании золы-уноса уже отмечалось уплотнение бетона, что приводило к повышению водонепроницаемости и морозостойкости изделий [111].

Исходя из области применения, применялась зола-уноса Новотроицкой ТЭС типа К (кислая) II-го вида, соответствующая качественным показателям – для

бетонных конструкций и изделий из тяжелого и легкого бетонов, строительных раствором, согласно ГОСТ 25818-91 (таблица 2.7). Использование в мелкозернистых бетонах зол-уноса типа О (основная), с высоким содержанием кальция, по истечению 1,5 года при нормальных условиях твердения, было выявлено ряд негативных влияний на долговечность готовых изделий [112].

Таблица 2.7 – Химический состав золы-уноса, %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	CaO	TiO ₂	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	прочее
55,10	28,87	5,40	3,10	2,27	2,17	1,20	0,91	0,45	0,05	0,48

Также, одной из целей использования золы-уноса являлось улучшение реологических свойств смеси текстиль-бетона, что имеет важное значение с учетом особенностей приготовления композита. Основные физические характеристики представлены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Физические характеристики золы-уноса

Истинная плотность, г/см ³	Насыпная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, см ² /г	Среднемассовый размер частиц D[4,3], мкм
2,0	0,84	2 950	38,5

Форма частиц золы-уноса шероховатая, с большим количеством мелких впадин (рисунок 2.9).

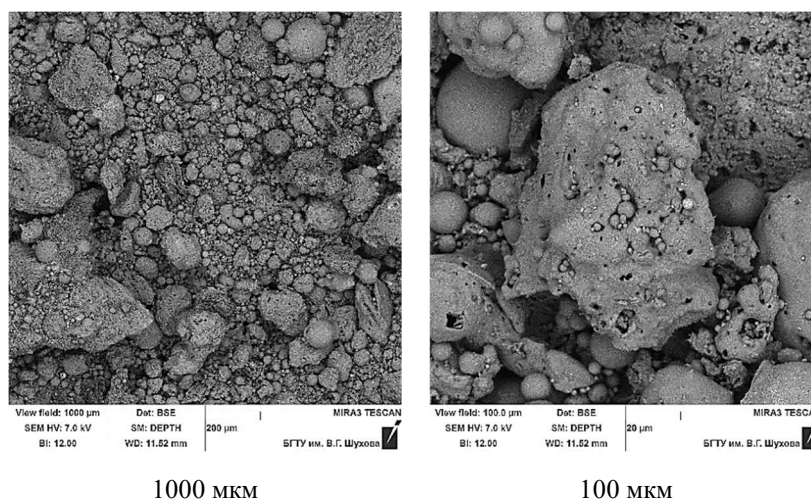


Рисунок 2.9 – Внешний вид частичек золы-уноса

Использовался **микрокремнезем** конденсированный МК-85 (согласно ТУ 5743-048-02495332-96), от поставщика ООО «СтроКорпорация74», который представляет из себя тонкодисперсный порошок, отход производства ферросплавов и кристаллического кремния (таблица 2.9, 2.10).

Таблица 2.9 – Химический состав микрокремнезема, %

SiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	прочее
88,09	3,60	2,07	1,30	1,03	0,96	0,81	0,46	0,43	1,25

Таблица 2.10 – Физические характеристики микрокремнезема

Истинная плотность, г/см ³	Насыпная плотность, г/см ³	Удельная поверхность, см ² /г	Среднемассовый размер частиц D[4,3], мкм
1,69	0,21	53 405	3,3

Сферическая форма тонкодисперсных частиц микрокремнезема (рисунок 2.10) проявляется уже на стадии приготовления бетонной смеси, изменяя ее реологические характеристики, а затем – на стадии уплотнения свежееуложенного бетона и формирования начальной структуры цементного камня.

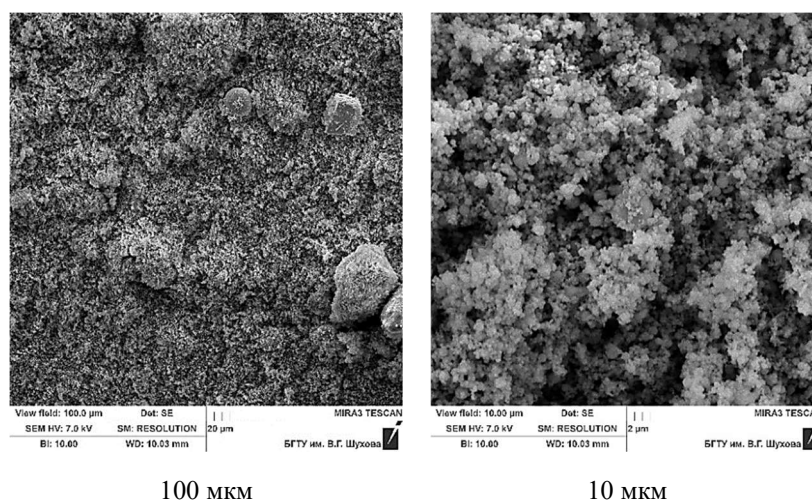


Рисунок 2.10 – Внешний вид частичек микрокремнезема

Доказано, что введение микрокремнезема в бетон, в сочетании с пластифицирующими добавками, позволяет улучшить удобоукладываемость, за счет замены некоторого количества воды между флокулированными цементными зернами

легкими частицами микрокремнезема. Высокодисперсные сферические частицы заполняют пустоты между более грубыми цементными частицами, тем самым позволяют достичь уплотнения цементной пасты [113].

Минеральные добавки. *Отходы мокрой магнитной сепарации* представляют собой подготовленный природно-техногенными процессами кремнеземсодержащий компонент с высокой свободной внутренней энергией, состоящий из кварца (от 67 до 70 %), железистых карбонатов (от 6 до 13 %), силикатов (от 9 до 12 %), гематита (от 6 до 11 %) и магнетита (от 2 до 6 %) (таблица 2.11).

Таблица 2.11 – Химический состав отходов ММС Лебединского ГОКа, %

SiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	CO ₂	MgO	CaO	Al ₂ O ₃	SO ₃	прочее
77,8	7,12	6,58	3,63	2,26	1,5	0,57	0,13	0,41

Кварц железистых кварцитов различного генезиса имеет уникальные характеристики. Он состоит из трех разновидностей: регионально-метаморфизованная (халцедоновидная), динамо-метаморфическая и контактово-метаморфическая генерации. Гематит встречается в виде включений в зернах диагенетического кварца в качестве второстепенных – амфиболы, карбонаты, полевые шпаты и слюды.

Опоковидный мергель Хворостянского месторождения Белгородской области представлен кальцитом (от 40 до 45 %), цеолитом (от 20 до 25 %), опалом (от 22 до 30 %) и монтмориллонитом (от 5 до 25 %) (таблица 2.12).

Таблица 2.12 – Химический состав опоковидного мергеля, %

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	ппп	прочее
61,13	8,12	6,97	2,98	7,1	13,7

Минеральное сырье образовалось в результате природной химической переработки мергелистых пород в поверхностных слоях и характеризуется сотовой структурой массива.

Пластифицирующие добавки. При изучении свойств разработанных полиминеральных композиционных вяжущих, а также приготовлении текстиль-бетона

методом лить использовался суперпластификатор **Glenium 51** на основе поликарбосилатного эфира. Добавка не содержит в своем составе хлоридов, отвечает требованиям норм ASTM C 494. Основными достоинствами является придание бетону свойство реопластичности, при низком водоцементном соотношении.

Для приготовления текстиль-бетона методом ламинирования применялся пластификатор **Реопласт ЛС 01**. Это пластифицирующая и водоудерживающая добавка, на основе модифицированных лингосульфонов, регулирующая пластичность, плотность, связность и удобоукладываемость бетонных смесей, способствующая повышению технологичности, обеспечивающая длительное сохранение подвижности. Соответствует нормативной документации: ТУ 5745-001-25842763-2014, ГОСТ 24211-2008, ГОСТ 30459-2008.

Суперабсорбирующие полимеры (САП) являются добавками нового поколения со сверхвысокой поглощающей способностью, действие которых основано на высокой способности к поглощению и удержанию воды с последующей отдачей. Добавки являются сшитыми полиэлектролитами (полиакрилаты натрия), которые начинают набухать при контакте с водой или влагосодержащими растворами, что приводит к образованию гидрогеля. САП используется как сухая химическая добавка, так как поглощает воду в процессе перемешивания смеси.

Характеристики применяемых в работе суперабсорбирующих полимеры представлены в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Характеристики применяемых САП

Марка	Модификация	Дисперсность, мкм	Применяемое в исследовании обозначение
Floset	B3	до 200	САП-I (<200 мкм)
		от 200 до 500	САП-I (200-500 мкм)
	129 XB4N	до 200	САП-II (<200 мкм)
		от 200 до 500	САП-II (200-500 мкм)

САП способны поглощать жидкости в количествах, значительно превышающих их собственную массу, образуя гель и сохраняя их в своей структуре без растворения. Так применяемые САП Floset 129 XB4N в сухом состоянии массой 1 г

поглощают 90 г воды. После отдачи влаги частицы SAP возвращаются в исходную форму без потери массы.

Водопоглощение суперабсорбирующих полимеров основано на образовании вторичных химических связей, но вода так слабо связана, что ее можно рассматривать как свободную (рисунок 2.11). Длинные полимерные цепи частично нейтрализованной полиакриловой кислоты, сшитые друг с другом поперечными ковалентными связями в единую трехмерную пространственную сеть [114, 115].

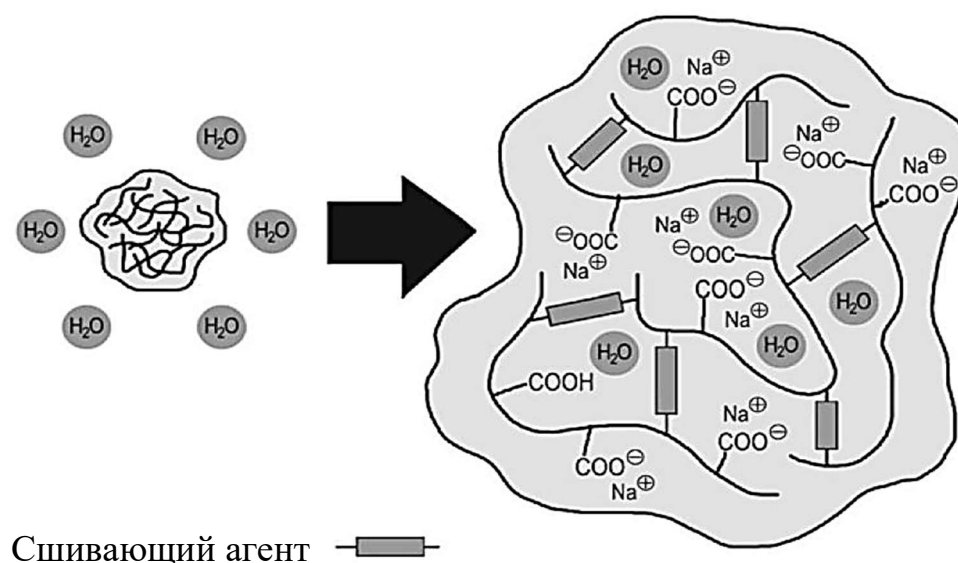


Рисунок 2.11 – Механизм набухания САП на основе полиакриловой кислоты [75]

Высокая сорбционная способность суперабсорбента обеспечивается в основном за счет действия электростатических сил и сил осмотического давления. При попадании САП в водную среду происходит диссоциация молекул полимера с образованием карбоксильных анионов (COO^-), связанных с полимерной цепью, и низкомолекулярных катионов (Na^+), свободно перемещающихся внутри геля и создается эффект полупроницаемой мембраны. Стремление системы вода–суперабсорбент выровнять химический потенциал создает «распирающее» осмотическое давление, вызывающее значительное набухание геля

Основными производителями САП в технической области являются – Arkema и SNF Floerger.

Армирующая текстильная сетка. В работе используется текстильная сетка из волокон щелочестойкого AR-стекла, является двунаправленной (2D), перевивочного переплетения, так называемое «Leno weave», имеет размер ячеек 10×10 мм, расход волокон 520 г/м^2 (рисунок 2.12).

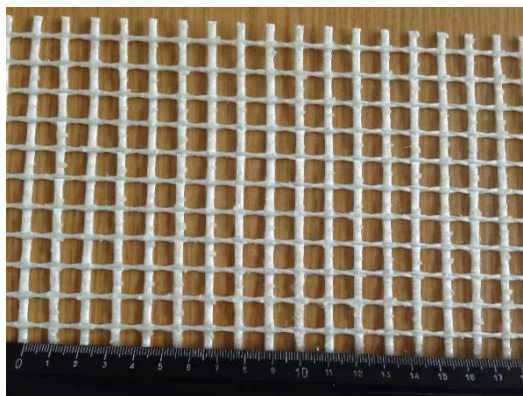


Рисунок 2.12 – Внешний вид используемой сетки

Щелочестойкие стекла выпускают на основе системы $\text{ZrO}_2\text{-SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$. Содержание дорогого оксида циркония в них варьируется в пределах от 15 до 23 %. Поскольку температура плавления чистого оксида циркония достаточно высока (2715°C), в стекло добавляют щелочные металлы, чаще всего Na_2O (от 12 до 16 %). В таблице 2.14 представлен химический состав используемого AR-стекла для производства стекловолокна.

Таблица 2.14 – Химический состав стекла типа AR, % (из справочных материалов)

SiO_2	ZrO_2	Na_2O	TiO_2	K_2O	Al_2O_3
58,3-60,6	18,1-21,2	13,0-14,1	0-2,8	0-2,8	0,2

В таблице 2.15 представлены физико-механические свойства AR-стекла.

Таблица 2.15 – Физико-механические свойства волокна из AR-стекла (из справочных материалов)

Свойство	Плотность, г/см^3	Коэффициент линейного расширения, 10^{-6}	Прочность, МПа	Модуль упругости, ГПа	Удлинение до разрыва, %
Значение	2,6-2,7	7,5	1500-1700	72-75	2-2,4

Применяемая текстильная сетка произведена в Техническом университете Дрездена и предоставлена директором Института строительных материалов Технического университета Дрездена профессором Мещериным В.С.

Стекловолокно (ровинги) от производителя ООО «Композит-комфорт» (рисунок 2.13) применялось с целью изучения влияния щелочной агрессии вяжущих систем.



Рисунок 2.13 – Внешний вид применяемого стекловолокна

Для достижения максимального эффекта растворения вследствие высокой щелочности, применялось стекловолокно из стекла типа Е (таблица 2.16).

Таблица 2.16 – Химический состав стекла типа Е, % (из справочных материалов)

SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	ZrO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	Fe ₂ O ₃	F ₂
59-60	22-23	12-13	3-4	0,5-1,5	0,6-0,9	0-0,2	0,2	0,1

ГЛАВА 3. ПОВЫШЕНИЕ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ ЦЕМЕНТНОЙ МАТРИЦЫ ДЕСТРУКТИВНЫМ ПРОЦЕССАМ

В период гидратации и твердения, в цементной системе происходит ряд деструктивных процессов, влияющих на формирование структуры материала, что в конечном счете, серьезным образом сказывается на его технических и эксплуатационных свойствах. Такие процессы, как возникновение внутреннего напряжения, образование структурных микротрещин, изменение геометрических размеров и прочее, в основном вызваны усадочными явлениями цементного камня, что в большинстве случаев приводит к растрескиванию бетона. Согласно результатам выполненных ранее работ, компенсация данных негативных явлений осуществляется в основном путем введения модификаторов различных спектров действия, но используемые методы не всегда являются эффективными при применении традиционных видов вяжущих.

В связи с этим **рабочей гипотезой** исследований является предположение о возможности повышения эффективности текстиль-бетона за счет использования полиминеральных композиционных вяжущих и суперабсорбирующих полимеров.

3.1 Пути повышения сопротивляемости цементной матрицы

Согласно результатам выполненных ранее работ, сокращение негативных явлений осуществляется в основном путем введения модификаторов различных спектров действия, способных скомпенсировать данные недостатки цементного камня. Однако, используемые методы не всегда являются эффективными при применении традиционных видов вяжущих. Поэтому ключевым фактором повышения сопротивляемости цементной матрицы может стать воздействие на формирование структуры материала в период гидратации и твердения вяжущего.

Рост прочности твердеющего цементного камня является результатом структурных преобразований, выражающихся в кристаллизации, развитии и срастании кристаллических гидратов, в накоплении и уплотнении образующегося геля.

Существует несколько теорий гидратации и структурообразования портландцемента и материалов на его основе – трех-стадийная, где используется кинетика структурной прочности (рисунок 3.1, а) [116] и пяти-стадийная объясняющая процесс с точки зрения динамики тепловыделения (рисунок 3.1, б) [117].

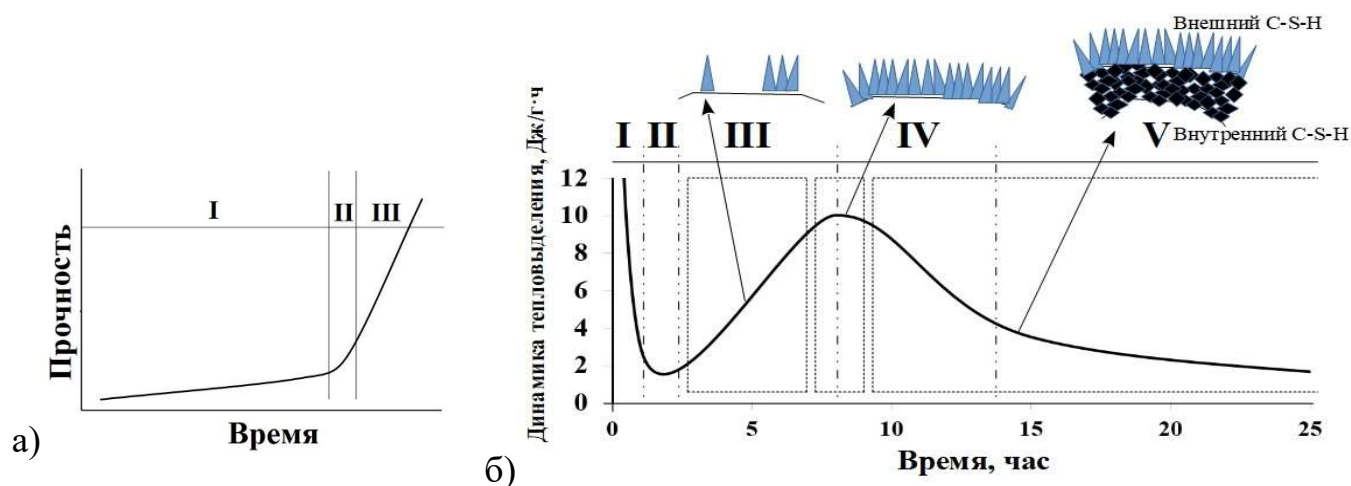


Рисунок 3.1 – Нарастание структурной прочности портландцемента:

- а) трех-стадийная теория (кинетика структурообразования) [116],
- б) пяти-стадийная теория (динамика тепловыделения) и взаимосвязь основного пика тепловыделения с ростом C-S-H [117]

Отличие заключается в том, что в первой химический процесс (гидролиз силикатов кальция с выделением портландита) осуществляется сразу после соприкосновения реагентов, а во второй – спустя временной (индукционный) интервал I+II, завершающийся основным экзотермическим эффектом.

С точки зрения динамики тепловыделения (рисунок 3.1, б), в начальный период (до 24 часов), характерных для тепловыделения при гидратации цемента, два экзотермических эффекта разделены индукционным периодом (II). Первый эффект (I) связан с адсорбционным и химическим взаимодействием. На этой стадии отмечается быстрый рост концентрации ионов Ca^{2+} в жидкой фазе, и через несколько минут с момента затворения достигается пересыщение. После этого выщелачивание кальция резко замедляется. Этот период не характеризует структурные превращения. Рост зародышей новообразований до критических размеров при постепенном увеличении пересыщения жидкой фазы по кальцию может служить одной из

вероятных причин наличия индукционного периода. Индукционный период является этапом зародышеобразования, длительность которого определяется скоростью нуклеации, а затем гидратация проходит через этап роста новообразований, что соответствует второму экзотермическому эффекту.

Ускоренный период тепловыделения (III) совпадает с интенсивной кристаллизацией гидrolитической извести. Гидратация в ускоренный период является процессом накопления новообразований, идущим с постоянной скоростью до периода замедления (IV). Дальнейшее монотонное затухание скорости тепловыделения и гидратации (V) обусловлено накоплением продуктов реакции, затрудняющих доступ воды к исходной фазе и тем самым снижающих интенсивность их взаимодействия. Эти периоды характеризуются изменением полноты гидратации и значением констант скорости реакции. Основные структурные преобразования протекают в эти периоды [118].

Структурные изменения в период превращения цементного теста в искусственный камень и дальнейшее нарастание структурной прочности заключаются в образовании и развитии контактов срастания между частичками гидратов и остатками зерен исходных цементов, и зависят от количественного содержания гидратов в цементном камне, их морфологии и дисперсности. Отсюда, формирование высокопрочной структуры цементного камня возможно за счет:

- повышение площади поверхностного слоя зерен цемента;
- увеличения содержания гидратных фаз;
- увеличения количества контактов между новообразованиями;
- утолщения и уплотнения гелиевых оболочек на зернах цемента;
- сокращения количества непрореагировавших зерен цемента.

Исходя из этого, обеспечение качественных структурных изменений, обусловленных наибольшей полнотой гидратации, будет способствовать повышению сопротивляемости цементного камня к деструктивным процессам.

Уплотнение структуры и увеличение количества основных структурных единиц (гидросиликатов кальция) возможно за счет создания дополнительных центров кристаллизации посредством ввода активного или механоактивированного

аморфного кремнезема в виде микро- и наноразмерных частиц или добавления дополнительных гидросиликатов кальция, полученных путем синтеза аморфного кремнезема и чистой гидратной извести. В этом случае происходит уплотнение дисперсной системы за счет сокращения расстояния между частицами системы «цемент–наполнитель», а места контактов микронаполнителя с цементом, также могут являться активными зонами кристаллизации.

В процессе гидратации общий объем системы «цемент–вода» уменьшается, в то время как объем твердой фазы за счет присоединения воды увеличивается. Все процессы, связанные с изменением объема цементной системы, более значительны на первоначальном этапе формирования структуры и особенно в период превращения псевдожидкой структуры смеси в твердую структуру, а с возрастом бетона постепенно затухают. Объемные изменения, такие как набухание или усадка, приводят к возникновению внутреннего напряжения и появлению структурных деформаций на макро- и микроуровнях. Особенно важное значение это имеет при твердении в экстремальных условиях (при высокой температуре окружающей среды и низкой влажности), так как возрастает риск образования пластической усадки. В результате чего, нарушается однородность и плотность структуры, возникает внутреннее напряжения, изменяются геометрические размеры и образуются структурных микротрещин, что значительным образом снижает физико-механические характеристики цементного камня.

Сокращение усадочных деформаций на разных этапах структурообразования возможно за счет обеспечения внутреннего ухода за цементной системой путем ввода специальных добавок, влияющих на механизм образования усадки, или за счет обеспечения внешнего ухода за материалом.

Таким образом, повышение сопротивляемости цементной матрицы к деструктивным процессам возможно за счет:

- обеспечения наибольшей полноты гидратации вяжущего, способствующей качественным структурным изменениям;
- формирования высокопрочной структуры в процессе твердения цементного камня;

- уплотнения структуры за счет создания дополнительных центров кристаллизации;
- сокращение воздействия усадочных явлений на первоначальном этапе формирования структуры цементного камня.

3.2 Применение суперабсорбирующих полимеров в цементных системах

Для сокращения количества деструктивных явлений цементного камня в результате действия пластической усадки, на первоначальном этапе формирования структуры, изучался характер влияния вида и дисперсности суперабсорбирующих полимеров, способных обеспечить внутренний уход посредством компенсации влаги в период схватывания. Исследования проводились на специально собранной установке по определению пластической усадки цементных систем, расположенной внутри климатической камеры, в лаборатории Института строительных материалов Технического университета Дрездена (рисунок 2.1, глава 2). Характеристики исследуемых САП, представлены в таблице 2.14 (глава 2).

Добавки вводились в сухом состоянии в количестве 0,3 % от массы цемента, установленном ранее при изучении свойств данных видов САП. Готовилось цементное тесто при В/Ц=0,5 по режиму, обеспечивающему наилучшее смешивание компонентов (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Режим приготовления цементного теста с использованием смесителя

Общее время	Этап	Длительность этапа, мин
00:00 – 02:00	Перемешивание сухих компонентов	2
02:00 – 03:00	Добавление 80 % воды	1
03:00 – 04:00	Перемешивание в обычном режиме	1
04:00 – 05:00	Перемешивание в быстром режиме	1
05:00 – 06:00	Соскребание со стенок вручную	1
06:00 – 06:30	Добавление оставшихся 20 % воды	0,5
06:30 – 08:30	Перемешивание в обычном режиме	2

Испытания проводились в климатической камере при двух режимах работы, имитирующих нормальные условия твердения (скорость испарения влаги $0,25 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$) и жаркий климат ($0,75 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$) (таблица 3.2).

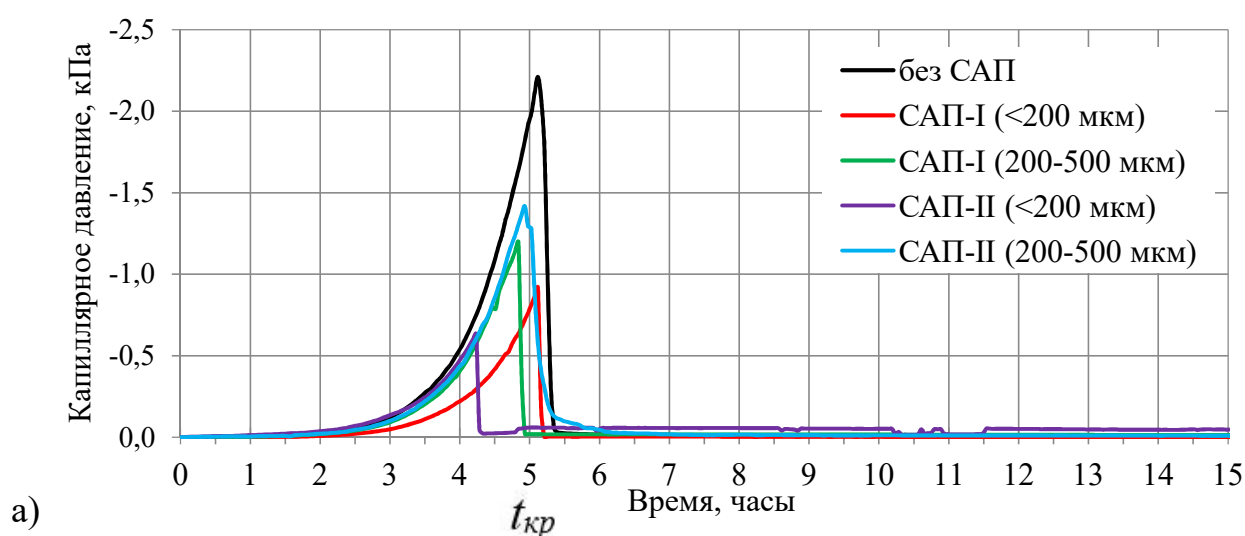
Таблица 3.2 – Режимы работы климатической камеры

Ре- жим	Температура воз- духа T , °C	Влажность воз- духа ω , %	Скорость ветра $v_{\text{ветр}}$, м/с	Скорость испарения влаги, $\text{кг/м}^2 \cdot \text{ч}$
1	20	65	4	0,25
2	35	40	5,5	0,75

3.2.1 Влияние САП на пластическую усадку цементного теста

Движущей силой пластической усадки в цементных системах является отрицательное капиллярное давление в микропорах. Образовавшееся давление вызывает объемное сжатие, приводящее к значительной усадке свежееуложенного бетона. Чем выше отрицательное капиллярное давление, тем сильнее объемное сжатие, и, следовательно, пластическая усадка.

В связи с чем, было изучено влияние суперабсорбирующих полимеров на механизм действия пластической усадки. Кривые изменения капиллярного давления представлены на рисунке 3.2, а, б.



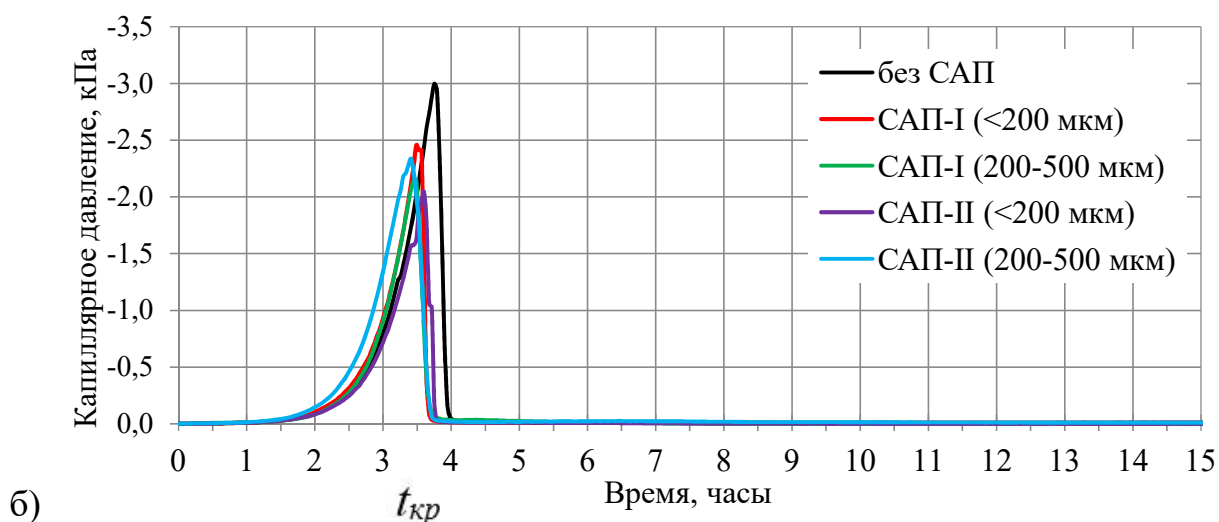


Рисунок 3.2 – Кривые изменения капиллярного давления:

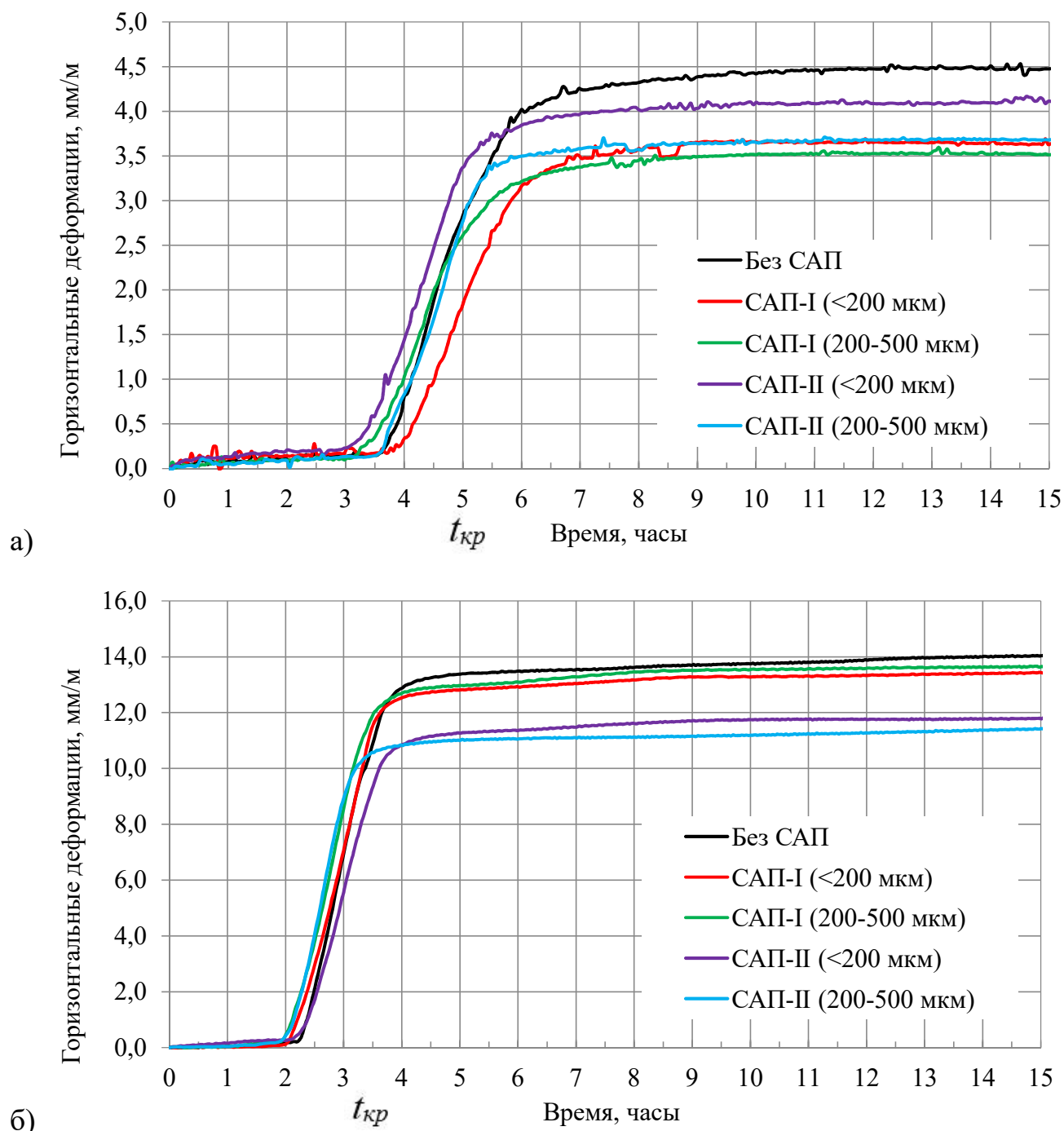
а) климатический режим 1, б) климатический режим 2

Все исследуемые образцы, имеющие в своем составе добавки САП, показали значительные отклонения отрицательного капиллярного давления от значений контрольных бездобавочных образцов в сторону уменьшения, в результате десорбции воды гелем САП под воздействием самого отрицательного давления. Компенсация испарившейся влаги привела к снижению значения капиллярного давления в среднем на 53 % при испытании в первом режиме работы климатической камеры, и на 25 % при испытании во втором режиме. При этом, наибольший эффект демонстрируют образцы содержащие добавки наименьшей дисперсности.

