

На правах рукописи



**КУЛИКОВА АНЖЕЛИКА АНДРЕЕВНА**

**Самоуплотняющиеся мелкозернистые бетоны со стабильными  
эксплуатационными характеристиками**

2.1.5. Строительные материалы и изделия

**Автореферат**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Томск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

**Научный руководитель:**

**КОПАНИЦА Наталья Олеговна,**  
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**УРХАНОВА Лариса Алексеевна,**  
доктор технических наук, профессор,  
профессор кафедры  
«Градостроительство» ФГБОУ ВО  
«Национальный исследовательский  
Московский государственный  
строительный университет (НИ МГСУ)»

**ИЛЬИНА Лилия Владимировна,**  
доктор технических наук, профессор,  
директор института цифровых и  
инженерных технологий ФГБОУ ВО  
«Новосибирский государственный  
архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)»

**Ведущая организация:**

ФГБОУ ВО «Казанский государственный  
архитектурно-строительный  
университет (КазГАСУ)» г. Казань

Защита состоится «20» февраля 2026 г. в 14.00 ч. на заседании Диссертационного совета 24.2.414.01 при ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный университет», по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, корп. 2, ауд. 303.

С текстом диссертации можно ознакомиться в научной библиотеке Томского государственного архитектурно-строительного университета, а также по адресу: 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2 и на сайте <https://tsuab.ru/article/kulikova-anzhelika-andreevna?lang=ru>

Автореферат разослан «    » \_\_\_\_\_ 2025 года.

и.о. учёного секретаря диссертационного  
совета



Кумпyak Олег Григорьевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** В последнее десятилетие в России, как и во всем мире, ежегодно растет объем железобетонных конструкций, изготовленных из самоуплотняющихся бетонов (СУБ). Несмотря на то, что стоимость таких бетонов выше, их применение позволяет существенно сократить трудозатраты и время строительства за счет возможности более быстрого набора прочности, что связано со значительным количеством различных по функциональности модифицирующих добавок, а также с отсутствием необходимости в виброуплотнении.

Одной из важных проблем в технологии самоуплотняющихся бетонов является высокий расход цемента и использование дорогостоящих импортных модифицирующих добавок и наполнителей. Также в настоящий момент проблемой является нестабильность показателей качества самоуплотняющихся бетонов. Исходя из этого, актуальны исследования по выбору сырьевых компонентов для самоуплотняющихся бетонов с возможностью максимального использования местного сырья, отходов различных производств, а также побочных и вторичных продуктов. Также актуальны исследования по проектированию составов СУБ, которые будут обеспечивать стабильность эксплуатационных характеристик и при этом не приводить к удорожанию изделий и конструкций.

Совершенствование технологии производства самоуплотняющегося бетона особенно важно для районов, где отсутствует крупный заполнитель высокого качества (арктические и северные районы России). В концепции устойчивого развития стран и регионов разработка природоохранных, ресурсосберегающих технологий и материалов, возможность замены природного сырья при производстве бетонов вторичными продуктами производства позволит существенно снизить нагрузку на сырьевую базу.

Одним из приоритетных направлений развития РФ на данный момент является переход к передовым технологиям проектирования и создания высокотехнологичной продукции, основанный на применении интеллектуальных производственных решений и новых материалов. Исследования по разработке составов самоуплотняющихся бетонов с рациональным использованием вторичных продуктов с применением методов компьютерного моделирования являются актуальными. Диссертационная работа выполнена при поддержке грантов «Проведение фундаментальных и прикладных научных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами организаций – членов Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» (МГСУ, 2022, 2023, 2025 гг.). Реализация программы научных исследований в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ FEMN-2022-0001 (Молодежная научная лаборатория в рамках национального проекта «Наука и университеты» и программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030»).

**Степень разработанности темы диссертационного исследования.** Изучению закономерностей формирования структуры и свойств модифицированных бетонов, в том числе самоуплотняющихся, содержащих в своем составе пластифицирующие и минеральные добавки, посвящены работы многих отечественных и зарубежных ученых и исследователей, в том числе: И.Н. Ахвердова, Ю.М. Баженова, В.Г. Батракова, Б.В. Гусева, Л.М. Добшица, В.Т.

Ерофеева, Ю.Г. Иващенко, В.И. Калашникова, С.С. Каприелова, Н.О. Копаницы, Л.Я. Крамар, А.И. Кудякова, С.М. Мchedlova-Петросяна, Т.А. Низиной, Г.В. Несветаева, Г.С. Рояка, В.В. Строковой, О.В. Тараканова, Л.А. Урхановой, Л.В. Ильиной, А.В. Ушерова-Маршака, В.Р. Фаликмана, В.Г. Хозина, А.Е. Шейкина, А.В. Шейнфельда, Р.С. Aitcin, R. Flatt, J. Plank, I. Schober, H. Okamura, K. Yamada и др.

Несмотря на то, что был выполнен и опубликован значительный объем исследований на эту тему, остается ряд нерешенных вопросов, требующих дальнейшего изучения. В их число входят вопросы по исследованию процессов гидратации цемента и структурообразования цементного камня в присутствии нано- и микродисперсных активных минеральных добавок на основе вторичных продуктов, а также разработка комплексных модификаторов на их основе для получения самоуплотняющихся бетонов со стабильными технологическими и эксплуатационными характеристиками.

**Объект исследования.** Самоуплотняющиеся мелкозернистые бетоны со стабильными эксплуатационными характеристиками.

**Предмет исследования.** Процессы формирования иерархически организованной структуры и свойств модифицированного цементного камня и самоуплотняющегося мелкозернистого бетона.

**Цель работы:** разработка научно обоснованных решений по формированию состава и структуры самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов со стабильными эксплуатационными характеристиками.

Для решения поставленной цели решались следующие **задачи**:

- обосновать выбор наноразмерных и тонкодисперсных компонентов для получения модифицирующих добавок в самоуплотняющиеся бетоны, обеспечивающих улучшение эксплуатационных характеристик.
- разработать комплексную добавку на основе наноразмерного диоксида кремния и тонкодисперсных компонентов и исследовать ее влияние на физико-механические характеристики цементного вяжущего.
- провести комплекс физико-химических исследований портландцемента с разработанной комплексной добавкой с обоснованием ее влияния на процессы гидратации и структурообразования цементного камня.
- модернизировать метод проектирования составов мелкозернистых СУБ с учетом дисперсности компонентов.
- исследовать физико-механические свойства, разработанных мелкозернистых СУБ с комплексной добавкой.
- провести оценку технико-экономических показателей предложенной технологии.
- апробировать результаты исследований в производственных условиях.

**Научная новизна работы.** Обоснованы и экспериментально подтверждены решения, обеспечивающие получение самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов со стабильными эксплуатационными характеристиками:

1. Установлено, что введение в цементную композицию наноразмерного диоксида кремния, синтезированного методом дугового плазменного испарения, по сравнению с аналогичными добавками, полученными другими способами, обеспечивает снижение водопотребности и увеличение прочности цементного

вяжущего на сжатие до 38%. Полученный результат объясняется пластинчатой формой частиц и широким диапазоном их размеров (от 10 до 300 нм), за счет чего происходит уплотнение структуры и сокращение количества пор в цементном камне. Встраивание наночастиц  $\text{SiO}_2$  в матрицу цементного камня и наличие в них включений наноуглерода (26%) создает армирующий эффект, способствует релаксации дефектов и предотвращению развития микротрещин. Пластинчатая форма наночастиц имеет большую площадь поверхности для возникновения активных центров, что повышает их химическую активность и обеспечивает формирование низкоосновных гидросиликатов кальция и снижение интенсивности пиков этtringита на ранних стадиях твердения.

2. Установлено, что комплексная добавка (микрокальцит, кварцевая мука, наноразмерный диоксид кремния в соотношении 2:1:0,012) в количестве 7,53% от массы цемента обеспечивает увеличение прочности на сжатие цементного вяжущего до 40%, а при сокращении расхода цемента (на 7,53%) – до 33,7%. Принцип действия добавки объясняется тем, что наноразмерный диоксид кремния, адсорбируясь на частицах микрокальцита и кварцевой муки, активирует их поверхность, повышая реакционную способность, а наноуглеродные включения структурируют воду затворения, что ускоряет процессы образования кремнегеля и реакций гидратации. При модифицировании цементного вяжущего комплексной добавкой нано- и микрочастицы, выстраиваясь на различных масштабных уровнях: микрокальцит (15 мкм) – кварцевая мука (4,9 мкм) – нанодиоксид кремния (10-300 нм), выступают в роли уплотняющих и упрочняющих компонентов, при этом формируются дополнительные структурообразующие вещества (низкоосновные гидросиликаты кальция), что препятствует движению дислокаций и деформационным процессам в цементном камне. Сбалансированное сочетание компонентов добавки обеспечивает стабильность получаемых свойств за счет самоорганизации и самоуплотнения структуры цементного вяжущего и бетона, что подтверждено комплексом физико-химических исследований.

