

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования

«Волгоградский государственный технический университет»

На правах рукописи



ЛЯШЕНКО ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**МОДИФИКАЦИЯ СТРУКТУРЫ ФИБРОБЕТОНА КОМПЛЕКСНЫМИ
НАНОДОБАВКАМИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ
СВОЙСТВ**

Специальность 2.1.5 Строительные материалы и изделия

Диссертация на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель: доктор
технических наук, профессор

Перфилов Владимир Александрович

Волгоград – 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НАНОМОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ БЕТОНА.....	10
1.1 Анализ состояния вопроса исследований, направленных на изучение влияния наномодифицирующих добавок на свойства бетонов	10
1.2 Особенности введения модифицирующих углеродных нанодобавок в структуру строительного композита	18
1.2.1 Введение наномодифицирующих добавок с помощью ультразвукового диспергирования.....	20
1.2.2 Введение наномодифицирующих добавок механическими способами	24
1.3 Общие сведения о структуре и свойствах углеродных наноматериалов.....	26
1.4 Свойства наномодифицированных бетонов	30
1.5 Модифицированные бетоны.....	34
1.6 Виды, характеристика фибробетонов и армирующих волокон для их производства	40
1.7 Выводы по главе 1	44
ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ	46
2.1 Материалы для проведения исследований	46
2.2. Методы и оборудование для проведения экспериментов	57
2.3. Выводы по главе 2	67
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НАНОМОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК С СОСТАВЕ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА	69
3.1. Подбор пластификатора.....	69
3.2. Основы структурообразования наномодифицированного бетона	74
3.3. Особенности введения наномодификаторов в состав бетона методом механической активации и ультразвуковым диспергированием.....	82
3.4. Исследование структуры наномодифицированного бетона	91
3.5. Устойчивость суспензии	96
3.6. Исследование влияния наномодифицирующих добавок на бетон с помощью рентгеновской дифрактометрии.....	102
Выводы по главе 3	112

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ СОТАВОВ ФИБРОБЕТОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ НАНОМОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК	116
4.1. Способ получения мелкозернистого наномодифицированного бетона	116
4.2. Влияние совместного применения добавок наномодификаторов и фиброволокна на свойства фибробетона	120
4.2.1. Разработка состава сталефибробетона.....	121
4.2.2 Разработка состава базальтофибробетона	130
4.3. Регрессионный анализ влияния добавок на прочностные характеристики бетона.....	137
4.3.1 Регрессионный анализ состава сталефибробетона.....	138
4.3.2 Регрессионный анализ состава базальтофибробетона	142
4.4. Фибробетонная стяжка как альтернатива армирования стальной арматурной сеткой.....	146
Выводы по главе 4	149
ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	155
Приложение 1.....	171
Приложение 2.....	172
Приложение 3.....	173

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность исследования

Современное строительное материаловедение направлено на получение новых или улучшение имеющихся технологий материалов, связанных с повышением основных эксплуатационных свойств, что позволит значительно повысить качество и долговечность конструкций, изделий и материалов. Это позволит снизить стоимость на их затраты, за счет уменьшения количества строительно-монтажных работ и уменьшения материалоемкости строительных конструкций. Одним из перспективных направлений для решения проблем в данной области является применение наномодифицирующих добавок для бетонов, в том числе фибробетонов с включением углеродных наноразмерных трубок.

Актуальность данной работы обусловлена следующими факторами:

1. **Повышение качества и долговечности конструкций.** Добавление углеродных нанотрубок и суперпластификатора позволяет улучшить физико-механические свойства фибробетона, что способствует повышению его качества и долговечности. Это особенно важно для строительства объектов, работающих в сложных условиях, например, в агрессивных средах или при воздействии высоких нагрузок.
2. **Снижение стоимости строительства.** Использование наномодифицированных бетонов может снизить стоимость строительства за счёт уменьшения расхода цемента и других компонентов, а также повышения эффективности строительно-монтажных работ.
3. **Развитие новых технологий.** Исследование влияния углеродных нанотрубок и суперпластификаторов на свойства фибробетона способствует развитию новых технологий в строительстве, что является важным фактором для обеспечения конкурентоспособности отечественной строительной отрасли.
4. **Расширение возможностей применения фибробетона.** Улучшение свойств фибробетона за счёт наномодификации расширяет возможности его

применения в различных областях строительства, включая гражданское, промышленное и транспортное строительство.

Таким образом, исследование применения углеродных трубок совместно с суперпластификатором в составе фибробетона является важной задачей, направленной на повышение эксплуатационных свойств бетона.

В настоящее время развитие технологий производства многокомпонентных бетонов характеризуется внедрением как традиционных составов с химическими добавками, так и высокофункциональных бетонов.

Научная гипотеза:

Комплексное применение углеродных наномодификаторов и фибры обеспечит армирование микро и макроструктуры бетона, что в свою очередь, обеспечит более плотную компоновку частиц цементной матрицы и обеспечит значительное повышение прочностных и других физико-механических характеристик бетона.

В соответствии с вышеизложенным, **целью** данных научных исследований является улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств фибробетона за счет модифицирования структуры композита на микро- и наноуровнях путем введения в состав бетона наноразмерных углеродных трубок.

Для реализации поставленной цели решались следующие задачи:

1. Произвести подбор наиболее эффективной пластифицирующей добавки, способствующей увеличению подвижности смеси и наилучшей диспергации наноразмерных добавок;
2. Исследовать влияние совместного применения наномодифицирующих добавок (углеродные нанотрубки) и пластификатора на свойства мелкозернистого бетона;
3. Исследовать и разработать оптимальную технологию введения малого количества вводимых добавок наномодификаторов в состав бетонной смеси;
4. Произвести исследования влияния наномодифицирующих добавок на структурные изменения и свойства бетонных композиций;

5. Разработать эффективную методику получения наномодифицированного фибробетона с применением стальной и базальтовой фибры, совместно с введением углеродных нанотрубок, способствующих повышению физико-механических свойств;

6. Установить оптимальное количество вводимых модифицирующих добавок, для обеспечения наилучшего эффективного распределения нанодобавок и стальной фибры в матрице композита, а также для повышения пределов прочности при сжатии и изгибе;

7. Разработать новые составы и практические рекомендации для получения фибробетонов, модифицированных комплексными нанодобавками.