Увеличение интенсивности испарения воды с поверхности цементного теста приводит к повышению значения отрицательного капиллярного давления более чем на 26 % и изменению времени достижения давления прорыва ($t_{кр}$). При среднем значении испаряемого количества воды равном $0,25 \text{ кг/м}^2 \text{ в} \cdot \text{ч}$ в климатическом режиме 1, время достижения давления прорыва ($t_{кр}$) соответствует 5 часам 10 минут, тогда так при значении испаряемого количества воды равном $0,75 \text{ кг/м}^2 \text{ в} \cdot \text{ч}$ в климатическом режиме 2, $t_{кр}$ соответствует 3 часа 40 минут, для контрольных бездобавочных образцов.

Риск возникновения пластической усадки, образования трещин на поверхности цементной системы, а значит и возникновения структурных деформаций на

ранних сроках твердения, в более сухом климате значительно выше. Это подтверждают графики изменения горизонтальных деформаций исследуемых составов цементного камня (рисунок 3.3, а, б). Значения горизонтальных деформаций бездобавочных составов цементного камня, испытываемых в более сухом климатическом режиме 2, более чем в три раза превосходят значения того же состава в умеренном климатическом режиме 1.



Характер развития горизонтальных деформаций совпадает с характером изменения отрицательного капиллярного давления во всех климатических режимах испытаний. Это подтверждает механизм образования пластической усадки в результате действия капиллярного давления в микропорах цементных систем. После достижения давления прорыва ($t_{кр}$), отрицательное капиллярное давление резко стремится к нулю и в дальнейшем перестает развиваться. Вместе с этим, скорость развития горизонтальных деформаций резко уменьшается. Дальнейшие видимые деформации происходят в результате самоусыхания цементного камня.

Анализ графиков горизонтальных деформаций показал, что добавки САП значительным образом снижают горизонтальные деформации, за счет снижения отрицательного капиллярного давления в микропорах посредством десорбции воды. В среднем, добавки САП-I в первом и во втором климатических режимах сокращают горизонтальные деформации цементного камня на 20 и 4 % соответственно, тогда как САП-II – на 13 и 17 % соответственно. При этом, дисперсность добавок в сокращении горизонтальных усадочных деформаций существенной роли не играет.

Кривые изменения вертикальных деформаций имеют иной характер (рисунок 3.4, а, б). Во всех климатических режимах испытаний, под действием «сжимающего» отрицательного капиллярного давления, цементная система стремится к максимальной степени самоуплотнения, до достижения времени прорыва ($t_{кр}$). Однако, за счет того, что горизонтальные деформации, уже незначительно, но продолжают развиваться, а объем системы остается неизменным, то вертикальные размеры цементного теста увеличиваются и кривые изменения деформаций принимают противоположный знак.

Отличие характера кривых вертикальных деформаций с момента времени равному 9 часам, объясняется действием более сухого климатического режима 2, приводящего к возникновению последующего объемного сжатия в результате высыхания образцов (рисунок 3.4, б).

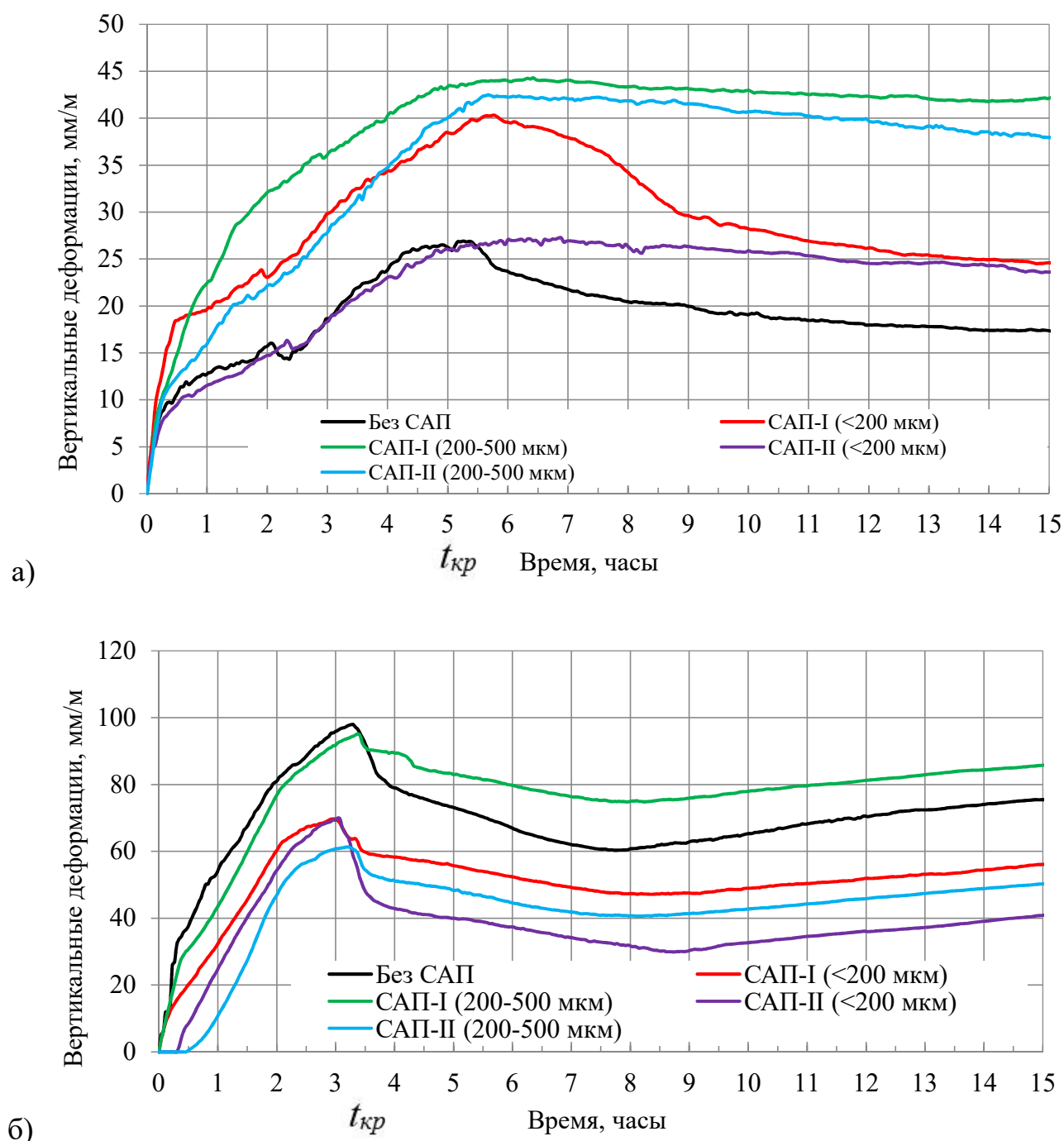


Рисунок 3.4 – Кривые изменения вертикальных деформаций:

а) климатический режим 1, б) климатический режим 2

Влияние добавок САП на вертикальные деформации неоднозначное. Так при испытании в климатическом режиме 1 (рисунок 3.4, а), все исследуемые виды добавок способствовали увеличению вертикальных деформаций. Этот эффект можно объяснить результатом уменьшения объема частичек САП, из-за десорбции воды, и заполнением свободного пространства цементным тестом, в результате чего

уменьшается объем испытываемых образцов. Наилучший эффект был достигнут добавлением САП-II дисперсностью менее 200 мкм. Однако, при испытании в климатическом режиме 2 (рисунок 3.4, б), введение САП привело к значительному сокращению вертикальных деформаций. Наибольший эффект был достигнут введением САП-II, при этом добавка дисперсностью более 200 мкм сократила деформации примерно на 30 %, а дисперсностью менее 200 мкм – на 50 %, в свою очередь САП-I дисперсностью менее 200 мкм сократило вертикальные деформации на 28 %.

Таким образом, в результате изучения характера влияния вида и дисперсности суперабсорбирующих полимеров на пластическую усадку в цементном камне установлено, что САП являются эффективным средством снижения усадочных деформаций цементной системы на первоначальном этапе формирования структуры, что способствует сокращению количества деструктивных явлений цементного камня. Среди используемых САП наибольший эффект сокращения горизонтальных деформаций был достигнут применением модификации Floset B3 (дисперсности менее 200 мкм), при испытании в нормальных условиях твердения, и составил 20 %, а для модификации Floset 129XB4N (дисперсности менее 200 мкм), в более жарком климате, составил 17 %.

3.2.2 Гидратация и твердение цемента в присутствии САП

Характер влияние суперабсорбирующих полимеров на гидратацию цемента, устанавливался путем определения динамики тепловыделения, выраженной зависимостью $dQ/dt=f(t)$, в течение 24 часов испытаний, и общего количества выделившегося тепла, описывающегося функцией $Q=f(t)$, в течение 70 часов, с использованием дифференциального колориметра. Производилось сравнение результатов контрольного образца бездобавочного цемента, и образцов с содержанием САП в количестве 0,3 % от массы цемента размеров менее 200 мкм и более 200 мкм, а также, в количестве 0,6 % размером частиц менее 200 мкм. Готовились пробы цемента массой по 10 г, количество вводимой воды составляло 5 г.

Установлено, что САП не оказывают химического влияния на процесс гидратации цемента. Однако введение добавки в количестве более 0,3 % от массы вяжущего, приводит к значительному увеличению сроков схватывания (периода активной гидратации) посредством абсорбции и десорбции воды (рисунок 3.5).

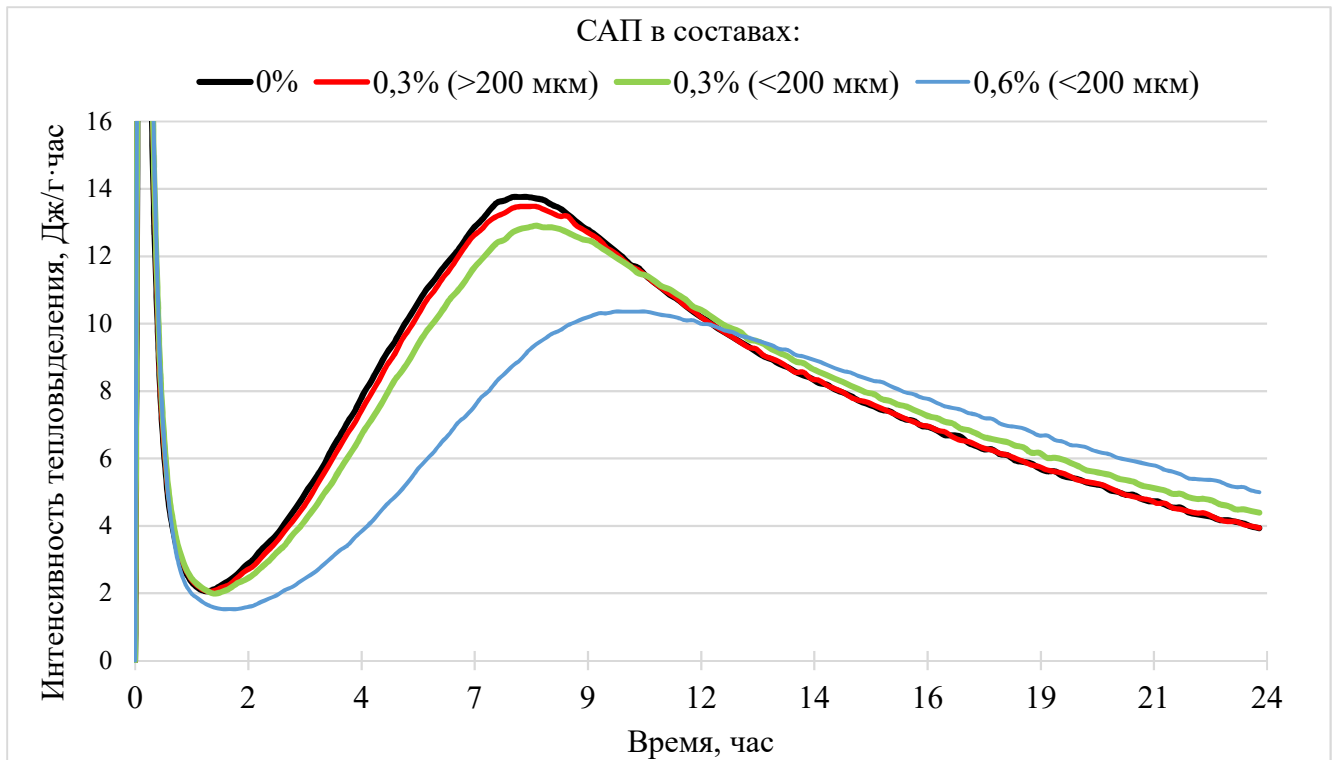


Рисунок 3.5 – Кривые динамики тепловыделения при гидратации цемента в присутствии САП

Удержание влаги в первые часы после затворения, приводит к неполной гидратации вяжущего, так как не все частицы цемента могут быть в полной мере обеспечены необходимой водой. Однако последующая водоотдача приводит к дополнительному протеканию реакции, что подтверждается вытянутыми кривыми динамики тепловыделения образцов, в составе которых присутствуют добавки. По общему количеству выделившегося тепла в течение 70 часов испытаний образцов, содержащих САП по сравнению с контрольным составом, можно судить о том, что вся вода была задействована в процессе гидратации цемента (таблица 3.3).

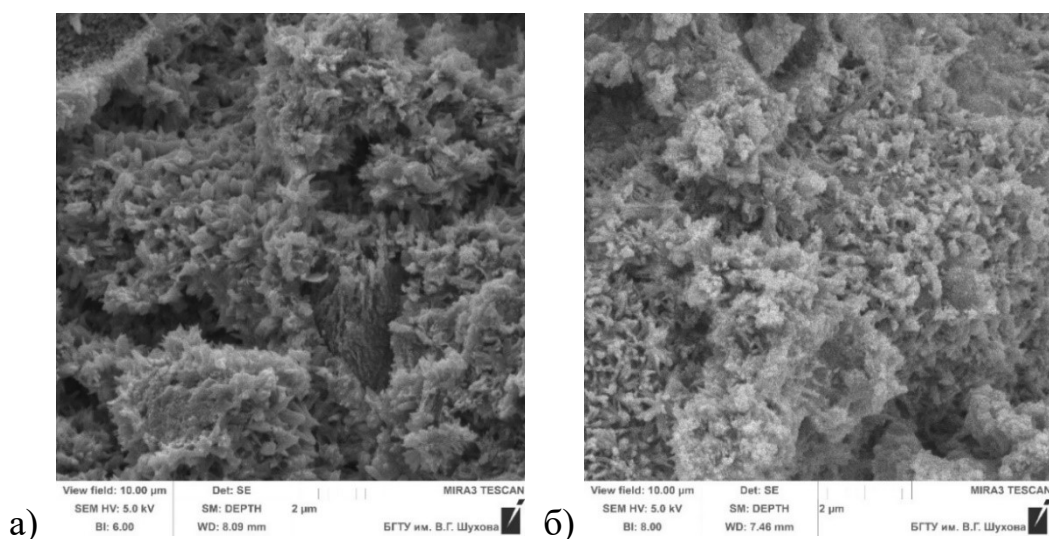
Таблица 3.3 – Количество выделившегося тепла при испытании в течение 70 часов, Дж/г

Количество САП в образце, % от вяжущего			
0	0,3 (более 200 мкм)	0,3 (менее 200 мкм)	0,6 (менее 200 мкм)
280,03	279,80	286,03	281,13

Для установления влияния водоотдачи добавок на рост новообразований в ранние сроки твердения, были подготовлены образцы цементного камня при В/Ц=0,5, с содержанием 0,3 % САП (дисперсности менее 200 мкм) и контрольные бездобавочные. После расформовки, образцы хранились в открытом виде в лабораторных условиях. В течение 48 часов после затворения цемента водой, с помощью электронного сканирующего микроскопа TESCAN MIRA 3LMU, изучалась морфология новообразований и производился сравнительный анализ.

Установлено, что спустя 17 и 24 часа после водозатворения, кристаллы новообразований в контрольных бездобавочных образцах развивались стремительней и имели больший размер (рисунок 3.6, а – г). Однако, через 41 час после затворения водой, больший размер новообразований характерен для образцов, содержащих САП (рисунок 3.6, д, е).

Такой эффект достигнут в результате участия в процессе гидратации дополнительной воды, высвобожденной из гидрогеля САП примерно после достижения максимума экзотермической реакции.



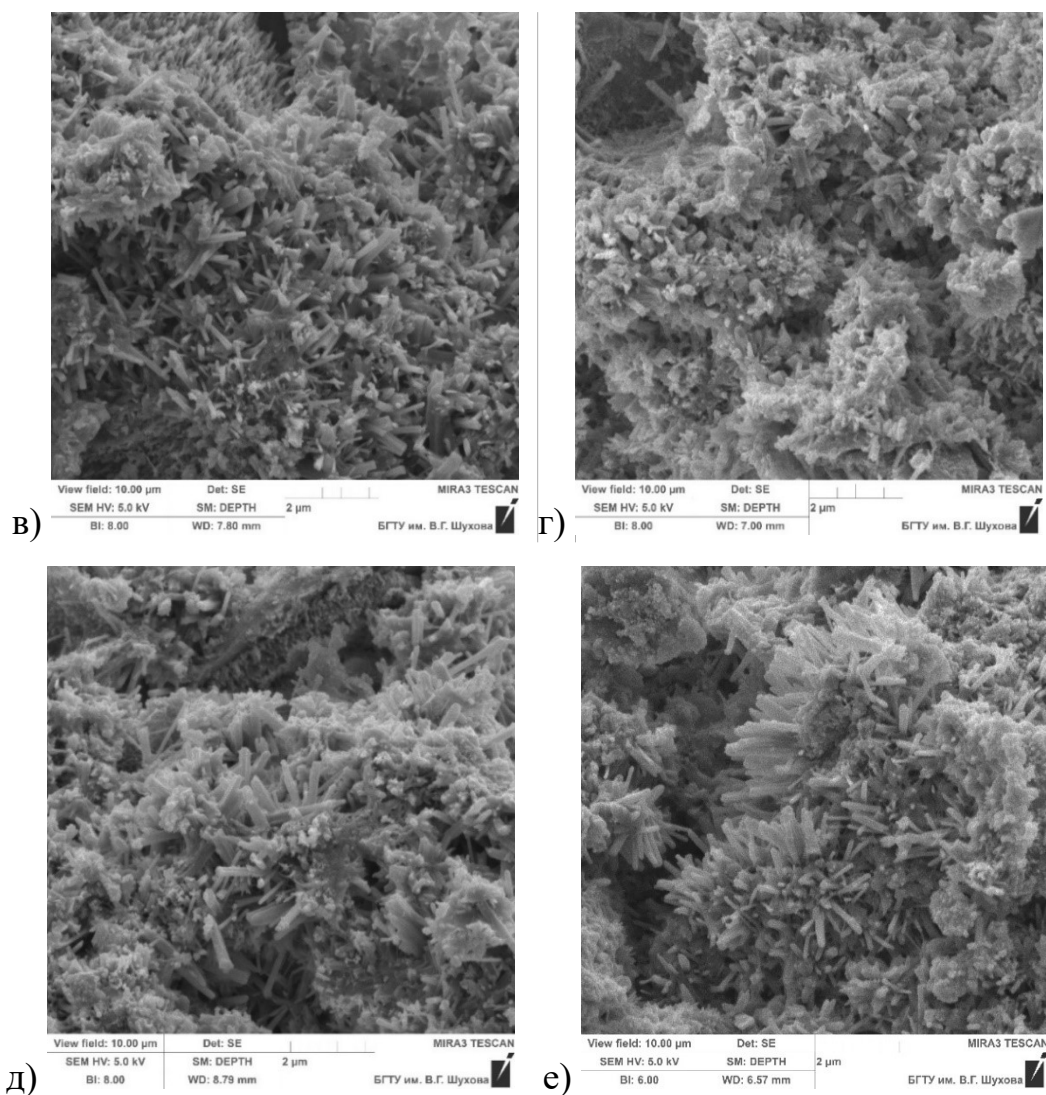


Рисунок 3.6 – Микросъемка кристаллов новообразований (10 мкм):
спустя 17 часов после затворения водой – а) без САП, б) с САП;
спустя 24 часа после затворения водой – в) без САП, г) с САП;
спустя 41 час после затворения водой – д) без САП, е) с САП

3.2.3 Реологические и физико-механические свойства цементной системы с добавлением САП

Реологические свойства исследуемых образцов цементного теста определялись посредством измерения диаметра расплыва лепешки из формы в виде усеченного конуса ($h=60$ мм, $D=100$ мм, $d=70$ мм) на гладкой поверхности сразу после приготовления. Результаты испытаний представлены в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Влияние САП на консистенцию цементного теста и среднюю плотность цементного камня

Наименование состава	Распływ конуса, мм	Средняя плотность цементного камня, кг/м ³
Без САП	215	1920
САП-I (<200 мкм)	206	1880
САП-I (200-500 мкм)	210	1880
САП-II (<200 мкм)	164	1870
САП-II (200-500 мкм)	180	1870

Добавки САП-I, вне зависимости от дисперсности, не обладают значительным влагонасыщением в первые 8,5 минут после контакта с водой (длительность приготовления смеси). Однако, САП-II (<200 мкм) сокращает распływ цементного теста на 24 %, а САП-II (200-500 мкм) на 14 %. Разница распłyва конуса образцов содержащих САП-II говорит о том, что с увеличением дисперсности добавки, увеличивается скорость ее влагонасыщения. Дальнейшее влагонасыщение водой будет зависит от сорбционной возможности полимера, его размера и количества присутствующей несвязанной воды. Относительное количество потребленной воды можно определить по значению средней плотности цементного камня.

Влияние суперабсорбирующих полимеров на физико-механические свойства устанавливалось путем испытания образцов цементного камня, приготовленных в стандартных формах 40×40×160 мм, на 3, 7 и 28 суток. Испытания и обработка результатов проводились по ГОСТ 30744-2001.

Введение добавок приводит к снижению средней плотности цементного камня (таблица 3.4). В период водозатвердевания, перемешивания и вплоть до затвердевания, частицы САП сорбируют воду и превращаются в гидрогель, тем самым, снижая плотность смеси. После затвердевания цементного камня, частицы САП образуют замкнутую пору, заполненную водой, что приводит к снижению средней плотности образцов.

Прослеживается тенденция между влагонасыщением добавок САП и значением средней плотности цементного камня. Чем больше воды способна впитывать частица полимера, тем ниже средняя плотность и тем больший объем пор создается

в цементном камне. Такая же закономерность прослеживается при установлении влияния САП на прочностные показатели цементного камня.

В ранние сроки набора прочности (на 3 суток), образцы цементного камня, содержащие САП-I и САП-II меньшего размера частиц (<200 мкм), показали увеличение предела прочности при изгибе на 9,05 и 2,91 % соответственно. Однако в последующие сроки испытаний, прочность падает. Так в среднем на 7 и 28 суток испытаний образцов, содержащих САП-I, в сравнении с контрольными образцами, наблюдается снижение предела прочности при изгибе на 16,48 и 27,96 % соответственно, а при испытании образцов, содержащих САП-II – на 26,52 и 31,29 % соответственно (рисунок 3.7).

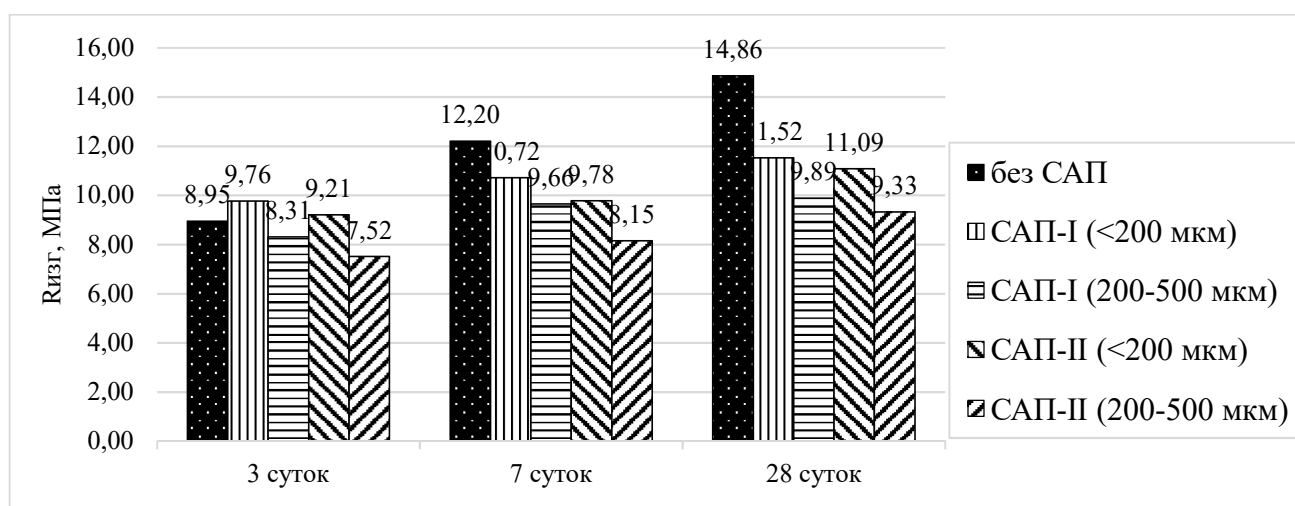


Рисунок 3.7 – Влияние САП на предел прочности при изгибе цементного камня

Также наблюдается снижение предела прочности при изгибе в зависимости от дисперсности добавок. Для образцов цементного камня с САП-I, разница пределов прочности при изгибе на 3, 7 и 28 суток составляет 14,89, 9,61 и 14,15 % соответственно, а для образцов цементного камня содержащих САП-II – 18,35, 16,67 и 15,87 % соответственно. Увеличение размера пор за счет введения САП большего размера приводит к снижению сопротивления цементного камня изгибающим нагрузкам.

Похожая тенденция прослеживается при установлении влияния на предел прочности при сжатии. Так на 3, 7 и 28 суток испытаний образцов, содержащих САП-I, в сравнении с контрольными образцами, наблюдается снижение предела

прочности при сжатии в среднем на 3,74, 14,29 и 16,55 % соответственно, а при испытании образцов, содержащих САП-II – на 17,15, 23,08 и 16,08 % соответственно (рисунок 3.8).

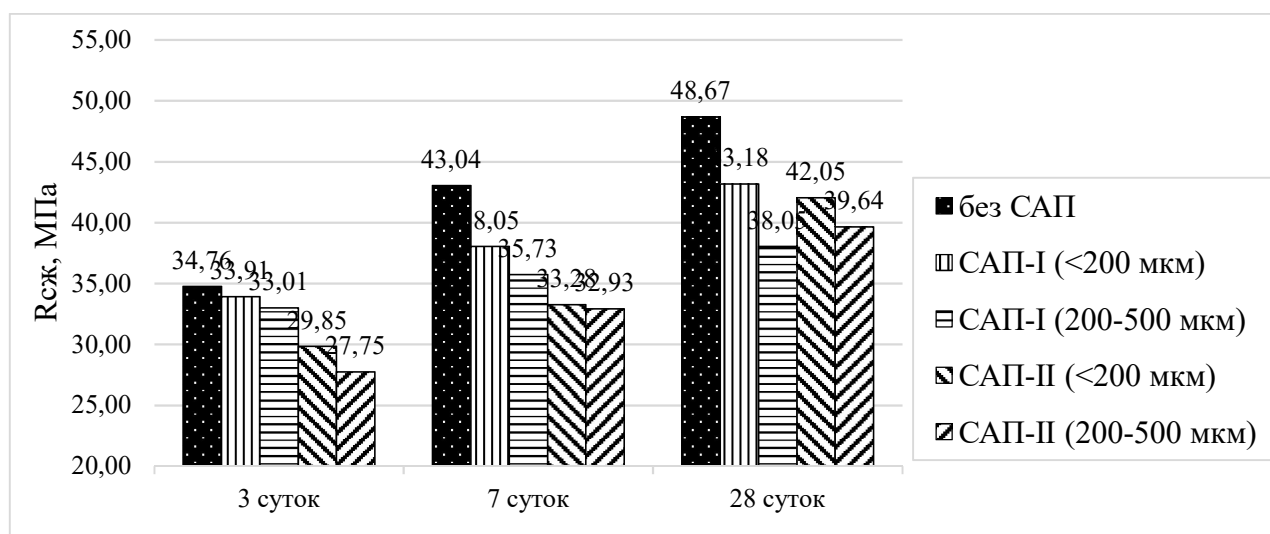


Рисунок 3.8 – Влияние САП на предел прочности при сжатии цементного камня

Увеличение размера частичек САП приводит к снижению предела прочности при сжатии. Для образцов цементного камня содержащих САП-I на 3, 7 и 28 сутки разница пределов прочности при сжатии составляет 2,65, 6,1 и 11,88 % соответственно, а для образцов в присутствии САП-II – 7,04, 1,05 и 5,73 % соответственно.

Таким образом, введение суперабсорбирующих полимеров в состав цементного камня приводит к образованию замкнутых пор, заполненных, в зависимости от условий хранения, водой или воздухом, и снижению физико-механических характеристик. При этом, увеличение размера частиц САП способствует наибольшему снижению прочностных показателей.

3.3 Разработка полиминеральных композиционных вяжущих

Для повышения сопротивляемости к деструктивным процессам на всем жизненном цикле бетона и эффективности применения суперабсорбирующих полимеров, рассмотрена возможность использования полиминеральных композиционных вяжущих.

В работе, под композиционным вяжущим понимается вяжущее, полученное в результате совместного помола (обеспечивающего механоактивацию компонентов) портландцемента с одним или несколькими минеральными кремнеземистыми компонентами, с добавлением химических модификаторов, способствующих усилению имеющихся и приданию новых свойств конечных изделий. Замена традиционного цемента полиминеральным композиционным вяжущим будет способствовать снижению усадочных явлений вызванных цементной основой, а также компенсировать прочностные потери вызванные введением САП.

3.3.1 Обоснование целесообразности применения композиционных вяжущих при создании текстиль-бетона

Конструкционная особенность текстиль-бетона заключается в сочетании бетонной основы и текстильной армирующей сетки, образующих композиционный материал малой толщины, что требует обеспечения повышенной прочности и долговечности. При изготовлении тонкостенных конструкций из высокомарочных бетонов, возрастает риск деструктивных процессов и образования трещин, в результате усадочных явлений цементного камня, это может привести к значительному ухудшению эксплуатационных свойств конструкций и даже их полному разрушению.

Решение данных задач возможно за счет использования полиминеральных композиционных вяжущих, которые позволяют получить материал нового поколения с высокими эксплуатационными свойствами, недостижимыми при использовании традиционного сырья, повысить сопротивляемость к деструктивным процессам цементной основы и улучшить качество конечного продукта. При этом, применяемые композиционные вяжущие могут иметь свое определенное назначение и их свойства могут быть оптимизированы под конкретные задачи.

Для приготовления композиционных вяжущих используются активные кремнеземсодержащие компоненты, введение которых способствует сокращению гидравлического вяжущего, улучшению процессов структурообразования и

повышению физико-механических характеристик композитов на его основе, посредством:

- уплотнения структуры за счет создания дополнительных центров кристаллизации;
- снижения общей пористости цементного камня, за счет увеличения дисперсности и концентрации наполнителя по объему;
- образования дополнительных гидросиликатов, за счет взаимодействия аморфизированного, в результате помола, кремнеземистого компонента с портландитом;
- создания кластеров «вяжущие – наполнитель», в результате высокой поверхностной энергии частиц кремнеземистого компонента;
- упрочнения зоны контакта между цементным камнем и заполнителем в бетоне [119].

Кроме того, замена части цементной основы в композиционных вяжущих активными кремнеземсодержащими компонентами, возможно, будет способствовать снижению агрессивного воздействия щелочной среды бетона на текстильные армирующие сетки, за счет повышения степени гидратации цементной основы и увеличения количества низкоосновных новообразований, что, в конечном счете, приведет к снижению значения pH бетона, рисков щелочной коррозии и увеличению долговечности текстиль-бетона в целом.

Использование при приготовлении композиционных вяжущих сложных подготовленных природно-техногенными процессами кремнеземсодержащих компонентов с высокой свободной внутренней энергией, может способствовать повышению эффективности КВ, приготавливаемых на их основе, и тем самым, повысить качественные характеристики конечного продукта. Такими кремнеземсодержащими компонентами являются отходы мокрой магнитной сепарации (ММС) железистых кварцитов.

Вне зависимости от месторождений, ММС характеризуются близким минеральным составом и, кроме кварца, содержат железистые карбонаты, силикаты и, в небольшом содержании, гематит и магнетит. Кварц железистых кварцитов

различного генезиса имеет уникальные характеристики. Он состоит из трех разновидностей: регионально-метаморфизованная (халцедоновидная), динамо-метаморфическая и контактово-метаморфическая генерации.

Изучение железорудной толщи Лебединского ГОКа показало, что в ее составе преобладают магнетитовые (54,7 %) и силикатно-магнетитовые (22,8 %) разновидности железистых кварцитов [120]. Присутствующий в отходах ММС в измельченном виде кварц может участвовать в формировании новообразований и, следовательно, отходы могут быть использованы при приготовлении композиционных вяжущих.

Для активизации химических и физико-химических превращений необходимо механическое воздействие на структуру твердого тела. Обогащение железистых кварцитов включает в себя дробление и помол, в результате чего происходят химические реакции и изменение структуры породообразующих минералов. Теоретической предпосылкой возможности инициирования и ускорения химических реакций при механическом воздействии, на кварц различного генезиса и другие минералы, является повышение удельной поверхности и деформирование кристаллической решетки, и, даже, частичная аморфизация. При дальнейшем деформировании минералов (за пределом текучести) их структура разрушается, и энергия механического воздействия идет на образование, перемещение и размножение различных дефектов структуры.

Запасенная в отходах ММС энергия, под воздействием механической активизации, может способствовать ускорению процесса структурообразования в системе «отходы мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов – портландцемент». Поэтому, кремнеземсодержащие отходы ММС целесообразно использовать в качестве сырьевых компонентов для приготовления композиционных вяжущих, содержащих в себе энергию геологических и техногенных воздействий.

Уникальным с точки зрения содержания активных минеральных компонентов является опоковидный мергель Хворостянского месторождения Белгородской области. Минеральное сырье образовалось в результате природной химической переработки мергельных пород в поверхностных слоях. Опоковидный мергель

представлен кальцитом (от 40 до 45 %), цеолитом (от 20 до 25 %), опалом (от 22 до 30 %) и монтмориллонитом (от 5 до 25 %). Такой минеральный состав может активно участвовать в формировании структуры композиционного вяжущего, за счет создания дополнительных центров кристаллизации и образования низкоосновных гидросиликатов кальция.