3. Установлено, что стабильные эксплуатационные свойства СУБ (удобоукладываемость, вязкость, текучесть, прочность) со сниженным расходом цемента ( $412 \text{ кг/м}^3$ ) связана с формированием плотной и однородной структуры бетона за счет оптимизации гранулометрического состава дисперсных компонентов, при помощи адаптивной физико-математической модели (коэффициент вариации не более 10%), и применением модифицированного комплексной добавкой цементного вяжущего.

**Теоретическая значимость работы:** развиты представления о направленном формировании структуры цементного камня и самоуплотняющегося бетона на различных масштабных уровнях (от нано до макро) путем последовательного модифицирования компонентов добавки и бетона, а также за счет оптимизации состава дисперсных систем при помощи адаптивной физико-математической модели.

#### **Практическая значимость работы:**

1. Разработана комплексная добавка на основе нанодиоксида кремния, микрокальцита и кварцевой муки. Комплексная добавка позволяет получить повышение прочности на сжатие вяжущего до 40% и снизить водопотребность смеси, при сокращении расхода цемента.

2. Разработаны составы самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов с использованием модифицирующих добавок, а также вторичного и побочного сырья в качестве микронаполнителей и заполнителей. Получены самоуплотняющиеся мелкозернистые бетоны с маркой по удобоукладываемости РК1, маркой по вязкости V2, маркой по текучести Т4, классом по прочности В40 и маркой по морозостойкости F500, при пониженном расходе цемента 412 кг/м<sup>3</sup>.

3. Разработана физико-математическая модель проектирования оптимального соотношения компонентов полифракционной бетонной смеси, позволяющая варьировать соотношение фракций мелкого заполнителя, наполнителя и цемента в зависимости от требуемых характеристик (плотность, прочность, подвижность).

4. Предложена технологическая схема производства самоуплотняющегося бетона, обеспечивающая получение стабильных эксплуатационных характеристик. Определена экономическая эффективность получения самоуплотняющегося бетона с разработанной комплексной добавкой, которая составляет 10-12%.

5. Разработаны технические условия ТУ 24.66.47-095-02069295-2025. Комплексные добавки к строительным растворам и бетонам.

**Методология исследования основана на рабочей гипотезе,** заключающейся в том, что получение самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов со стабильными эксплуатационными свойствами связано с направленным регулированием структуры на различных масштабных уровнях (нано, микро, макро) через последовательное модифицирование компонентов комплексной добавки и бетонной смеси, а также с проектированием гранулометрического состава дисперсных материалов в бетоне при помощи математической модели.

**Методы исследования.** Экспериментальные исследования проведены на аттестованном и поверенном оборудовании ТГАСУ с использованием стандартных методик в соответствии с национальными стандартами РФ. Физико-химические исследования сырьевых материалов и продуктов гидратации цементного камня проводились на современном высокотехнологичном оборудовании, на базе центров коллективного пользования Томского государственного архитектурно-строительного университета, Национального исследовательского Томского политехнического университета, Национального исследовательского Томского государственного университета. Рентгенофазовый анализ проводился на дифрактометре XRD-6000 Shimadzu, дифференциально-термический анализ осуществлялся с использованием синхронного термоанализатора СТА 449 С Jupiter Netzsch (Германия). Растровая микроскопия снималась на сканирующем электронном микроскопе JSM-7500F (JEOL, Япония) с энергодисперсионным микроанализатором EDXS.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследований вещественных компонентов и разработка составов комплексных добавок на основе вторичных и побочных продуктов для получения самоуплотняющихся бетонов со стабильными физико-механическими и эксплуатационными характеристиками.

2. Установленные особенности процессов гидратации портландцемента, формирования фазового состава, структуры и свойств цементного камня в присутствии комплексной добавки.

3. Алгоритм проектирования состава самоуплотняющегося бетона на основе адаптивной физико-математической модели, позволяющей рассчитывать оптимальное содержание дисперсных компонентов в бетонных смесях и получать бетоны с заданными характеристиками и высоким уровнем стабильности физико-механических свойств.

**Достоверность научных положений и выводов** обеспечена привлечением стандартизированных методов и взаимодополняющих методик исследования, применением высокоточных приборов и средств измерения, а также необходимым количеством экспериментальных данных для их корректной статистической обработки.

**Реализация результатов исследований.** Проведены опытно-промышленные испытания самоуплотняющегося мелкозернистого бетона с комплексной модифицирующей добавкой (ООО ТД «ТОП Бетон», АО «ТГОК «Ильменит»). Полученные в ходе выполнения диссертационных исследований данные используются в подготовке учебных занятий для студентов направления подготовки 08.03.01 Строительство, профиля «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», 08.04.01 Строительство, программы подготовки «Эффективные строительные материалы и технологии». Разработаны методические указания к лабораторным работам в рамках курса «Нанотехнологии в производстве строительных материалов».

**Личный вклад автора** в решении исследуемой проблемы состоит в постановке цели и задач работы, планировании исследований, научном обосновании выбора добавок, проведении экспериментальных исследований цементного камня, разработке модели расчета оптимального соотношения компонентов полифракционной бетонной смеси и модернизации метода проектирования состава бетона, подборе и исследовании свойств бетона, анализе и обобщении результатов, апробации результатов исследований, подготовке их к публикации.

**Апробация.** Основные положения диссертационной работы и результаты исследований представлены на Конкурсе молодежных проектов Всероссийского фестиваля науки NAUKA+, г. Томск, 2021 г.; V Международной научно-практической конференции «Современные строительные материалы и технологии», г. Калининград, 2022 г.; XIX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2022 г.; VI Международной научно-практической конференции «Современные строительные материалы и технологии», г. Калининград, 2023 г.; XX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2023 г.; Международном научно-практическом симпозиуме «Будущее строительной отрасли: Вызовы и перспективы развития», секция «Строительные материалы», г. Москва, 2023 г.; VII Международной научно-практической конференции «Качество. Технологии. Инновации», г. Новосибирск, 2024 г.; XXI Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук», г. Томск, 2024 г.; VII Международной научно-практической конференции «Современные строительные материалы и технологии», г. Калининград, 2024 г.; Форуме «Инженерный экстрим», секция «Вопросы развития аддитивных

технологий» г. Томск, 2024 г.; Всероссийском инженерном конкурсе, г. Москва, 2024 г.

**Публикации.** По результатам выполненных в диссертационной работе исследований опубликовано 39 научных работ, в том числе 7 – в журналах из перечня ВАК РФ (K1, K2), 8 – в изданиях, индексируемых в международных базах SCOPUS и Web of Science. Издана 1 монография.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка и приложений. Общий объем 201 страницы, из них 192 страницы машинописного текста, включающих 51 рисунок, 41 таблицу. Библиографический список включает 286 наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** представлена актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, рабочая гипотеза работы.

**В первой главе** рассмотрен и проанализирован опыт российских и зарубежных исследователей по получению высокофункциональных бетонов. Отмечены особенности их получения, такие как точный расчет соотношения компонентов, повышенные требования к точности дозирования, использование современных суперпластификаторов для обеспечения низких водоцементных отношений, уменьшение крупности заполнителя. Также отмечено, что в технологии изготовления высокофункциональных бетонов предъявляются особые требования к выбору сырьевых материалов и их оптимальному содержанию. Одним из перспективных видов высокофункциональных бетона в настоящее время является самоуплотняющийся бетон (СУБ). В работе представлен анализ основных проблем при разработке составов и технологий производства СУБ, связанных с возможностью получения их однородной структуры и стабильных свойств. На основании проведенного анализа литературных данных сформулирована цель и задачи исследований.