Научная новизна работы:

1. Теоретически обоснована и экспериментально доказана эффективность применения стальной и базальтовой фибры совместно с суперпластификатором, углеродными нанотрубками для целенаправленного влияния на процесс модифицирования микро- и макроструктуры, и улучшения физико-механических характеристик бетона.

2. Установлено влияние и подтверждена эффективность комплексного применения добавок, включая углеродный наномодификатор «Таунит-М», суперпластификатор «Полипласт СП-3» и технологии их приготовления, что способствовало модификации структуры на наноуровне за счет более полной гидратации и ускоренного кристаллизационного роста самоармирующихся основных минералов цементного камня, в том числе на поверхности углеродных нанотрубок, что обеспечивает более плотное расположение кристаллообразований и, в конечном итоге, приводит к возрастанию прочности бетона как в ранние, так и конечные сроки твердения.

3. Впервые определено, что использование технологии линейно-индукционного вращения за счет равномерного распределения наноуглеродных трубок по объему смеси, обеспечивает более плотную компоновку частиц, в процессе твердения это приводит к ускоренному росту содержания портландита и

более высокой степени гидратации алито-белитовой фазы, что, в свою очередь, способствует повышению прочности бетона.

Теоретическая значимость работы:

Теоретическая значимость работы заключается в определении расчетных показателей влияния вводимых добавок наномодификаторов и фибры на прочностные характеристики бетона при помощи многофакторных зависимостей, а также в разработке составов и методик получения наномодифицированных фибробетонов.

Практическое значение работы:

1. Определены оптимальные составы фибробетонов, с включением наномодификаторов, которые модифицируют структуру бетона на микро- и наноуровнях, значительно увеличивая прочность материала. Разработаны наномодифицированная бетонная смесь и технология ее получения. Получено два патента на изобретение РФ: № 2781876 Бетонная смесь / В.А. Перфилов, Д.А. Ляшенко, Е.Ю. Козловцева; Волгогр. гос. техн. ун-т. - 2022., № 2832473 Способ получения мелкозернистой наномодифицированной бетонной смеси / В.А. Перфилов, Д.А. Ляшенко, М.Е. Николаев; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. - 2024.

2. Внедрение результатов осуществлено в следующем виде: Разработанный состав сталефибробетона с применением фибры «Миксарм», углеродных нанотрубок «Таунит-М» и суперпластификатором «Полипласт СП-3» применялся при обустройстве стяжки производственного помещения, расположенного в городе Волгограде, по адресу: ул. Моцарта, д. 45 "А". Общая площадь покрытия составила 3040,8 м², при толщине стяжки 50 мм. Экономический эффект применения данного состава бетона составил 868 387 рублей за счет отказа от применения арматурной сетки, в пользу применения сталефибробетона. (см. приложение 3).

Методология и методы исследования:

Экспериментальные исследования проводились с помощью современной измерительной аппаратуры на основе применения стандартных методик. Было

задействовано оборудование для исследования структуры и фазового состава бетона. Также применялись математические методы статистики с применением ЭВМ.

Достоверность результатов работы:

- проведение исследований осуществлялось при помощи стандартных средств измерений и приборов как разрушающего (гидравлические пресса), так и неразрушающего типа (ультразвуковой прибор «Пульсар 1.2);

- исследование микро и макроструктуры разработанного наномодифицированного мелкозернистого бетона производилось с применением современных компьютеризированных приборов сканирующей электронной микроскопии – СЭМ «Versa 3D»

- проведен анализ фазового состава наномодифицированного бетона с помощью метода рентгеновской дифрактометрии, прибором «BrukerD8 Advance» (модель 2016 г., серийный номер 210247). Анализ дифрактограмм и расшифровка фазового состава осуществляли с помощью программного обеспечения к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1) с использованием лицензионной базы данных PowderDiffractionFile-2 (TheInternationalCenterforDiffractionData).

Апробация работы:

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на:

Конференции актуальных проблем и перспектив развития строительного комплекса 7-8 декабря 2021 года, в г. Волгограде (Волгоградский государственный технический университет);

7-й Международной конференции по строительству, архитектуре и техносферной безопасности ICCATS, 10-16 сентября 2023 года, в г. Сочи (Московский политехнический университет);

8-й Международной конференции по строительству, архитектуре и техносферной безопасности ICCATS, 8-14 сентября 2024 года, в г. Санкт-Петербурге (Московский политехнический университет);

VII Национальной научно-практической конференции с междунар. участием, приуроч. ко Дню рос. Науки 9 февраля 2024 года, в г. Астрахань (Астраханский государственный строительный университет);

Конференции наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий (НТО-V-2024), 7-8 ноября 2024 года, г. Красноярск.

Личный вклад:

Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное исследование, которое подтверждает эффективность совместного применения фибры и углеродных нанотрубок в составе бетона. Проведены лабораторные исследования с последующей обработкой и анализом полученных данных. Произведена апробация полученных тезисов.

Публикации:

Результаты диссертационной работы и выполненных исследований изложены в 19 научных трудах, в том числе: 1 всероссийской конференции и 4 международных конференций. Опубликовано 13 научных статей, в том числе 2 статьи, индексируемые в базе данных Scopus, 4 статьи, индексируемые в системе RSCI, 7 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК, а также 2 патента на изобретение.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, основных выводов, списка использованной литературы, включающего 128 наименований, и 3 приложения. Содержит 185 страниц машинописного текста, в том числе 55 рисунков и 56 таблиц.

ГЛАВА 1. АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НАНОМОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК ДЛЯ БЕТОНА

1.1 Анализ состояния вопроса исследований, направленных на изучение влияния наномодифицирующих добавок на свойства бетонов

На сегодняшний день имеется множество технологий по внедрению в производство многокомпонентных бетонов, как традиционных, имеющих различные химические добавки [3,37,38,95,111], так и высокофункциональных бетонов [3,31,90,128]. Нанотехнологии представляют собой одно из перспективных направлений развития науки и техники, охватывающее широкий спектр областей. Особое внимание уделяется применению наномодификаторов, которые являются ключевым фактором в развитии технологий, в частности, в строительном материаловедении.