Таким образом, представленные полиминеральные сырьевые материалы могут стать уникальными компонентами композиционного вяжущего, благодаря которым возможно повышение стойкости деструктивным процессам цементной основы и снижение щелочной агрессии бетонной матрицы, что в конечном счете приведет к повышению эффективности текстиль-бетона, приготавливаемого на их основе.

3.3.2 Химические и морфологические особенности компонентов полиминеральных КВ

Необходимыми свойствами композиционное вяжущее наделяют все компоненты – вяжущая основа, минеральные добавки и химические модификаторы.

Для разработки композиционных вяжущих в качестве вяжущей основы использовался бездобавочный портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н Верхнебаканского цементного завода, характеристики которого представлены в главе 2.

В качестве полиминеральных компонентов, способных снизить деструктивные явления цементной матрицы, рассматривается возможность применения отходов ММС железистых кварцитов и опоковидный мергель. Основные характеристики применяемых минеральных добавок представлены в главе 2.

Качественные характеристики кремнеземсодержащих компонентов оказывают существенное влияние на процессы структурообразования, протекающие в композиционном вяжущем и свойства изделий на их основе. Одним из критериев оценки эффективности кремнеземсодержащих компонентов, является пуццолановая активность, которая возрастает с повышением степени дисперсности,

дефектности кристаллической решетки минералов, с наличием газовых включений, содержания аморфного кремнезема и др.

В результате изучения морфологии поверхности применяемых минеральных добавок (измельченных до удельной поверхности $\approx 550 \text{ м}^2/\text{кг}$) с помощью электронного растрового микроскопа было установлено, что кварц отходов ММС имеет дефектную и шероховатую поверхность (рисунок 3.9), что дает основание предположить о определенной пуццолановой активности полигенетического кварца, а также повышении адсорбционных свойств добавки.

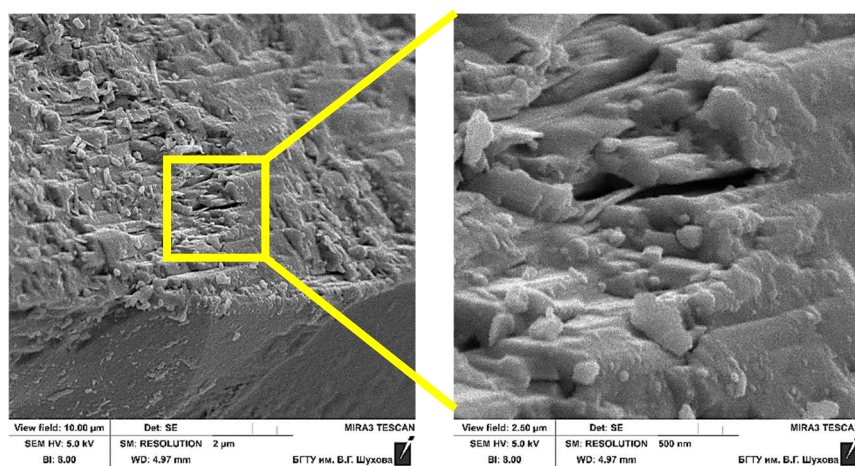


Рисунок 3.9 – Морфология поверхности кварца отходов ММС

Частички мергеля, представленные монтмориллонитом, имеют дефектность кристаллической решетки (рисунок 3.10), что, наряду с входящей в состав опокой, может способствовать повышению пуццолановой активности данной минеральной добавки.

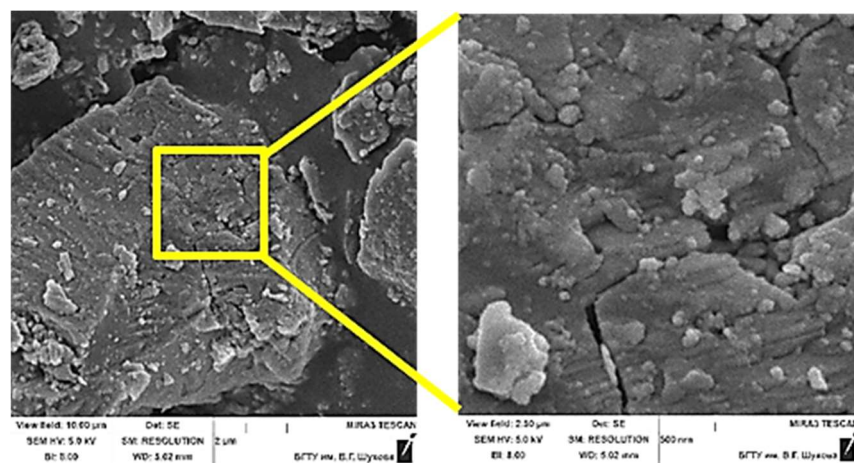


Рисунок 3.10 – Дефектность частичек опоковидного мергеля

Пуццолановая реакция характерна тем, что уже при комнатной температуре наблюдается отверждение смеси из пуццолана, гидрата окиси кальция и воды. Хотя в природных и техногенных песках пуццоланы, как таковые, отсутствуют, при высокой степени дисперсности и механохимической активацией, происходит переход части минерального кристаллического материала в аморфное. В результате, в силу приобретенного запаса свободной энергии и термодинамической неустойчивости, аморфизированные частички не клинкерных компонентов могут проявлять активность.

С целью выявления пуццолановых свойств применяемых добавок, была определена их активность по отношению к связыванию оксида кальция, в сравнении с кварцевым песком (таблица 3.5).

Таблица 3.5 – Активность минеральных добавок по поглощению CaO

Кремнеземсодержащий компонент	Удельная поверхность, м ² /кг	Активность по поглощению CaO (титрование), м ² /г
Кварцевый песок	553	25,6
Отходы ММС	553	36,2
Опоковидный мергель	551	74,4

Определение пуццолановой активности исследуемых материалов показало, что применяемые отходы ММС, как и кварцевый песок, относятся к группе слабо-активных модификаторов, тогда как опоковидный мергель является активной минеральной добавкой.

Продукты новообразований среднеосновные гидросиликаты ($\text{Ca/Si} > 1,5$), в отличие от низкоосновных ($\text{Ca/Si} < 1,5$), формируют высоко щелочную среду $\text{pH} \geq 11,80$. Повышение активности кремнеземсодержащих компонентов КВ способствует связыванию свободного Ca(OH)_2 , портландита, выделяющего в процессе гидратации, с образованием дополнительных гидросиликатов кальция, что в свою очередь приводит к снижению pH жидкой фазы бетона, тем самым снижается агрессивное воздействие щелочной среды на армирующие сетки в текстиль-бетоне.

В ранние сутки твердения, значение pH зависит от состава вяжущей системы (природы компонентов) и активности протекания пуццолановой реакции. Показатель pH среды характеризует наличие $\text{Ca}(\text{OH})_2$, выделяющегося в результате гидратации клинкерных минералов. При замене части портландцемента минеральными добавками возможно снижение количества $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в продуктах гидратации, что может привести к снижению pH среды гидратированного вяжущего. Как видно из таблицы 3.6, отходы ММС имеют низкое значение щелочности водной вытяжки, что наряду с пуццолановой активностью, будет способствовать снижению pH гидратированного композиционного вяжущего. Относительно высокая щелочность

Таблица 3.6 – Значения pH водных вытяжек минеральных добавок и портландцемента

Наименование	Значение pH
Отходы ММС	8,06
Опоковидный мергель	11,12
Портландцемент	12,93

водной вытяжки опоковидного мергеля, может являться доказательством наличия, помимо пуццолановых свойств добавки, также гидравлической активности.

Одной из неотъемлемой частью современных композиционных вяжущих являются химические модификаторы. Их применение обусловлено приданием различных свойств вяжущего и усилением эффекта взаимодействия компонентов. С целью снижения водовязущего отношения (В/В) и повышения эффективности КВ, использовался суперпластификатор на основе поликарбоксилатного эфир-полимера – Glenium-51. Применение данной добавки обусловлено доступностью и высокой пластифицирующей способностью.

Таким образом установлено, что применяемые полиминеральные компоненты композиционного вяжущего обладают хорошими качественными характеристиками, заключающимися в проявлении пуццолановой активности, адсорбционной способности морфологии поверхности частичек минералов и низким значением pH водных вытяжек относительно портландцемента.

3.3.3 Технология получения композиционных вяжущих

В настоящее время композиционные вяжущие нового поколения изготавливают путем совместного помола основного гидравлического вяжущего и минеральных добавок. Это позволяет исключить процесс сушки, требующих дополнительных затрат на энергоносители. Эффективность такого способа доказана многочисленными исследованиями. В связи с чем, дальнейшие исследования были направлены на разработку составов полиминеральных композиционных вяжущих и определение оптимальной дозировки основных компонентов.

Оптимизация составов КВ осуществлялась с применением математического метода планирования эксперимента. В качестве варьированных факторов выступало содержание отходов ММС в составе композиционного вяжущего (15, 30, 45 % от массы цемента) и содержание опоковидного мергеля, используемого в качестве минерального модификатора (ММ) (2, 3, 4 % от массы КВ) (таблицы 3.7, 3.8). Выбор уровней варьирования КВ осуществлялся исходя из результатов предварительных исследований с минеральными компонентами. Выходным параметром служил предел прочности при сжатии. В качестве контрольных образцов выступал чистый портландцемент.

Таблица 3.7 – Условия планирования эксперимента

Факторы		Уровни варьирования			Интервал варьирования
Натуральный вид	Кодированный вид	-1	0	+1	
Отходы ММС от массы цемента, %	X_1	15	30	45	15
ММ от массы КВ, %	X_2	2	3	4	1

Получение полиминеральных композиционных вяжущих осуществлялось путем совместного помола портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н и отходов ММС до удельной поверхности $\approx 550 \text{ м}^2/\text{кг}$ в вибрационной мельнице с последующим введением домолотого опоковидного мергеля ($S_{уд} \approx 700 \text{ м}^2/\text{кг}$), используемого в качестве минерального модификатора. Отдельное введение ММ обусловлено

рациональностью приготовления КВ, а выбор значения удельной поверхности – повышением пуццолановой активности с увеличением дисперсности и значительным снижением размолоспособности мергеля при достижении данной Суд.

Таблица 3.8 – Матрица планирования

№ точки плана	Факторы			
	X ₁		X ₂	
1	-1	15	-1	2
2	-1	15	+1	4
3	-1	15	0	3
4	+1	30	-1	2
5	+1	30	+1	4
6	+1	30	0	3
7	0	45	-1	2
8	0	45	+1	4
9	0	45	0	3

Результаты оптимальных составов полиминеральных композиционных вяжущих представлены в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Результаты оптимальных составов КВ

Обозначение	Цемент, % по массе	ММС, % по массе	ММ, %	В/В	Рк., мм	Ср, пл., кг/м ³	Рсж, МПа		
							3 сут	7 сут	28 сут
Контроль	100	-	-	0,51	100	1 960	20,66	26,36	33,08
КВ-1	55	45	2	0,51	100	1 920	14,49	22,02	28,29
КВ-2	70	30	3	0,48	100	2 150	29,79	43,33	53,03
КВ-3	85	15	4	0,46	100	2 190	33,47	48,03	60,28

Совместный помол цемента и отходов ММС в разном процентном соотношении и введение оптимального количества минерального модификатора, позволили выявить влияние состава на предел прочности при сжатии. При испытании на 28 сутки твердения составов КВ-3 и КВ-2, установлено увеличение предела прочности на 82,2 и 60,3 % соответственно, тогда как в составе КВ-1 отмечается сокращение предела прочности на 14,5 %.

В результате совместного помола до равной удельной поверхности, несмотря на разное соотношение компонентов и их твердость, был достигнут практически равный зерновой состав полиминеральных композиционных вяжущих (рисунок 3.11).

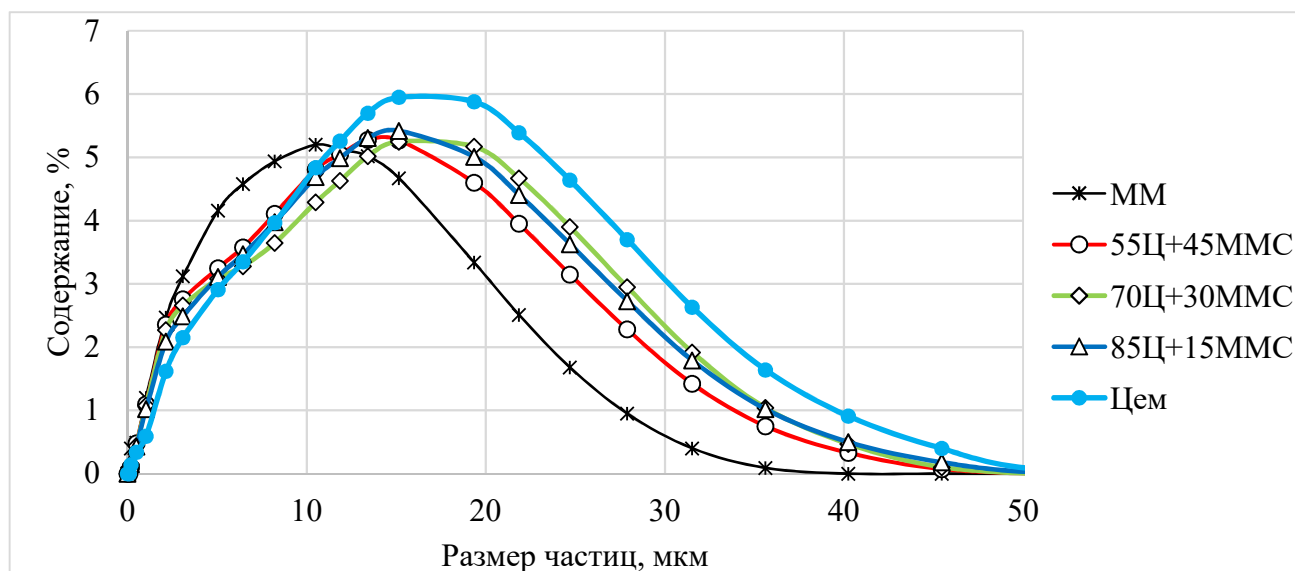


Рисунок 3.11 – Зерновой состав вяжущих систем в диапазоне от 0 до 50 мкм

Для снижения В/В отношения и повышения эффективности полиминеральных композиционных вяжущих и портландцемента, использовался суперпластификатор Glenium-51. Установление оптимального количества, вводимого химического модификатора, производилось путем определения влияния добавки на распыл теста вяжущего с применением усеченного малого конуса (рисунок 3.12).

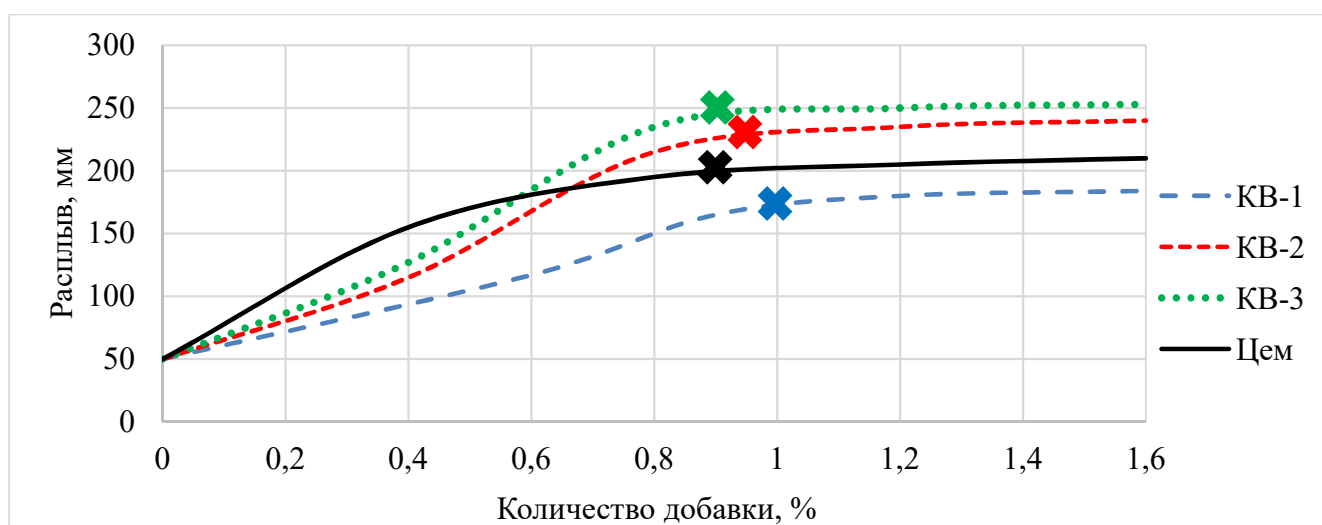


Рисунок 3.12 – Влияние добавки Glenium-51 на реологию вяжущих

Введение химического модификатора в состав КВ, способствовало значительному улучшению характеристик полиминеральных композиционных вяжущих (таблица 3.10).

Таблица 3.10 – Оптимизированные составы разработанных полиминеральных композиционных вяжущих

Обозначение	Цемент, %	ММС, %	Glenium-51, %	ММ, %	В/В	Рк., мм	Ср, пл., кг/м ³	Рсж, МПа		
								3 сут	7 сут	28 сут
Контроль	100	-	0,9	-	0,32	100	2 110	24,08	38,68	49,63
КВ-1	55	45	1	2	0,26	100	2 080	17,29	27,12	34,79
КВ-2	70	30	0,95	3	0,25	100	2 210	41,13	50,19	63,1
КВ-3	85	15	0,9	4	0,24	100	2 270	53,52	64,46	75,64

При подборе оптимальной дозировки суперпластификатора было установлено снижение количества воды затворения, необходимого для достижения заданного расплыва конуса КВ, по сравнению с контрольным составом. Это обусловлено использованием суперпластификатора Glenium-51 на основе поликарбоксилатного эфир-полимера, действие которого усиливается при увеличении дисперсности вяжущей системы. Также выявлено повышение водопотребности композиционных вяжущих с ростом доли отходов ММС в их составе. Это объясняется большей размолоспособностью отходов ММС по сравнению с цементом, в результате чего, при совместном помоле до заданной удельной поверхности, с увеличением содержания ММС растет доля частичек цемента большего размера, что приводит к снижению эффекта диспергирования, вызванного совокупностью действия электростатического и стерического (пространственного) отталкивания при вводе суперпластификатора. В свою очередь, это привело к увеличению предела прочности при сжатии испытываемых образцов на всех периодах испытаний, по сравнению с составами, не содержащими химический модификатор (таблица 3.9).

Прирост прочности разработанных КВ-2 и КВ-3, содержащих суперпластификатор Glenium-51, на 28 суток твердения составил более чем на 25 и 50 %

соответственно, в сравнении с контрольным образцом цементного камня, также содержащим добавку.

С учетом прироста прочности разработанных составов полиминеральных композиционных вяжущих, оптимизированных химическим модификатором, и потерями, вызванными введением САП в цементную систему, эффективность применения KB-2 и KB-3, за счет компенсации прочности, в сочетании с САП модификации ВЗ (<200 мкм) составляет 14 и 39 % соответственно, в сочетании с САП модификации FLOSET 129XB4N (<200 мкм) – KB-2 полностью компенсирует прочностью, тогда как KB-3 на 30 % превосходит недостающую разницу.

Таким образом, были разработаны составы полиминеральных композиционных вяжущих путем совместного помола портландцемента ЦЕМ I 42,5 Н и отходов ММС с последующим введением домолотого опоковидного мергеля, используемого в качестве минерального модификатора, и оптимизацией за счет химического модификатора (Glenium-51), а также выявлены их физико-механические свойства.

Дальнейшие исследования направлены на изучение характера дефектности структуры гидратированного полиминерального композиционного вяжущего и объяснение выявленных эффектов.

3.4 Характер дефектности структуры гидратированных полиминеральных композиционных вяжущих

Для выявления характера дефектности структуры гидратированного полиминерального композиционного вяжущего и наличия усадочных деформаций, с использованием растрового электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU была изучена микроструктура образцов гидратированного KB-3 на 7 и 28 сутки твердения и проведен сравнительный анализ с контрольными образцами.

С этой целью были заформованы партии образцов-балочек (70×10×10 мм) составов вяжущих KB-3 и контрольных, равного расплыва конуса ($R_k = 100$ мм) (см. таблицу 3.10), хранившихся в нормальных условиях. Структура затвердевших

вяжущих изучалась по поверхности «идеального» скола, чтобы свести к минимуму дефекты, вызванные механическим разрушением.

При анализе микроструктуры образцов гидратированного КВ-3 на 7 суток твердения, наблюдалось значительное снижение количества образовавшихся микротрещин и их размеров, по сравнению с контрольными образцами цементного камня (рисунок 3.13, б).

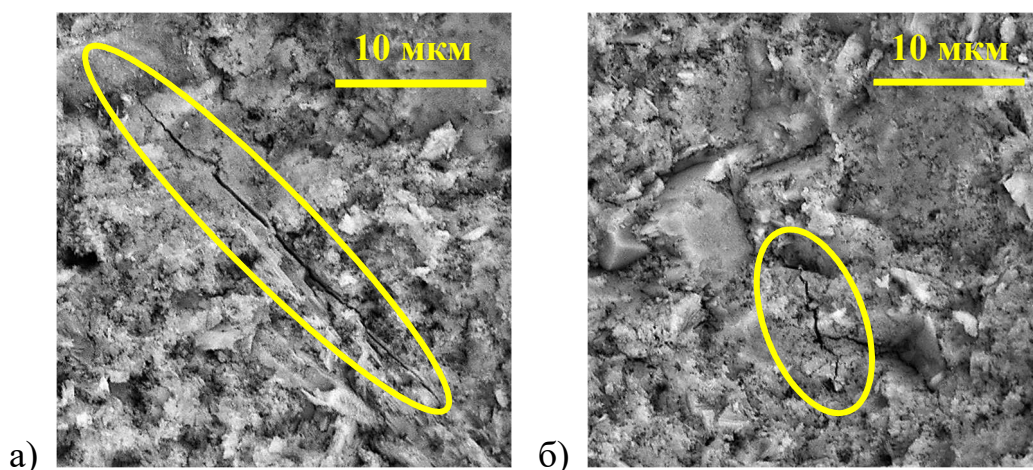


Рисунок 3.13 – Характерные усадочных микротрещины в структуре цементного камня (а) и гидратированного КВ-3 (б) на 7 суток твердения

Микротрещины не имеют ярко выраженной направленности, представляют из себя рваные нити и не пересекаются между собой. Тогда как трещины в цементном камне – ярковыраженные, с острыми краями и строго направлены (рисунок 3.13, а).

Усадочные микротрещины образцов КВ-3 и контрольных, исследуемых на 28 суток твердения, имеют схожий характер с образцами, исследуемых на 7 суток, однако в цементном камне усадочные трещины уже образуют сеть разветвлений (рисунок 3.14, а). При сравнении результатов исследований микроструктуры контрольных образцов, проведенных на 28 суток твердения, с результатами полученными на 7 суток испытаний, выявлено значительное увеличение среднего размера усадочных микротрещин, за период между исследованиями, что свидетельствует о развитии деструктивных процессов, которые, вероятно, вызваны усадкой в цементном камне. Тогда как подобного значительного увеличения среднего размера микротрещин в образцах КВ-3 не наблюдается (рисунок 3.14, б).

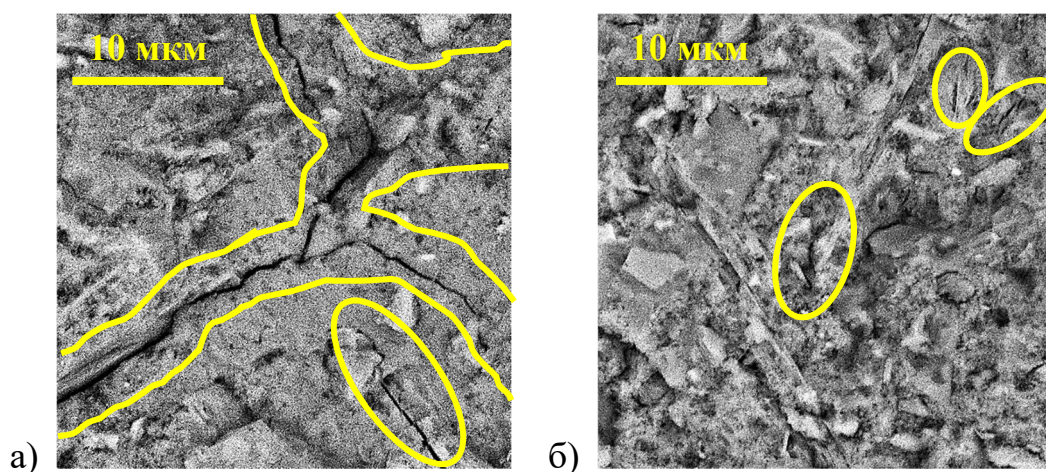


Рисунок 3.14 – Характерные усадочных микротрещины в структуре цементного камня (а) и гидратированного КВ-3 (б) на 28 сутки твердения

Форма усадочных микротрещин и характер развития, главным образом, могут характеризоваться процессами структурообразования и составом гидратированного вяжущего. Большую опасность в структуре цементных матриц представляют трещины в виде игл, так как они выступают в качестве концентраторов напряжений. На «острие» трещины скапливается напряжение, которое разрывает плотные однородные слои структуры. Наибольшая концентрация таких игольчатых трещин наблюдается в структуре контрольного образца цементного камня, возникновение которых, возможно, обусловлено внутренним напряжением в результате гидратации и последующего твердения.

В тоже время, образцы затвердевших полиминеральных композиционных вяжущих не имеют таких опасных игольчатых трещин, так как их образованию и развитию препятствуют, содержащиеся в составе, частички кварца и железосодержащие минералы, которые выступают как армирующие компоненты и являются демпферами внутреннего напряжения при гидратации и твердении КВ. Содержащиеся в структуре в небольшом количестве усадочные микротрещины имеют вид паутинок, как бы огибающих препятствие, что говорит о «гашении» напряжения, сконцентрированного в трещине.

Таким образом, выявленный характер дефектности структуры и ее развитие во времени, позволяют высказать предположение о повышении сопротивляемости

полиминерального композиционного вяжущего к деструктивным процессам, вызванных особенностями твердения.

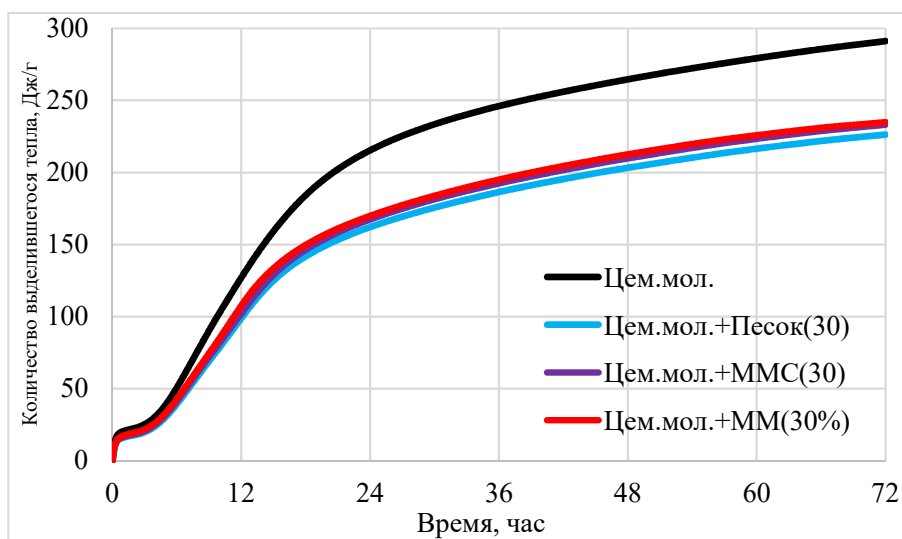
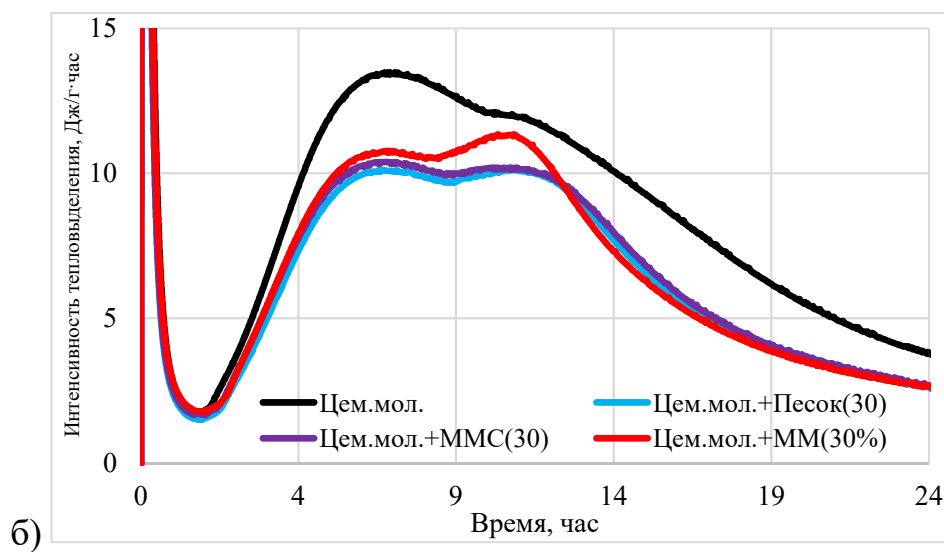
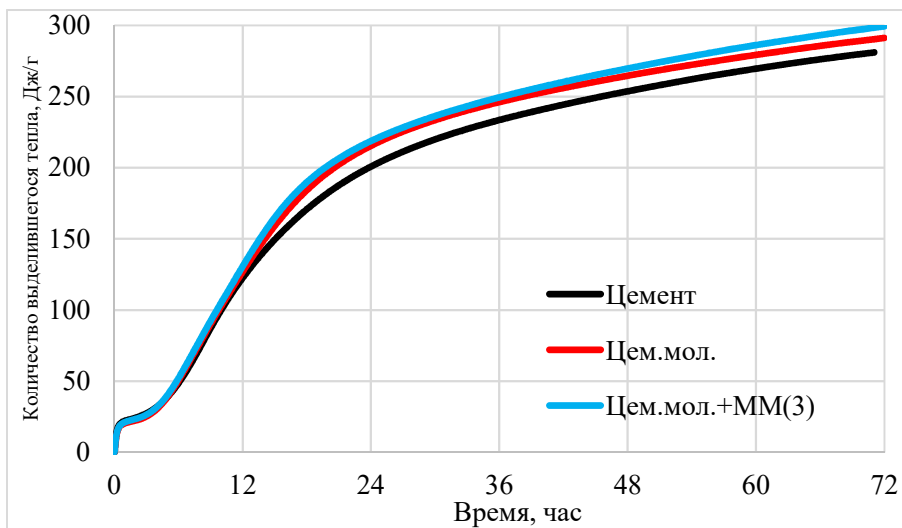
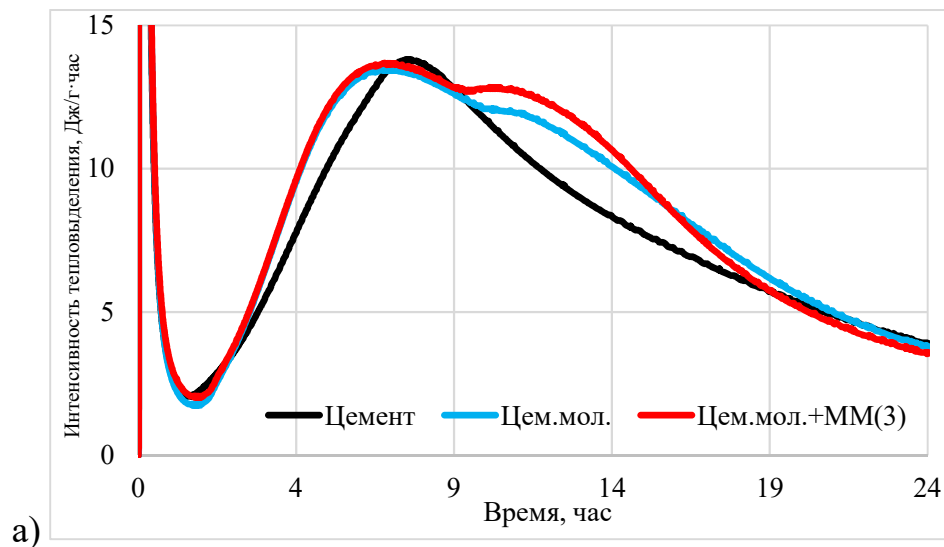
3.5 Особенности гидратации и твердения полиминеральных КВ

С целью обоснования сопротивляемости гидратированного полиминерального композиционного вяжущего деструктивным процессам, дальнейшие исследования были направлены на выявление особенностей гидратации и твердения КВ.