**Во второй главе** представлены характеристики сырьевых материалов, применяемых в работе. Для исследований использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5 Б (ООО «Топкинский цемент»). В качестве крупного заполнителя использовался отсев щебня фракции 2,5-5 мм Курлекского карьера Томской области. Мелкий заполнитель – песок Туганского месторождения Томской области (АО «ТГОК «Ильменит») фракций 0,16; 0,315; 0,63; 1,25, являющийся побочным продуктом горнодобывающих работ. В качестве микрозаполнителя и компонента комплексной модифицирующей добавки использовалась кварцевая мука (удельная поверхность 474,7 м<sup>2</sup>/кг), произведенная путем помола песков Туганского месторождения (вторичный продукт АО «ТГОК «Ильменит»). В качестве микродисперсных составляющих модифицирующих добавок использовался микрокальцит (отход, образующийся при дроблении мрамора), характеризующийся содержанием карбоната кальция до 99%, удельной поверхностью 250 м<sup>2</sup>/кг. В качестве наномодификатора применялся нанодисперсный диоксид кремния. В работе исследовались и сравнивались различные виды нанодиоксида кремния, отличающиеся исходным сырьем и методом получения. Использовались



нанопорошки, полученные способом испарения вещества под действием электронного пучка – VHEE (удельная поверхность 38000 м<sup>2</sup>/кг, размер частиц – 10-20 нм, примеси – С (17 масс.%)), плазменно-дуговым методом из диатомита Камышловского месторождения – ТРМ1 (удельная поверхность 32000 м<sup>2</sup>/кг, размер частиц – 10-300 нм, примеси – С (26 масс.%)), плазменно-дуговым методом из кварцевого песка Туганского месторождения – ТРМ2 (удельная поверхность 32000 м<sup>2</sup>/кг, размер частиц – 10-300 нм, примеси – С (26 масс.%)), и золь-гель методом – SGM (удельная поверхность 40000 м<sup>2</sup>/кг, размер частиц – 10-48 нм, примеси отсутствуют). Данные нанопорошки отличаются друг от друга структурой, диапазоном размерности частиц и наличием примесей. В качестве пластифицирующей добавки для бетонных смесей применялся поликарбоксилатный гиперпластификатор – Rheoplast PCE 3241 (ООО «Реопласт»). Исследования цементного камня проводились на образцах-кубиках размером 20×20×20 мм из цементного теста нормальной густоты с разным содержанием добавок. Для каждого состава готовилось не менее 15 образцов. Значение прочности определялось как среднеарифметическое из 5 образцов, коэффициент вариации не более 5 %. Для исследования свойств бетона готовились образцы из бетонной смеси размерами 100×100×100 мм. Образцы твердели в нормальных условиях при температуре 20±2°С и влажности 95-98 %.

**В третьей главе** представлены результаты исследований влияния модифицирующих добавок на свойства цементного вяжущего. Обоснован выбор компонентов добавок, близких по вещественному составу с цементом, но имеющих разную структуру и свойства: нанодиоксид кремния ( $nSiO_2$ ), микрокальцит ( $MCa$ ), кварцевая мука ( $KM$ ).

На первом этапе проводились исследования влияния на свойства цементного камня добавок нанодиоксида кремния (табл. 1). Добавка вводилась сверх 100 % от массы цемента.

Таблица 1 – Составы исследуемых образцов и водопотребность цементного теста

Состав	ПЦ, %	Нанодиоксид кремния, %	Нормальная густота, %
Контрольный	100	–	28,75
Ц+nSiO <sub>2</sub> (TPM1)	100	0,01 / 0,03 / 0,05	28,75 / 28 / 28
Ц+nSiO <sub>2</sub> (VHEE)	100	0,01 / 0,03 / 0,05	28,75 / 28,75 / 29,25
Ц+nSiO <sub>2</sub> (TRM2)	100	0,01 / 0,03 / 0,05	28,75 / 28 / 28
Ц+nSiO <sub>2</sub> (SGM)	100	0,01 / 0,03 / 0,05	29,25 / 29,75 / 29,75

Установлено, что нанопорошки, отличающиеся способом получения, по-разному влияют на свойства цементного вяжущего. Так, наибольшей водопотребностью, по сравнению с контрольным образцом, обладают составы с порошком нано-SiO<sub>2</sub>, синтезированным SGM, при всех концентрациях добавки (нормальная густота от 29,25 до 29,75%), что связано с наличием значительного количества частиц преимущественно однородно малых размеров (10-48 нм), по сравнению с другими порошками (10-300 нм), а также с более высокой удельной поверхностью. При этом у составов с порошками нано-SiO<sub>2</sub>, синтезированными ТРМ, водопотребность цементного теста уменьшается как по сравнению с контрольным составом, так и с увеличением концентрации добавки.

Установлено, что значительный рост прочности на сжатие цементного камня в ранние сроки (1-е сутки) наблюдается у составов с nSiO<sub>2</sub>(VHEE) и nSiO<sub>2</sub>(TPM1), с

концентрацией добавки 0,03%, и составляет от 10 до 40% по сравнению с контрольным образцом (рис. 1). При использовании  $\text{nano-SiO}_2(\text{SGM})$ , наблюдается значительное снижение прочностных характеристик как на 1-е, так и на 7-е сутки твердения (до 32,9%), при всех концентрациях добавки. Увеличение содержания добавки  $\text{nano-SiO}_2$ , особенно порошка, произведенного SGM, ведет к снижению прочностных показателей (до 30 %) на всех сроках твердения.

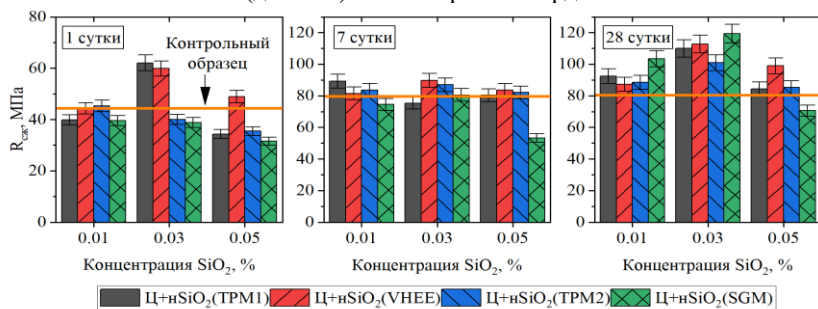
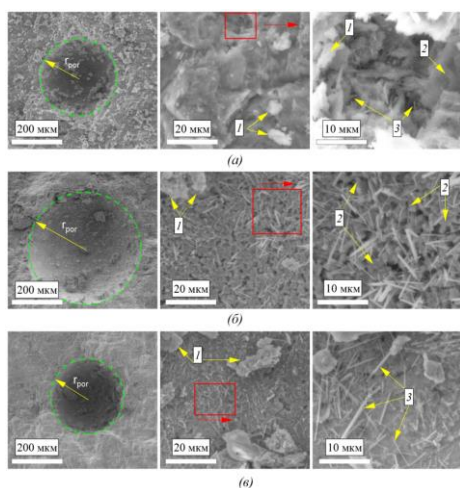


Рисунок 1 – Кинетика набора прочности при сжатии ЦК с добавкой нанодиоксида кремния

Повышенные показатели прочности у состава с порошком, полученным TPM, объясняются пластинчатой формой частиц, обладающих более развитой площадью поверхности и активными центрами, имеющими высокую химическую реактивность. Встраиваясь в структуру цементного камня, эти частицы создают армирующий эффект, а также способствуют релаксации дефектов и предотвращают развитие микротрещин. Частицы с широким диапазоном размерности (10-300 нм) уплотняют структуру за счет сокращения количества пор диаметром от 0,3 до 300 мкм. Благодаря ускоренной гидратации, о которой можно судить по ранней прочности (рис.1), и уплотнению структуры, мелкие трещины могут «залечиваться» за счёт дополнительного образования C-S-H геля. Ранняя прочность также объясняется тем, что происходит самоармирование структуры за счет образования «мостиков» между частицами углерода и диоксида кремния. Углерод обладает гидрофобными свойствами, а диоксид кремния гидрофильными, из-за чего каждый из них притягивает к себе соответствующие группы элементов, присутствующих в системе, и это создает натяжение связей между ними с образованием прочных структур. Отсутствие примесей в  $\text{nano-SiO}_2(\text{SGM})$ , а также его более высокая удельная поверхность приводит к повышенной реакционной площади поверхности частиц и химической активности. Это создает условия для химического связывания воды затворения частицами  $\text{SiO}_2$  в малорастворимые кристаллогидраты ( $\text{H}_2\text{SiO}_3$ ). Соответственно, возможно возникновение дефицита воды для процессов гидратации минералов цемента, что подтверждает высокая водопотребность данного вида  $\text{nano-SiO}_2$  (табл. 1). Сферические частицы  $\text{nano-SiO}_2(\text{SGM})$  уступают пластинчатым  $\text{nSiO}_2(\text{TPM2})$  по скорости реакции из-за меньшей доступности поверхности и ограниченных возможностей диффузии, что приводит к менее активному участию в процессах гидратации цементного вяжущего (рис.2).