Исследования и разработки в области наномодифицированных строительных материалов охватывают множество сфер человеческой деятельности, включая медицину, электротехнику, машиностроение и другие. В строительной отрасли также проводятся значительные исследования, однако на сегодняшний день большинство из них находятся на стадии разработки.

Данная работа посвящена актуальным исследованиям и разработке в области получения новых видов и улучшения свойств фибробетонов с использованием наномодифицирующих технологий.

На основе проведённых исследований [2,103,109,118] можно сделать вывод о высокой актуальности нанотехнологий в области строительного материаловедения и их потенциальной востребованности среди потребителей. Наномодификация строительных материалов представляет собой комплекс технологических мероприятий химического или физического характера, направленных на введение или формирование наномодифицированных структур в матрице материала. Эти процессы приводят к модификации исходного материала на атомно-молекулярном

уровне, что способствует значительному улучшению физико-механических характеристик или приобретению новых свойств строительными композиционными материалами. В последнее время в строительном материаловедении наблюдаются разработки новых видов бетонов путем использования различных модифицирующих высокотехнологичных добавок. Примером может служить разработка технологии высокопрочных бетонов high-strength concrete (прочность при сжатии от 80 до 120 МПа), сверхвысокопрочные ultra high-strength concrete (выше 120 МПа), а также ультравысокопрочные бетоны high performance concrete [6,85,107].

Производство такого рода бетонов имеет цель повышения эксплуатационных характеристик, что заключается в разработке оптимальной рецептуры бетонной смеси. Исходя из этого проводятся исследования влияния различных факторов на необходимые характеристики готового материала. Полученные экспериментальные данные применяются для получения требуемых показателей готовых изделий и материалов. В дополнение к подбору высококачественных вяжущих веществ производят оптимизацию состава заполнителей, а также комбинирование водоцементного отношения, наполнителей и модифицирующих добавок. Перспективным направлением технологии высокофункциональных и высокопрочных бетонов является применение нанодобавок различных модификаций. Значительный вклад в области исследования технологии наномодифицированных бетонов в России и за рубежом внесли: Баженов Ю.М., Ибрагимов Р.А., Пухаренко Ю.В., Королев Е.В., Королев А.С., Яковлев Г.И., Первушин Г.Н., Ткачев А.Г., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В., Павленко Н.В., Рабинович Ф.Н., Романов В.П., Чернышов Е.М., Бикбау М.Я., Пономарев А.Н., Юдович М.Е., Строкова В.В., Буракова А.Е., Иноземцев А.С., Аубакирова И.У., Веселова С.И., Артамонова О.В., Гришина А.Н., Поляков И.А., Орлов В.С., Бабков В.В., Xianming Shi, B. Lothenbach, Bernhard Elsener, N. de Belie, J.L. Provis, W. Matthes, M.C.G. Juenger, S.A. Bernal и другие.

На сегодняшний день в строительном материаловедении термин

«наномодифицированный бетон» получил широкое распространение. Несмотря на это, данный материал еще не получил устойчивого понятия и определения. Так в исследуемой литературе [7,9,11,12] авторами предлагается применять указанный термин для строительных материалов, в составе которых присутствуют наноразмерные суспензии. То есть материалы, которые имеют в составе наноразмерные частицы, как минимум в одном пространственном направлении (100-500 мкм).

Акцентирование внимания исследователей в области внедрения нанотехнологий для строительного материаловедения обусловлено возможностью получения материалов с заданными, а в некоторых случаях и улучшенными эксплуатационными свойствами. Особенно этот фактор может иметь место в специализированных областях строительства, где стандартные методы получения бетона недостаточно эффективны [28,125].

В наномодифицированных бетонах применяют добавки, значительно улучшающие структуру бетона начиная с наноуровня. Такие бетоны имеют более плотную упаковку по объемным характеристикам матрицы [28].

Можно выделить следующие актуальные направления применения нанотехнологий в области строительного материаловедения:

- наномодифицированные бетоны [4,29,118];
- наномодифицированные стальные изделия, полимерные изделия и окрасочные материалы;
- наномодифицированные вяжущие вещества [116];
- композиционные материалы специального назначения [24,122].

Можно выделить два основных подхода получения наномодифицирования строительных материалов [84,87]:

1. Метод «сверху – вниз», реализуется путем использования явлений, связанных с изменением энергетического состояния структуры материала или же физико-химической активности удельной поверхности частиц твердых веществ при их измельчении путем физических, либо механических способов до получения

структуры материалов, обладающих критериями нанометрового порядка;

2. Метод «снизу – вверх» в области строительного материаловедения реализуется на основе применения явлений конденсации при формировании твердой фазы веществ в гидратационных, гидротермально-синтезных системах твердения. Вещество в таком случае формируется из элементарных частиц, которые образуют наноразмерный порядок при технологическом контроле (см. рис. 1.1).