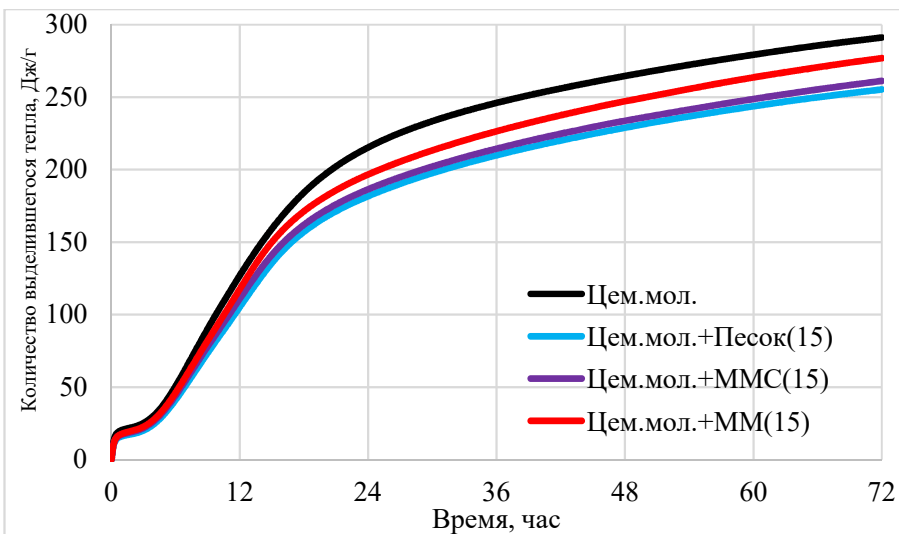
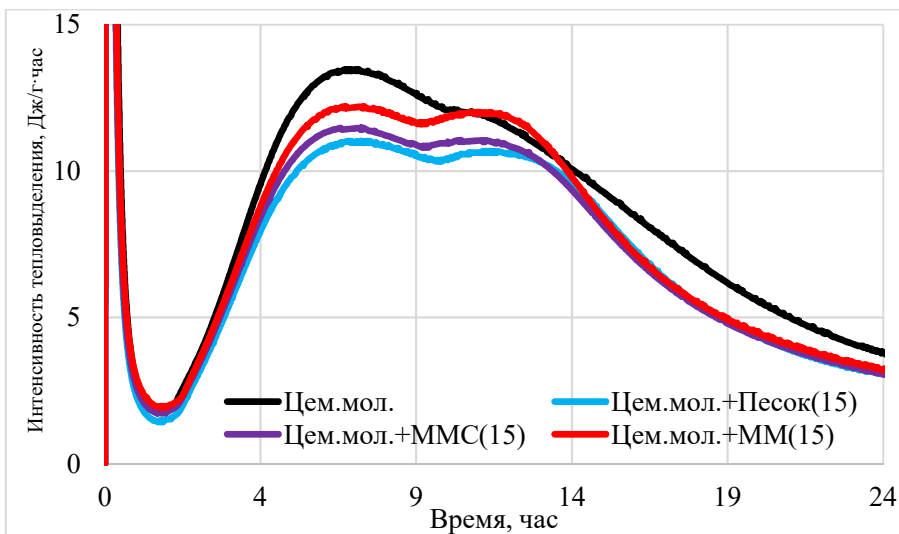
Особенность гидратации и влияние кремнеземсодержащих компонентов, устанавливалось с точки зрения динамики тепловыделения (пяти-стадийный процесс гидратации), выраженной зависимостью $dQ/dt=f(t)$ в начальный период твердения (до 24 часов), и общего количества выделившегося тепла, описывающегося функцией $Q=f(t)$, в течение 72 часов, с использованием дифференциального калориметра. Для возможности проведения сравнительного анализа результатов, применяемые сырьевые материалы имели удельную поверхность равную разработанному КВ ($\approx 550 \text{ м}^2/\text{кг}$). Составы проб и результаты испытаний представлены в таблице 3.11 и на рисунках 3.15 соответственно. Расшифровка полученных термокинетических зависимостей производилась по трудам А.В. Ушера-Маршака [121].

Таблица 3.11 – Составы испытываемых проб

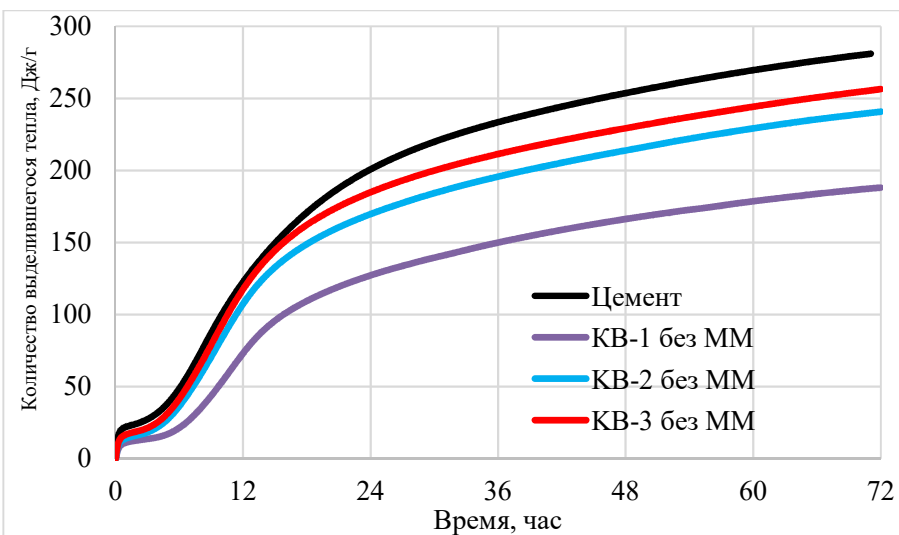
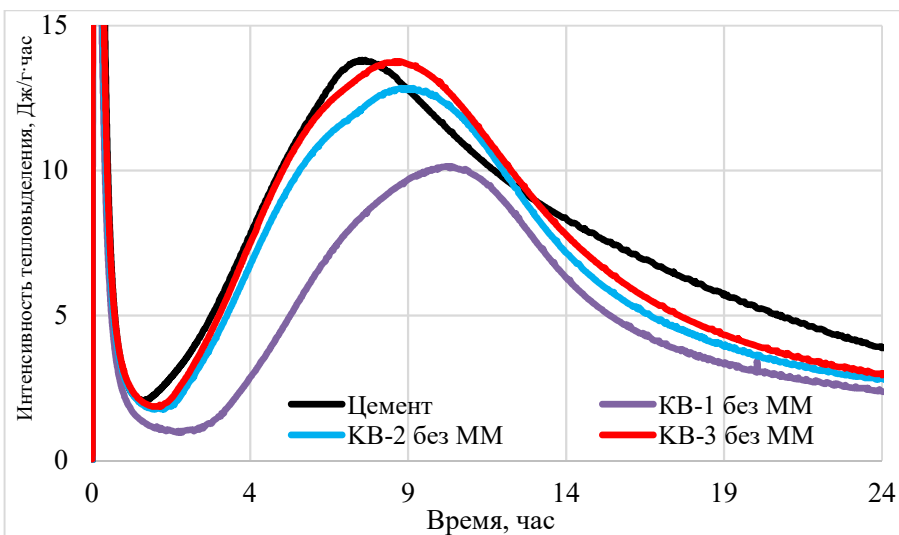
№		Обозначение	Количество ком-ов, %		Расшифровка обозначений
			Цемент	Добавка	
1	1	Цемент	100	-	Товарный цемент
	2	Цем.мол.	100	-	Молотый цемент
	3	Цем.мол.+ММ(3)	97	3	Молотый цемент с добавлением ММ
2	1	Цем.мол.+Песок(30)	70	30	Молотый цемент с добавлением песка
	2	Цем.мол.+ММС(30)	70	30	Молотый цемент с добавлением ММС
	3	Цем.мол.+ММ(30)	70	30	Молотый цемент с добавлением ММ
3	1	Цем.мол.+Песок(15)	85	15	Молотый цемент с добавлением песка
	2	Цем.мол.+ММС(15)	85	15	Молотый цемент с добавлением ММС
	3	Цем.мол.+ММ(15)	85	15	Молотый цемент с добавлением ММ
4	1	КВ-1 без ММ	55	45	Совместный помол цемента и отходов ММС
	2	КВ-2 без ММ	70	30	
	3	КВ-3 без ММ	85	15	
5	1	КВ-1	53	47	Оптимальные составы КВ
	2	КВ-2	67	33	
	3	КВ-3	81	19	



в)



г)



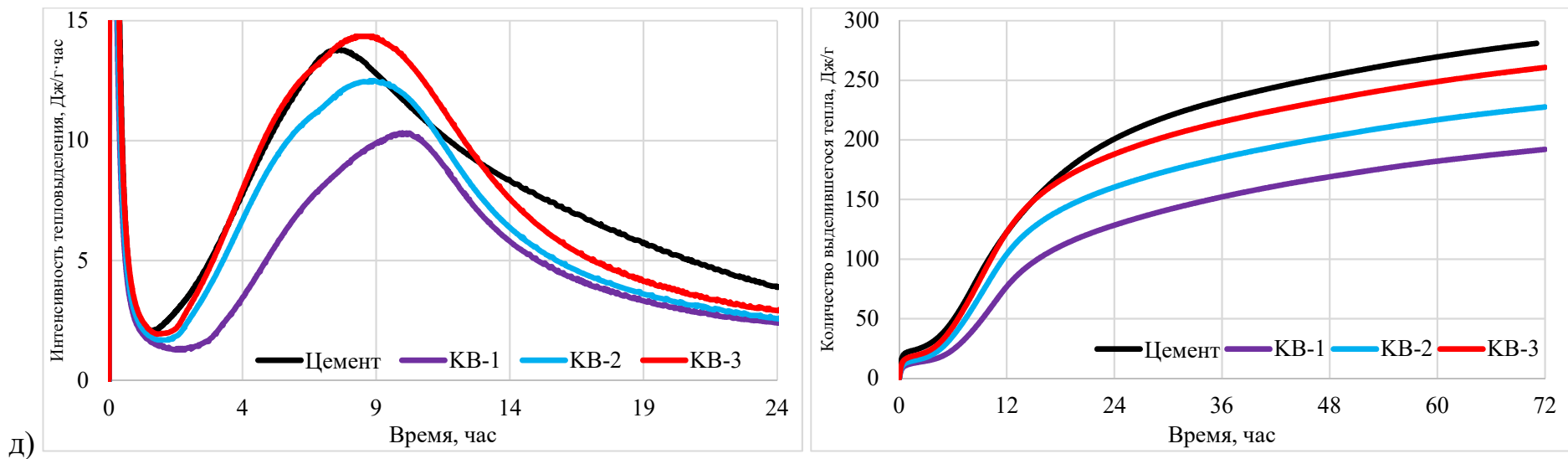


Рисунок 3.15 – Динамика тепловыделений (слева) и общее количество выделившегося тепла (справа) при гидратации:

- а) термокинетические зависимости цемента, молотого цемента, а также с добавлением 3% ММ;
- б) термокинетические зависимости молотого цемента с добавлением 30% добавок;
- в) термокинетические зависимости молотого цемента с добавлением 15% добавок;
- г) термокинетические зависимости композиционных вяжущих без ММ;
- д) термокинетические зависимости оптимизированных композиционных вяжущих

Проведенные исследования позволяют фиксировать длительность индукционного периода, момент начала интенсивного роста гидратной фазы, длительность и полноту гидратации.

Домол цемента приводит к изменению характера гидратации и появлению на кривой динамики тепловыделения второго пика (рисунок 3.15, а, слева). Вероятно, это обусловлено запоздалой гидратацией основных клинкерных минералов, в результате блокирования этtringитом и портландитом, которые интенсивно образуются на стадии ускорения тепловыделения, что проявляется ранним достижением максимума тепловыделения, по сравнению с контрольным товарным цементом. При это, за счет возобновления гидратации C_3S и C_3A , в момент появления второго пика (примерно в 9 часов после контакта в водой), увеличивается общее количество выделившегося тепла (рисунок 3.15, а, справа).

Влияние добавок на гидратацию цемента, в ускоренный и замедленный периоды, характеризуется изменением полноты гидратации и значением констант скорости реакции. При гидратации контрольной пробы бездобавочного цемента, скорость реакции, в эти периоды, имеет постоянное значение. Следовательно, до монотонного затухания скорости тепловыделения, определяющим является процесс накопления новообразований, идущий с постоянной скоростью. Соответственно, вводимые добавки могут активизировать гидратацию в индукционный и ускоренный периоды, а в замедленный – снизить скорость процесса.

При сравнительном анализе термокинетических кривых динамики тепловыделения проб, содержащих бездобавочный домолотый цемент и такой же цемент с добавлением кремнеземсодержащие компонентов, наблюдается проявления пущцолоановой реакции, которая выражается ростом второго пика в период основного экзотермического эффекта и последующим резким затуханием скорости тепловыделения (рисунок 3.15, б, в – слева). При этом, такое проявление тем больше, чем выше активность кремнеземсодержащей добавки по поглощению CaO (см. таблицу 3.5).

Введение в систему молотого цемента минерального модификатора (опоковидного мергеля) приводит к активизированию гидратации в индукционный и

ускоренный периоды, увеличению полноты гидратации основных клинкерных минералов, за счет активного связывания блокирующего портландита, и большей концентрации накопленных новообразований. Это подтверждается увеличением второго пика и последующим резким спадом интенсивности выделяющегося тепла (рисунок 3.15, б, в – слева).

Однако, перепады в интенсивности гидратации могут привести к появлению внутреннего напряжения в структуре полутвердого цементного камня и последующей деформации несформировавшейся гелиевых структур.

Динамика тепловыделения композиционных вяжущих имеет иной характер. Длительность индукционного периода и момент начала интенсивного роста гидратной фазы в пробах КВ характеризуется количеством содержащегося портландцемента. Чем его больше, тем быстрее протекают эти периоды. При этом, механоактивированные совместным помолом частички кремнеземсодержащих компонентов раньше «запускают» пуццолановую реакцию, чем подвергшиеся отдельному помолу компоненты КВ. За счет этого интенсивно образующийся, блокирующий гидратацию C_3S и C_3A , портландит стремительно вступает в реакцию с механоактивированными активными компонентами КВ, в результате чего, не происходит разделения основного экзотермического эффекта на два пика. Это приводит к равномерной кристаллизации новообразований, без возникновения внутреннего напряжения. Характер кривой динамики тепловыделения КВ-3 без ММ (рисунок 3.15, г, слева) демонстрирует наибольшую полноту процесса гидратации композиционного вяжущего.

Оптимизация составов КВ путем введения оптимального количества ММ, приводит к увеличению интенсивности протекания гидратации за счет минеральной составляющей опоковидного мергеля. При этом, наибольший эффект был достигнут оптимальным составом КВ-3 (рисунок 3.15, д, слева).

Основываясь на знаниях о природе происхождения используемых компонентов КВ и их свойствах, дальнейшее нарастание структурной прочности композиционных вяжущих, предположительно, происходит за счет обеспечения последовательного роста новообразований при твердении системы «клинкерные минералы –

опоковидный мергель – кварц различного генезиса – магнетит и гематит – вода – суперпластификатор». Последовательность твердения обусловлена разной интенсивностью и временем взаимодействия минеральной составляющей опокovidного мергеля, полигенетического кварца, магнетита и гематита с продуктами гидратации клинкерных минералов. Регионально-метаморфизованная (халцедоновидная) генерации кварца отходов ММС интенсивно связывают гидроксид кальция, а динамо-метаморфическая и контактово-метаморфическая разновидности выступают подложками и центрами кристаллизации. Участие железосодержащих магнетита и гематита, будет обусловлено адсорбирующим действием, за счет высокого электростатического потенциала, что приведет к созданию подложек для новообразований.

Такая феноменологическая модель⁴ твердения системы полиминерального композиционного вяжущего способна объяснить выявленный характера дефектности структуры гидратированного КВ и ее развитие во времени, позволяющий высказать предположение о повышении сопротивляемости деструктивным процессам, вызванных особенностями твердения.

Таким образом, установлена особенность процесса гидратации и последующего твердения разработанных полиминеральных композиционных вяжущих, заключающаяся в создании условий для более полной гидратации основных клинкерных минералов за счет участия активных минеральных компонентов, входящих в его состав, без скачкообразного тепловыделения в период основной экзотермической реакции, и обеспечения последовательного роста новообразований при твердении, обусловленного разной интенсивностью и временем взаимодействия минеральной составляющей КВ.

⁴ Феноменологическая модель – это модель, охватывающая набор наблюдаемых явлений, которую можно использовать для прогнозирования. При этом не ставится цель объяснить причины, лежащие в основе этого явления или связать их общими законами.

3.6 Микроструктура и свойства новообразований КВ

С целью подтверждения предложенной феноменологической теории, была изучена микроструктура и свойства новообразований гидратированного полиминерального композиционного вяжущего на 28 сутки твердения, с применением расторового электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU и метода энерго-дисперсионной рентгеновской спектроскопии.

Как говорилось ранее, за счет высокого электростатического потенциала, железосодержащие (до 17 % атомарного веса оксида железа) компоненты композиционного вяжущего – магнетит и гематит, притягивают гидросиликаты кальция, оказывая адсорбирующее действие и выступая подложками для новообразований. При изучении микроструктуры гидратированного КВ хорошо видно, что железосодержащие компоненты плотно окутаны тонкодисперсными гидросиликатами кальция (рисунок 3.16).

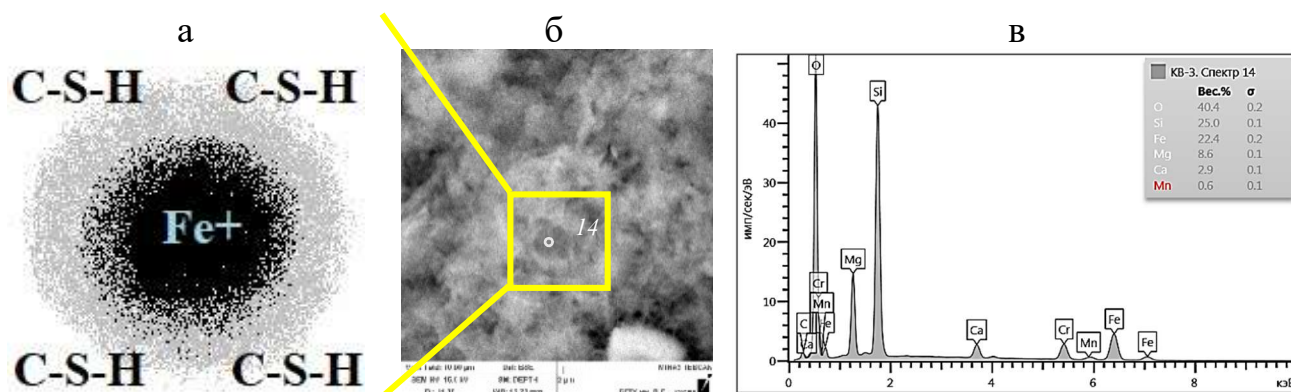


Рисунок 3.16 – Абсорбирующее действие железосодержащих компонентов:

- а – принцип действия, где C-S-H – гидросиликаты, Fe+ – условное обозначение железосодержащего минерала,
- б – фотография микроструктуры,
- в – энерго-дисперсионный спектр железосодержащего минерала

При сравнительном анализе было установлено, что новообразования в цементном камне представлены в виде частокола крупных игольчатых и пластинчатых форм (рисунок 3.17, а), тогда как в полиминеральных композиционных вяжущих новообразования высокодисперсные, плотно заполняют межпоровое

пространство, отличаются особой плотностью и прочностью кластеров «вяжущие – наполнитель» (рисунок 3.17, б, в).

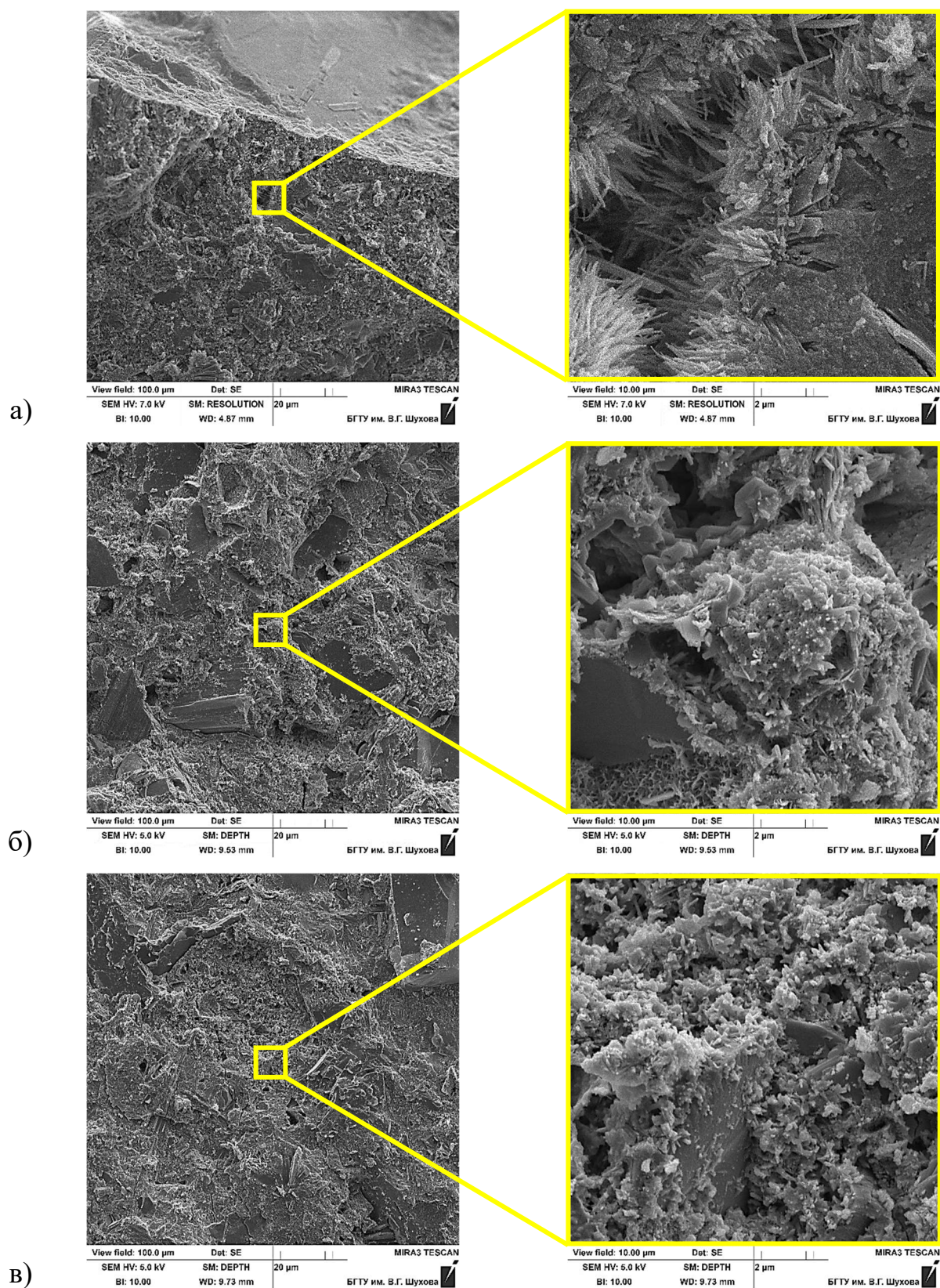


Рисунок 3.17 – Морфология новообразований цементного камня (а), гидратированных КВ-2 (б) и КВ-3 (в)

Таким образом, последовательное твердение полиминеральной системы композиционного вяжущего, способствует оптимизации структуры материала, увеличению плотности и дисперсности новообразований.

3.7 Выводы

1. В период гидратации и твердения, в цементной системе происходит ряд деструктивных процессов, влияющих на формирование структуры материала, что в конечном счете, серьезным образом сказывается на его технических и эксплуатационных свойствах. Ключевым фактором повышения сопротивляемости цементной матрицы может стать воздействие на формирование структуры материала в период гидратации и твердения вяжущего, за счет:

- обеспечения наибольшей полноты гидратации вяжущего, способствующей качественным структурным изменениям;
- формирования высокопрочной структуры в процессе твердения цементного камня;
- уплотнения структуры за счет создания дополнительных центров кристаллизации;
- сокращение воздействия усадочных явлений на первоначальном этапе формирования структуры цементного камня.

2. Установлен характер влияния САП на пластическую усадку в цементном камне, от вида и дисперсности суперабсорбирующих полимеров, заключающийся в снижении отрицательного капиллярного давления посредством водоотдачи САП, что способствует сокращению усадочных деформаций еще незатвердевшей системы, и, как следствие, снижению количества деструктивных процессов на первоначальном этапе формирования структуры, при этом не оказывая химического воздействия на гидратацию до содержания в количестве менее 0,3 % от массы вяжущего. Среди используемых САП наибольший эффект сокращения горизонтальных деформаций был достигнут применением модификации Floset B3 (дисперсности менее 200 мкм), при испытании в нормальных условиях твердения, и составил

20 %, а для модификации Floset 129XB4N (дисперсности менее 200 мкм), в более жарком климате, составил 17 %. Однако, применение суперабсорбирующих полимеров приводит к незначительному снижению прочности.

3. Применение композиционных вяжущих для повышения эффективности текстиль-бетона обуславливается хорошими качественными характеристиками, заключающимися в проявлении пуццолановой активности, адсорбционной способности морфологии поверхности частичек минералов и низким значением pH водных вытяжек, благодаря которым возможно повышение стойкости деструктивным процессам цементной основы и снижение щелочное агрессии бетонной матрицы.

4. Разработанные полиминеральные композиционные вяжущие значительно превышают значение предела прочности при сжатии контрольных образцов цементного камня. Прирост прочности разработанных КВ-2 и КВ-3, оптимизированных суперпластификатором Glenium-51, на 28 сутки твердения составил более чем 25 и 50 % соответственно, в сравнении с контрольным образцом цементного камня, также оптимизированным добавкой. Такой эффект был достигнут за счет снижения количества воды затворения и особенностями структурообразования полиминеральных компонентов и клинкерной основы.

С учетом прироста прочности разработанных оптимизированных составов полиминеральных композиционных вяжущих и потерями, вызванными введением САП в цементную систему, эффективность применения КВ-2 и КВ-3, за счет компенсации прочности, в сочетании с САП модификации ВЗ (дисперсности менее 200 мкм) составляет 14 и 39 % соответственно, в сочетании с САП модификации FLOSET 129XB4N (дисперсности менее 200 мкм) – КВ-2 полностью компенсирует прочностью, тогда как КВ-3 на 30 % превосходит недостающую разницу.

5. Выявлен характер дефектности структуры гидратированного полиминерального композиционного вяжущего, заключающийся в значительном снижении количества образовавшихся усадочных микротрещин, их размеров и разнице форм, по сравнению с цементным камнем. Микротрещины не имеют ярко выраженной направленности и не пересекаются между собой. Тогда как, трещины в цементном камне строго направлены и образуют сеть разветвлений. Выявленный характер

дефектности структуры позволяет высказать предположение о повышении сопротивляемости полиминерального композиционного вяжущего к деструктивным процессам, вызванных особенностями твердения.

6. Установлена особенность процесса гидратации разработанных полиминеральных композиционных вяжущих, заключающаяся в создании условий для более полной гидратации основных клинкерных минералов за счет участия активных минеральных компонентов, входящих в его состав, без скачкообразного тепловыделения в период основной экзотермической реакции.

Предложена феноменологическая модель твердения системы полиминерального композиционного вяжущего «портландцемент – опоковидный мергель – отходы ММС», заключающаяся в последовательном росте новообразований системы «клинкерные минералы – опоковидный мергель – кварц различного генезиса – магнетит – гематит – вода – суперпластификатор». Последовательность твердения обусловлена разной интенсивностью и временем взаимодействия минеральной составляющей мергеля, полигенетического кварца и железосодержащих компонентов с продуктами гидратации клинкерных минералов, что объясняет повышение сопротивляемости КВ к деструктивным процессам, вызванных образованием и развитием микротрещин, за счет входящих в состав КВ минеральных компонентов, создающих армирующий эффект, и участвующих в последовательном росте новообразований, отличающихся высокой дисперсностью и плотностью.

ГЛАВА 4. СВОЙСТВА ТЕКСТИЛЬ-БЕТОНА, В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СОСТАВА

Эксплуатационные и технические свойства текстиль-бетона главным образом зависят от характеристик применяемых материалов и технологических особенностей его производства. Для приготовления текстиль-бетона следует применять мелкозернистый бетон высокого качества, обеспечивающий повышенные значения прочности и плотности структуры, что является ключевым в обеспечении долговечности изделий и сооружений на его основе.

Ввиду того, что текстиль-бетон – это относительно новый композиционный материал, пока еще ни в одной стране мира нет нормативных документов, предписывающих требования по его производству. В связи с этим, основным предписывающим нормативным документом в данной работе является свод правил для армоцементных конструкций (СП 96.13330.2016 "СНиП 2.03.03-85 Армоцементные конструкции").

4.1 Особенности проектирования бетонной смеси на основе полиминеральных КВ для текстиль-бетона

Используемый для производства армоцементных конструкций мелкозернистый бетон качественно отличается от обычных тяжелых бетонов. Это обусловлено повышенным расходом цемента, отсутствием крупного заполнителя и более низким водоцементным отношением. Применяют мелкозернистый бетон составов Ц:П = 1:1,5 – 1:3 марок 300 – 600. Крупность зерен заполнителя выбирают в зависимости от толщины сечения, частоты армирования и способа укладки бетона, но она не должна превышать 5 мм. Как известно, прочность бетона на растяжение на мелком песке выше прочности бетона на крупном песке более чем в 1,5 раза. Но при этом наблюдается относительное снижение прочности на сжатие. Однако, ввиду особенности приготовления текстиль-бетона, для послойной укладки бетона

толщиной слоя менее 5 мм, применение крупных песков исключается. Поэтому было принято решение о использовании кварцевого песка модуля крупности 1,7.

Важным фактором при проектировании состава мелкозернистого бетона, является консистенция бетонной смеси, необходимая для обеспечения требуемой удобоукладываемости. Исходя из двух основных способов производства текстиль-бетона – метод ламинирования (послойная укладка) и литья, и требований по обеспечению удобоукладываемости для армоцементов, для приготовления по методу ламинирования принято значение расплыва конуса равное 185 мм (установленное по EN 1015-3). Для приготовления по методу литья, оценкой поведения смеси в условиях густого армирования является формуемость смеси на проход, под которой подразумевается способность смеси плотно укладываться в данных условиях за период времени (глава 2, раздел 1). Для текстиль-бетона, армированного от трех до пяти слоев сетки и толщиной 2-3 см устанавливалось значение формуемости равное 3-5 с [92].

Получение необходимых консистенций и оптимизация В/В достигалось путем ввода пластифицирующих добавок: Реопласт ЛС-01 для метода ламинирования и Glenium-51 для литья. Оптимальное количество добавки для используемых видов вяжущих устанавливалось путем определения расплыва малого конуса. Влияние добавки Glenium-51 на реологию вяжущих представлено в главе 3, а добавки Реопласт ЛС-01 на рисунке 4.1.

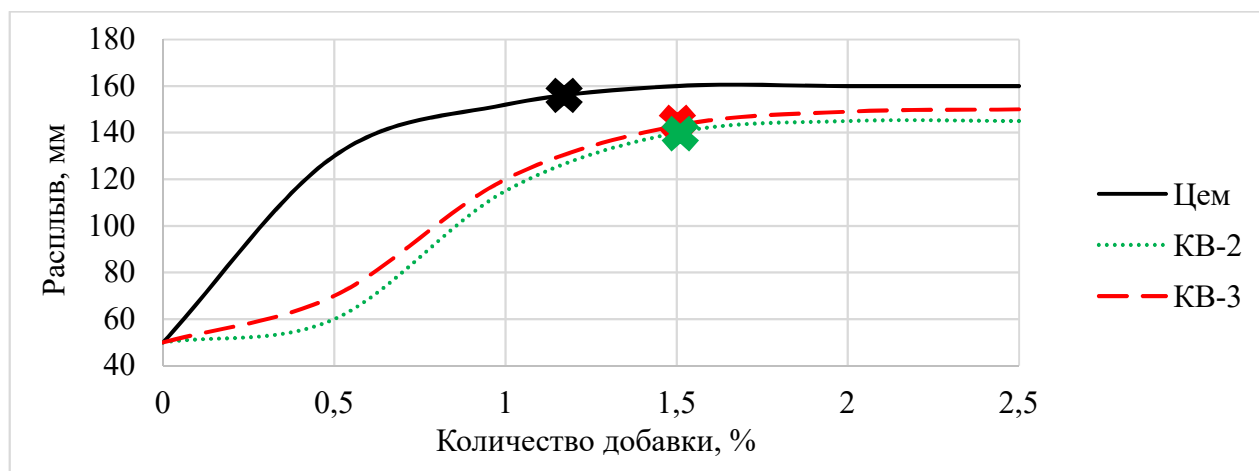


Рисунок 4.1 – Влияние Реопласт ЛС-01 на реологию вяжущих

Долговечность бетона в основном зависит от его морозостойкости и коррозионной устойчивости, которые обеспечиваются прочностью и плотностью структуры. Максимальная плотность структуры достигается путем проектированием оптимального зернового состава. С этой целью, для производства текстиль-бетона, проектирование составов бетонной смеси производилось по расчетно-экспериментальному способу, с применением методики расчета высокоплотных зерновых составов, разработанной профессором А.Н. Хархардиным (глава 2, раздел 2.1). Данная методика использовалась для уплотнения предварительных составов цементно-песчаных смесей, заданных реологических свойств, путем введения тонких наполнителей техногенного происхождения различной дисперсности.

Методика уплотнения дисперсной смеси включает в себя:

- расчет предварительного состава цементно-песчаного бетона, обеспечивающего получение заданной подвижности смеси и заданную прочность. Проверка состава путем пробных затворений и, если необходимо, уточнение;
- вычисление значения плотности упаковки смеси предварительного состава;
- расчет необходимого количества вводимого наполнителя;
- вычисление значения плотности упаковки смеси уплотненного состава;
- последующий расчет и дальнейшее введение более тонкого наполнителя до достижения максимального значения плотности смеси;
- корректировка составов мелкозернистого бетона с учетом требуемых реологических характеристик.

Проектирование цементно-песчаных смесей, производилось расчетно-экспериментальным путем, предложенным Ю.М. Баженовым [79], с целью достижения марки мелкозернистого бетона М450, с учетом установленной активности используемых полиминеральных композиционных вяжущих. Полученные составы представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Составы цементно-песчаных смесей марки М450 на 1 м³, кг

Компонент		Ламинирование			Литье		
		Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Цемент		690	-	-	690	-	-
КВ-2		-	685	-	-	685	-
КВ-3		-	-	588	-	-	588
Песок		1 242	1 233	1 352	1 242	1 233	1 352
Вода		264	234	180	235	212	164
Добавки	ЛС-01	8,28	10,28	8,82	-		
	Glenium-51	-			6,21	6,51	5,29

Для улучшения реологических свойств и придания плотной структуры текстиль-бетона, использовались минеральные наполнители техногенного происхождения – зола-уноса (типа К) и микрокремнезем (глава 2, раздел 2.2).

В результате применение методики расчета высокоплотных зерновых составов, проектируемые составы мелкозернистых бетонов пополнились тонкодисперсными наполнителями на 8-12 % (таблица 4.2), что в среднем повысило значение плотности упаковок на 6-10 % (таблица 4.3), а также, приготовленные смеси приобрели необходимые реологические свойства, что обеспечило удобство в работе с ними. При уплотнении исходных цементно-песчаных смесей соблюдалась равноподвижность консистенций.