Повышенные показатели прочности на сжатие ЦК (от 10 до 48%) достигаются к 28-м суткам твердения при использовании порошка  $\text{nano-SiO}_2$  в оптимальной концентрации – 0,03%, независимо от способа его синтеза.

На электронных снимках (рис. 2) видно, что игольчатые гидросиликаты кальция в структуре модифицированного цементного камня на основе плазменного нанодиоксида кремния более равномерно распределены по объему и размерам, по сравнению с нанодиоксидом кремния, произведенным SGM. Это свидетельствует о том, что порошок  $\text{nano-SiO}_2$ , полученный TPM, более активно участвует в процессах гидратации цементного вяжущего. Игольчатые кристаллы низкоосновных гидросиликатов кальция (3-20 мкм) формируют армированный матричный каркас цементного камня и, тем самым, повышают сцепление между частицами. При этом поверхность игольчатых кристаллов обладает повышенной реакционной способностью, что, в свою очередь, позволят им выступать контактными центрами новых связей. Это подтверждается результатами рентгенофазового (рис. 3) и дифференциально-термического анализа (рис. 4).



увеличение x2000; x4000; x8000;

Рисунок 2 – Электронно-микроскопический снимок и количественный анализ образца ЦК с добавкой нанодиоксида кремния (а – контрольный, б – TPM, в – SGM)

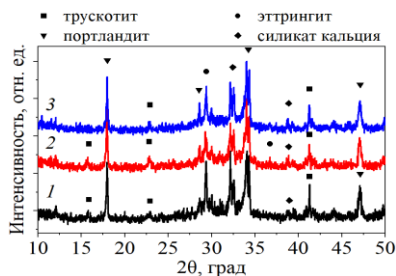


Рисунок 3 – Рентгеновские дифрактограммы:

1 – контрольный образец; 2 – образец с добавкой  $\text{nSiO}_2$  (TPM); 3 – образец с добавкой  $\text{nSiO}_2$  (SGM)

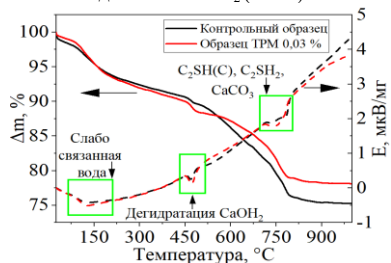


Рисунок 4 – Термограммы ЦК контрольного и с добавкой нанодиоксида кремния

Наночастицы, распределённые в цементной матрице, препятствуют развитию микротрещин, так как повышают локальную прочность и упругость. Это способствует снижению концентрации напряжений вокруг дефектов и их релаксации. Пространство пор полностью закристаллизовывается разрастающимися гидросиликатами кальция, обеспечивающими плотную структуру, с образованием дополнительных подложек для центров кристаллизации. Такое «затягивание» пор позволит прогнозировать повышение значений водонепроницаемости и морозостойкости в бетоне.

Анализ рентгеновских дифрактограмм показывает снижение интенсивности рефлексов портландита  $\text{Ca(OH)}_2$  в цементном камне, модифицированном нанодиоксидом кремния полученным ТРМ. Также в цементном камне с добавкой  $\text{nSiO}_2$ (ТРМ2) наблюдается повышение интенсивности пиков низкоосновных гидросиликатов кальция (трускотит  $\text{Ca/Si} \sim 0.6$ ) и снижение интенсивности пиков этtringита, что и обеспечивает высокие показатели прочности. При этом в составе с добавкой  $\text{nSiO}_2$ (SGM) интенсивность пиков этtringита высокая, что в дальнейшем может стать причиной сульфатной коррозии цементного камня.

На ИК-спектрах (рис. 5) контрольного и модифицированного образцов цементного камня видны основные различия – появление и изменение интенсивности полос в области  $\sim 1000 \text{ см}^{-1}$  (наличие полимеризованного диоксида кремния), и  $2700\text{-}3600 \text{ см}^{-1}$  (наличие гидросиликатов, таких как тоберморит), что связано с добавлением наночастиц  $\text{SiO}_2$ , влияющих на структуру и химический состав цементного камня.

Электронный снимок BSE шлифа цементного камня с картой распределения элементов (рис. 6) указывает на комплексную микроструктуру цементного камня, модифицированного добавкой нано- $\text{SiO}_2$ , что и приводит к повышению его механических характеристик.

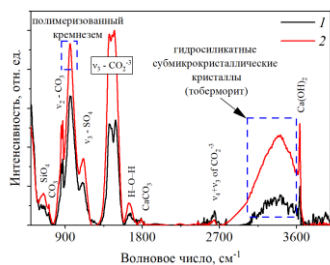


Рисунок 5 – ИК-спектры в диапазоне  $500\text{--}4000 \text{ см}^{-1}$  образцов на 28 суток:

1 – контрольный образец; 2 – образец с добавкой нанодиоксида кремния

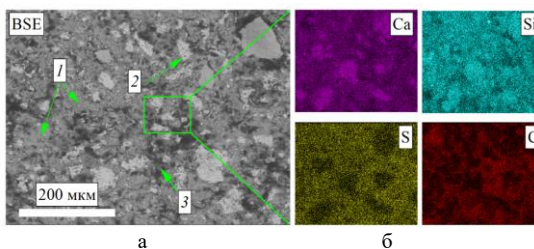


Рисунок 6 – Электронный снимок BSE полированной поверхности цементного камня (а) и карты распределения химических элементов (б): 1 – основная цементная матрица; 2 – гидратированные зерна; 3 – поровое пространство

Так как модифицирование цементного вяжущего нанодиоксидом кремния, произведенным методом дугового плазменного испарения, обеспечивает оптимальные показатели по водопотребности и стабильный прирост прочности, а также производится из доступного недорогого сырья (кварцевого песка Туганского месторождения), дальнейшие исследования проводились с этим видом модификатора.

В работе представлены сравнительные исследования влияния двух видов микрокальцита на свойства цементного вяжущего. Микрокальцит Ново-Ивановского карьера (НИ) имеет более высокие значения содержания  $\text{CaCO}_3$  (97-99%) и величину удельной поверхности ( $250 \text{ м}^2/\text{кг}$ ), по сравнению с микрокальцитом Дальнегорского карьер (Д) – содержание  $\text{CaCO}_3$  – 92,7%, удельная поверхность  $200 \text{ м}^2/\text{кг}$ , что может по разному влиять на свойства вяжущего.

По результатам исследований было установлено, что добавка микрокальцита Ново-Ивановского карьера, введенная в количестве 5% от массы цемента, обеспечивает оптимальную водопотребность и повышает прочностные характеристики вяжущего (до 26% на 28-е сутки), позволяя сокращать его расход (на 5%). Введение добавки микрокальцита в цементную матрицу обеспечивает затягивание пор и уплотнение структуры, за счет образования дополнительного количества частично закристаллизованных тоберморитоподобных гидросиликатов кальция и стабильных высокоосновных гидросиликатов кальция, что подтверждается данными физико-химических исследований (РФА, ДТА, микроскопия). Дальнейшие исследования проводились с микрокальцитом Ново-Ивановского карьера.

Также проводились исследования по оценке влияния кварцевой муки (КМ) в качестве добавки на свойства цементного вяжущего. В количестве 5% от массы цемента добавка обеспечивает прирост прочности (до 6,8%), при этом позволяя сокращать расход вяжущего. Это происходит за счет высокой удельной поверхности кварцевой муки ( $474,7 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) и образования дополнительных центров кристаллизации, что обеспечивает уплотнение и упрочнение структуры цементного камня. Проведенные исследования позволили сделать вывод, что кварцевая мука может эффективно применяться в качестве добавки в цементное вяжущее.

**Комплексная добавка (микрокальцит + кварцевая мука + нанодиоксид кремния).** Далее исследовалось влияние комплексной модифицирующей добавки, состоящей из микрокальцита, кварцевой муки и нанодиоксида кремния (ТРМ), на свойства цементного камня (табл. 2).