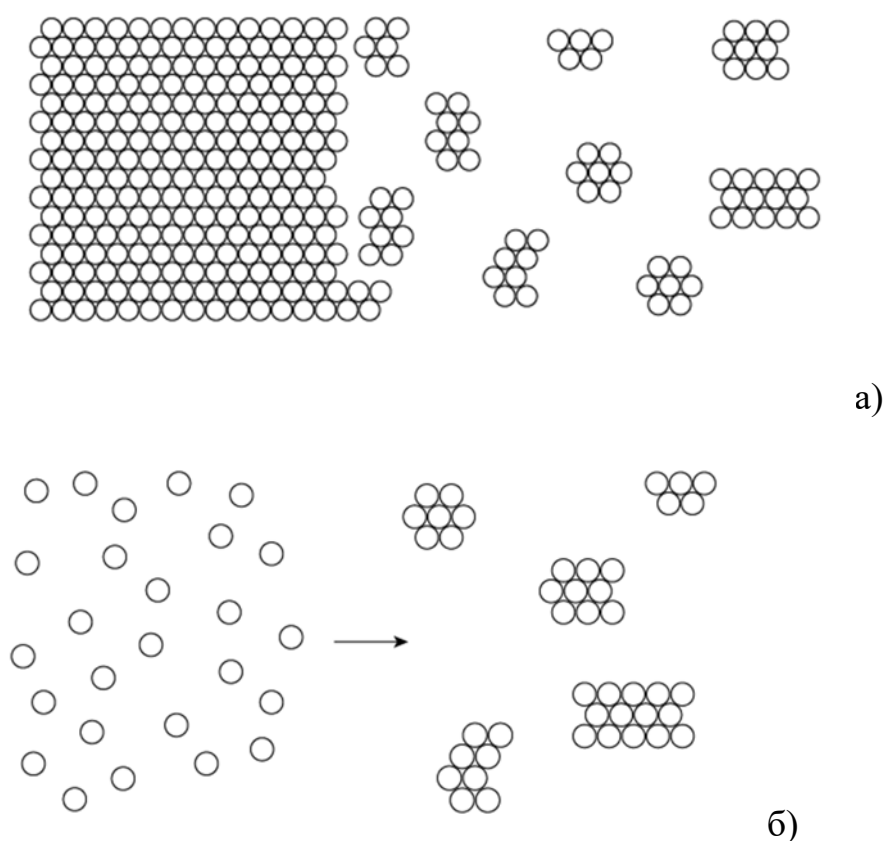


Рисунок 1.1 – Основные подходы технологии наномодифицирования бетона

а) «Сверху вниз»; б) «Снизу вверх»

Можно выделить три основных метода получения наномодифицированного бетона. Первый метод включает измельчение традиционного портландцемента (ПЦ) до наноразмерных частиц. Однако этот подход сталкивается с проблемой использования различных типов мельниц, среди которых наиболее распространена шаровая мельница. Её применение не является экономически целесообразным из-

за значительного энергопотребления. В качестве альтернативы предлагаются планетарные мельницы, которые могут быть более эффективными с точки зрения энергозатрат [78], в свою очередь данные установки достаточно сложны в изготовлении и эксплуатации. В городе Балашиха, в ООО «НПО «Активация» была разработана инновационная установка – активатор. Предназначена данная установка для измельчения цементного вяжущего. Рабочая камера активатора выполнена в кольцевом виде, что позволяет обеспечить эффективное измельчение материала. В зависимости от мощности и геометрии камеры ее производительность варьируется от 0,5 до 5 тонн в час, при этом энергопотребление находится в пределах от 6 до 8 кВт·ч на одну тонну обработанного материала. Это значительно ниже шаровых мельниц, потребление которых составляет около 50 кВт·ч на одну тонну.

Также имеются установки с еще большей энергоэффективностью, такие как измельчители портландцемента, функционирование которых основано на электромагнитном воздействии. Такие установки называются аппаратами вихревого слоя (АВС). Принцип работы таких установок основан на создании вихревого потока обрабатываемой смеси и мелющих тел, что способствует эффективному измельчению материала. Данное оборудование было изобретено в 1965 году Д.Д. Логвиненко, и патент на него был зарегистрирован под номером 168264 «Реактор для проведения процессов в кипящем слое». Однако представленное изобретение имело узкое направление. Увеличение производства подобных установок было возобновлено в наши дни (ООО «Регионметтранс», г. Нижний Новгород).

Для данной разработки следует учитывать малые сроки хранения активированных вяжущих. Это связано с тем, что ПЦ после измельчения до наименьших размеров частиц при контакте с атмосферной средой склонен к быстрой потере активности. Исходя из этого, такое вяжущее рекомендуется использовать после непосредственного изготовления. Одним из примеров может служить производство сборного железобетона. Аппараты вихревого слоя являются

доступными для подобных производств, так как они имеют невысокую стоимость. Имеются разработки технологии активированного вяжущего с более долгим сохранением характеристик. Такой разработкой занимался научных коллектив под руководством доктора технических наук М.Я. Бикбау (патент WO 2014148944 A1 «Способ производства наноцемента и наноцемент») [55]. Указанный способ производства основан на механической активации цемента с добавлением полимерного модификатора в виде минеральных кремнеземистых добавок, а также диоксида кремния и гипсового камня. Таким образом происходит формирование сплошных капсул с нанооболочками, имеющих толщину 20-100 нм. Таковую активацию производят до размеров удельной поверхности $200-1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ в шаровых мельницах. Наномодифицированный цемент с наноразмерными включениями получают благодаря применению следующих компонентов в определенных пропорциях, выраженных в массовых процентах: портландцемент или клинкер – 30-90%; полимерный модификатор – 0,6-2%; гипсовый камень – 0,3-6%; кремнеземистая добавка – остальное. Этот материал регулируется национальным предстандартом ПНСТ 19-2014 «Портландцемент наномодифицированный. Технические условия». Разработка данного стандарта была осуществлена с участием М.Я. Бикбау, который внес значительный вклад в обобщение многолетних результатов исследований и практического применения наномодифицированного цемента. Разработка подобных материалов ведется для возможности более широкого промышленного внедрения наномодифицированного цемента [97].

Следует отметить работы Ибрагимова Р.А., направленные на разработку технологии применения аппаратов вихревого слоя (АВС). В данных исследованиях произведен конкретный подбор режимов обработки в данных установках. Имеются разработки с применением «сухого вяжущего» при помощи активации за счет применения мелющих тел (металлические, ферромагнитные цилиндры), так и цементной суспензии (цемент – вода).

Полученные таким образом цементные камни исследовали методом

инфракрасной спектроскопии. Было определено, что применение портландцемента, активированного с помощью АВС, увеличивает количество силикатной фазы ПЦ на 12-39%, а также снижает количество портландита на 8%. Введение углеродных нанотрубок повысило количество включений гидросиликатов кальция на 20-28% [31].

Еще одним примером использования АВС является разработка ООО «Регионметтранс». Отмечается, что обработка цементного вяжущего в АВС не только повышает дисперсность, но и приводит к изменению энергетического состояния вещества. Для определения норм времени обработки портландцемента были получены уравнения регрессии, указывающие на зависимость времени обработки вяжущего на повышение марочной прочности бетона. Таким образом, при обработке с частотой вращения 70 Гц в течение 4,5-5,5 мин была повышена марочная прочность в 1,48 раза. При этом наблюдается большая интенсивность набора прочности в начальные сроки твердения. Так, в первые сутки прочность обработанных образцов превысила прочность образцов на основе активированного вяжущего в 2,44 раза [36].