Таблица 4.2 – Соотношение компонентов уплотнённых составов

Наименование	Ламинирование						Литье					
	Состав 1		Состав 2		Состав 3		Состав 1		Состав 2		Состав 3	
	% от П+В ⁵	Сод-ие комп.,%	% от П+В ⁵	Сод-ие комп.,%	% от П+В ⁵	Сод-ие комп.,%	% от П+В ⁵	Сод-ие комп.,%	% от П+В ⁵	Сод-ие комп.,%	% от П+В ⁵	Сод-ие комп.,%
Песок	64,29	57,85	64,29	58,1	69,7	62	64,3	58,86	64,29	58,4	69,7	62,7
Вяз-ее	35,71	32,14	35,71	32,3	30,3	27	35,7	32,70	35,71	32,4	30,3	27,3
Зола	+ 8,5	7,65	+ 9,2	8,3	+ 10,1	9	+ 7,05	6,5	+ 8,3	7,5	+ 9,1	8,2
Микрокремнезем	+ 2,63	2,37	+ 1,5	1,4	+ 2,2	2	+ 2,16	1,98	+ 1,8	1,7	+ 2,0	1,8

⁵ П – песок, В – вяжущее

Таблица 4.3 – Значения плотностей упаковки смесей мелкозернистых бетонов

Наименование	Ламинирование			Литье		
	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Контрольный	0,849	0,857	0,861	0,852	0,864	0,872
Уплотненный	0,898	0,914	0,918	0,925	0,946	0,953

С целью определения эффективности использования данной расчетно-экспериментальной методики, определялись значения пористости (воздухосодержания) бетонных смесей по ГОСТ 10181-2014, с применением поромера КП-133. В ходе сравнительного анализа полученных результатов значений воздушных пор уплотненных бетонных смесей и предварительных составов цементно-песчаных смесей, выявлено снижение объема вовлеченного воздуха (таблица 4.4).

Таблица 4.4 – Значения объема воздушных пор предварительных составов цементно-песчаных смесей и уплотненных бетонных смесей, %

Наименование	Ламинирование			Литье		
	Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Контрольный	3,6	3,5	3,5	3,5	3,3	3,2
Уплотненный	3,0	2,8	2,8	2,6	2,4	2,4

Это подтверждает тот факт, что данная расчетно-экспериментальная методика проектирования позволяет создавать «плотные» составы мелкозернистых бетонов, обладающих низким содержанием воздушных пор, что в дальнейшем, способно обеспечить повышение эксплуатационных и технических свойств бетонных изделий.

В результате проектирования по расчетно-экспериментальному способу, с применением методики расчета высокоплотных зерновых составов и экспериментальных поправок, с учетом изменения реологических свойств смесей при вводе наполнителей, были получены уплотненные составы мелкозернистого бетона для приготовления текстиль-бетона по двум основным способам (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Составы уплотнённого мелкозернистого бетона на 1 м³, кг

Наименование		Ламинирование			Литье		
		Состав 1	Состав 2	Состав 3	Состав 1	Состав 2	Состав 3
Песок		1 242	1 233	1 352	1 242	1 233	1 352
Цемент		690	-	-	690	-	-
КВ-2		-	685	-	-	685	-
КВ-3		-	-	588	-	-	588
Зола		164	176	196	138	159	177
Микрокремнезем		51	29	43	42	35	39
Вода		254	230	174	228	206	159
Добавка, кг	ЛС-1	8,28	10,28	8,82	-		
	Glenium-51	-			6,21	6,51	5,29

Результаты физико-механических испытаний образцов-балочек (40×40×160 мм) контрольных цементно-песчаных смесей и уплотненных составов приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты физико-механических испытаний разработанных составов мелкозернистого бетона

Способ приготовления	№ состава		R _{сж} , МПа			R _{изг} , МПа			ρ _{ср} , кг/м ³
			3 сут	7 сут	28 сут	3 сут	7 сут	28 сут	
Ламинирование	Контроль ⁶	1	22,41	34,36	50,52	8,95	12,20	14,86	2 330
		2	22,78	37,18	50,97	9,34	13,11	15,42	2 320
		3	25,16	38,67	53,14	9,89	14,27	16,18	2 330
	Уплотненные	1	18,06	35,93	54,95	9,25	12,87	15,78	2 250
		2	24,53	37,67	54,61	9,86	13,81	16,86	2 250
		3	26,18	39,54	57,08	10,39	14,87	18,18	2 220
Литье	Контроль ⁶	1	34,70	48,46	59,96	10,15	14,60	17,66	2 360
		2	34,78	49,12	60,74	10,94	15,41	18,74	2 350
		3	36,19	50,18	62,49	11,69	16,29	19,20	2 360
	Уплотненные	1	30,04	49,25	70,57	10,35	15,15	18,86	2 300
		2	36,45	50,16	72,64	11,25	16,34	20,81	2 290
		3	37,18	51,28	73,16	12,37	17,38	21,67	2 290

⁶ Неуплотненные составы

Установлено, что введение в цементно-песчаную смесь наполнителей приводит не только к улучшению удобоукладываемости, но и, за счет сокращения пористости, повышению прочностных характеристик. Уплотнение контрольных составов мелкозернистых бетонов, рекомендуемых для приготовления методом ламинирования, с применением методики расчета высокоплотных зерновых составов привело к повышению пределов прочности при сжатии и изгибе на 28 сутки испытаний – на портландцементе на 9 и 6 %, на КВ-2 на 7 и 9 %, на КВ-3 на 7 и 12 % соответственно. Уплотнение контрольных составов мелкозернистых бетонов, рекомендуемых для приготовления методом литья, привело к повышению пределов прочности при сжатии и изгибе – на портландцементе на 18 и 7 %, на КВ-2 на 19 и 11 %, на КВ-3 на 17 и 13 % соответственно.

Таким образом, в ходе проектирования составов бетонных смесей, для производства текстиль-бетона, по расчетно-экспериментальной методики высокоплотных зерновых составов, установлена эффективность выбранного способа проектирования, заключающегося в снижении пористости (воздухосодержания), повышении реологических свойств бетонных смесей и физико-механических характеристики бетона.

4.2 Структура и свойства матрицы текстиль-бетона

Снижение объема воздушных пор бетонной смеси, не всегда является показателем плотности структуры бетона, так как эта величина не учитывает количество пор заполненных водой. В связи с этим, с применением растрового электронного микроскопа высокого разрешения TESCAN MIRA 3 LMU, была изучена структура образцов бетона состава 3, приготовленного методом литья, до уплотнения и после. Результаты сравнительного анализа образцов показали, что в результате отсутствия наполнителей в контрольных цементно-песчаных составах, в слоях склеивающей матрицы затвердевшего бетона между зернами заполнителей наблюдаются поры (рисунок 4.2, а). В свою очередь, уплотненные наполнителями

составы бетона характеризуются высокой плотностью структуры, значительно меньшим наличием пор и их размеров (рисунок 4.2, б).

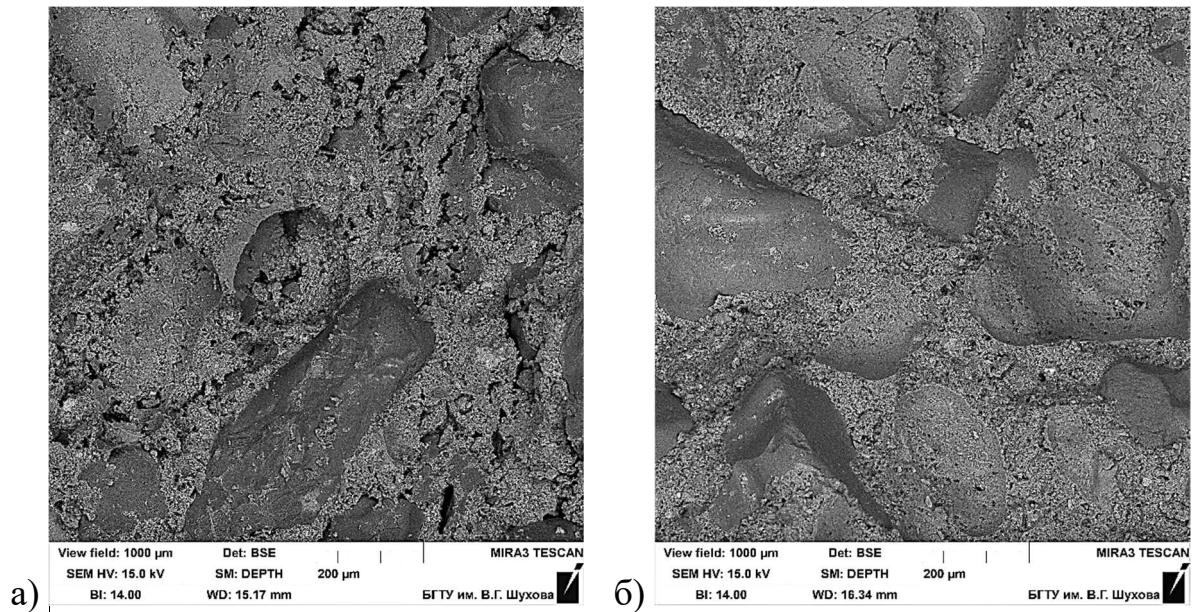


Рисунок 4.2 – Структура мелкозернистого бетона состава 3 (литье):

а) без уплотнения, б) после уплотнения наполнителями

С целью установления возможности применения разработанных полиминеральных композиционных вяжущих для производства текстиль-бетона и применения расчетно-экспериментальной методики высокоплотных зерновых составов, определялись технические свойства приготовленных составов мелкозернистых бетонов на соответствие нормативным требованиям. Так как текстиль-бетон является совершенно новым композиционным материалов в России, то для установления соответствия разработанных составов, использовались требования, предъявляемые СП 96.13330.2016 "СНиП 2.03.03-85 Армоцементные конструкции". Марка по морозостойкости и водонепроницаемости устанавливалась в испытательном центре «БГТУ-Сертис» (приложение А). Результаты соответствия основных физико-механических и технических свойств представлены в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Свойства разработанных составов мелкозернистого бетона

Состав		Класс по прочности на сжатие (группы Б)	Класс прочности на растяжение при изгибе	Класс по средней плотности	Марка по морозостойкости	Марка по водонепроницаемости
Ламинирование	1	B-40	<i>Btb</i> 1,6	D2200	F300	W18
	2	B-40	<i>Btb</i> 1,6	D2200	F300	W18
	3	B-40	<i>Btb</i> 1,6	D2200	F300	W18
Литье	1	B-55	<i>Btb</i> 2	D2200	F400	W20
	2	B-55	<i>Btb</i> 2	D2200	F400	W20
	3	B-55	<i>Btb</i> 2	D2200	F400	W20

Установленные технические свойства разработанных составов мелкозернистых бетонов полностью удовлетворяют требования данных норм и позволяют применять их для приготовления изделий и сооружений из текстиль-бетона, при использовании нормативных документов для армоцементных конструкций.

Помимо физико-механических и технических свойств бетонной основы, долговечность текстиль-бетона также будет зависеть от способности армирующих материалов длительное время сохранять свои свойства в щелочной среде цементной матрицы и обеспечивать совместную работу с бетоном. В связи с этим, было изучено влияния разработанных составов полиминеральных композиционных вяжущих на волокна армирующих сеток путем определения разницы изменения рН водных вытяжек и динамики набора прочности образцов содержащих стекловолокно, по сравнению с контрольными неармированными составами.

Для этого были заформованы партии контрольных образцов-кубиков на основе портландцемента и, рекомендованных для создания текстиль-бетона, композиционных вяжущих составов KB-2 и KB-3, а также партии образцов-кубиков с применением тех же вяжущих, но армированных стекловолокном (таблица 4.8). Так как для создания текстиль-бетона используются армирующие сетки из щелочестойких материалов, для выявления негативного влияния щелочной агрессии в короткий период времени, использовали волокна из стекла типа Е (глава 2,

раздел 2.2). Результаты физико-механических испытаний образцов цементного камня и гидратированных композиционных вяжущих представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Составы и результаты физико-механических испытаний исследуемых образцов

Обозначение	Glenium-51, % по массе	Стеклово- локно, % по массе	В/Ц	$\rho_{\text{ср}}$, кг/м ³	R _{сж} , МПа		
					3 сут	7 сут	28 сут
Цемент	0,9	-	0,32 ⁷	2 110	24,08	38,68	49,63
КВ-2	0,95		0,25 ⁷	2 210	41,13	50,19	63,1
КВ-3	0,9		0,24 ⁷	2 270	53,52	64,46	75,64
Цемент	0,9	1	0,32	2 050	34,3	48,13	54,77
КВ-2	0,95		0,25	2 160	57,27	65,36	78,21
КВ-3	0,9		0,24	2 210	62,68	74,7	86,83

Также определялось значения pH водных вытяжек проб всех испытываемых образцов по методике, описанной в главе 2 (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Значения pH водных вытяжек образцов гидратированных вяжущих

Образцы	Время гидратации, сутки		
	3	7	28
Цемент	11,7	11,69	11,5
КВ-2	11,25	11,2	10,9
КВ-3	11,32	11,3	11,12
Цемент+волокно	11,69	11,58	11,18
КВ-2+волокно	11,25	11,2	10,75
КВ-3+волокно	11,32	11,29	10,94

Разница изменения pH водных вытяжек образцов, содержащих стеклянные волокна и контрольных, является следствием развивающейся коррозии фибры, в результате которой, продукты коррозии, в виде оксидов кремния, разбавляют щелочную систему (рисунок 4.3).

⁷ Обеспечивающее равное значение расплыва малого конуса (100 мм)

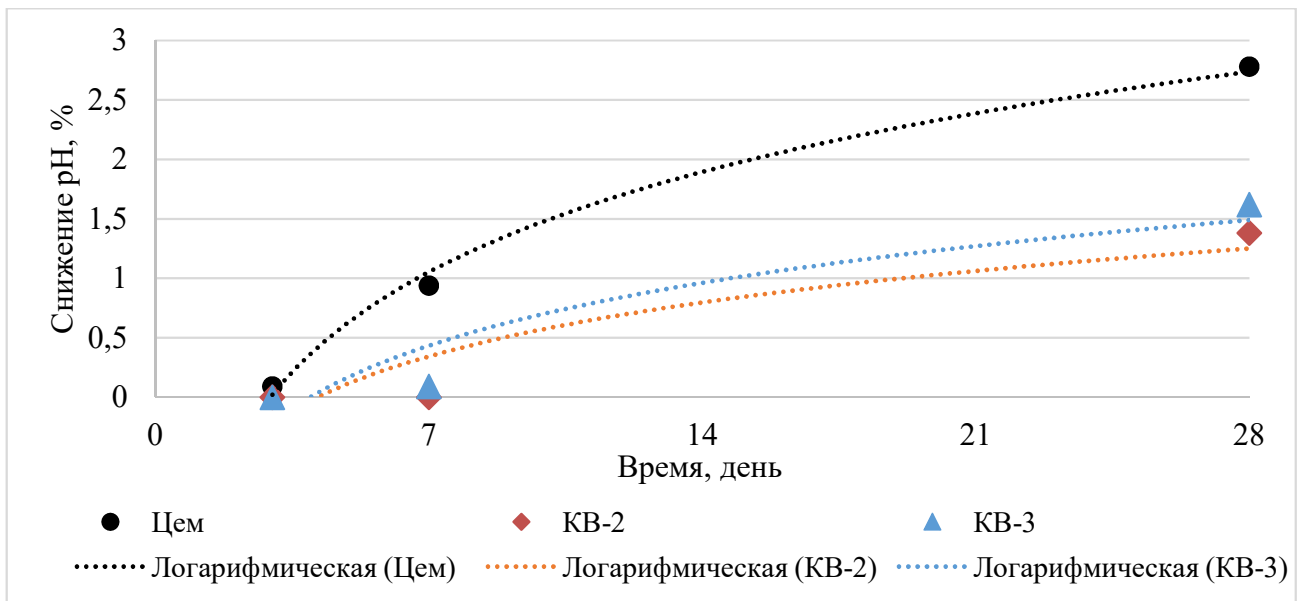


Рисунок 4.3 – Разница изменения pH водных вытяжек, содержащих стекловолокно

При этом, образовавшиеся продукты коррозии негативно сказываются на прочности цементного камня за счет снижения качества зацепления с цементной матрицей. Чем агрессивнее среда, тем быстрее развивается коррозия стекловолокна, и тем стремительней сокращается динамика набора прочности (рисунок 4.4).

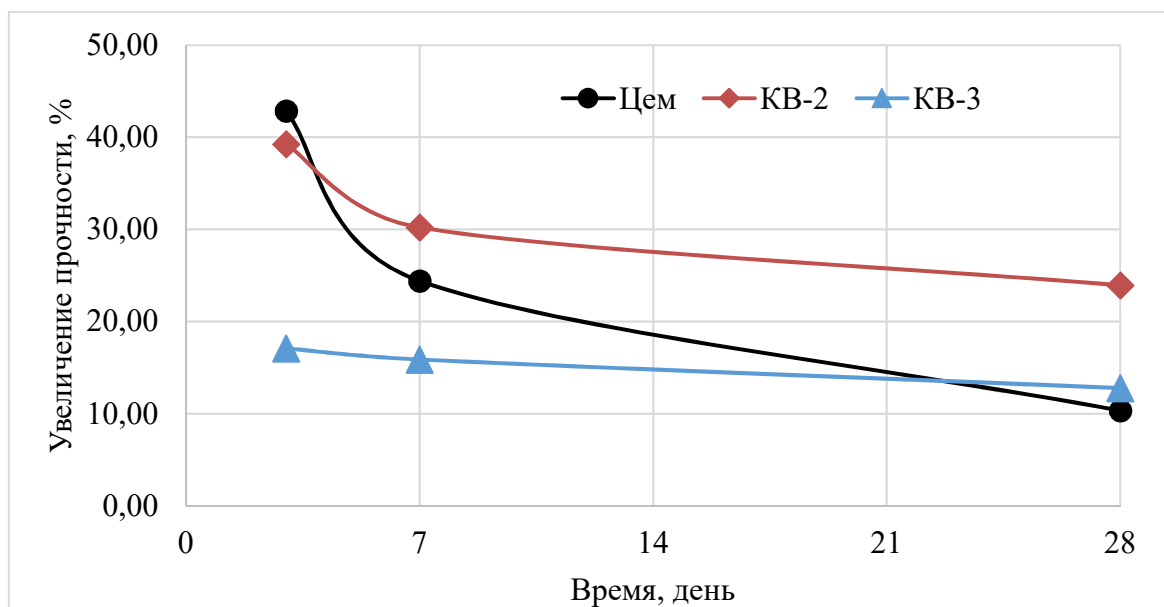
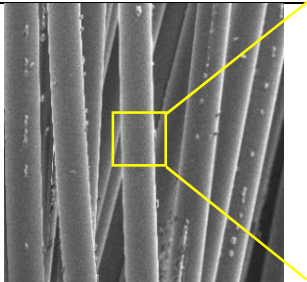
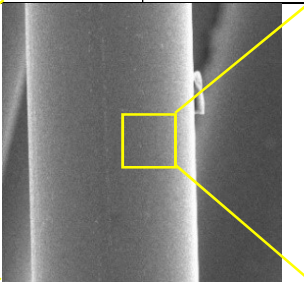
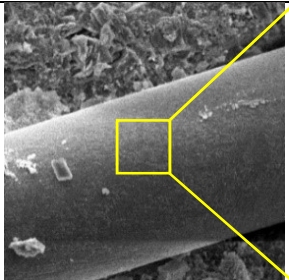
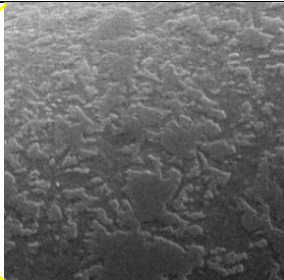
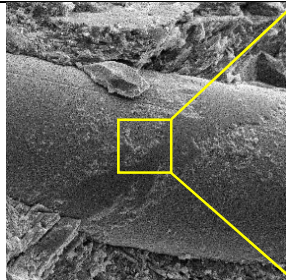
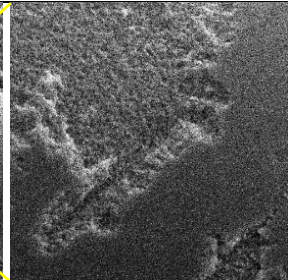
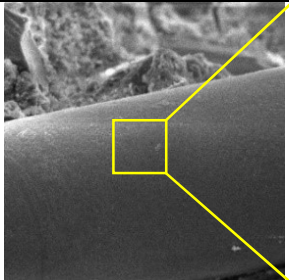
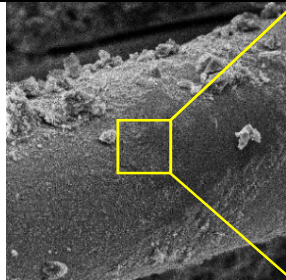
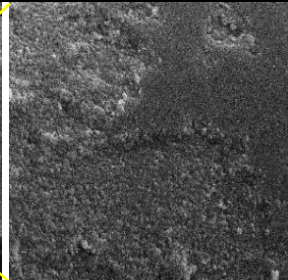
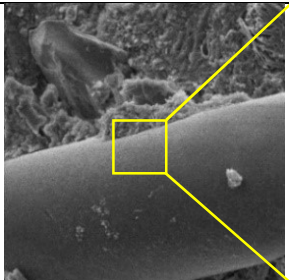
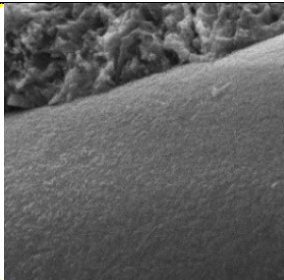
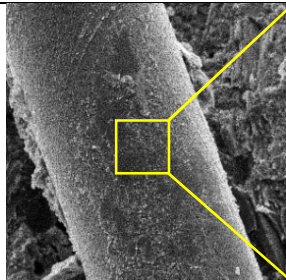
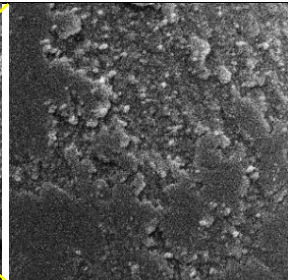


Рисунок 4.4 – Динамика набора прочности образцов, армированных стекловолокном

Разработанные полиминеральные композиционные вяжущие демонстрируют тенденцию снижения щелочной агрессии, что также подтверждается микросъемкой поверхности стекловолокна, на 7 и 28 суток испытаний (таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Характер поверхности стекловолокна, выдержанного в гидратированных вяжущих

Вид вяжущего	Время испытания			
	7 суток		28 суток	
Контроль				
	100 мкм		20 мкм	
				
			4 мкм	
Цемент				
	20 мкм		4 мкм	
				
	20 мкм		4 мкм	
КВ-2				
	20 мкм		4 мкм	
				
	20 мкм		4 мкм	
КВ-3				
	20 мкм		4 мкм	
				
	20 мкм		4 мкм	

В результате щелочной агрессии на поверхности стекловолокна образуются нестойкие соединения адсорбционного типа, у которых впоследствии распадаются

связи Si–O–Si с образованием рыхлой пленки. В результате действия растворов, гидроокиси кремнезема переходят в анионы SiO_4^{-4} , SiO_5^{-2} и SiO_3^{-2} , скопление которых, на поверхности стекловолокна, выявлено методом энерго-дисперсионной рентгеновской спектроскопии (рисунок 4.5).



Рисунок 4.5 – Контактная зона стекловолокна с цементным камнем (а) и ее многослойная карта энерго-дисперсионной спектроскопии (б) на 72 сутки испытаний: 1 – стекловолокно, 2 – продукт коррозии, 3 – гидратированное вяжущее

Таким образом установлено, что использование расчетно-экспериментальной методики высокоплотных зерновых составов с применением техногенных тонкодисперсных наполнителей, для проектирования составов текстиль-бетона заданных характеристик, способствует формированию плотной структуры материала и повышению его физико-механических и технических свойств. За счет применения разработанных полиминеральных композиционных вяжущих КВ-2 и КВ-3 для производства текстиль-бетона, возможно увеличение долговечности композита, посредством снижения щелочной агрессии цементной матрицы на текстильные армирующие материалы

4.3 Усадочные деформации текстиль-бетона

Изучалось влияние вида вяжущего, суперабсорбирующих полимеров и текстильных армирующих сеток на усадочные деформации разработанных

равноподвижных составов текстиль-бетона в ранние сроки твердения. Исходя из результатов предыдущих исследований данной работы, производилось сравнение горизонтальных деформаций дисперсных систем на портландцементе и КВ-3. Использовались САП модификации Floset B3 дисперсности менее 200 мкм, показавшие наилучшие результаты при снижении пластической усадки и наименьшем влиянии на физико-механические характеристики цементного камня. Применялся самый экономически выгодный вид текстильной армирующей сетки из щелочестойкого стекла типа AR, расходом волокон 520 г/м² и размером ячеек 10×10 мм. Исследуемые составы текстиль-бетонов представлены в таблице 4.11.

Таблица 4.11 – Исследуемые составы текстиль-бетонов в расчете на 1 м³, кг

Обозначение Наименование	Ц	Ц+САП	Ц+С	КВ-3	КВ-3+САП	КВ-3+С
Песок	1 242	1 242	1 242	1 352	1 352	1 352
Цемент	690	690	690	-	-	-
КВ-3	-	-	-	588	588	588
Зола	138	138	138	177	177	177
Микрокремнезем	42	42	42	39	39	39
Glenium-51	6,21	6,21	6,21	5,29	5,29	5,29
Вода	228	255,4	228	159	178,1	159
САП (0,15% от м.в.)	-	1,035	-	-	0,882	-
Слоев сетки, шт	-	-	2	-	-	2

Испытания проводились на специальной установке по изучению пластической усадки цементных систем (глава 2) при двух режимах работы климатической камеры, используемых ранее (таблица 4.12).

Таблица 4.12 – Режимы работы климатической камеры

Ре- жим	Температура воз- духа T , °С	Влажность воз- духа ω , %	Скорость ветра $v_{\text{ветр}}$, м/с	Ср. знач. испаряемого кол-ва воды, кг/м ² в·ч
1	20	65	4	0,25
2	35	40	5,5	0,75

В ходе испытаний было установлено, что введение САП в состав текстиль-бетона во всех случаях приводит к сокращению горизонтальных деформаций,

вызванных пластической усадкой. При испытании в нормальных условиях (скорость испарения влаги $0,25 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$) в первые 15 часов после водозатворения, составы текстиль-бетона на портландцементе и КВ-3 имеют практически равные значения горизонтальных деформаций (рисунок 4.6, а). Однако, за счет особенностей гидратации и твердения полиминерального композиционного вяжущего, в последующие сроки испытаний, в текстиль-бетоне наблюдается меньшее количество структурных дефектов.

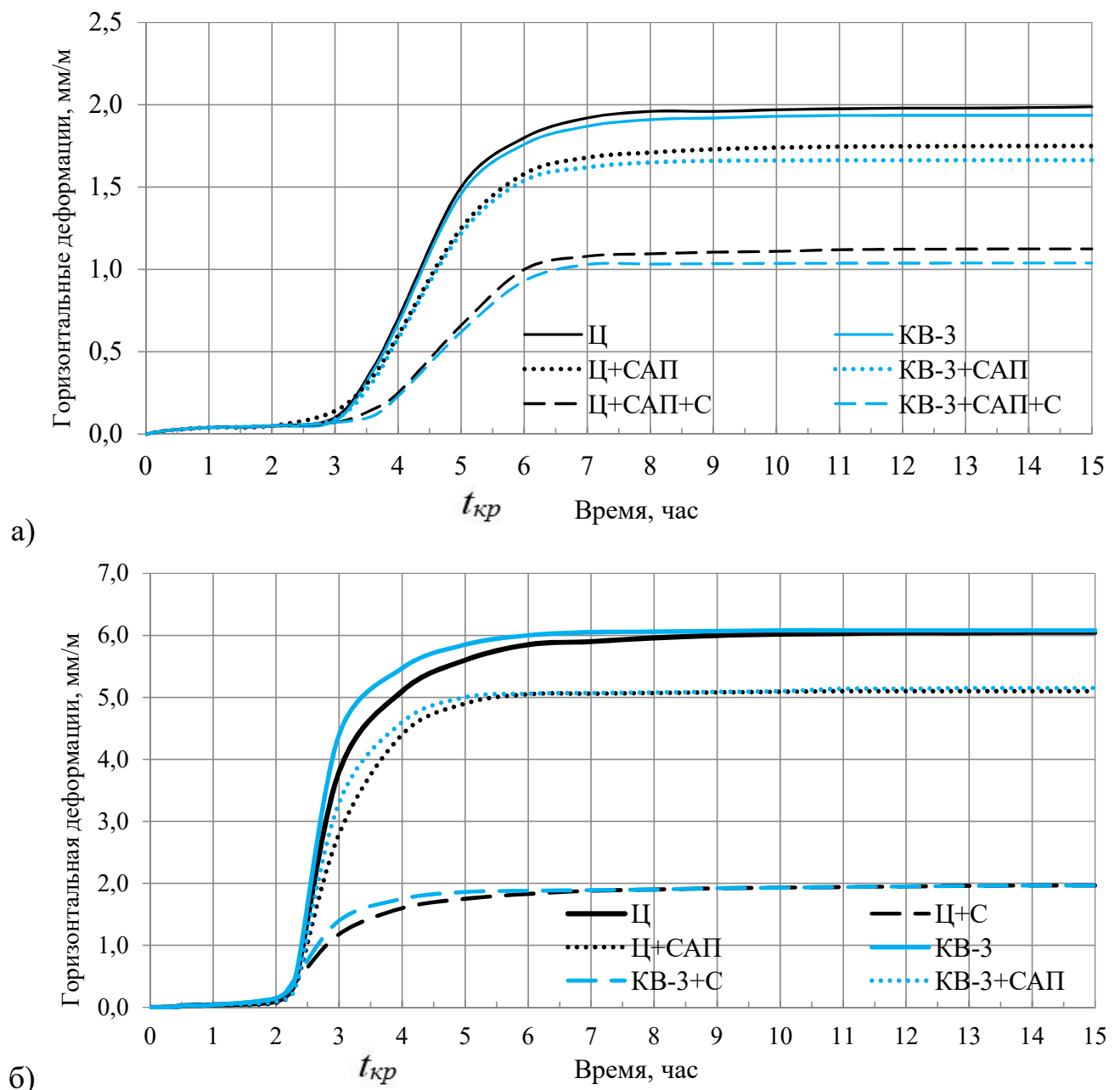


Рисунок 4.6 – Влияние компонентов текстиль-бетона на изменение горизонтальных деформаций, при испытании в климатическом режиме 1 (а) и климатическом режиме 2 (б)

При испытании в жарком климатическом режиме 2 (скорость испарения $0,75 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{ч}$) из-за более интенсивного испарения влаги с поверхности бетонной смеси, объемные деформации в первые часы, вызванные образованием отрицательного капиллярного давления, ввиду отсутствия структурной прочности вяжущего, развиваются стремительней (рисунок 4.6, б). Так как, схватывание портландцемента наступает несколько раньше, чем у композиционного вяжущего, то и деформации текстиль-бетона на портландцементе при достижении 3 часов меньше чем на КВ-3. Однако в дальнейшем гидратация полиминерального композиционного вяжущего усиливается, что приводит к сокращению горизонтальных деформаций.

При сравнении результатов испытаний текстиль-бетона и цементного камня (см. рисунок 3.3) наблюдается снижение горизонтальных деформации более чем в два раза. Это объясняется сдерживающим действием заполнителя и наполнителей при развитии пластической усадки текстиль-бетона. Хорошо подобранное соотношение крупной и мелкой фракции сокращает размер капиллярных пор, предотвращает расслоение бетона и образует каркас, препятствующий развитию объемных деформаций.

Как видно из графиков (рисунок 4.6), огромное значение в сдерживании усадочных деформаций в ранние сроки твердения играет текстильная армирующая сетка. При испытании в нормальных условиях, два слоя армирующих сеток совместно с САП в составе текстиль-бетона на портландцементе и композиционном вяжущем, более чем на 40 %, сокращают горизонтальные деформации, а при испытании в жарком климате – более чем на 60 %.

В результате проведенных испытаний, установлена что введение суперабсорбирующих полимеров в количестве 0,15 % от массы вяжущего приводит к сокращению усадочных деформаций бетонной смеси, вне зависимости от вида вяжущего, в нормальных и жарких условиях твердения на 20 и 16 % соответственно, а текстиль-бетона на 40 и 60 % соответственно. Эффективность применения полиминеральных композиционных вяжущих будет заключаться в формировании структуры текстиль-бетона повышенной сопротивляемости деструктивным процессам, проявляющихся в виде микротрещин, что было исследовано ранее.

4.4 Технологическая схема производства изделий и составы текстиль-бетона

Для внедрения результатов исследований, предложена технологическая схема производства изделий из текстиль-бетона, с учетом технологических особенностей приготовления полиминеральных композиционных вяжущих, и рекомендации по приготовлению.

Технологическая схема производства изделий из текстиль-бетона, на основе полиминеральных композиционных вяжущих с применением суперабсорбирующих полимеров, состоит из трех основных этапов – приготовление КВ и минерального модификатора, приготовление мелкозернистого бетона заданных свойств и изготовление изделий из текстиль-бетона, в зависимости от принятого способа (рисунок 4.7).

Первый этап. Для приготовления, полиминеральных композиционных вяжущих используется портландцемент ЦЕМ I 42,5Н, соответствующий требованиям ГОСТ 31108-2003. Отходы ММС железистых кварцитов Лебединского горно-обогатительного комбината, соответствующие используемому в работе минералогическому составу (глава 2), без содержания грязевых примесей. Опоковидный мергель Хворостянского месторождения Белгородской области. Влажность минеральных компонентов не должна превышать 3 %.

Портландцемент и отходы ММС в принятом соотношении подвергаются совместному помолу в вибрационной мельнице в течение периода времени, необходимого для достижения удельной поверхности смеси равной $550 \text{ м}^2/\text{кг}$. Минеральный модификатор приготавливается путем домола мергеля в вибрационной мельнице до достижения необходимой дисперсности.

Второй этап. Приготовление бетонной смеси осуществляется в соответствии с требованиями соответствующих стандартов и нормативных документов для смесей мелкозернистого бетона. Для достижения равномерной консистенции, рекомендуется применять бетоносмесители принудительного действия (лопастные).