Таблица 2 – Составы исследуемых образцов и водопотребность цементного теста

Состав	ПЦ, %	МСа, %	КМ, %	Нано-SiO <sub>2</sub> , %	Нормальная густота, %
Контрольный	100	—	—	—	24,5
*Ц+МСа+КМ+nSiO <sub>2</sub>	100	5,0	2,5	0,03	26,75
Ц-МСа-КМ-nSiO <sub>2</sub>	92,47	5,0	2,5	0,03	24,5

\*Добавка вводилась сверх 100 % от массы цемента

Комплексная добавка обеспечивает стабильный рост прочности на всех сроках твердения (рис. 7). На 7-е сутки прирост прочности – до 33,3%, на 28-е сутки – до 40%, по сравнению с контрольным составом. С введением комплексной добавки в гидратированном цементном вяжущем идентифицируются дополнительные пики тоберморитоподобных гидросиликатов кальция ( $d = 4,9, 3,07 \text{ Å}$ ) с соотношением  $\text{Ca/Si} > 1,5$ , а также ксонотлита ( $\text{C}_6\text{S}_6\text{H}$ ) ( $d = 2,71, 1,1 \text{ Å}$ ) (рис. 8). Интенсивность и количество пиков данных соединений выше, чем у составов, в которые компоненты добавки вводились по отдельности, а также уменьшилось количество пиков чистого диоксида кремния, исходя из чего следует, что компоненты добавки работают в комплексе, повышая реакционную способность друг друга, тем самым обеспечивают более полную гидратацию цементного вяжущего. Пики  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и этtringита в модифицированном цементном камне отсутствуют.

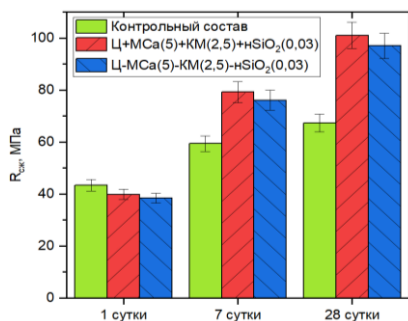


Рисунок 7 – Прочностные характеристики цементного камня, модифицированного комплексной добавкой (МСа+КМ+ nSiO<sub>2</sub>)

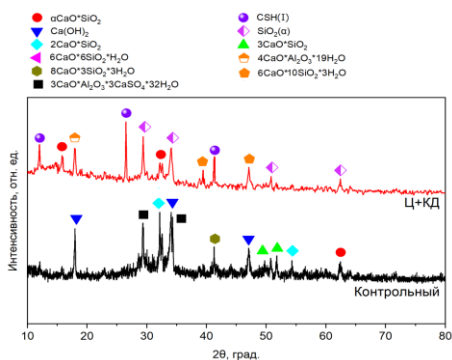


Рисунок 8 – Рентгеновские дифрактограммы контрольного образца и цементного камня, модифицированного комплексной добавкой (МСа+КМ+nSiO<sub>2</sub>)

Введение комплексной добавки (МСа+КМ+Нано-SiO<sub>2</sub>) в цементную матрицу обеспечивает образование низкоосновных гидросиликатов кальция с разрозненной игольчатой структурой, затягивающей поры (рис. 9). Это подтверждается элементным анализом новообразований, который показывает интенсивное присутствие гидросиликатов кальция.

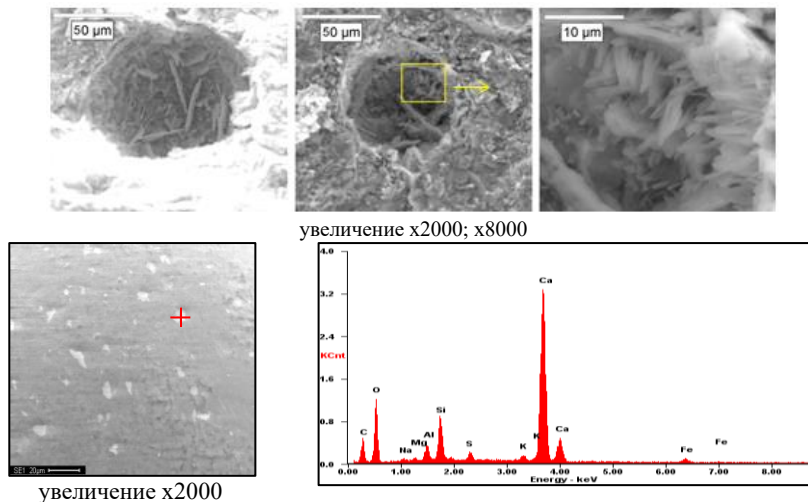


Рисунок 9 – Электронно-микроскопические снимки и количественный анализ цементного камня, модифицированного комплексной добавкой (МСа+КМ+nSiO<sub>2</sub>) на сколе образца и в поровом пространстве

Для определения тепловых эффектов при гидратации цемента были проведены исследования по установлению разницы между тепловыделением контрольного и модифицированного составов при разных температурах (20, 30 и

40 °С). Графики изменения теплового потока для исследуемых составов представлены на рисунках 10, 11.

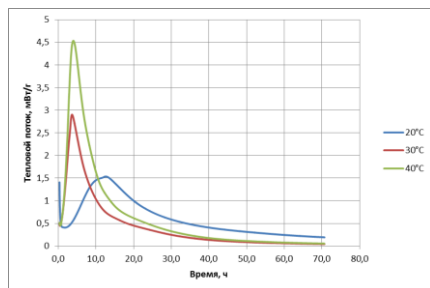


Рисунок 10 – Изменение теплового потока контрольного состава при различных температурах

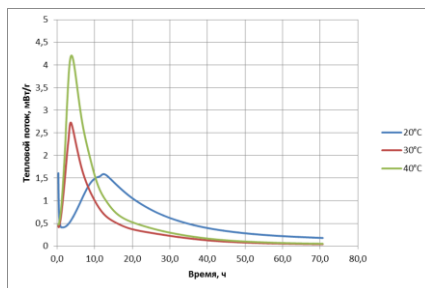


Рисунок 11 – Изменение теплового потока состава, модифицированного комплексной добавкой (МСa+KM+ nSiO<sub>2</sub>), при различных температурах

Анализ графиков показывает, что при гидратации модифицированного цементного вяжущего на ранних стадиях тепловыделение выше, чем у контрольного состава. Это связано с присутствием в составе добавки нано-SiO<sub>2</sub>, которая активизирует процессы гидратации цементного вяжущего с зарождением низкоосновных гидросиликатов кальция, что и объясняет повышение прочности в ранние сроки твердения. Полученные данные использовались для расчета энергии активации при гидратации цементного вяжущего. Определение кажущейся энергии активации проводилось методом изотермической калориметрии. Для определения кажущейся энергии активации  $E_A$  можно использовать значения скорости тепловыделения  $dQ/dt$  при нескольких температурах  $T$ .

Значения энергии активации в сравнении со значениями ранней прочности для рассмотренных составов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Энергия активации при гидратации цементного вяжущего

Состав	$E_A$ , кДж/моль	$R_{сж}$ , МПа (3 сутки)
Контрольный	43,087	58,96
Ц+МСa+KM+nSiO <sub>2</sub>	36,838	75,42

Снижение эффективного параметра энергии активации определяет увеличение скорости гидратации цемента на ранних сроках и способствует повышению прочностных характеристик образцов. Так, модифицированные составы, имея меньшие показатели энергии активации, показывают наибольший прирост прочности в ранние сроки твердения по сравнению с контрольным образцом.

Проведенные исследования позволили сделать вывод об эффективности разработанной комплексной добавки. При смешивании компонентов добавки друг с другом наноразмерный диоксид кремния, адсорбируясь на частицах микрокальцита и кварцевой муки, активирует их поверхность, повышая реакционную способность. Далее происходит модифицирование вяжущего и наноуглеродные включения, входящие в состав порошка диоксида кремния, структурируют воду затворения, что ускоряет реакции гидратации и образование

C-S-H геля. Нанодиоксид кремния является инициатором самоорганизации структуры цементного камня, а микрочастицы кальцита и кварцевой муки заполняют поровое пространство в структуре цементного камня, создавая специальные стесненные условия в процессе гидратации цемента, путем ограничения подвижности частиц за счет их соприкосновения и создания препятствий для свободного перемещения, а также выступают в роли подложек для формирования дополнительного объема гидратных соединений. Нано и микрочастицы, выстраиваясь на различных масштабных уровнях: микрокальцит (15 мкм) – кварцевая мука (4,9 мкм) – нанодиоксид кремния (10-300 нм), выступают в роли упрочняющих включений, при этом формируя дополнительные структурообразующие вещества, что препятствует движению дислокаций и деформационным процессам в цементном камне, и повышает плотность упаковки и, в дальнейшем, прочность вяжущего и долговечность бетона. Благодаря комплексному воздействию добавки на цементное вяжущее происходит самоорганизация и самоуплотнение структуры, что обеспечивает стабильность получаемых свойств.