Отдельно проводили исследования активации в АВС цементной суспензии (цемент – вода). В данном случае наблюдалось повышение прочностных характеристик бетона, а также его водонепроницаемости и морозостойкости. В камеру АВС подается предварительно перемешанные цемент и вода затворения в виде суспензии, также в камере находятся анизотропные ферромагнитные тела длиной 5-10 мм и диаметром 1,2 мм. После обработки в камере АВС в течение 2-3 минут, активированную суспензию размешивают с заполнителем в бетоносмесителе.

Технология применения АВС совместно с кавитационными установками рассматривались в работе Королева Е.В. и Ибрагимова Р.А. [32] Кавитационная установка применяется для повышения эффективности вводимой пластифицирующей добавки в воду затворения [64]. Обработка вяжущего в камере АВС происходила в течение 4-8 минут с применением ферромагнитных мелющих

тел. После активации портландцемента удельная поверхность частиц повысилась от 3000 до до 6000 см²/г. Обработку воды затворения совместно с пластифицирующей добавкой производили в течение 5-9 минут. При этом вода в аппарате подвергалась следующим физическим воздействиям: кавитация, гидроудар, ультразвуковое воздействие и электромагнитное поле.

Авторами [62] разрабатывались составы, где помимо механоактивации смеси применялись комплексные добавки. Так, в состав вводились микрокремнезем и наномодифицирующие микросферы. Микросферы смешивались с суспензией на основе нанокomпонентов. После чего на поверхности микросфер образовывался слой из наночастиц. В процессе твердения такого бетона на поверхности сфер образовывалось множество центров кристаллизации, что в свою очередь повышает прочность материала [62]. Стоит отметить, что имеются разработки с похожим принципом, в которых вместо микросфер применяли фиброволокна [120].

Также имеются разработки составов легкого бетона [27,33,36,65], где в качестве добавки применялся микрокремнезем и полые микросферы. Поверхность микросфер обрабатывали раствором золя кремневой кислоты и золя гидроксида железа (размеры частиц не менее 30 нм). Минеральная часть включает кварцевый песок и микрокремнезем, которые заполняют межзерновое пространство, что позволяет образовать более плотную структуру. Так как микросферы покрыты наномодификатором, это позволяет локализовать химическую активность на границе раздела фаз «цементный камень – микросфера». Таким образом уплотняется граница раздела фаз [27,33,65], и при этом упрочняется наиболее слабая часть композита. Технология приготовления такого бетона имеет следующий вид: предварительно микросферы смешиваются с коллоидным раствором золя кремневой кислоты и золя гидроксида железа. Затем в смесителе происходит смешивание каменной муки, микрокремнезема, портландцемента и наномодифицированных микросфер, после получения однородной смеси вводится вода затворения совместно с пластификатором. Такой легкий бетон имеет более высокий модуль упругости (в 1,1-1,5 раза), а также повышенную прочность (в 1,12-

1,45 раз) [27,33,65].

Работы Пухаренко Ю.В. основываются на применении различных углеродных нановолокон фуллероидного типа. Наномодификатором выступают фуллерены и фуллероидные углеродные наночастицы (ФУН), которые имеют различные типы строения и топологию. Для приготовления бетонов использовались следующие виды модификаторов:

- а) Добавка взвеси фуллереновой сажи в H_2O ;
- б) Добавка раствора фуллеренола-d в H_2O ;
- в) Добавка взвеси фуллеренола-ss в H_2O .

Приготовленные образцы по сравнению с контрольным образцом показывали увеличение прочности при сжатии, а также понижалось влагопоглощение уже на 2, 4 и 7 сутки. Введение даже малого количества наномодифицирующих добавок значительно повышает эксплуатационные характеристики [127].

1.2 Особенности введения модифицирующих углеродных нанодобавок в структуру строительного композита

Можно отметить, что синтезирование углеродных наноматериалов имеет свои особенности. Так, при формировании структуры они могут приобретать различные диаметры, длины, а также могут быть переплетены. При этом переплетение структуры можно отнести к негативному фактору, так как это мешает равномерно вводить наномодификаторы на основе углеродных структур, а особенно это важно в строительных композиционных материалах. Это связано с тем, что наночастицы способны отрицательно влиять на изменение физико-механических параметров композита. Большинство исследований указывают на положительное влияние углеродных наномодифицирующих структур в строительные композиционные материалы. При этом, введение таких добавок обычно сопровождается дополнительной обработкой нанодобавок. Связано это с возможностью полного раскрытия всех физико-механических характеристик при

модифицировании, а именно при получении стабильных суспензий наноструктур. Рассматриваемые частицы наноразмерного порядка способны к взаимодействию между собой за счет Ван-дер-Ваальсовых сил притяжения. Для устранения данного недостатка применяются различные виды методов диспергирования суспензий с наномодифицирующими структурами, такие как механические, химические, а также с применением ковалентных связей и др. (рис. 1.2.)