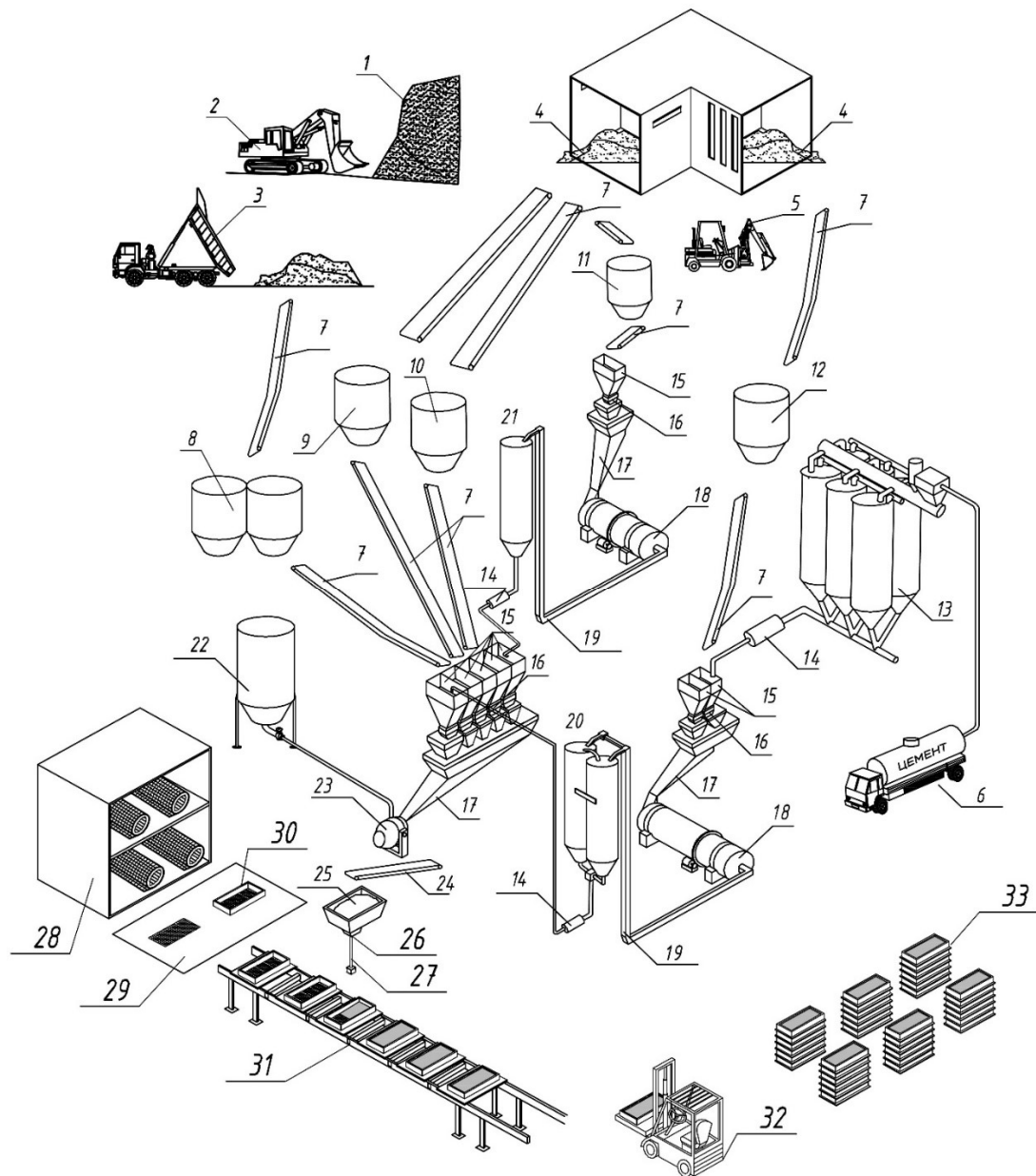


Рисунок 4.7 – Технологическая схема производства изделий из текстиль-бетона:

1 – карьер песка; 2 – экскаватор; 3 – автотранспорт; 4 – склад хранения ММС, золы, микрокремнезема, мергеля; 5 – погрузчик сырья; 6 – цементовоз; 7 – ленточный транспортер; 8 – бункер хранения песка; 9 – бункер хранения золы; 10 – бункер хранения микрокремнезема; 11 – бункер хранения мергеля; 12 – бункер хранения ММС; 13 – бункер хранения цемента; 14 – камерный насос; 15 – сборный бункер; 16 – весовые дозаторы; 17 – приемная воронка; 18 – шаровая мельница; 19 – элеватор; 20 – силос КВ; 21 – силос мергеля; 22 – емкость для воды; 23 – бетоносмеситель; 24 – ленточный питатель; 25 – накопительный бункер; 26 – роторный нагнетатель; 27 – ручной распределитель смеси; 28 – склад текстильной сетки; 29 – пункт разрезки и укладки в опалубку текстильной сетки; 30 – опалубка; 31 – ленточный конвейер; 32 – разгрузчик; 33 – склад хранения отформованных изделий

Рабочий цикл приготовления бетонной смеси состоит из загрузки отдозированных компонентов, их перемешивания и выгрузки готового замеса. Загрузка компонентов бетонной смеси осуществляется в следующей последовательности: заполнитель, вяжущее, наполнители, вода, пластификатор.

Загрузка компонентов бетонной смеси осуществляется при работающем активаторе смесителя, чтобы исключить комкование и сократить время начального смешивания. В соответствие с ГОСТ 7473-94, длительность перемешивания должна составлять не менее 50 с.

Дозирование компонентов бетонной смеси осуществляется весовыми дозаторами с погрешностью $\pm 2\%$ для вяжущего и наполнителей, и $\pm 1\%$ для воды, пластифицирующие добавки и суперабсорбирующие полимеры добавляются вручную.

После окончания перемешивания, через узел разгрузки осуществляется подача готовой смеси на пост формирования. Перед началом формирования изделий, с целью уточнения правильности консистенции смеси, рекомендуется определять ее подвижность.

Третий этап. После подачи готовой бетонной смеси в бункер распределителя смеси, с помощью подвижного ручного распределительного устройства производится дозирование и заполнение форм, в зависимости от способа приготовления текстиль-бетона. Отформованные изделия поступают в склад хранения.

Способ приготовления изделий из текстиль-бетона, в каждом отдельном случае, выбирается в зависимости от конструктивных особенностей. Существует три способа приготовления текстиль-бетона: методом ламинирования (послойной укладкой бетонной смеси), методом литья (заполнением формы подвижным составом бетонной смеси) и торкретирование (послойная кладка бетонной смеси набрызгом с применением торкрет-оборудования).

Приготовление методом ламинирования. Данный метод используется для приготовления текстиль-бетона с применением таких составов бетонных смесей, консистенция которых подходит для послойного, равномерного нанесения бетонной смеси, при которой текстильная сетка, под действием собственного веса, не

тонет в слое смеси. Метод послойной укладки используется для изготовления изделий в опалубке (рисунок 4.8, а), а также при применении текстиль-бетона для усиления и реконструкции бетонных и железобетонных сооружений (рисунок 4.8, б).

Поверх первого слоя бетонной смеси нужной толщины, укладывается текстильная армирующая сетка, которая, с помощью валика, «притапливается» так, чтобы слой сетки находился на одном уровне со слоем бетонной смеси. Второй слой бетонной смеси аккуратно наносится на слой сетки. Последующая укладка текстильной армирующей сетки и бетонной смеси производится аналогичным образом.

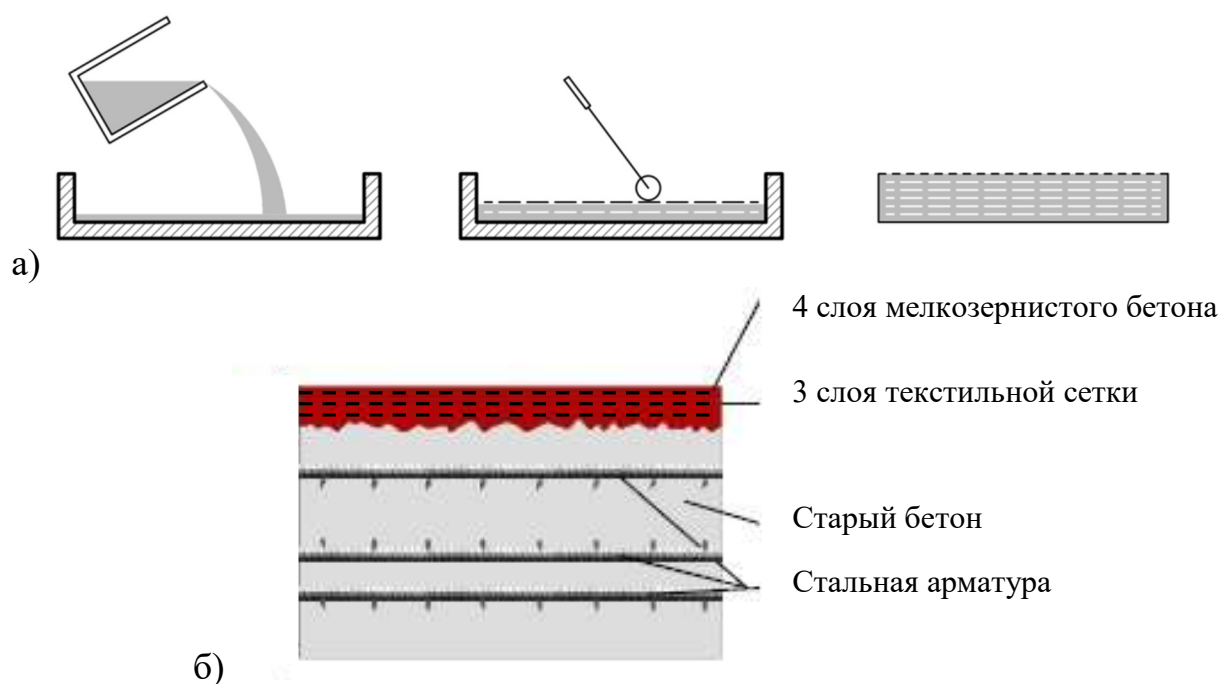


Рисунок 4.8 – Схема приготовления текстиль-бетона послойной укладкой в опалубке (а) и при усилении железобетонных конструкций (б)

Приготовление методом литья. Данный метод используется для приготовления текстиль-бетона с применением подвижных консистенций бетонных смесей, обеспечивающих равномерное заполнение, прохождение смеси между ячейками и слоями сеток, и вытесняющими воздух из опалубки (рисунок 4.9).

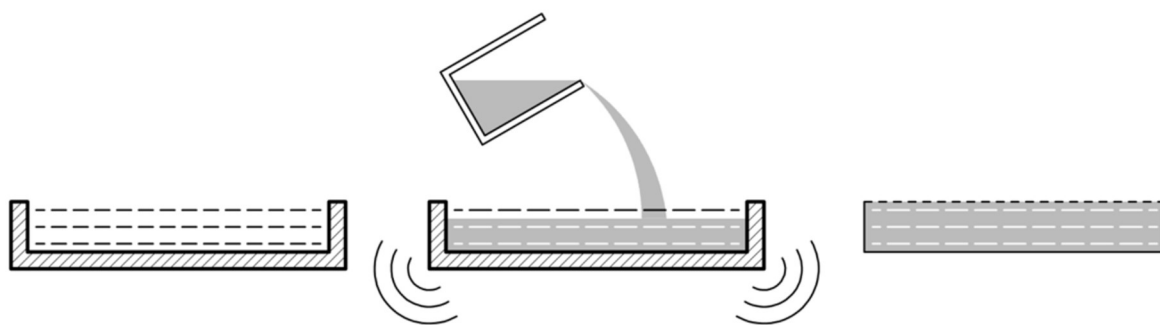


Рисунок 4.9 – Схема приготовления текстиль-бетона методом литья

В форму или опалубку устанавливается армирующий каркас, из системы текстильных сеток, соединенных между собой, и расположенных на заданном расстоянии. Форма заливается бетонной смесью необходимой консистенции вытесняя воздух и максимально заполняя пространство. При использовании жестких консистенций, рекомендуется подвергать смесь вибрированию для равномерной укладки и придания качественного вида наружной поверхности.

Приготовление торкретирования. Данный метод используется для приготовления текстиль-бетона с применением специальных составов бетонных смесей, содержащих комплекс химических модификаторов, придающих необходимую консистенцию, пригодную для использования торкрет-оборудования (рисунок 4.10).

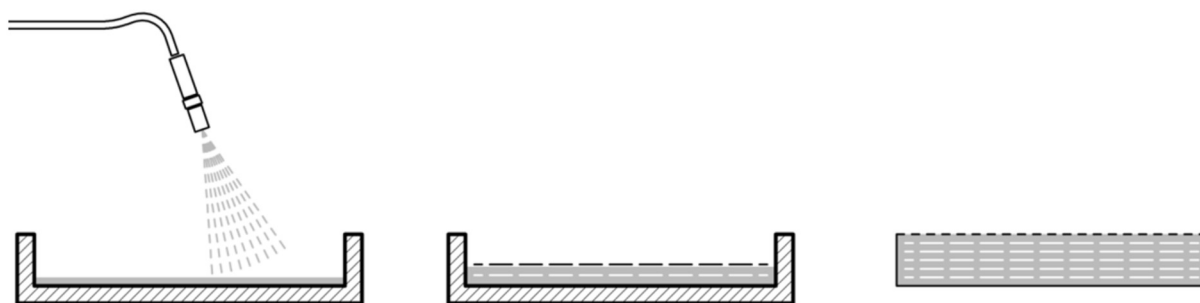


Рисунок 4.10 – Схема приготовления текстиль-бетона методом торкретирования

Слои бетонной смеси наносятся послойно набрызгом с помощью торкрет-оборудования. При приготовлении текстиль-бетона данным методом, возможно использование дополнительных армирующих добавок, например, полипропиленовых, базальтовых и других видов фибр. Применение метода набрызга

целесообразно при проведении работ по усилению и реконструкции зданий и сооружений с использованием текстиль-бетона.

Согласно СНиП 2.03.03-85, армированные тонкостенные бетонные конструкции рекомендуется применять в элементах зданий и сооружений, для которых существенное значение имеют снижение собственного веса, уменьшение раскрытия трещин и обеспечение водонепроницаемости бетона. Толщина конечного изделия, количество слоев и вид армирующей сетки определяются исходя из прочностных расчетов изготавливаемой конструкции.

С учетом особенностей проектирования и установленных закономерностей влияния компонентов на усадочные деформации, была разработана широкая номенклатура составов текстиль-бетонов с применением полиминеральных композиционных вяжущих КВ-2 и КВ-3 и суперабсорбирующих полимеров марки Floset модификации В3 дисперсности менее 200 мкм, для приготовления по двум основным способам (таблицы 4.13 и 4.14).

Марки по морозостойкости и водонепроницаемости устанавливалась в испытательном центре «БГТУ-Сервис» (приложение Б). Все физико-механические и технические свойства разработанных составов текстиль-бетонов соответствуют требованиям предъявляемыми СП 96.13330.2016 "СНиП 2.03.03-85 Армоцементные конструкции".

Таблица 4.13 – Рекомендуемые составы для приготовления текстиль-бетона методом ламинирования и их эксплуатационные свойства

Состав ⁸	Количество компонентов на 1 м ³ , кг							Класс по прочности на сжатие	Класс по прочности на осевое растяжение	Класс по средней плотности	Марка по морозостойкости	Марка по водонепроницаемости
	Песок Мк=1,7	КВ	Зола-уноса (типа К)	Микрокремнезем	Реопласт ЛС-01	Вода	Floset B3 (<200 мкм)					
ТБ-Ла-КВ2-30	1 233	685	176	29	10,28	245	1,028	B30	Bt 1,2	D2100	F200	W16
ТБ-Ла-КВ2-40	1 016	847	136	22	12,71	224	1,271	B40	Bt 1,6	D2200	F300	W18
ТБ-Ла-КВ3-30	1 352	588	196	43	8,82	187	0,882	B30	Bt 1,2	D2100	F200	W16
ТБ-Ла-КВ3-40	1 249	694	170	28	10,41	284	1,041	B40	Bt 1,6	D2200	F300	W18
ТБ-Ла-КВ3-50	982	893	118	19	13,4	324	1,34	B50	Bt 1,6	D2100	F400	W20

Таблица 4.14 – Рекомендуемые составы для приготовления текстиль-бетона методом литья и их эксплуатационные свойства

Состав ⁹	Количество компонентов на 1 м ³ , кг							Класс по прочности на сжатие	Класс по прочности на осевое растяжение	Класс по средней плотности	Марка по морозостойкости	Марка по водонепроницаемости
	Песок Мк=1,7	КВ	Зола-уноса (типа К)	Микрокремнезем	Glenium-51	Вода	Floset B3 (<200 мкм)					
ТБ-Ли-КВ2-45	1 233	685	159	35	6,51	222	1,028	B45	Bt 1,6	D2100	F400	W20
ТБ-Ли-КВ2-55	825	1 031	112	20	7,84	363	1,547	B55	Bt 2	D2300	F500	W22
ТБ-Ли-КВ3-45	1 352	588	177	39	5,29	182	0,882	B45	Bt 1,6	D2100	F400	W20
ТБ-Ли-КВ3-55	1 110	793	143	29	7,14	335	1,19	B55	Bt 2	D2200	F500	W22
ТБ-Ли-КВ3-60	866	962	129	27	8,66	379	1,443	B60	Bt 2	D2300	F500	W22

⁸ «ТБ» – текстиль-бетон, «Ла» – приготовление методом ламинирования, «КВ» – вид разработанного композиционного вяжущего, «30» – класс по прочности на сжатие.

⁹ «ТБ» – текстиль-бетон, «Ли» – приготовление методом литья, «КВ» – вид разработанного композиционного вяжущего, «45» – класс по прочности на сжатие.

4.6 Выводы

1. Для приготовления составов бетонных смесей необходимых реологических и высоких технических свойств использовалась расчетно-экспериментальная методика высокоплотных зерновых составов, разработанная профессором А.Н. Хархардиным, с применением техногенных тонкодисперсных минеральных наполнителей. Эффективность методики была доказана путем сравнительного анализа полученных результатов значений пористости уплотненных бетонных смесей и предварительных составов цементно-песчаных смесей. Кроме этого, наличие техногенных наполнителей таких как зола и микрокремнезем, способствуют приданию требуемых реологических свойств, повышают удобоукладываемость и способствуют сокращению свободной воды.

2. Использование расчетно-экспериментальной методики высокоплотных зерновых составов с применением техногенных тонкодисперсных наполнителей, способствует формированию плотной структуры бетона. Технические свойства разработанных составов мелкозернистых бетонов полностью удовлетворяют требования, предъявляемым СП 96.13330.2016 "СНиП 2.03.03-85 Армоцементные конструкции", что позволяет применять их для приготовления изделий и сооружений из текстиль-бетона. За счет использования разработанных полиминеральных композиционных вяжущих КВ-2 и КВ-3 для производства текстиль-бетона, возможно увеличение долговечности композита, посредством снижения щелочной агрессии цементной матрицы на текстильные армирующие материалы.

3. Установлена что введение суперабсорбирующих полимеров в количестве 0,15 % от массы вяжущего приводит к сокращению усадочных деформаций бетонной смеси, вне зависимости от вида вяжущего, в нормальных и жарких условиях твердения на 20 и 16 % соответственно, а текстиль-бетона на 40 и 60 % соответственно. Эффективность применения полиминеральных композиционных вяжущих будет заключаться в формировании структуры текстиль-бетона повышенной сопротивляемости деструктивным процессам, проявляющихся в виде микротрещин, что было исследовано ранее.

Сдерживающей действием при развитии пластической усадки бетонной смеси оказывают заполнитель и наполнители. Хорошо подобранное соотношение крупной и мелкой фракции сокращает размер капиллярных пор, предотвращает расслоение бетона и образует каркас, препятствующий развитию объемных деформаций.

4. Для внедрения результатов исследований, предложена технологическая схема производства изделий из текстиль-бетона, с учетом технологических особенностей приготовления полиминеральных композиционных вяжущих, и рекомендации по приготовлению. Технологическая схема состоит из трех основных этапов: приготовление композиционных вяжущих и минерального модификатора, приготовление бетонной смеси требуемых реологических свойств и производство изделий из текстиль-бетона в зависимости от принятого способа. Способ приготовления текстиль-бетона, в каждом отдельном случае, устанавливает в зависимости от конструктивных особенностей, применяемого состава бетона и требуемых физико-механических и технических свойств изделий.

ГЛАВА 5. ВНЕДРЕНИЕ И ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП "Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014-2020 годы" (уникальный идентификатор проекта RFMEFI58317X0063), научно-исследовательского гранта DAAD, а также в рамках реализации программы стратегического развития БГТУ им. В.Г. Шухова.

Теоретические положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» профиля «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», а также магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» профилей «Технологии строительных материалов, изделий и конструкций», «Инновации и трансфер технологий» и «Эффективные строительные материалы для 3D аддитивных технологий», что отражено в учебных программах дисциплин «Строительные материалы и изделия», «Технологии нового поколения» и «Эффективные строительные композиты для 3D аддитивных технологий».

5.1 Разработка нормативных документов

В ходе внедрения результатов научно-исследовательской работы были разработаны, получены и зарегистрированы следующие документы:

- стандарт организации СТО 02066339-001-2018 «Текстиль-бетон повышенной сопротивляемости деструктивным процессам» (приложение В);
- рекомендации по приготовлению текстиль-бетона на основе композиционных вяжущих (приложение Г);
- ноу-хау №20180024 «Текстиль-бетона на композиционном вяжущем» (приложение Д);

- протокол о намерениях внедрения результатов диссертационной работы с ООО «Строительная Компания №1» г. Белгород (приложение Е);
- справка о внедрении результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс (приложение Ж).

5.2 Внедрение при разработке уникальных архитектурных сооружений

Апробация полученных результатов экспериментальных исследований осуществляется в рамках реализации проекта "Геосинтезированная архитектурная среда" на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Применение разработанных составов текстиль-бетонов на основе полиминеральных композиционных вяжущих с добавлением суперабсорбирующих полимеров планируется при возведении «звуковой» перголы (рисунок 5.1).

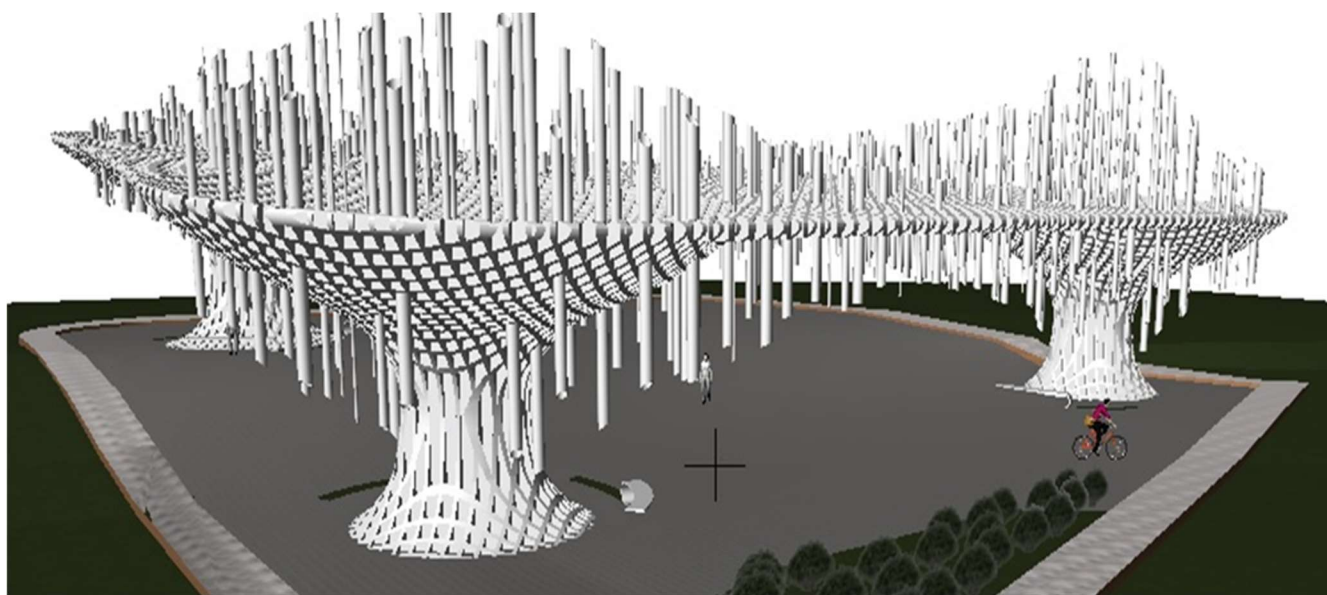


Рисунок 5.1 – Компьютерная модель «звуковой» перголы

Пергола представляет из себя решётчатый светотеневой навес на трёх визуально массивных опорах. Согласно нижеприведенным расчетам, геометрические размеры перголы в плане $41,00 \times 33,00$ м. Форма в плане треугольная, с радиально закруглёнными завершениями. Решетчатая структура имеет высоту от 200 до 600 мм с размерами ячейки 300×300 мм. Условная плоскость навеса перголы имеет

усложненную вогнутую поверхность различной в сечении высоты (в пределах 600 мм).

Целесообразность таких геометрических данных обусловлена возможностью произвольного размещения труб/трубок для создания звуков различных требуемых частот. Оптимальный внешний диаметр труб 300 мм. При этом, имеется возможность расположения труб любого большего диаметра, кратного 300 мм, путем вырезки крестообразного сегмента структуры перголы, для диаметра 600 мм, или вырезки решётчатого сегмента 900×900 мм, для монтажа трубы диаметром 900 мм.

Предполагаемая высота в пролете – от 4 до 5 м. Максимальная высота конструкции – от 5 до 6,6 м. Звуковые трубы металлические.

Концепция технологии создания звуковой перголы заключается в формировании всей структуры с помощью текстиль-бетона.

Численная реализация конструкции. В качестве расчетной схемы принимается пространственная стержневая система пролетом 22 м. Шаг ячеек 300×300 мм. Физическую нелинейность материалов предварительно принималась в виде экспоненциальной зависимости. Используется разработанный состав бетона ТБ-Ла-КВ3-30 В30 ($E_b=27500$ МПа, $R_{b,ser}=15$ МПа). В качестве армирующего материала принимается щелочестойкая текстильная сетка из AR-стекла (120 г/м², 2D, Bewehrung Typ 11 $E_f=72000$ МПа, $R_{f,n}=1450$ МПа, $A_f=7,07$ мм²). Изгибающий момент в сечении (для III снегового района) $M=0,83$ кНм. Минимальное сечение структуры (h) предварительно принято 100×200 мм. В расчете рассматривается работа только пролетной части перголы. Расчет ведется по методике [122] на основе нелинейной деформационной модели бетона (рисунки 5.2 – 5.5), а также принимая пропорциональные зависимость деформирования армирующего материала.

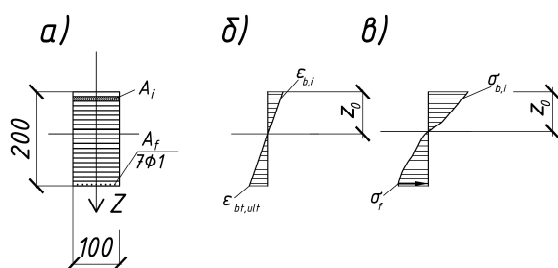


Рисунок 5.2 – К примеру расчета трещиностойкости: а) расчетная схема сечения, б) эпюра относительных деформаций, в) эпюра напряжений

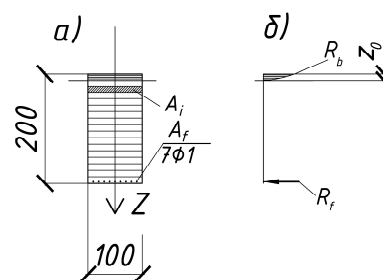


Рисунок 5.3 – К примеру расчета прочности: а) расчетная схема сечения, б) эпюра напряжений

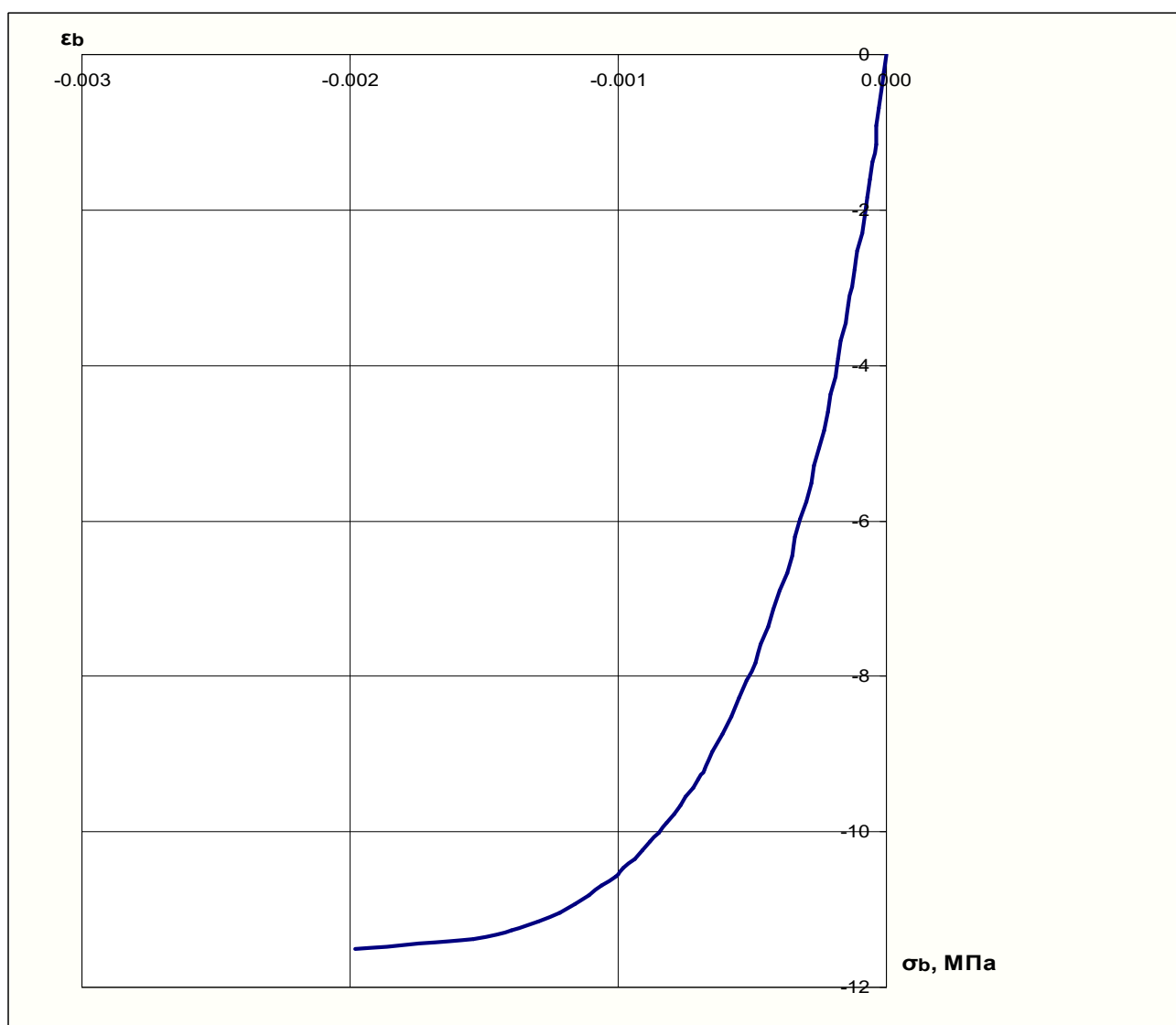


Рисунок 5.4 – Диаграмма деформирования бетона для расчета прочности

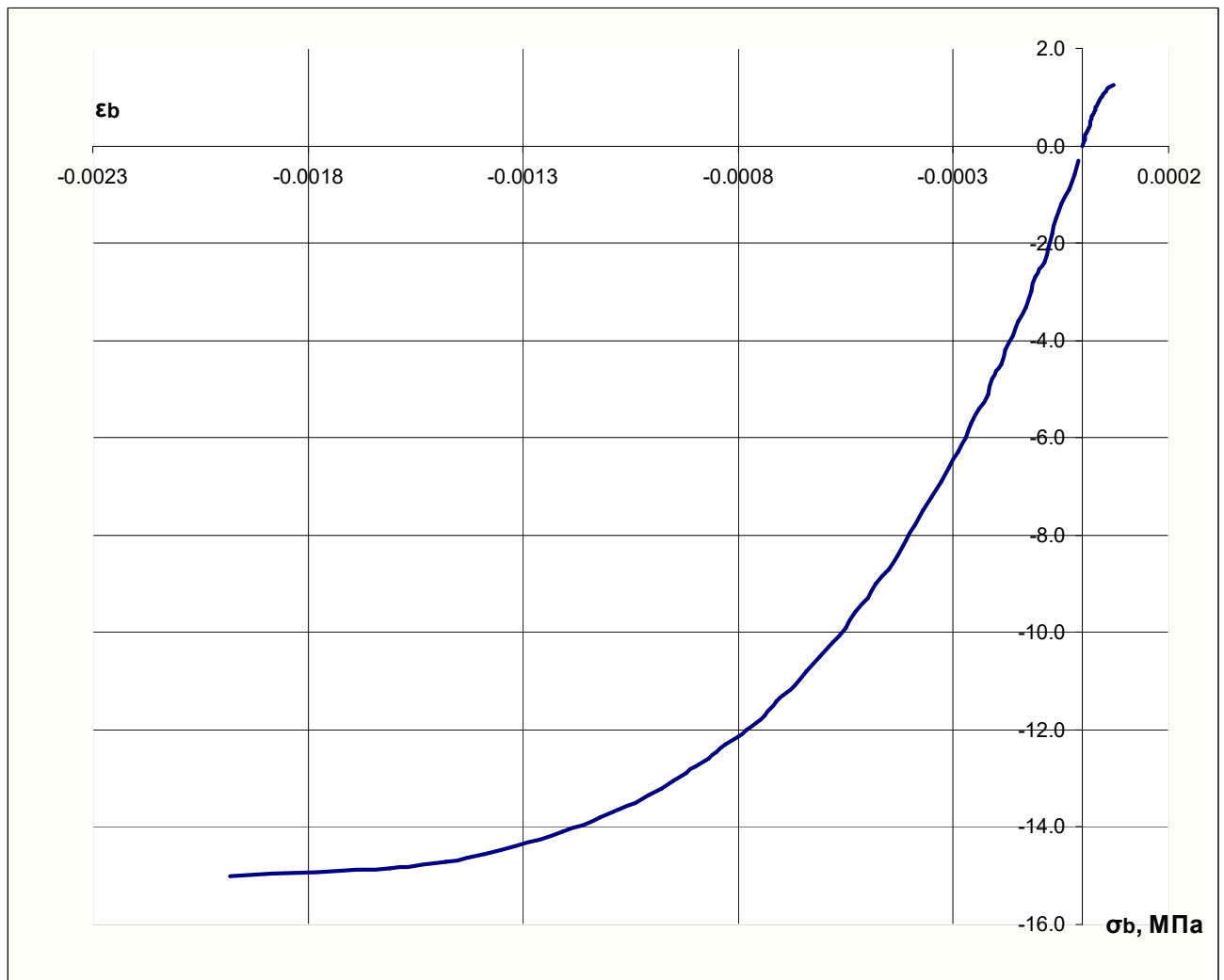


Рисунок 5.5 – Диаграмма деформирования бетона для расчета по второй группе предельных состояний

Результаты расчета прочности и трещиностойкости представлены в таблицах 5.1 и 5.2.