В связи с тем, что современное производство и применение СУБ связано с проблемой достижения и сохранения стабильности требуемого уровня эксплуатационных характеристик, была разработана модифицирующая добавка, комплексно влияющая на структуру и улучшающая свойства цементного вяжущего. Дальнейшей задачей является разработка математической модели, которая позволит рассчитывать оптимальное содержание дисперсных компонентов в бетонных смесях и получать бетоны с заданными характеристиками и высоким уровнем стабильности их физико-механических характеристик.

**В четвертой главе** представлена разработанная физико-математическая модель проектирования оптимального соотношения компонентов полифракционной бетонной смеси, позволяющая варьировать доли мелкого заполнителя, наполнителя и цемента в зависимости от требуемых характеристик бетонной смеси и бетона (плотность, прочность, подвижность).

На рисунке 12 представлена модель соотношений фракций песка (0,16; 0,315; 0,63) для оценки величин плотности, водоотделения и расплыва конуса бетонной смеси, а также прочности бетона с использованием регрессий на основе гауссовских процессов.

Задача выбора оптимального состава решается в постановке условной оптимизации, когда критерием служит максимизация прочности как основного показателя, а остальные характеристики – удобоукладываемость, плотность, устойчивость к расслоению – рассматриваются как ограничения, значения которых должны оставаться в допустимом диапазоне. Такой подход позволяет сбалансировать влияние различных фракций и выбрать состав, который, не обеспечивая абсолютного максимума по каждому отдельному критерию, является компромиссным и технологически реализуемым.



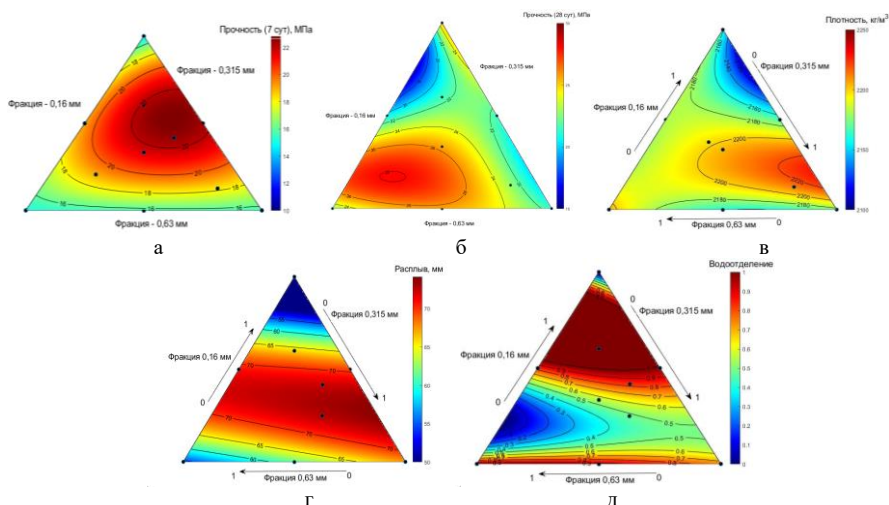


Рисунок 12 – Зависимость прочности бетона на 7-е сутки (а), 28-е сутки (б), плотности бетонной смеси (в), распыла конуса бетонной смеси (г), водоотделения бетонной смеси (д) от соотношений фракций песка

На рисунках 13-16 представлены значения распределения плотности бетонной смеси и прочности бетона: слева показаны средние значения, рассчитанные по модели гауссовских процессов, справа – соответствующие значения степени неопределённости (дисперсии) этих средних.

Анализ распределений плотности бетонной смеси (рис. 13) показывает, что даже при наличии высокой неопределённости проявляется отчётливый максимум, положение которого с высокой степенью коррелирует с положением максимального значения прочности бетона в аналогичных координатах.

Анализ регрессионных моделей на основе гауссовских процессов позволяет визуализировать распределение прочности бетона на 7-е и 28-е сутки твердения в зависимости от содержания кварцевой муки (рис. 14, 15) и цемента (рис. 16) для различных значений водоцементного отношения.

В полученных распределениях чётко прослеживается максимум прочности в интервале расхода кварцевой муки от 50 до 65 кг/м<sup>3</sup>, воды – 235-245 л/м<sup>3</sup>, цемента – 480-530 кг/м<sup>3</sup>, что согласуется с эффектом оптимальной упаковки (оптимальные свойства бетона достигаются тогда, когда более мелкие зерна максимально эффективно заполняют пустоты между более крупными, формируя структуру с минимальной пористостью для обеспечения максимальной прочности каркаса) и подтверждает целесообразность использования данного диапазона расходов компонентов при проектировании состава.

Точность прогностической модели оценивалась по показателю среднеквадратического отклонения (Root-mean square error – RMSE). В представленной модели RMSE для 7 суток = 3,1 МПа, RMSE для 28 суток = 4,5 МПа. Также учитывался коэффициент вариации – отношение RMSE к среднему значению. Коэффициент вариации в обоих случаях – 10%, что является допустимым показателем, учитывая, что СУБ – это сложная многокомпонентная смесь.

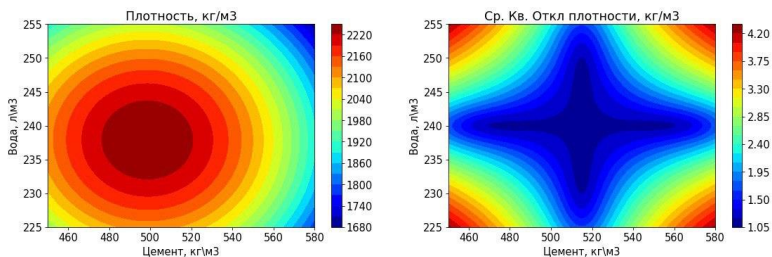


Рисунок 13 – Распределение плотности бетонной смеси в зависимости от расхода цемента

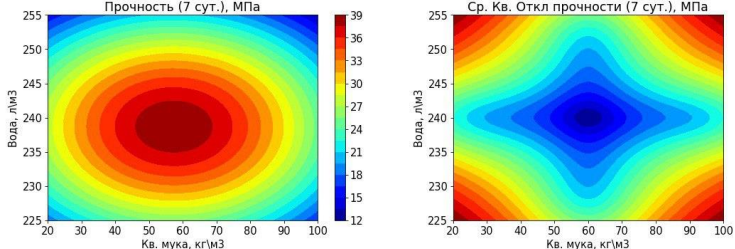


Рисунок 14 – Распределение прочности бетона (7 сут) в зависимости от содержания кварцевой муки

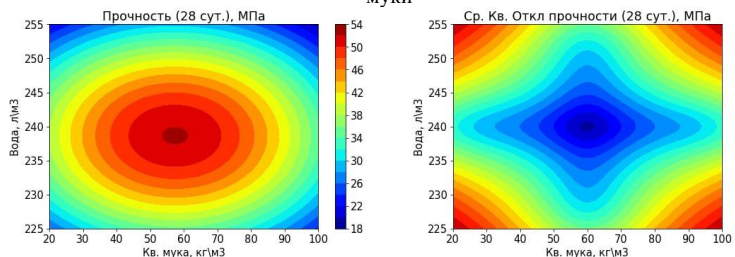


Рисунок 15 – Распределение прочности бетона (28 сут) в зависимости от содержания кварцевой муки

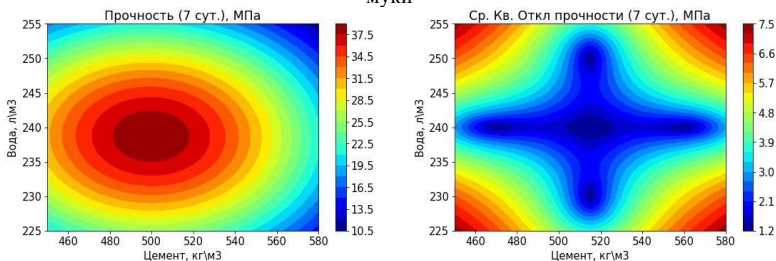


Рисунок 16 – Распределение прочности бетона (7 сут) в зависимости от расхода цемента

В работе представлены результаты комплекса исследований физико-механических свойств СУБ с оптимизированным составом, исходя из разработанной расчетной модели.