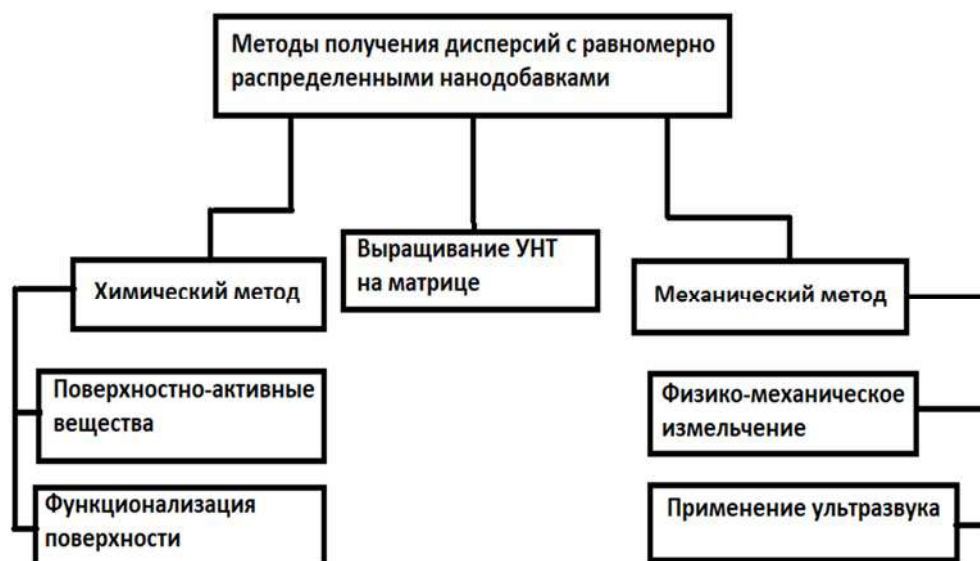


Рисунок 1.2 – Основные методы введения наномодифицирующих добавок в суспензии

Можно отметить, что ультразвуковая обработка является одним из самых часто применяемых и эффективных способов получения суспензий с равномерным распределением нанотрубок. Множество исследований в области строительного материаловедения рассматривают способы применения наномодифицирующих добавок путем их введения в смесь в воде затворения. Образовавшие агломераты из наноразмерных частиц разделяют путем ультразвукового кавитационного воздействия, а также за счет нагрева и образования свободных радикалов. Кроме эффекта диспергации, такое воздействие может изменить диаметр нанотрубок и уменьшить их длину [30,108,117,124].

1.2.1 Введение наномодифицирующих добавок с помощью ультразвукового диспергирования

Одним из перспективных направлений введения наномодифицирующих добавок в бетоны является ультразвуковая диспергация. Данная технология заключается в введении наномодификаторов, добавок-пластификаторов в воду затворения, с получением водной суспензии.

Процесс диспергирования нанотрубок при помощи ультразвукового воздействия в жидкостях выполняется за счет образования перепада давления и параллельного образования разряжения и сжатия. При разрежении межмолекулярное расстояние увеличивается и как следствие между частицами образуется микроскопический кавитационный пузырь (рисунок 1.3). Разрыв пузыря происходит при максимальном давлении на молекулы с параллельным образованием механической и тепловой энергии [127]. Частота ультразвуковых волн может влиять на геометрические параметры получаемых кавитационных пузырей. Исходя из этого, данный тип воздействия будет отличаться эффективностью за счет установления наиболее оптимальных параметров обработки. Повышение параметров обработки может привести к превышению пороговых и к разрушению структуры диспергируемых нанотрубок, а в отдельных случаях это может привести к агломерации наноразмерных частиц.

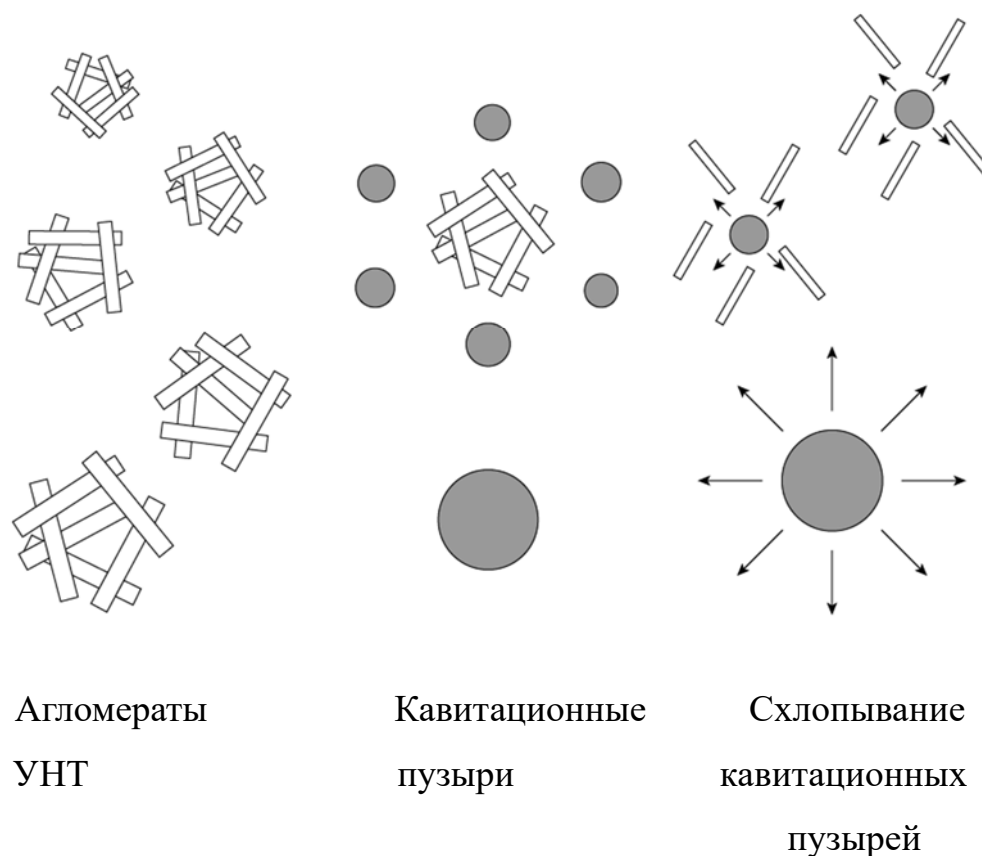


Рисунок 1.3 – Схема диспергирования углеродных нанотрубок с помощью ультразвука в водной среде [91]

Наномодификаторами могут являться различные углеродные наноразмерные добавки. Пластификаторы повышают пластичность бетонной смеси при неизменном водоцементном отношении, позволяют регулировать рецептурный состав смеси, а также способствуют более оптимальному распределению наноразмерных частиц в воде затворения [36,91].

Водная суспензия подготавливается путем введения в воду затворения расчетного количества нанодобавки и пластифицирующей добавки. Обработка производится с помощью ультразвуковых диспергаторов, рабочий орган которых оснащен пьезоэлектрическим компонентом, генерирующим ультразвуковые колебания частотой от 22 кГц. Обработка воды затворения в зависимости от объема, количества добавки, а также частоты ультразвука производится в пределах 3-10 минут. Таким образом, возможно введение наноразмерных добавок в количестве

0,001-0,01% по массе вяжущего. В процессе обработки пластификаторы выступают как поверхностно активные вещества, которые оседают на поверхности наночастиц и позволяют предотвратить агломерацию частиц и обеспечить стабильную эмульсию, способную не расслаиваться в течение 7 суток. Это упрощает возможность введения УНТ в состав бетонной смеси. Повышение прочности бетонов, модифицированных таким способом, обусловлено формированием более оптимальной и плотной микроструктуры цементного камня. Также отмечается ускорение набора прочности в ранние сроки твердения цементного камня [66,102].