Предельный момент, воспринимаемый сечением, $M_{ult}=1,41 \cdot 10^6$ Нмм=1,41 кНм. Относительная погрешность вычислений составила 7%. Момент трещиностойкости $M_{crc}=1,08 \cdot 10^6$ Нмм=1,08 кНм (вычислен с относительной погрешностью 2 %). Предельная нагрузка, воспринимаемая сечением $M_{crc}=1,08$ кНм $> M=0,83$ кНм. Представленные результаты расчетов полностью обеспечивают необходимую прочность и трещиностойкость.

Таблица 5.1 – Результаты расчета прочности нормального сечения

№ участка	Площадь участка, мм ²	Координата Z _b , мм	Координата Z _f , мм	ϵ_i	E _{b,i} , МПа	σ_{bi} , МПа	E _{f,i} , МПа	σ_{fi} , МПа	1/ ρ , мм ⁻¹	$\epsilon_{b,ult}$	Z ₀ , мм	$\sigma_i \cdot A_i$	$\sigma_i \cdot A_i \cdot Z_i$
1	275	-9.625		-0.00198	5808.1	-11.500						-3163	30439
2	275	-6.875		-0.00057	14929.8	-8.510						-2340	16089
3	275	-4.125		-0.00034	18264.7	-6.210						-1708	7044
4	275	-1.375		-0.00011	23000	-2.530						-696	957
5	1100	5.5		0.00046	0	0.000						0	0
6	1100	16.5		0.00137	0	0.000						0	0
7	1100	27.5		0.00228	0	0.000						0	0
8	1200	39.5		0.00328	0	0.000						0	0
9	1200	51.5		0.00428	0	0.000			8.30E-05	0.00198	11.0	0	0
10	1200	63.5		0.00527	0	0.000						0	0
11	1200	75.5		0.00627	0	0.000						0	0
12	1200	87.5		0.00727	0	0.000						0	0
13	1200	99.5		0.00826	0	0.000						0	0
14	1200	111.5		0.00926	0	0.000						0	0
15	1200	123.5		0.01026	0	0.000						0	0
16	1200	135.5		0.01125	0	0.000						0	0
17	1200	147.5		0.01225	0	0.000						0	0
18	1200	159.5		0.01325	0	0.000						0	0
19	1200	171.5		0.01424	0	0.000						0	0
20	1200	183.5		0.01524	0	0.000						0	0
21	7.07		185.5	0.01438			72000.000	1035.71				7323	1358324
											$\Sigma=$	-584	1412853

Таблица 5.2 – Результаты расчета трещиностойкости нормального сечения

№ участка	Площадь участка, мм ²	Координата Z _b , мм	Координата Z _f , мм	ϵ_i	E _{b,i} , МПа	σ_{bi} , МПа	E _{f,i} , МПа	σ_{fi} , МПа	1/ ρ , мм ⁻¹	$\epsilon_{bt,ult}$	Z ₀ , мм	$\sigma_i \cdot A_i$	$\sigma_i \cdot A_i \cdot Z_i$
1	1000	-90.5		-0.00006	26217	-1.573						-1573	142357
2	1000	-80.5		-0.00006	26217	-1.573						-1573	126627
3	1000	-70.5		-0.00005	26480	-1.324						-1324	93342
4	1000	-60.5		-0.00004	26775	-1.071						-1071	64796

Продолжение таблицы 5.2

№ участка	Площадь участка, мм ²	Координата Z _b , мм	Координата Z _f , мм	ϵ_i	E _{b,i} , МПа	$\sigma_{b,i}$, МПа	E _{f,i} , МПа	$\sigma_{f,i}$, МПа	1/ ρ , мм ⁻¹	$\epsilon_{bt,ult}$	Z ₀ , мм	$\sigma_i \cdot A_i$	$\sigma_i \cdot A_i \cdot Z_i$
5	1000	-50.5		-0.00003	27067	-0.812						-812	41006
6	1000	-40.5		-0.00003	27067	-0.812						-812	32886
7	1000	-30.5		-0.00002	27350	-0.547						-547	16684
8	1000	-20.5		-0.00001	27500	-0.276						-276	5658
9	1000	-10.5		-0.00001	27500	-0.276			6.89E-07	0.00007		-276	2898
10	100	-0.5		0	-	0.000						0	0
11	1900	9.5		0.00001	26900	0.269						511	4855
12	1000	19.5		0.00001	26900	0.269						269	5246
13	1000	29.5		0.00002	26000	0.520						520	15340
14	1000	39.5		0.00003	24867	0.746						746	29467
15	1000	49.5		0.00003	24867	0.746						746	36927
16	1000	59.5		0.00004	23575	0.943						943	56109
17	1000	69.5		0.00005	22080	1.104						1104	76728
18	1000	79.5		0.00005	22080	1.104						1104	87768
19	1000	89.5		0.00006	20383	1.223						1223	109459
20	1000	99.5		0.00007	18486	1.294						1294	128753
21	7.07		101.5	0.00007			72000.000	5.04				36	3617
											$\Sigma=$	232	1080523

По итогам расчета конструктивной прочности одного элемента навеса треугольной формы «звуковой» перголы, для обеспечения требуемой прочности, предлагается использовать следующую конструкцию текстиль-бетона (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Конструкция текстиль-бетона

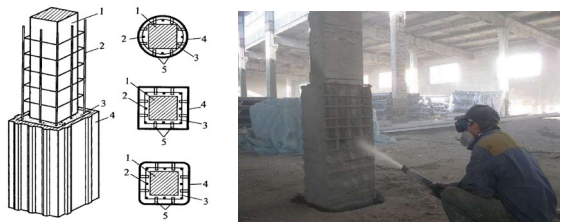
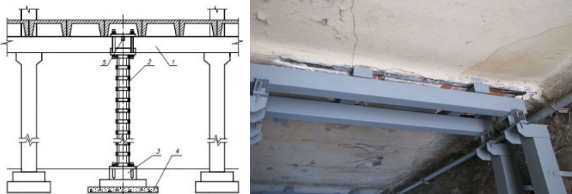
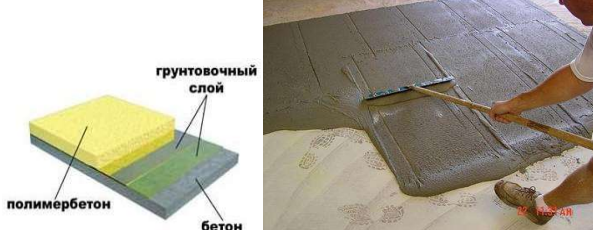
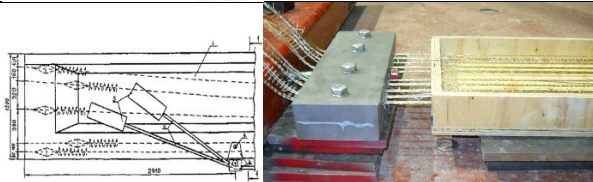
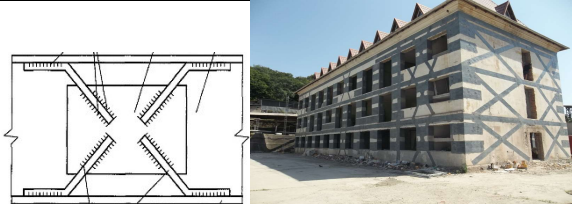
Наименование	Характеристика	Количество слоев	Толщина слоя, мм
Состав бетона ТБ-Ла-КВ3-30	в таблице 4.13 (глава 4)	7	40
Текстильная сетка	AR-стекло, 120 г/м ² , 2D	6	-

5.3 Внедрение при проведении работ по усилению и реконструкции

В рамках выполнения программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова в период 2017–2021 гг. была установлена возможность применения текстиль-бетона в качестве композиционного материала для проведения работ по усилению и реконструкции бетонных сооружений, а также разработана схема коммерциализации малого инновационного предприятия (МИП) для осуществления трансфера технологий в строительную отрасль Белгородской области.

В ходе исследований, были выявлены некоторые недостатки существующих методов усиления и реконструкции бетонных сооружений (таблица 5.6).

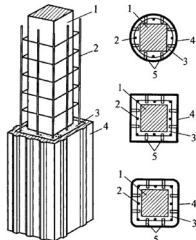
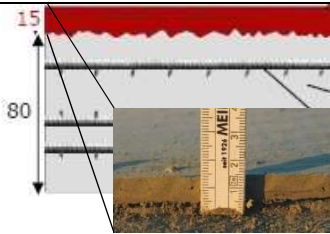
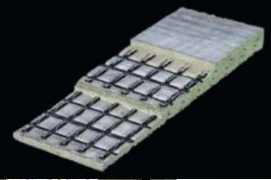
Таблица 5.6 – Недостатки существующих методов усиления

Метод усиления конструкции	Основные недостатки метода	Демонстрация метода
Увеличением площади поперечного сечения с применением железобетона	- значительное увеличение размеров конструкции; - коррозия стальной арматуры	
Изменением конструктивной схемы сооружения	- устройство дополнительных конструкций	
Полимербетонными композиционными материалами	- восприимчивость к температурным колебаниям, ультрафиолетового излучения; - низкая огнестойкость	
С предварительным напряжением арматурных пучков	- коррозия металла наружных прядей; - незащищенность от актов вандализма	
С помощью полимерных пластин и полотен, имеющих сцепление с бетоном	- дороговизна; - дополнительные трудозатраты при отделке; - низкая эстетичность	

Среди применяемых методов усиления конструкций, наиболее распространенными являются – увеличение площади поперечного сечения с применением железобетона, изменение конструктивной схемы сооружения, использование предварительно напряженных арматурных пучков, использование полимерных пластин и полотен, имеющих сцепление с бетоном. Однако, несмотря на популярность, данные методы имеют ряд серьезных недостатков, которые в конечном счет отражаются на качестве проведенных работ, долговечности сооружений, финансовых и трудовых затратах.

Применение текстиль-бетона в качестве основного композиционного материала и технологии его приготовления, имеет ряд преимуществ по сравнению с каждым из традиционных методов, а также способствует комплексному решению задачи по благоустройству городской агломерации (таблица 5.5).

Таблица 5.5 – Достоинства применения текстиль-бетона при усилении и реконструкции

Показатель	Достоинства	Другой метод	Текстиль-бетон
Конструктивная схема	- упрощение конструктивной схемы; - сокращение толщины отделки; - сокращение нагрузки от собственного веса		
Трудовозатраты	- отсутствие опалубки, дополнительных трудовых затрат при отделке; - простота в работе		
Долговечность	- отсутствие коррозии армирующей сетки; - высокопрочный состав бетона		
Эстетичность	- рекомендуется для усиления и реконструкции памятников архитектуры		

Для осуществления трансфера технологий в строительную отрасль Белгородской области, разработан проект малого инновационного предприятия с участием БГТУ им. В.Г. Шухова и схема коммерциализации МИП, в которой задействованы инвестиции из-за рубежа (рисунок 5.7).



1. Средства областного (федерального) бюджета (грант) расходуются в соответствии с таблицей 5.6.

2. Постоянные расходы (таблица 5.7) производятся за счет собственных средств организации (выручка/доход от финансово-хозяйственной деятельности).

3. Выручка от финансово-хозяйственной деятельности в первый год – 300 тыс. руб. (таблица 5.8);

Таблица 5.6 – Единовременные затраты на 1 год

Наименование	Сумма, руб.
Средства гранта	
1. Оборудование	150 000
2. Сырье	100 000
3. Поведение уполномоченными организациями технических испытаний	50 000
Итого средства гранта	300 000
Собственные средства	
1. Составление рекомендаций для области применения материала и технологий	10 000
2. Проведение работ по подготовке комплекта документов для получения охранного документа	5 000
3. Работы по выходу на рынок (реклама, участие в выставках и др.)	20 000
4. Сопровождение проекта:	
- заработная плата (первые 2 квартала)	144 000
- налоги и отчисления	104 976
Итого собственных средств	283 976

Таблица 5.7 – Постоянные затраты на 1 год

Наименование	Сумма, руб.
Коммунальные платежи (электроэнергия, водоснабжение, теплоэнергия, газификация, канализация)	-
Аренда	-
Оплата труда исследователей	288 000
Расходы на рекламу	20 000
Проведение работ по подготовке комплекта документов для получения охранного документа	5 000
Поведение уполномоченными организациями технических испытаний	50 000
Составление рекомендаций для области применения материала и технологий	10 000
Налоги, отчисления всего, в том числе:	104 976
- Единый налог 6% (при УСН)	18 000
- Отчисления во внебюджетные фонды 30,2%	86 976
ИТОГО:	477 976

Примечание: - в связи с тем, что будет создана организация (команда) в рамках 217-ФЗ, переведена на упрощенную систему налогообложения и будет деятельность научные исследования, разработки и трансфер технологий – применяется тариф отчислений во внебюджетные фонды 30,2%;

- организация будет находится на базе БГТУ им. В.Г. Шухова (Гк 138) и не является плательщиком коммунальных платежей и аренды.

Таблица 5.8 – Выручка от финансово-хозяйственной деятельности (в первый год)

Наименование	Сумма, руб.
Выручка от финансово-хозяйственной деятельности	300 000
ИТОГО:	300 000

В результате реализации проекта в первый год планируется рентабельность – 52%. Планируется в течение года создание двух рабочих мест со среднемесячной заработной платой 12 000 рублей. Отчисления в бюджет и внебюджетные фонды в первый год составят 104 976 рублей (таблица 5.9).

Таблица 5.9 – Динамика основных финансово-экономических показателей предпринимательской деятельности на 3 года реализации проекта

Наименование	№ строк	Сумма, руб.		
		1 год	2 год	3 год
Единовременная субсидия (грант)	1	300 000	–	–
Собственные средства	2	283 976	–	–
Выручка от финансово-хозяйственной деятельности	3	300 000	800 000	1 200 000
Оплата труда исследователей и др.	4	288 000	288 000	288 000
Приобретение оборудования	5	150 000		
Приобретение сырья	6	100 000		
Поведение уполномоченными организациями технических испытаний	7	50 000		
Проведение работ по подготовке комплекта документов для получения охранного документа	8	5 000		
Расходы на рекламу	9	20 000		
Составление рекомендаций для области применения материала и технологий	10	10 000		
Налоги, отчисления всего, в том числе: Единый налог при УСН, 6% Отчисления во внебюджетные фонды, 30,2%	11	104 976 18 000 86 976	134 976 48 000 86 976	158 976 72 000 86 976
Итого расходы	12	727 976	422 976	446 976
Прибыль	13	156 000	377 024	753 024
Рентабельность (%)	14	52	47,1	62,8

Планируемый срок окупаемости проекта – менее года.

Всего за три года реализации проекта:

1. Создано три рабочих места;
2. Налоги и отчисления во внебюджетные фонды – 398 928 руб;
3. Достигнута прибыль – 1 286 048 руб;
4. Научная значимость проекта – решена проблема трещинообразования на ранней стадии твердения мелкозернистого бетона, доказана эффективность составов текстиль-бетона;
5. Создана эффективная методики проведения работ по усилению и реконструкции зданий и сооружений с использованием текстиль-бетона на сырье Белгородской области;
6. Достигнут трансфер технологий в регионе и в отрасли в целом.

Разработанный проект малого инновационного предприятия был высоко оценен судейской комиссией во главе с канд. экон. наук, Романович Л.Г. на конкурсе работ МИП при БГТУ им. В.Г. Шухова в 2016 г.

5.4 Технико-экономическое обоснование

Основную экономическую нагрузку при производстве изделий и конструкций из текстиль-бетона будут нести текстильные армирующие материалы. В России на сегодняшний день разработка новых видов армирующих материалов, таких как арматура и сетки из углепластика, или текстильные сетки из щелочестойких материалов, является новой отраслью в строительном материаловедении, поэтому применение зарубежных технологий, а также отсутствие конкуренции на внутреннем рынке, приводят к удорожанию данных материалов. Однако благодаря отсутствию коррозии применяемой арматуры, сокращаются расходы на сырьевые материалы, необходимые для приготовления бетона, увеличивается долговечность композита и снижаются расходы на капитальный ремонт сооружений из текстиль-бетона. С точки зрения перспективы эксплуатации, материал выглядит привлекательным, по сравнению с железобетоном.

Для установления экономической эффективности, рассмотрено использование текстиль-бетона для усиления и реконструкции бетонного сооружения площадью 1 м². Произведен сравнительный анализ финансовых затрат на сырьевые материалы для традиционного метода усиления путем надстройки железобетона и метода послойной укладки текстиль-бетона. Для расчета использовались составы обеспечивающие равную несущую способность.

Из таблицы 5.10 видно, что стоимость компонентов текстиль-бетона для усиления 1 м² сооружения менее чем в два раза выше стоимости компонентов железобетона. Такую разницу в расходах обеспечивает применение текстильной армирующей сетки. Однако, благодаря сетки и конструктивным особенностям, почти в четыре раза снижаются затраты на сырье для бетона, а также нагрузка от собственного веса надстраемого материала. Это может быть решающим фактором в выборе способа усиления при проведении работ реконструкции сооружений, представляющих культурную и историческую ценность.

Таблица 5.10 – Финансовые затраты на усиления 1 м² площади поверхности равной сдерживающей нагрузки

Материалы	Железобетон (Бетон В25, высота слоя 60 мм)			Текстиль-бетон (Состав ТБ-Ла-КВ3-30, высота слоя 15 мм)		
	Расход м-ов на м ² , кг	Рыночная стоимость материалов	Затраты на м ² , руб	Расход м-ов на м ² , кг	Рыночная стоимость материалов	Затраты на м ² , руб
Цемент	22,8	300 руб/50 кг	136,8	7,5	300 руб/50 кг	45
Песок (Мк=1,7)	100,2	88 руб/25 кг	352,71	20,3	88 руб/25 кг	71,5
Пластификатор	0,151	30 руб/кг	4,53	0,005	30 руб/кг	0,15
Вода	10,8	1 руб/л	10,8	2,8	1 руб/л	2,8
САП	-	-	-	0,01	63 руб/кг	0,63
Отходы ММС	-	-	-	1,3	3000 руб/т	3,9
Опок.мергель	-	-	-	0,3	1000 руб/т	0,3
Микрокремнезем	-	-	-	0,7	8000 руб/т	5,8
Зола-уноса	-	-	-	2,9	1200 руб/т	3,48
Затраты на бетон			504,84			133,56
Арм. материалы	10 м (12 кг)	17 руб/м (А-III Ø 8)	170	4 м ² (1,92 кг)	414 руб/м ² (Тур 11)	1656
Итого	146		974,84	37,74		1789,56

Несмотря на то, что проектные затраты выше базовых, можно говорить о техническом преимуществе текстиль-бетона на полиминеральном композиционном вяжущем с добавлением САП по сравнению с рядовым бетоном. Технические характеристики разработанных составов текстиль-бетонов, такие как коррозионная стойкость и долговечность, в среднем на 50 % превышают технические характеристики рядового бетона, что снижает риски проведения капитальных и косметических ремонтов.

5.5 Выводы

1. В ходе внедрения результатов научно-исследовательской работы были разработаны: стандарт организации СТО 02066339-001-2018 «Текстиль-бетон повышенной сопротивляемости деструктивным процессам», рекомендации по приготовлению текстиль-бетона на основе композиционных вяжущих, получено ноу-хау №20180024, заключен протокол о намерениях внедрения результатов диссертационной работы с ООО «Строительная Компания №1». Теоретические положения диссертационной работы используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению 08.03.01 «Строительство».

2. Апробация полученных результатов экспериментальных исследований осуществляется в рамках реализации проекта "Геосинтезированная архитектурная среда" на базе БГТУ им. В.Г. Шухова. Применение разработанных составов текстиль-бетонов на основе полиминеральных композиционных вяжущих с добавлением суперабсорбирующих полимеров планируется при возведении «звуковой» перголы. Для этих целей произведены деформативные расчеты по предельным нагрузкам для изделий из текстиль-бетона и установлена оптимальная конструкция композита.

3. В рамках выполнения программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова в период 2017–2021 гг. была установлена возможность применения текстиль-бетона в качестве композиционного материала для проведения работ по усилению и реконструкции бетонных сооружений. Для осуществления

трансфера технологий в строительную отрасль Белгородской области, разработан проект малого инновационного предприятия с участием БГТУ им. В.Г. Шухова и схема коммерциализации МИП, в которой задействованы инвестиции из-за рубежа.

4. В ходе сравнительного анализа между традиционным методом усиления с помощью железобетона и применения текстиль-бетона в качестве материала для реконструкции было установлено, что расход материалов на 1 м² для текстиль-бетоном менее чем в два раз выше стоимости компонентов железобетона. При этом, основную экономическую нагрузку несут текстильные армирующие материалы. Однако, благодаря сетки и конструктивным особенностям, почти в четыре раза снижаются затраты на сырье для бетона, а также нагрузка от собственного веса надстраемого материала. Это может быть решающим фактором в выборе способа усиления при проведении работ реконструкции сооружений, представляющих культурную и историческую ценность.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность повышения эффективности текстиль-бетона за счет применения суперабсорбирующих полимеров и использования полиминеральных композиционных вяжущих, полученных путем совместного помола портландцемента и отходов ММС и последующим введением опоковидного мергеля, используемого в качестве минерального модификатора.

Расширены представления об усадочных явлениях в цементных системах и предложена общая модель усадочных деформаций.

Установлен характер влияния САП на пластическую усадку в цементном камне, от вида и дисперсности суперабсорбирующих полимеров, заключающийся в снижении отрицательного капиллярного давления посредством водоотдачи САП, что способствует сокращению усадочных деформаций еще незатвердевшей системы, и, как следствие, снижению количества деструктивных процессов на первоначальном этапе формирования структуры. Среди используемых САП наибольший эффект сокращения горизонтальных деформаций был достигнут применением модификации Floset В3 (дисперсности менее 200 мкм), при испытании в нормальных условиях твердения, и составил 20 %, а для модификации Floset 129XB4N (дисперсности менее 200 мкм), в более жарком климате, составил 17 %.

Выявлена особенность гидратации и предложена феноменологическая модель твердения системы полиминерального композиционного вяжущего «портландцемент – опоковидный мергель – отходы ММС», заключающаяся в последовательном росте новообразований системы «клинкерные минералы – опоковидный мергель – кварц различного генезиса – магнетит – гематит – вода – суперпластификатор». Последовательность твердения обусловлена разной интенсивностью и временем взаимодействия минеральной составляющей мергеля, полигенетического кварца и железосодержащих компонентов с продуктами гидратации клинкерных минералов, что объясняет повышение сопротивляемости КВ к деструктивным процессам, вызванных образованием и развитием микротрещин, за счет входящих в

состав КВ минеральных компонентов, создающих армирующий эффект, и участвующих в последовательном росте новообразований, отличающихся высокой дисперсностью и плотностью.

Установлен характер синергетического действия полиминеральных композиционных вяжущих и САП на формирование структуры текстиль-бетона, заключающийся в повышении сопротивляемости бетонной матрицы к деструктивным процессам, вызванных пластической усадкой и трещинообразованием в период схватывания и твердения, а также снижении щелочной агрессии по отношению к стеклянным волокнам армирующие сетки, за счет использования разработанных КВ, что в дальнейшем благоприятно сказывается на долговечности текстиль-бетона.

Разработаны составы для приготовления текстиль-бетона на основе полиминеральных композиционных вяжущих и САП, с использованием расчетно-экспериментальной методики высокоплотных упаковок. Разработанные составы полностью удовлетворяют требованиям, предъявляемым СП 96.13330.2016 "СНиП 2.03.03-85 Армоцементные конструкции": классу по прочности на сжатие В30-60, классу по прочности на осевое растяжение Вt1,2-2, классу по средней плотности D2100-2300, маркам по морозостойкости F200-500 и маркам по водонепроницаемости W16-22. Предложены рекомендации по изготовлению текстиль-бетона и технологическая схема производства изделий на его основе, с учетом технологических особенностей приготовления полиминеральных композиционных вяжущих.

Для внедрения результатов исследований разработаны следующие нормативные документы: рекомендации по приготовлению текстиль-бетона на основе композиционных вяжущих; стандарт организации СТО 02066339-001-2018 «Текстиль-бетон повышенной сопротивляемости деструктивным процессам». На составы текстиль-бетонов зарегистрировано ноу-хау (№20180024 от 10.07.2018 г.). Заключен протокол о намерениях с ООО «Строительная Компания №1» по внедрению разработанных составов текстиль-бетона на ряде строительных площадок по благоустройству городской агломерации Белгородской области, при строительстве здания «Института исследований внешней акустики», а также в рамках реализации

проекта "Геосинтезированная архитектурная среда" для возведения «звуковой» перголы.

Внедрение результатов диссертации в учебно-методический процесс осуществляется при выполнении аудиторной и самостоятельной работы студентов, обучающихся по направлению «Строительство» бакалавриата и магистратуры в ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова».

Теоретические и экспериментальные результаты диссертационной работы могут быть **рекомендованы** для внедрения при строительстве объектов сложной конфигурации с повышенной архитектурной выразительностью, решающих задачи по улучшению среды обитания человека, а также в учебный процесс при подготовке бакалавров и магистров по направлениям «Строительство» и «Химическая технология».

Перспективы дальнейших исследований могут быть направлены на расширение возможностей и сферы применения бетонов, используемых для создания комфортной среды обитания человека за счет новых подходов и приемов при проектировании и синтезе строительных материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баженов, Ю.М. Новый век: новые эффективные бетоны и технологии / Ю.М. Баженов, В.Р. Фаликман // Сборник докладов I-ой Всероссийская конференции по проблемам бетона и железобетона «Бетон на рубеже третьего тысячелетия», Москва: 09-14 сентября 2001 г. – М.: Ассоциация "Железобетон", 2001. – С. 91-101.
2. Пшеничный, Г.Н. Проблемы, существующие в бетоноведении / Г.Н. Пшеничный // Технологии бетонов. – 2014. – № 12 (101). – С. 40-43.
3. Бетон на рубеже третьего тысячелетия. I-ая Всероссийская конференция по проблемам бетона и железобетона. Том 1. Пленарные доклады. – М.: Ассоциация "Железобетон", 2001. – 460 с.
4. Давидюк, А.Н. Бетон в строительстве – новые вызовы и перспективы / А.Н. Давидюк // Вестник НИЦ Строительство. – 2017. – № 1 (12). – С. 5-13.
5. Лесовик, В.С. Строительные материалы. Настоящее и будущее / В.С. Лесовик // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12, № 1 (100). – С. 9-16.
6. Пухаренко, Ю.В. Реставрация и строительство: потенциал фиброармированных материалов и изделий / Ю.В. Пухаренко // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4. – С. 359.
7. Салтыков, И.П. Создание комфортной среды обитания в помещениях жилых зданий с учетом архитектурных, инженерных и экологических аспектов / И.П. Салтыков // Вестник МГСУ. – 2012. – № 8. – С. 189-196.
8. Архитектурное материаловедение: учебник для вузов / В.Е. Байер. – М.: «Архитектура-С», 2006.
9. Байер, В.Е. Материаловедение для архитекторов / В.Е. Байер, А.В. Ефимов, О.Г. Максимов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2017. – № 8 (704). – С. 103-109.
10. Искусство интерьера. Современные материалы для отделки: учебное пособие для вузов / В.И. Логанина, С.Н. Кислицына, С.М. Саденко – Ростов на Дону: Феникс, 2006. – 253 с.

11. Лесовик, В.С. Архитектурная геоника / В.С. Лесовик // Жилищное строительство. – 2013. – № 1. – С. 9-12.
12. Архитектурная бионика / Лебедев Ю.С., Рабинович В.И., Положай Е.Д. и др. // Под ред. Ю.С. Лебедева. – М.: Стройиздат, 1990. – 269 с.
13. Корниенко, С.В. "Зеленое" строительство в России и за рубежом / С.В. Корниенко, Е.Д. Попова // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 4 (55). – С. 67-93.
14. Ерофеев, В.Т. Обеспечение комфортного микроклимата в здании при реализации принципов "зеленого строительства" / В.Т. Ерофеев, С.А. Коротаев // В сборнике: Актуальные вопросы архитектуры и строительства. Материалы Пятнадцатой Международной научно-технической конференции. – 2017. – С. 445-449.
15. Давидюк, А.Н. Эффективные материалы и конструкции для решения проблемы энергосбережения зданий / А.Н. Давидюк, Г.В. Несветаев // Жилищное строительство. – 2010. – № 3. – С. 16-20.
16. Береговой, А.М. Строительные материалы и наружные ограждающие конструкции зданий повышенной тепловой эффективности: монография / А.М. Береговой, В.А. Береговой, А.В. Мальцев, А.В. Гречишкин, М.А. Дерина. – Пенза: ПГУАС, 2014. – 180 с.
17. Береговой, В.А. Эффективные теплоизоляционные материалы с регулируемым декоративными свойствами на основе опочных горных пород / В.А. Береговой, Д.С. Сорокин, А.М. Береговой // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 2. – С. 84-88.
18. Иващенко, Ю.Г. Конструкционно-теплоизоляционный пенобетон, модифицированный волокнистым наполнителем / Ю.Г. Иващенко, Д.Ю. Багапова, А.В. Страхов // Инженерный вестник Дона. – 2017. – Т. 47. – № 4 (47). – С. 157.
19. Удодов, С.А. 3D-печать в строительстве: новое направление в технологии бетона и сухих строительных смесей / С.А. Удодов, Ф.А. Белов, А.Е. Золотухина // В сборнике: International innovation research Сборник статей победителей VI Международной научно-практической конференции. Под общей редакцией Г.Ю. Гуляева. – 2017. – С. 58-61.

20. Демиденко, А.К. Перспективы применения 3D-печати в строительном комплексе Российской Федерации / А.К. Демиденко, А.В. Кулибаба, М.Ф. Иванов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – № 12 (63). – С. 71-96.
21. Nerella, V. N. 3D-Druck mit Beton: Sachstand, Entwicklungstendenzen, Herausforderungen / V. N. Nerella, V. Mechtcherine // Bautechnik. – 2018. – № 95. – S. 366-377.
22. В России напечатали первый жилой дом [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://apis-cor.com/about/news/first-house>
23. Лесовик, В.С. Трансдисциплинарность - теоретическая основа создания интеллектуальных композитов [Электронный ресурс] / В.С. Лесовик, А.А. Володченко. В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого Российским фондом фундаментальных исследований и Правительством Белгородской области Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Белгород: 09-10 апреля 2015 г. Режим доступа: https://elibrary.ru/download/elibrary_23760828_89528329.pdf
24. Данилов, А.М. Системные аспекты исследований в области строительного материаловедения / А.М. Данилов, И.А. Гарькина // Аллея науки. – 2017. – Т. 4. – № 9. – С. 98-102.
25. Гарькина, И.А. Структурно-параметрический синтез композитов / И.А. Гарькина, А.М. Данилов // Молодежный научный вестник. – 2017. – № 6 (18). – С. 139-144.
26. Макридин, Н.И. Методологические аспекты прогнозирования механического поведения цементных композитов / Н.И. Макридин, И.Н. Максимова, И.А. Суров // Региональная архитектура и строительство. – 2014. – № 3. – С. 37-41.
27. Черкасов, В.Д. Моделирование структуры композита / Черкасов В.Д., Карташов В.А., Бузулуков В.И., Киселев Е.В., Емельянов А.И. // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2007. – № 4. – С. 28-36.

28. Эффективные строительные материалы с использованием техногенных отходов: монография / В.С. Демьянова, А.Д. Гусев. – Пенза: ПГУАС, 2013. – 127 с.
29. Тараканов, О.В. Перспективы применения комплексных добавок в бетонах нового поколения / О.В. Тараканов, В.И. Калашников // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2017. – № 1 (39). – С. 223-229.
30. Низина, Т.А. Мелкозернистые дисперсно-армированные бетоны на основе комплексных модифицирующих добавок / Т.А. Низина, А.Н. Пономарев, А.С. Балыков // Строительные материалы. – 2016. – № 9. – С. 68-72.
31. Пухаренко, Ю.В. Полидисперсное армирование строительных композитов / Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2011. – № 2 (145). – С. 25-26.
32. Королев, Е.В. Нанотехнология в строительном материаловедении / Е.В. Королев // Вестник МГСУ. – 2017. – Т. 12. – № 7 (106). – С. 711-717.
33. Румянцева, В.Е. Коррозия стальной арматуры в бетоне: причины, последствия, способы предотвращения / В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова // Информационная среда вуза. – 2015. – № 1. – С. 153-158.
34. Schladitz, F.; Lorenz, E.; Walther, T.: Textilbeton – Gestaltung ohne Grenzen? 10. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie 13. März 2014, S. 49-55.
35. Scherer, S.; Michler, H.; Curbach, M.: Brücken aus Textilbeton. Handbuch Brücken: Entwerfen, Konstruieren, Berechnen, Bauen und Erhalten (2014), S. 118-129.
36. Textilbeton in Theorie und Praxis: Tagungsband zum 6. Kolloquium zu Textilbewehrten Tragwerken (CTRS6) in Berlin am 19. und 20.9.2011 / Technische Universität Dresden, Sonderforschungsbereich 528, herausgegeben von Manfred Curbach und Regine Ortlepp. – Dresden: Technische Universität, 2011. – 444 S.
37. Übersicht der C³-Partner. C³ Carbon Concrete Composite. 14. Mai 2015 [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.bauen-neu-denken.de/c3-partner-liste>

38. Curbach, M. Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton - Konstruktion, Fertigung, numerische Berechnung / M. Curbach, W. Graf, D. Jesse, J. U. Sickert, S. Weiland // Beton- und Stahlbetonbau. – 2007. – № 102 (6). – S. 342-352.
39. Jesse, F. Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton / F. Jesse, M. Curbach // Beton- und Stahlbetonbau. – 2009. – № 104 (1). – S. 9-16.
40. Curbach, M. Textilbewehrter Beton – Innovativ! Leicht! Formbar! / M. Curbach, H. Michler, S. Weiland, D. Jesse // Beton-Werk International. – 2008. – № 11 (5). – S. 62-72.
41. Bösche, A.: Möglichkeiten zur Steigerung der Biegetragfähigkeit von Beton- und Stahlbetonbauteilen durch den Einsatz textiler Bewehrung – Ansatz für ein Bemessungsmodell. Dresden: Technische Universität Dresden, Fakultät Bauingenieurwesen, Dissertation, 2007.
42. Verstärkung von Stahlbetonbauteilen mit textilbewehrtem Spritzbeton. Fachaufsatz / C. Hankers, D. Matzdorf, S.10.
43. Schladitz, F. Verstärkung einer denkmalgeschützten Tonnenschale mit Textilbeton / F. Schladitz, E. Lorenz, F. Jesse, M. Curbach // Beton- und Stahlbetonbau. – 2009. – № 104 (7). – S. 432-437.
44. Michler, H. Segmentbrücke aus textilbewehrtem Beton – Rottachsteg Kempten im Allgäu / H. Michler // Beton- und Stahlbetonbau. – 2013. – № 108 (5). – S. 325-334
45. Hegger, J. Schlanke Fußgängerbrücke aus Textilbeton – Sechsfältige Fußgängerbrücke mit einer Gesamtlänge von 97 m / J. Hegger, C. Goralksi, C. Kulas // Beton- und Stahlbetonbau. – 2011. – № 106 (2). – S. 64-71.
46. Hegger, J. Tragverhalten und Dauerhaftigkeit einer schlanken Textilbetonbrücke – Eine 97 m lange Fußgängerbrücke mit einer Bewehrung aus AR-Glasfilamenten / J. Hegger, C. Kulas, M. Raupach, T. Büttner // Beton- und Stahlbetonbau. – 2011. – № 106 (2). – S. 72-80.
47. Deutsches Institut für Bautechnik (DIBT): Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung: „betoShell“ Platten aus Betonwerkstein mit rückseitig einbetonierten

Befestigungselementen zur Verwendung als hinterlüftete Außenwandbekleidung oder als abgehängte Decke Z-33.1- 577. 31. Juli 2008.