Основные эксплуатационные характеристики СУБ определялись по ГОСТ Р 59714-2021, ГОСТ Р 59715-2022, ГОСТ 10180-2012, ГОСТ 10060-2012.

Таблица 4 – Расчетный состав самоуплотняющейся бетонной смеси на 1 м<sup>3</sup>

Отсев щебня (Ф 2,5-5), кг/м <sup>3</sup>	ПЩ, кг/м <sup>3</sup>	Песок (Ф 1,25), кг/м <sup>3</sup>	Песок (Ф 0,63), кг/м <sup>3</sup>	Песок (Ф 0,315), кг/м <sup>3</sup>	Песок (Ф 0,16), кг/м <sup>3</sup>	КМ, кг/м <sup>3</sup>	КД, кг/м <sup>3</sup>	Rheoplast PCE 3241	В/Ц	Расплав, см	Расчетная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Класс бетона
396	412	170	265	265	265	60	20,6	8,24	0,45	50	2070	B40

Удобоукладываемость смеси определялась как величина расплыва нормального конуса и составила 58 см, что соответствует марке РК1 (рис. 17).

Вязкость самоуплотняющийся бетонной смеси определялась временем, за которое расплав нормального конуса достигнет значения 50 см. Это время составило 5 секунд, что соответствует марке по вязкости V2.

Текучесть смеси определялась способностью смеси растекаться через препятствия из арматурных стержней через блокировочное кольцо с 16 арматурными стержнями. Показатель текучести определяется разностью высот между бетонной поверхностью в центре и в четырех позициях по краю расплыва вне блокирующего кольца. Разница составила не более 10 мм, что соответствует марке Т4 (рис. 18).



Рисунок 17 – Расплав смеси 58 см



Рисунок 18 – Определение текучести при помощи блокирующего кольца

Показатели по прочности при сжатии исследуемого состава определялся на стандартных образцах-кубиках размерами 100×100×100 мм. Согласно полученным данным по прочности, которая в 28 суток твердения составляет 54 МПа, это соответствует классу В40.

Морозостойкость определялась третьим ускоренным методом при многократном замораживании и оттаивании. Образцы бетона выдержали 15 циклов испытаний на морозостойкость, что соответствует марке F500.

Таблица 5 – Основные эксплуатационные характеристики самоуплотняющегося бетона

Марка по удобоукладываемости	Марка по вязкости	Марка по текучести	Класс по прочности	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Марка по морозо- стойкости
РК1	V2	T4	B40	2081	F500

Таким образом, проведенный комплекс физико-механических исследований показал эффективность модернизированного метода проектирования состава самоуплотняющегося бетона с использованием в качестве наполнителей

фракционированных песков (побочный продукт горнодобывающего производства) и разработанной комплексной модифицирующей добавкой.

Из открытых источников известно, что для получения самоуплотняющихся бетонов классов В25-В30 расход цемента составляет в среднем 510-530 кг/м<sup>3</sup>. В ходе проведенных исследований был получен состав с расходом цемента 412 кг/м<sup>3</sup> и классом по прочности В40. Данный показатель был достигнут за счет применения разработанной комплексной добавки и подбора оптимального гранулометрического состава мелкого заполнителя.

Полученные мелкозернистые СУБ могут применяться для:

– неармированных или низкоармированных бетонных конструкций – плиты перекрытий, трубопроводы, облицовки туннелей, фундаментов, сваи, плиты проезжей части (марка по удобоукладываемости РК1);

– густоармированных конструкций и изделий, к которым предъявляются высокие требования по качеству поверхности и не требующие дополнительной обработки (марка по вязкости В2);

– инженерных сооружений, армированных с шагом от 60 до 80 мм (марка по текучести Т4).

Получение СУБ со стабильными эксплуатационными характеристиками обеспечивается посредством:

1. Направленного воздействия на физико-химические процессы в цементном вяжущем посредством введения в состав СУБ разработанной комплексной модифицирующей добавки;

2. Использования разработанной физико-математической модели проектирования оптимального соотношения компонентов полифракционной бетонной смеси с низкими коэффициентом вариации (не более 10%) и значением среднеквадратического отклонения;

3. Сходимости расчетных и экспериментальных данных по составам СУБ на лабораторных образцах. Коэффициент вариации при испытаниях составил не более 5%.

В соответствии с принятой рабочей гипотезой в работе научно обоснован и экспериментально подтвержден подход направленного регулирования структуры на различных масштабных уровнях (нано, микро, макро) через поэтапное модифицирование компонентов комплексной добавки и бетонной смеси, а также проектирования гранулометрического состава дисперсных материалов в бетоне при помощи математической модели. Выполненные экспериментальные исследования подтверждают получение самоуплотняющихся мелкозернистых бетонов, со стабильными эксплуатационными свойствами.

**В пятой главе** представлена технологическая схема производства комплексной добавки и самоуплотняющейся бетонной смеси с использованием типового бетоносмесительного оборудования. Комплексную добавку готовят путем последовательного перемешивания компонентов в смесителе интенсивного действия в последовательности: микрокальцит – нанодиоксид кремния – кварцевая мука. Для производства бетонной смеси принята базовая технологическая схема ее приготовления. При разработке технологии приготовления бетонной смеси были учтены научные результаты, представленные в главе 3 и 4. С учетом расхода

материалов на предложенный состав стоимость мелкозернистого СУБ составляет 10 700 руб./м<sup>3</sup>, что ниже рыночной стоимости на 10-12% (в зависимости от региона).

На базе предприятия ООО ТД «ТОП Бетон» выпущены 2 партии самоуплотняющихся бетонных смесей с комплексными модифицирующими добавками и проведены опытно-промышленные испытания. Результаты исследований используются в образовательном процессе. Разработанный мелкозернистый СУБ с комплексной добавкой имеет стабильные показатели качества и рекомендован к производству.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертации представлены в выводах:

1. Введение в цементную композицию наноразмерного диоксида кремния, произведенного методом дугового плазменного испарения из побочного продукта горнодобывающих работ (кварцевый песок), обеспечивает снижение водопотребности и стабильное увеличение прочности (до 38%), по сравнению с аналогичными добавками других способов производства.

2. Добавка микрокальцита, введенная в количестве 5% от массы цемента повышает предел прочности при сжатии цементного камня до 26%, по сравнению с контрольным составом и позволяет сокращать расход вяжущего (на 5%). Кварцевая мука (вторичный продукт горнодобывающих предприятий), добавляемая в цементное вяжущее в количестве 5% ведет к увеличению прочности цементного камня до 6,8%, при этом позволяет сократить расход вяжущего (на 5%).

3. Введение комплексной добавки (микрокальцит + кварцевая мука + нанодиоксид кремния в соотношении 2:1:0,012), в количестве 7,53% от массы цемента обеспечивает увеличение прочности на сжатие цементного камня до 40%, а при сокращении расхода цементного вяжущего (на 7,53%) – до 33,7%.

4. Механизм действия комплексной добавки заключается в самоорганизации и самоуплотнении структуры цементного камня и обеспечении получения стабильных свойств цементного вяжущего и бетона за счет нано- и микрочастиц, препятствующих деформационным процессам, а также являющихся подложками для формирования дополнительного объема структурообразующих веществ – низкоосновных гидросиликатов кальция, с разросшейся игольчатой структурой, затягивающей поры.

5. Адаптивная физико-математическая модель проектирования состава бетона (коэффициент вариации не более 10%) позволяет прогнозировать свойства самоуплотняющейся бетонной смеси и бетона (плотность, прочность, подвижность), а также оптимизировать технологические параметры производства.

6. Направленное воздействие на физико-химические процессы в цементном вяжущем при помощи комплексной модифицирующей добавки, а также использование физико-математической модели проектирования состава бетона с низким коэффициентом вариации позволяет получать СУБ со стабильными эксплуатационными характеристиками (удобоукладываемость, вязкость, текучесть, прочность).

7. Результаты научных исследований подтверждены данными опытно-промышленных испытаний на предприятиях ООО ТД «ТОП Бетон», АО «ТГОК

«Ильменит», а также внедрены в учебный процесс при подготовке учебных занятий студентов направления подготовки 08.03.01 Строительство, профиля «Производство строительных материалов, изделий и конструкций» и 08.04.01 Строительство программы подготовки «Эффективные строительные материалы и технологии».