Введение углеродных нанотрубок приводит к образованию плотной, однородной мелкокристаллической структуры в сравнении с контрольными составами. Многослойные углеродные нанотрубки по сравнению с однослойными повышают прочностные характеристики в меньшей степени [57,106,114].

Яковлевым Г.И. были проведены исследования, направленные на наномодифицирование бетона при помощи диспергации различных добавок с помощью гидродинамического кавитатора. В бетон вводятся однослойные УНТ и волокна асбеста, а также пластификаторы, которые также улучшают эффект диспергации. Помимо этого, рассматривалась возможность совместного применения УНТ и добавки микрокремнезема. Введение комплексных добавок приводило к повышению эксплуатационных характеристик до 35% [39,40].

Устройство гидродинамического кавитатора основано на эжекции струйных течений окружающей водной среды. Пассивная среда уносится из кольцевых щелей с внешней стороны во время истечения вышеуказанного потока. При этом такое движение компенсируется притоком из пространства вокруг, а центральная часть уносится пассивно, без подпитки. Таким образом, в центральной части установившегося кольцевого потока с течением времени будет расти вакуум. Интенсивность протекания процесса зависит от скорости истечения жидкости. Образовавшая разность давлений с обеих сторон стенки струи создает куполообразные полости за счет смыкания с низким внутренним давлением. При этом давление внутри полостей не статично, и при повышении давления до

определенного значения, а также факторов, за счет которых уменьшается толщина стенок струи, происходит нарушение целостности данных оболочек. Данный процесс сопровождается резким выравниванием давления [39].

Такое выравнивание возвращает систему в исходное состояние, то есть к удалению куполообразных смыканий и образованию прямолинейного движения. Далее цикл продолжается.

Все изменения поверхности струи будут создавать волновое воздействие с частотой, пропорциональной скорости истечения. Возникновение и распространение волновых воздействий также создает звуковое поле.

Данные устройства представляют собой жидкостные свистки, генерирующие звуковое поле во внутреннем объеме, где протекает жидкость. В обрабатываемых жидкостях возникают кавитационные полости, которые в фазе избыточного давления мгновенно схлопываются. Энергия, высвобождающаяся при схлопываниях, вызывает интенсивное перемешивание жидкости, сопровождающееся локальным повышением температуры в эпицентрах схлопываний. Данная установка применялась для введения следующих наномодификаторов:

- Водная суспензия с волокнами хризолита-асбеста и поверхностно-активными веществами на основе карбоксилатов, которые выступают как пластификаторы и обволакивают оболочки хризолита, предотвращая его возможное распыление [56]. Введение таких волокон в количестве от 0,1% по массе цемента способствует повышению прочности при сжатии до 40% и при изгибе до 35% [56].
- Комплексная добавка многослойных углеродных нанотрубок (МУНТ) и микрокремнезема. В качестве вяжущего применялся портландцемент совместно с гипсовым вяжущим в пределах 55-75% и 5-35% соответственно. Диспергации в ультразвуковом кавитаторе подвергались УНТ в среде суперпластификаторов. В то время как микрокремнезем вводился в сухие компоненты смеси. Введение 0,006%

УНТ по массе вяжущего позволило повысить прочностные характеристики до 50% [105].

1.2.2 Введение наномодифицирующих добавок механическими способами

В различных исследованиях рассматриваются введение наноструктур за счет дезинтегрирующих устройств механического воздействия, к примеру шаровые мельницы и подобное оборудование [104,110,115].

Механические воздействия могут произвести к измельчению нанотрубок, а именно к уменьшению их длин и диаметров. Этот процесс сопровождается раскрытием спаянных при синтезе наночастиц, а также разбивкой их агломератов. Такая обработка значительно повышает сорбционные свойства наноразмерных добавок и уменьшает их способность образовывать агрегаты. Однако для достижения всех указанных положительных воздействий необходимо интенсивное и длительное воздействие. Такие воздействия, в свою очередь, могут привести к механическим деформациям нанотрубок и нарушению их структуры. В таком случае образуется аморфный углерод, наличие в составе которого не приведет к видимым повышениям качественных свойств получаемых материалов. Еще одна отрицательная сторона механического перемешивания - это высокая энергозатратность. Обычно такие процессы протекают достаточно длительное время, что и приводит к увеличению затрат на энергообеспечение производственных процессов.

Активация цементных вяжущих является одним из эффективных методов улучшения физико-механических свойств бетона. Такие процессы направлены на увеличение контактной площади поверхности твердых компонентов цемента. За счет этого образуются активные центры кристаллообразования, благодаря чему образуются благоприятные условия для гидратации цементного вяжущего.

Механическая активация строительных смесей также приводит к изменению свободной энергии системы за счет воздействия механических сил. Активация может происходить и без разрушения материала, в отличие от измельчения, но измельчение, в свою очередь, всегда сопровождается активацией. Это связано с тем, что внешние силы повышают запас энергии частиц при увеличении поверхностной энергии. Таким образом, все помольные механизмы воздействуют на цементные смеси как механические активаторы.

Эффективность активации вяжущих материалов обусловлена способом разрушения частиц, который определяется типом агрегата и используемого механического воздействия. Рассмотрим исследования измельчения композиционных вяжущих в различных агрегатах.

Для шаровых мельниц характерно диспергирование материала с помощью свободных ударов, что и является основной причиной разрушения по наиболее слабым связям структуры измельчаемого материала. Данный метод наиболее оптимален для производства щебня или искусственного песка, так как получаемый продукт обычно имеет изометрическую форму, а размеры продукта на выходе обычно находятся в одних пределах. Нужно учитывать, что для материалов с уже высоким показателем удельной поверхности необходимы дополнительные затраты энергии. В случае достижения критического размера частиц удар будет заменяться истиранием, и в этом случае ротор мельницы будет создавать завихряющее воздействие.