48. Shams, A. Experimental investigations on textile-reinforced concrete (TRC) sandwich sections / A. Shams, M. Horstmann, J. Hegger // Composite Structures. – 2015. – № 118. – S. 643-653.

49. Rempel, S. Filigrane Bauwerke aus Textilbeton / S. Rempel, N. Will, J. Hegger, P. Beul // Beton- und Stahlbetonbau. Fachaufsatz. Bericht. S. 1-10/pdf. Режим доступа: https://www.heringinternational.com/fileadmin/media/archive1/downloads/presseberichte/13_Artikel_Anwendungen_Neubau_Sonderheft_14113.pdf

50. Ehlig, D. Textilbeton – Ausgeführte Projekte im Überblick / D. Ehlig, F. Schladitz, M. Frenzel, M. Curbach, // Beton- und Stahlbetonbau. – 2012. – № 107 (11). – S. 777-785.

51. Scholzen, A. Dünnwandiges Schalentragsystem aus textillbewehrtem Beton. Entwurf, Bemessung und baupraktische Umsetzung / A. Scholzen, R. Chudoba, J. Hegger // Beton- und Stahlbetonbau. – 2012. – № 11. – S. 767-776.

52. Gelbrich, S. Organisch geformter Hybridwerkstoff aus textillbewehrtem Beton und glasfaserverstärktem Kunststoff / S. Gelbrich // Leichter bauen – Zukunft formen. TUDALIT. – 2012. – № 7. – S. 9.

53. Membrane Shell [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ims-institute.org>

54. Collection [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://store.pauls-berg.co/category/collection/>

55. Grasser, G. Digitale Entwurfstechniken für architektonische Anwendungen aus Textilbeton / G. Grasser, T. Kotnik // Leichter bauen – Zukunft formen. TUDALIT. – 2012. – № 7. – S.10.

56. Offermann, P. Außerordentlich flexibles Raumgeflecht aus Textilbeton / P. Offermann // Leichter bauen – Zukunft formen. TUDALIT. – 2011. – № 5. – S.3.

57. Лесовик, В.С. Геоника (геомиметика) как трансдисциплинарное направление исследований / В.С. Лесовик // Высшее образование в России. – 2014. – № 3. – С. 77–83.

58. Гридчин, А.М. Решение проблемы утилизации техногенного сырья КМА / А.М. Гридчин, Г.А. Лесовик, Е.Н. Авилова, Е.С. Глаголев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 4. – С. 7-10.
59. Лесовик, В.С. К проблеме техногенного метасоматоза в строительном материаловедении / В.С. Лесовик, А.А. Володченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 4. – С. 38-41.
60. Загороднюк, Л.Х. Закон сродства структур в материаловедении / Л.Х. Загороднюк, В.С. Лесовик, И.Л. Чулкова // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 3-2. – С. 267-271.
61. Sonderforschungsbereich 532 (Hrsg.): Sonderforschungsbereich SFB 532 "Textilbewehrter Beton - Grundlagen für die Entwicklung einer neuartigen Technologie". Forschungsantrag 2. Hj. 2008, 2009, 2010, 1. Hj. 2011; Aachen: Sonderforschungsbereich 532, 2008.
62. Kolkman, Annette: Methoden zur Verbesserung des inneren und äußeren Verbundes technischer Garne zur Bewehrung zementgebundener Matrices; Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2008; Zugl. Aachen: Shaker, 2008.
63. Abdkader, A. Textile reinforced concrete with AR glass filament yarns / A. Abdkader, P. Offermann, F. Jesse, M. Curbach // Industrial Fabrics Bulletin. – 2003. – № 3. – S. 50-54.
64. Gao, S. L. Sizings on Alkali-resistant Glass Fibers: Environmental Effects on Mechanical Properties / S. L. Gao, E. Mäder, A. Abdkader, P. Offermann // The American Chemical Society's Journal of Surfaces and Colloids. – 2003. – № 19 (6), P. 2496-2506.
65. Schierz, M. Charakterisierung der Handhabbarkeit textiler Bewehrungsstrukturen / M. Schierz, G. Franzke, M. Waldmann, P. Offermann, L. Hes // Technical Textiles. – 2003. – № 46 (2). – S. 141-144.
66. Столяров, О.Н. Применение высокопрочных текстильных материалов в строительстве / О.Н. Столяров, А.С. Горшков // Инженерно-технические журнал. – 2009. – № 4. – С. 21-25.

67. Загороднюк, Л.Х. Классификация добавок для армирования мелкодисперсных композитов / Л.Х. Загороднюк, Г.Г. Ильинская // БГТУ им. В.Г. Шухова, 2012.
68. Stockmann, P. Textile Strukturen zur Bewehrung zementgebundener Matrices. Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2002, p. 251.
69. Roye, A. Hochleistungs-doppelraschelprozess für Textilbetonanwendungen. Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2007; Zugl. Aachen: Shaker, 2007, p. 246.
70. Häußler-Combe, U. Bond and failure mechanisms of textile reinforced concrete (TRC) under uniaxial tensile loading / U. Häußler-Combe, J. Hartig, // Cement and Concrete Composites. – 2007. – № 29. – P. 279-289.
71. Aljewifi, H. Characterization of the impregnation by a cementitious matrix of five glass multi-filament yarns / H. Aljewifi, B. Fiorio, J-L. Gallias // European Journal of Environmental and Civil Engineering. – 2010. – № 14. – P. 529-544.
72. Aljewifi, H.; Fiorio, B.; Gallias, J-L.: Pull-out behaviour of a glass multi-filaments yarn embedded in a cementitious matrix. In proceedings: EURO-C 2010, March 15-18, 2010, Rohemoos/Schladming, Austria, P.77-86
73. Janetzko, S.; Kravaev, P.; Gries, T.; Kang, B.-G.; Brameshuber, W.; Schneider, M.; Hegger, J.: Textile reinforcements with spread and commingled yarn structures; In: Brameshuber, Wolfgang (Ed.): International RILEM Conference on Material Science, Vol. I: 2nd ICTRC Textile Reinforced Concrete, Aachen, Germany, September 6-8, 2010. - Bagneux: RILEM Publications, 2010, S. 37-44
74. Kravaev, P.; Janetzko, S.; Gries, T.; Kang, B.-G.; Brameshuber, W.; Zell, M.; Hegger, J.: Commingling yarns for reinforcement of concrete; In: Curbach, M.; Jesse, F. (Hrsg.): Textilbeton: Theorie und Praxis; Tagungsband zum 4. Kolloquium zu textilbewehrten Tragwerken (CTRS4) und zur 1. Anwendertagung, Dresden, 3.6.-5.6.2009. - Dresden: Techn. Univ., 2009, S. 17-28.
75. Gries, T., Kolkman, A.: Garnentwicklung zur zielgerichteten Beeinflussung der mechanischen Garn-Charakteristik. In: Curbach, M. (Hrsg.): Textile Reinforced Structures: proceedings of the 2nd Colloquium on Textile Reinforced Structures (CTRS2), Dresden 29.09.-01.10.2003.- Dresden: Techn. Univ, 2003, S. 29-40.

76. Nicke, D. Synthese und Charakterisierung mineralischer Beschichtungen auf Carbon faserbündeln für textile Bewehrung zementgebundener Werkstoffe. Projektarbeit. TUD, Fakultät Bauingenieurwesen, Institut für Baustoffe. – 2015. – S. 57.
77. Лесовик, В.С. Изучение основных моментов в создании текстиль-бетона / В.С. Лесовик, Д.Ю. Попов, D. Nicke // Сборник: Научные технологии и инновации. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, – 2014. – С. 237–241.
78. Столяров, О.Н. Технология производства вязаных полотен из текстильных нитей с высокими значениями деформационной жесткости / О.Н. Столяров // Известия высших учебных заведений. Технология легкой промышленности. – 2008. – № 1. – С. 49-52.
79. Volkova, A. Flexural behavior of textile-reinforced concrete / A. Volkova, A. Paykov, S. Semenov, O.N. Stolyarov, B. Melnikov. В сборнике: MATEC Web of Conferences Editor V. Murgul. – 2016. – P. 10-16.
80. Lieboldt, M., Barhum, R., Mechtcherine, V.: Effect of cracking on transport of water and gases in textile reinforced concrete. In: TANABE ET.AL. (Hrsg.): Proceedings of 8th International Conference on Creep, Shrinkage and Durability Mechanics of Concrete and Concrete Structures – CONCREEP-8, Taylor & Francis Group, London, 2008, P. 199-205.
81. Hempel, R. Dünne Platten aus textilbewehrtem Beton und ihre Einsatzmöglichkeiten im Fassadenbau / R. Hempel, M. Curbach, P. Offermann, G. Franzke, Th. Engler, H. Fuchs, R. Arnold, A.-M. Bartl, B. Wulforst, Th. Bischoff // Bauen mit Textilien. – 1999. – № 2 (1). – S. 22-25.
82. Holt, E. Cracking risks associated with early age shrinkage / E. Holt, M. Leivo // Cement and Concrete Composites. – 2004. – № 26. – P. 521-530.
83. Bentz, D.P. A review of early-age properties of cement-based materials / D.P. Bentz // Cement and Concrete Research. – 2008. – № 38. – P. 196-204.
84. Mechtcherine, V. Effect of internal curing by using superabsorbent polymers (SAP) on autogenous shrinkage and other properties of a high-performance fine-grained concrete: results of a RILEM round-robin test / V. Mechtcherine, M. Gorges, C. Schroebl,

A. Assmann, W. Brameshuber et al. // Material and structure. – 2014. – № 47. – P. 541-562.

85. Menashi, D. Mechanism of plastic shrinkage cracking in portland cement and portland cement-silica fume paste and mortar / D. Menashi, Jan Olek Cohen, L. William // Cement and concrete research. – 1990. – № 20. – P. 103-119.

86. William, P. Modelling the severity of plastic shrinkage cracking in concrete / P. William, R. Combrinck // Cement and concrete research. – 2013. – № 48. – P. 34–39.

87. Abdkader, A. Fuzzy-stochastic evaluation of uncertainties in material parameters of textiles / A. Abdkader, W. Graf, B. Möller, P. Offermann, J.-U. Sickert, // AUTEX Research Journal. – 2002. – № 3 (2). – P. 115–125.

88. Brockmann, J.; Raupach, M.: Durability Investigations on Textile Reinforced Concrete. Durability of Materials and Components, 9th International Conference (CSIRO 2002), Brisbane, Australia, 17-20 March 2002. Paper № 111.

89. La Chatelier, H. Sur les changements de volume qui accompagnent le durcissement des ciments. In: Bulletin Société de l'encouragement pour l'industrienne. Paris. 1900.

90. Волженский, А.В. Минеральные вяжущие вещества: (технология и свойства) / Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Учебник для вузов – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Стройиздат, 1979. – 476 с. ил.

91. Ахвердов. И.Н. Основы физики бетона. – М.: Стройиздат, 1981. 464 с. ил.

92. Баженов, Ю.М. Технология бетона. Учебник. 3-е издание. М.: Изд-во АСВ, 2003. 500 с. ил.

93. L'Hermite, R.G. Volume changes of concrete. In: 4th International symposium on the chemistry of cement. Washington. DC. 1960.

94. Slowik, V. Capillary pressure in fresh cement-based materials and identification of the air entry value / V. Slowik, M. Schmidt, R. Fritzsche // Cement and concrete composites. – 2008. – № 30. – P. 557–565.

95. Wittmann, F.H. On the action of capillary pressure in fresh concrete / F.H. Wittmann // *Cement and concrete research*. – 1976. – № 6. – P. 49-56.
96. Sivakumar, A. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete / A. Sivakumar, Manu Santhanam // *Cement and concrete composites*. – 2007. – № 7 (29). – P. 575-581.
97. Radocea, A. Study on the mechanism of plastic shrinkage of cement-based materials. PhD thesis, Chalmers University of Technology, Sweden. 1992.
98. Lura, P. Early-age acoustic emission measurements in hydrating cement paste: Evidence for cavitation during solidification due to self-desiccation / P. Lura, J. Couch, O.M. Jensen, J. Weiss // *Cement and concrete research*. – 2009. – № 39. – P. 861-867.
99. Некрасов, В.В. Кинетика гидратации цементов различных типов / В.В. Некрасов // *Журнал прикладной химии*. – 1948. – Т. 21. – № 3. – С. 204-211.
100. Lyman, C.G. Growth and movement in portland cement concrete, Oxford University Press, London, 1934.
101. Jensen, O.M. Autogenous Phenomena in Cement-Based Materials. København / Aalborg: Department of Civil Engineering, Aalborg University, 2005. – 188 p. – Publication: Doctoral thesis.
102. Lura, P. Influence of shrinkage-reducing admixtures on development of plastic shrinkage cracks / P. Lura, B. Pease, G.B. Mazzotta, F. Rajabipour, J. Weiss // *ACI Materials Journal*. – 2007. – № 2. – P. 187-194.
103. Красильников, К.Г. Физикохимия процессов расширения цементов / К.Г. Красильников, Л.В. Никитина, Н.Н. Скоблинская. Сб. трудов: VI Международного конгресса по химии цемента. т. III. – М., 1976. – С. 60-69.
104. Цилосани, З.Н. Исследование механизма усадки кристаллизационных и конденсационных дисперсных структур при удалении влаги / З.Н. Цилосани // *Коллоидный журнал*. – 1963. № 4. – С. 494-499.
105. Jensen O. M., Lura P., Kovler, K. (Eds.): Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation. Proceedings of International Conference, RILEM Publications, PRO52, 2006.

106. Алексеев, С.Н. Кинетика карбонизации бетона / С.Н. Алексеев, Н.К. Розенталь // Бетон и железобетон. – 1969. – № 4. – С. 22-24.
107. Лагерblad, Б. Механизм карбонизации / Б. Лагерblad // Цемент и его применение. – 2014. – № 1. – С. 177-181.
108. Васильев, А.А. Модель карбонизации бетона в атмосферных условиях / А.А. Васильев // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия F: Строительство. Прикладные науки. – 2009. – № 12. – С. 69-82.
109. Лесная, В.И. Влияние карбонизации бетона на долговечность строительных конструкций / В.И. Лесная, В.Т. Гуляев // Вологодские чтения. – 2008. – № 70. – С. 48-50.
110. Хархардин, А.Н. Структурная топология дисперсных материалов: учебное пособие / А. Н. Хархардин. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2011. – 288 с.
111. Староверов, В.Д. Зола ТЭС в цементных бетонах / В.Д. Староверов: Сборник научных трудов студентов, аспирантов и молодых ученых победителей конкурсов 2010 г. Вып. 6. – СПб.: СПбГАСУ, 2011. – С. 37-47.
112. Boche. Densified cement ultra-fine particle – based materials. Superplasticizer and concrete – Proceedings Second International Conference, Ottawa, June 1981, P. 185-218.
113. Francois de Larrard. Ultrafine particles for the making of very high strength concretes / Francois de Larrard // Cement and concrete research. – 1989. – V.19. – № 2. – P. 161-172.
114. Chanda, M.; Roy, S.K. Industrial polymers, specialty polymers, and their applications. Boca Raton, CRC Press, 2008. 432 p.
115. Kuruwita-Mudiyanselage T.D. Smart polymer materials. Doct.diss.Bowling Green, 2008. 128 p.
116. Горчаков, Г.И. Состав, структура и свойства цементных бетонов / Г.И. Горчаков [и др.]; под ред. Г.И. Горчакова, М.: Стройиздат, 1976. – 144 с.
117. Scrivener, K.L. Advances in understanding hydration of Portland cement / K.L. Scrivener, P. Juilland, P.J.M. Monteiro // Cement and concrete research. – 2015. – № 78 (A). – P. 38–56.

118. Кинд, В.А. Химическая характеристика портландцемента. Л-М.: Госстройиздат, 1932, с. 3-4.

119. Трунов, П.Н. Композиционные вяжущие с использованием вулканогенно-осадочных пород Камчатки и мелкозернистые бетоны на их основе: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Трунов Павел Николаевич. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2014. – 161 с.

120. Лесовик, Р.В. Мелкозернистые бетоны для дорожного строительства с использованием отходов мокрой магнитной сепарации железистых кварцитов: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Лесовик Руслан Валерьевич. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2002. – 238 с.

121. Калориметрия цемента и бетона. Избранные труды. А.В. Ушеров-Маршак. Под редакцией: В.П. Сопов. – Х.: Факт, 2002. – 183 с.: ил.

122. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. М.: Минрегион России, 2012.

ПРИЛОЖЕНИЯ

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р
Испытательный центр «БГТУ-Сертис»

308012 Россия г. Белгород, ул. Костюкова, 46

Аттестат аккредитации
№ РОСС RU.0001.22СЛ25
от 07 октября 2017 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 296

от 18 декабря 2017 г.

Наименование и адрес клиента: Попов Д.Ю., г. Белгород, ул. Славянская 76.

Предъявитель образцов: Попов Д.Ю.

Дата отбора образцов: 27 ноября 2017 г.

Наименование продукции: составы мелкозернистого бетона

Место отбора образцов: образцы доставлены в лабораторию заказчиком

Сведения об образцах, их идентификация: 1) образцы-кубы размерами 100×100×100 мм в количестве 36 штук; 2) образцы-шайбы (h=30 мм и d=150 мм) в количестве 36 штук

Дата испытаний образцов: начало 27.11.2017 г., окончание 18.12.2017 г.

Испытания проведены на соответствие требованиям: СП 96.13330.2016 «СНиП 2.03.03-85 Армоцементные конструкции»

Нормативные документы, в которых установлены требования к испытываемой продукции: ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия»

Методики испытаний: ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости», ускоренный метод 3, ГОСТ 12730.5-84 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости»

Результаты испытаний приведены в прилагаемых приложениях №1 и №2

Зам. директора
ИЦ «БГТУ-Сертис»



Сопин Д.М



Приложение №1
к Протоколу испытаний
№ 296 от 18 декабря 2017 г.
Лист 1
Всего листов 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

образцов на морозостойкость

Средства испытания: Морозильная камера ILKA Feutron, весы технические, NaCl по ГОСТ 4233, пресс гидравлический лабораторный, приспособления в соответствии с методикой испытаний

Таблица 1. Результаты испытаний образцов на сжатие

Образцы	Среднее значение предела прочности при сжатии, МПа			Уменьшение основных образцов по сравнению с контрольным	Фактическое по результатам испытаний (Нормируемое по ГОСТ X ^{II} _{min} ≥0,9X ^I _{min})	Марка по морозостойкости
	Конт-рольных	Основных при испытании после циклов				
		8	12			
Ла-1	55	53,6	-	1,4	X ^{II} _{min} =0,92X ^I _{min}	F300
Ла-2	54,6	53,2		1,4	X ^{II} _{min} =0,92X ^I _{min}	F300
Ла-3	57,1	55,8		1,3	X ^{II} _{min} =0,93X ^I _{min}	F300
Ли-1	70,6	-	68,3	2,3	X ^{II} _{min} =0,93X ^I _{min}	F400
Ли-2	72,6		70,9	1,7	X ^{II} _{min} =0,94X ^I _{min}	F400
Ли-3	73,2		71,5	1,7	X ^{II} _{min} =0,94X ^I _{min}	F400

Таблица 2. Результаты определения изменения массы основных образцов

Образцы	Средняя масса образцов в насыщенном состоянии, г			Уменьшение массы образцов, %	
	До начала испытаний	После 8 ц испытаний	После 12 ц испытаний	Нормируемое по ГОСТ	Фактическое
Ла-1	2 250	2 230	-	Не более 2	0,9
Ла-2	2 250	2 230			0,9
Ла-3	2 220	2 200			0,9
Ли-1	2 300	-	2 290		0,4
Ли-2	2 290		2 280		0,4
Ли-3	2 290		2 280		0,4



Приложение №2
к Протоколу испытаний
№ 296 18 декабря 2017 г.
Лист 2
Всего листов 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

образцов на водонепроницаемость

Средства испытания: Прибор определения водонепроницаемости

Таблица 1. Результаты определения водонепроницаемости

Образцы	Давление воды, МПа		Водонепроницаемость серии образцов, МПа	Марка по водонепро- ницаемости
	1,8	2,0		
Ла-1	Просачивание воды через образец не наблюдается	-	1,8	W18
Ла-2	Просачивание воды через образец не наблюдается		1,8	W18
Ла-3	Просачивание воды через образец не наблюдается		1,8	W18
Ли-1	Просачивание воды через образец не наблюдается		2,0	W20
Ли-2	Просачивание воды через образец не наблюдается		2,0	W20
Ли-3	Просачивание воды через образец не наблюдается		2,0	W20

Время выдерживания на каждой ступени – 4 часа

Дополнительные сведения:

1. Испытания на сжатие контрольных и основных образцов проводили по ГОСТ 10180-2012 в насыщенном состоянии согласно п.п. 5.2.2, 5.2.3.

Зам. директора
ИЦ «БГТУ-Сервис»

Сопин Д.М.

СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р
Испытательный центр «БГТУ-Сертис»

308012 Россия г. Белгород, ул. Костюкова, 46

Аттестат аккредитации
№ РОСС RU.0001.22СЛ25
от 07 октября 2017 г.

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 107

от 23 апреля 2018 г.

Наименование и адрес клиента: Попов Д.Ю., г. Белгород, ул. Славянская 7б.

Предъявитель образцов: аспирант Попов Д.Ю.

Дата отбора образцов: 16 марта 2018 г.

Наименование продукции: Мелкозернистый бетон различных составов

Место отбора образцов: доставка образцов в лабораторию заказчиком

Сведения об образцах, их идентификация: образцы-кубы размерами 100×100×100 мм в количестве 60 штук; образцы-шайбы высотой 30 мм и диаметром 150 мм в количестве 60 штук

Дата испытаний образцов: начало 19.03.2018 г., окончание 23.04.2018 г.

Испытания проведены на соответствие требованиям: СП 96.13330.2016 «СНиП 2.03.03-85 Армоцементные конструкции»

Нормативные документы, в которых установлены требования к испытываемой продукции: ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия»

Методики испытаний: ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости», Ускоренный метод 3, ГОСТ 12730.5-84 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости»

Результаты испытаний приведены в прилагаемых приложениях №1 и №2

Зам. директора

ИЦ «БГТУ-Сертис»



Сопин Д.М.



Приложение №1
к Протоколу испытаний
№ 107 от 23 апреля 2018 г.
Лист 1
Всего листов 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

образцов на морозостойкость

Средства испытания: Морозильная камера ILKA Feutron, весы технические, NaCl по ГОСТ 4233, пресс гидравлический лабораторный, приспособления в соответствии с методикой испытаний

Таблица 1. Результаты испытаний образцов на сжатие

Образцы	Среднее значение предела прочности при сжатии, МПа					Уменьшение основных образцов по сравнению с контрольным	Фактическое по результатам испытаний (Нормируемое по ГОСТ $X^{\text{II}}_{\text{min}} \geq 0,9X^{\text{I}}_{\text{min}}$)	Марка по морозостойкости
	Контрольных	Основных при испытании после циклов						
		5	8	12	15			
ТБ-Ла-КВ2-30	39,3	39,0	-			0,3	$X^{\text{II}}_{\text{min}}=0,92X^{\text{I}}_{\text{min}}$	F200
ТБ-Ла-КВ3-30	39,6	39,3	-			0,3	$X^{\text{II}}_{\text{min}}=0,92X^{\text{I}}_{\text{min}}$	F200
ТБ-Ла-КВ2-40	52,4	-	52,0	-		0,4	$X^{\text{II}}_{\text{min}}=0,94X^{\text{I}}_{\text{min}}$	F300
ТБ-Ла-КВ3-40	52,8	-	52,3	-		0,5	$X^{\text{II}}_{\text{min}}=0,94X^{\text{I}}_{\text{min}}$	F300
ТБ-Ла-КВ3-50	65,5	-		64,1	-	1,4	$X^{\text{II}}_{\text{min}}=0,94X^{\text{I}}_{\text{min}}$	F400
ТБ-Ли-КВ2-45	59	-		57,9	-	1,1	$X^{\text{II}}_{\text{min}}=0,93X^{\text{I}}_{\text{min}}$	F400
ТБ-Ли-КВ3-45	59,4	-		57,8	-	1,6	$X^{\text{II}}_{\text{min}}=0,93X^{\text{I}}_{\text{min}}$	F400
ТБ-Ли-КВ2-55	72,1	-			70,4	1,7	$X^{\text{II}}_{\text{min}}=0,94X^{\text{I}}_{\text{min}}$	F500
ТБ-Ли-КВ3-55	72,6	-			70,2	2,4	$X^{\text{II}}_{\text{min}}=0,93X^{\text{I}}_{\text{min}}$	F500
ТБ-Ли-КВ3-60	78,6	-			76,5	2,1	$X^{\text{II}}_{\text{min}}=0,94X^{\text{I}}_{\text{min}}$	F500

Таблица 2. Результаты определения изменения массы основных образцов

Образцы	Средняя масса образцов в насыщенном состоянии, г					Уменьшение массы образцов, %	
	До начала испытаний	После 5 ц испытаний	После 8 ц испытаний	После 12 ц испытаний	После 15 ц испытаний	Нормируемое по ГОСТ	Фактическое
ТБ-Ла-КВ2-30	2 180	2 150	-	-	-	Не более 2	1,4
ТБ-Ла-КВ3-30	2 170	2 140	-	-	-		1,4
ТБ-Ла-КВ2-40	2 240	-	2 210	-	-		1,3
ТБ-Ла-КВ3-40	2 250	-	2 230	-	-		0,9
ТБ-Ла-КВ3-50	2 160	-	-	2 150	-		0,5
ТБ-Ли-КВ2-45	2 170	-	-	2 150	-		0,9
ТБ-Ли-КВ3-45	2 160	-	-	2 140	-		0,9
ТБ-Ли-КВ2-55	2 320	-	-	-	2 300		0,9
ТБ-Ли-КВ3-55	2 250	-	-	-	2 230		0,9
ТБ-Ли-КВ3-60	2 360	-	-	-	2 340		0,8



Приложение №2
к Протоколу испытаний
№ 107 от 23 апреля 2018 г.
Лист 2
Всего листов 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

образцов на водонепроницаемость

Средства испытания: Прибор определения водонепроницаемости

Таблица 1. Результаты определения водонепроницаемости

Образцы	Давление воды, МПа				Водонепроницаемость серии образцов, МПа	Марка по водонепроницаемости
	1,6	1,8	2,0	2,2		
ТБ-Ла-КВ2-30	Просачивание воды через образец не наблюдается				1,6	W16
ТБ-Ла-КВ3-30	Просачивание воды через образец не наблюдается				1,6	W16
ТБ-Ла-КВ2-40	Просачивание воды через образец не наблюдается				1,8	W18
ТБ-Ла-КВ3-40	Просачивание воды через образец не наблюдается				1,8	W18
ТБ-Ла-КВ3-50	Просачивание воды через образец не наблюдается				2,0	W20
ТБ-Ли-КВ2-45	Просачивание воды через образец не наблюдается				2,0	W20
ТБ-Ли-КВ3-45	Просачивание воды через образец не наблюдается				2,0	W20
ТБ-Ли-КВ2-55	Просачивание воды через образец не наблюдается				2,2	W22
ТБ-Ли-КВ3-55	Просачивание воды через образец не наблюдается				2,2	W22
ТБ-Ли-КВ3-60	Просачивание воды через образец не наблюдается				2,2	W22

Время выдерживания на каждой ступени – 4 часа

Дополнительные сведения:

1. Испытания на сжатие контрольных и основных образцов проводили по ГОСТ 10180-2012 в насыщенном состоянии согласно п.п. 5.2.2, 5.2.3.

Зам. директора
ИЦ «БГТУ-Сервис»

Сопин Д.М.

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

Текстиль-бетон повышенной сопротивляемости
деструктивным процессам

СТО 02066339-001-2018

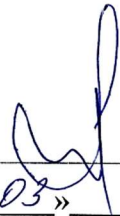
СОГЛАСОВАНО:

проректор по научной работе
д-р техн. наук, проф.
Евтушенко Е.И.
«03» 08 2018 г.



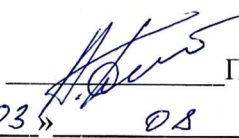
РАЗРАБОТАН:

науч. руков.:
д-р техн. наук, проф.
Лесовик В.С.
«03» 08 2018 г.



Исполнитель:

аспирант
Попов Д.Ю.
«03» 08 2018 г.



Белгород 2018 г.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г.ШУХОВА**

УТВЕРЖДАЮ
проректор по научной работе
БГТУ им. В.Г.Шухова
д-р техн. наук, проф.
Е.И. Евтушенко

«21» 05 2018 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ
по приготовлению текстиль-бетона на основе
композиционного вяжущего

РАЗРАБОТАНО
Научный руководитель:
д-р техн. наук, проф.

Лесовик В.С.,
"16" 05 2018 г.

Исполнитель:
аспирант.
Попов Д.Ю.

"16" 05 2018 г.

Белгород 2018 г.

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА»
(БГТУ им. В.Г. Шухова)



**СВИДЕТЕЛЬСТВО
о регистрации ноу-хау**

№ 20180024

«Текстиль-бетон на композиционном вяжущем»

Правообладатель(ли): Федеральное государственное
бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Белгородский государственный технологический университет
им. В.Г. Шухова»

Автор(ы): Лесовик Валерий Станиславович,
Попов Дмитрий Юрьевич, Ряпухин Александр Николаевич

Дата регистрации: 10 июля 2018 г.

Срок охраны сведений: 10 лет

Ректор



С.Н. Глаголев



УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Строительная
Компания №1»

Н.В. Ряпухин

2018 г.

Протокол о намерениях

внедрения результатов диссертационной работы на тему «Повышение эффективности текстиль-бетона» между кафедрой строительного материаловедения, изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова (БГТУ им. В.Г. Шухова) и ООО «Строительная Компания №1»

Кафедра строительного материаловедения, изделий и конструкций Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова, сокращенное наименование (кафедра СМИК БГТУ им. В.Г. Шухова), представляемая докт. техн. наук, профессором Лесовиком Валерием Станиславовичем и аспирантом Поповым Дмитрием Юрьевичем, и ООО «Строительная Компания №1», г. Белгород, представляемое директором Ряпухиным Николаем Витальевичем, называемые далее «Сторонами» выражают готовность к сотрудничеству.

1. Предмет соглашения

Настоящий протокол о намерениях внедрения результатов диссертационной работы аспиранта Попова Д.Ю. на тему «Повышение эффективности текстиль-бетона» (научный руководитель Лесовик В.С.) заключается на основании взаимных интересов с целью применения разработанных составов текстиль-бетона на ряде строительных площадок по благоустройству городской агломерации Белгородской области.

Стороны пришли к соглашению о сотрудничестве, основанном на взаимном уважении к автономии каждой из сторон, в соответствии с законами и постановлениями каждой из сторон, и принимая во внимание имеющиеся ресурсы каждой из сторон. Кафедра СМИК БГТУ им. В.Г. Шухова и ООО «Строительная Компания №1» согласились должным образом учитывать административные и образовательные потребности друг друга.

2. Обязанности сторон

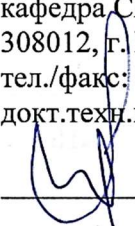
Кафедра СМИК БГТУ им. В.Г. Шухова и ООО «Строительная Компания №1» согласились подписать настоящее соглашение в следующих областях, представляющих взаимную заинтересованность:

2.1. Кафедра СМИК БГТУ им. В.Г. Шухова обязуется предоставить составы и технологические рекомендации по приготовлению текстиль-бетона на полиминеральном композиционном вяжущем с применением суперабсорбирующих полимеров, а также внести необходимые корректировки после апробации полученных результатов в промышленных условиях.

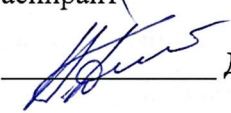
2.2. ООО «Строительная Компания №1» обязуется рассмотреть вопрос о внедрении разработанных составов текстиль-бетона на ряде строительных площадок по благоустройству городской агломерации Белгородской области.

3. Юридические адреса и подписи

ФГБОУ ВО Белгородский
государственный технологический
университет им. В.Г. Шухова,
кафедра СМИК
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46
тел./факс: 8(4722)55-82-01
докт.техн.наук, профессор

 В.С. Лесовик

аспирант

 Д.Ю. Попов

ООО «Строительная Компания №1»
308015, г. Белгород, ул. Сумская, 167
телефон: 8(4722)22-18-94

директор



 Н.В. Ряпухин

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор
БГТУ им. В.Г. Шухова
д-р техн. наук, профессор
Н.А. Шаповалов

« 15 » 05 2018 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс

Теоретические положения диссертационной работы Попова Д.Ю. на тему «Повышение эффективности текстиль-бетона», используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» профиля «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», а также магистров по направлению 08.04.01 «Строительство» профилей «Технологии строительных материалов, изделий и конструкций, «Инновации и трансфер технологий» и «Эффективные строительные материалы для 3D аддитивных технологий», что отражено в учебных программах дисциплин «Строительные материалы и изделия», «Технологии нового поколения» и «Эффективные строительные композиты для 3D аддитивных технологий».

Зав. кафедрой СМИК

Д-р техн. наук, профессор



Лесовик В.С.