**Рекомендации по дальнейшему развитию исследований.** Перспективами развития представленных в диссертационной работе результатов исследований являются использование полученных закономерностей по формированию оптимальной структуры смеси без использования крупных фракций заполнителей для разработки составов с их применением в аддитивных технологиях, а также возможности расширения сырьевой базы для производства высокофункциональных бетонов различного назначения.

Автор выражает глубокую признательность и благодарность к.т.н., доценту **Ольге Викторовне Демьяненко** и к.т.н., доценту **Роману Олеговичу Резаеву** за участие в обсуждении результатов работы.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### Издания из перечня ВАК России

1. **Куликова А.А.** Комплексные модифицирующие добавки для строительных смесей на цементной основе / А.А. Куликова, О.В. Демьяненко, Е.А. Сорокина, Н.О. Копаница // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2019. – Т. 21. – № 6. – С. 140-148. DOI: 10.31675/1607-1859-2019-21-6-140-148
2. Демьяненко О.В. Оценка влияния комплексной полифункциональной добавки на эксплуатационные характеристики цементного камня и бетона / О.В. Демьяненко, **А.А. Куликова**, Н.О. Копаница // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2020. – Т. 22. – № 5. – С. 139-152. DOI: 10.31675/1607-1859-2020-22-5-139-152
3. Демьяненко О.В. Влияние комплексных модифицирующих добавок на эксплуатационные свойства тяжелого бетона / О.В. Демьяненко, **А.А. Куликова**, Н.О. Копаница, А.Г. Петров // Известия вузов. Строительство. – 2021. – № 5. – С. 23-32 DOI: 10.32683/0536-1052-2021-749-5-23-32
4. Демьяненко О.В. Особенности проектирования составов многокомпонентных мелкозернистых бетонов / О.В. Демьяненко, Н.О. Копаница, **А.А. Куликова**, А.М. Устинов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – Т. 24. – № 2. – С. 114-124.
5. Власов В.А. Разработка состава мелкозернистого бетона с комплексными полифункциональными добавками / В.А. Власов, О.В. Демьяненко, Н.О. Копаница, О.Г. Волокитин, **А.А. Куликова** // Известия вузов. Строительство. – 2023. – № 1. – С. 24–34. DOI: 10.32683/0536-1052-2023-769-1-24-34
6. **Куликова А.А.** Влияние бинарных модифицирующих добавок на процессы гидратации цементных систем / А.А. Куликова, Н.О. Копаница, М.А. Дмитриева, О.В. Демьяненко, А.Г. Петров // Строительные материалы. – 2023. – № 9. – С. 83-88. DOI: <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-817-9-83-88>
7. **Куликова А.А.** Модифицирование цементной матрицы нанодисперсными частицами SiO<sub>2</sub>, синтезированными методом электродугового плазменного испарения /

А.А. Куликова, В.В. Шеховцов, О.В. Демьяненко, Н.О. Копаница, О.Г. Волокитин // Известия вузов. Строительство. – 2025. – № 7. – С. 38-48. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-799-7-38-48

### **Издания, индексированные в международной базе цитирования SCOPUS и Web of Science**

1. Kopanitsa N.O. Effective polyfunctional additive for composite materials based on cement / N.O. Kopanitsa, O.V. Demyanenko, **A.A. Kulikova** // Digital Technologies in Construction Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering / ed. by S.V. Klyuev. – 2022. – №. 173. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8\\_17](https://doi.org/10.1007/978-3-030-81289-8_17)
2. Kopanitsa N.O. Features of Designing Multicomponent Compositions Fine-Grained Concrete / N.O. Kopanitsa, O.V. Demyanenko, **A.A. Kulikova**, S.A. Lukyanchikov. // 4th International Scientific and Practical Conference “Advanced Building Materials and Technologies 2021”. – AIP Conf. Proc. – 2696. – P. 020003-1–020003-6 DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0116560>
3. Kopanitsa N.O. Influence of Activation Methods on the Structural and Technological Characteristics of Nanomodified Cement Compositions / N.O. Kopanitsa, O.V. Demyanenko, **A.A. Kulikova**, S.V. Samchenko, I.V. Kozlova, N.A. Lukyanova // Nanotechnologies in Construction. – 2022. – № 14(6). – P. 481-492. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492>. – EDN: PFYSQZ.
4. Копаница Н.О. Комплексные добавки на основе вторичных ресурсов для модификации цементных композиций / Н.О. Копаница, О.В. Демьяненко, **А.А. Куликова** // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 1. – С.136-144. DOI <https://doi.org/10.18799/24131830/2023/1/4045>
5. Kopanitsa N.O Composite building materials based on nanomodified cement systems / N.O. Kopanitsa, O.V. Demyanenko, **A.A. Kulikova**, A.F. Buryanov, N.A. Lukyanova, V.G. Soloviev // Nanotechnologies in Construction. – 2023. – № 15(5). – P. 443-452. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-443-452>
6. Копаница Н.О. Вторичные ресурсы в производстве композиционных строительных материалов на основе цемента / Н.О. Копаница, О.В. Демьяненко, **А.А. Куликова**, Е.В. Ткач, Н.И. Шестаков, И.В. Степина // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2023. – Т. 334. – № 10. – С. 49-60 DOI 10.18799/24131830/2023/10/4304
7. **Kulikova A.A.** Kopanitsa N.O., Shekhovtsov V.V., Demyanenko O.V. Influence of nanosized silicon dioxide on the properties of cement stone matrix: synthesis methods and experimental results / A.A. Kulikova, N.O. Kopanitsa, V.V. Shekhovtsov, O.V. Demyanenko // Russ Phys J. – 2024. – № 67. – P. 1711-1717 <https://doi.org/10.1007/s11182-024-03303-0>
8. Demyanenko O.V. Digital models for designing high-performance fine-grained concrete compositions using man-made raw materials / O.V. Demyanenko, N.O. Kopanitsa, **A.A. Kulikova**, A.F. Buryanov, I.V. Kozlova, N.A. Lukyanova // Nanotechnologies in Construction. – 2025 – 17(5) – P. 547-559. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2025-17-5-547-559>

### **Международные и всероссийские конференции, периодические печатные издания**

1. **Куликова А.А.** Влияние комплексных модифицирующих добавок на свойства цементного вяжущего в композиционных материалах / А.А. Куликова, О.В. Демьяненко // Современные ресурсосберегающие материалы и технологии: перспективы и

применение: материалы Международного симпозиума. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2020. – С. 49-54.

2. **Куликова А.А.** Разработка эффективной полифункциональной добавки / А.А. Куликова, О. В. Демьяненко, Н.О. Копаница // Эффективные методологии и технологии управления качеством строительных материалов: сборник научных трудов по материалам национальной научно-технической конференции с международным участием: НГАУ, 2021. – С. 77-81

3. **Куликова А.А.** Разработка комплексных модифицирующих добавок для тяжелого бетона / А.А. Куликова, О.В. Демьяненко, А.Н. Ничинский // The scientific heritage. – 2021. – V. 1. – № 80(80). – С. 37-40 DOI: 10.24412/9215-0365-2021-80-1-36-40

4. **Куликова А.А.** Формирование плотной структуры цементного камня и бетона / А.А. Куликова, О.В. Демьяненко, В.Ю. Сухопарова, И.И. Жеребилов // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: Материалы IX-ой международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е.М. – Тамбов, Изд-во ИП Чеснокова А.В., 2022. – С. 252-256.

5. Вторичные продукты в производстве строительных материалов: монография / В.В. Шеховцов, Н.К. Скрипникова, М.А. Семеновых, Н.О. Копаница, О.В. Демьяненко, **А.А. Куликова**, А.Б. Стешенко. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2023. – 152 с.

6. **Куликова А.А.** Самоуплотняющиеся бетоны на основе местного сырья / Куликова А.А., Копаница Н.О. // Современные строительные материалы и технологии: сборник научных статей. – Вып. 6. – Калининград: ФГУП «ИиТ газеты «Стражи Балтики» Минобороны России, 2024. – С. 106-114.

Подписано в печать. 2025. Формат 60×84.  
Бумага офсет. Гарнитура Таймс. Уч. изд. л.  
Тираж 100 экз. Заказ № 38.

Изд-во ФГБОУ ВО «ТГАСУ», 643003, г. Томск, пл. Соляная, 2.  
Отпечатано с оригинал-макета автора в ООП ФГБОУ ВО «ТГАСУ».  
634003, г. Томск, ул. Партизанская, 15.