В вибрационных мельницах мелющие тела совершают более сложные движения под действием дополнительной инерции, центробежных сил и знакопеременных воздействий. Такой процесс отличается интенсивным истиранием материала и незначительным ударным воздействием. Таким образом вибрационные мельницы более эффективны для получения тонкодисперсных материалов, в сравнении с шаровыми мельницами;

Вариопланетарные мельницы позволяют регулировать скорость вращения размольных стаканов независимо от опорного диска, благодаря этому изменяется

траектория перемещения мелющих тел. Это приводит к варьированию интенсивности ударных, истирающих и центробежных воздействий. Все это делает такой тип мельниц наиболее энергоэффективными. Синергетическое воздействие всех типов нагрузок способствует получению наиболее тонкомолотых порошков [8].

Еще одним типом механических активаторов являются аппараты вихревого слоя (АВС), которые обеспечивают постоянное движение (вращение) ферромагнитных мелющих тел в немагнитной трубе посредством электромагнитного поля. За счет движения ферромагнитных тел в камере аппарата вихревого слоя происходит измельчение материала, сопровождающееся сложным физическим и механическим воздействием. На эффективность механической активации АВС влияет отношение длины и диаметра ферромагнитных мелющих тел, а также их объемное содержание в камере [10,89].

1.3 Общие сведения о структуре и свойствах углеродных наноматериалов

В различных научных областях имеется множество исследований, направленных на изучение различных модификаций наноразмерных углеродных материалов, так имеются разработки нанотрубок, графенов, графитов, астраленов, фуллеренов и др. Применение углеродных структур в различных областях обусловлено их исключительными физическими и морфологическими особенностями. Наиболее значимым свойством углеродных структур являются высокие показатели прочности. Прочность углерода в разы превышает прочность стали. Также высоки показатели удельной поверхности, электропроводимость и возможность взаимодействий с различными структурами на химическом уровне. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности применения и дальнейшего совершенствования технологий использования данных материалов в

различных областях науки и техники, включая современное строительное материаловедение.

Фуллерены открыли в 1985 году, авторы Роберт Керл, Гарольд Крото и Ричард Смит. Первоначальные работы были направлены на изучение практического внедрения углеродных наноматериалов. Только к 1996 году данная форма наноматериалов была принята как новая. Графиты и алмазы имеют периодическую решетку атомов, в то время как фуллерены имеют кристаллическую молекулярную форму. Также исследователи столкнулись с тем, что первоначально количество синтезируемого материала было малым. Только к 1990 году Вольфганг Кретчмер и Дональд Хаффман применили угольную дугу и получили углеродные структуры в макроскопическом объеме. Данный метод позволял синтезировать фуллерены в лабораторных условиях, тем самым открылась возможность более обширных исследований.

Фуллерен представляет собой молекулу в виде сферы, которая состоит из более чем 60 атомов углерода. Публикации [29,80,121] подтверждают актуальность детальных исследований и большой пласт накопленных сведений о структуре и физико-механических свойствах углеродных наноматериалов.

Гексагональная форма графитовой сетки многостенных структур фуллеренов обнаружена в 1991 году при исследовании полученных молекулярных форм с помощью применения электронной микроскопии. Исследователи установили, что поверхность фуллеренов имела бесшовную цилиндрическую форму. Исходя из их геометрии данные объекты были названы как «углеродные нанотрубки».

При дальнейшем изучении углеродных нанотрубок была разработана их классификация по количеству графитовых сеток, которые скручены в цилиндрическую форму, благодаря чему и формируется структура нанотрубки. Различают как однослойные, так и многослойные углеродные нанотрубки. Однослойные углеродные нанотрубки (ОУНТ) имеют хиральную структуру, что отличает их от остальных модификаций УНТ. При этом они обладают следующими геометрическими показателями: диаметр от 1 до 2 нм, а длина от 0,2 до 5 мкм [98].

ОУНТ в зависимости от направления скручивания графеновых листов имеют следующие геометрические виды:

Ахиральная (в виде зигзага); ахиральные (в виде кресла); хиральные (рис. 1.3.) [115].

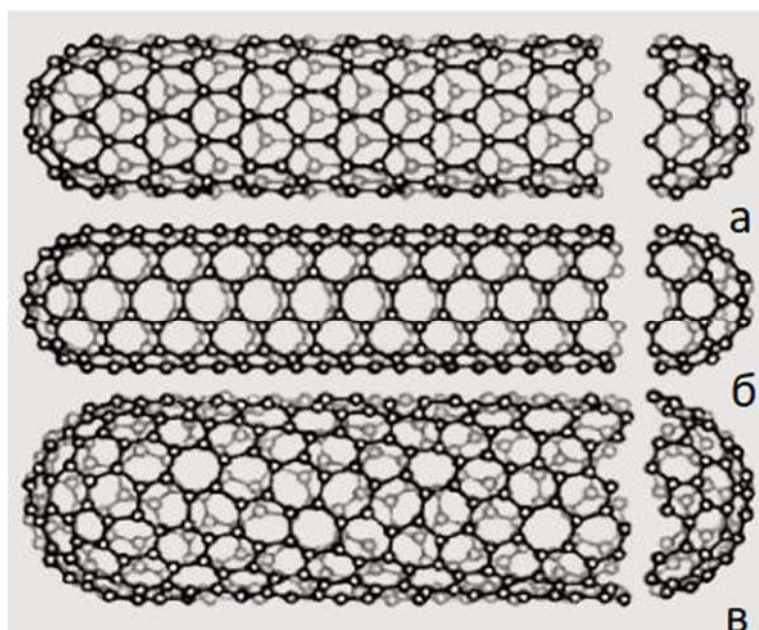


Рисунок 1.4 – Модификации графена

а – ахиральные типа кресла, б – ахиральные типа зигзагообразной структуры,
в – хиральная структура.

Многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) имеют вид нескольких графеновых слоев, скрученных между собой. Благодаря этому они могут иметь большее разнообразие структур, чем ОУНТ. Многослойные углеродные нанотрубки (МУНТ) имеют вид нескольких скрученных графеновых слоев. Из-за этого они отличаются более широким разнообразием модификаций структуры. В качестве основных можно выделить: «папье-маше», «рулоны», коаксильные цилиндры (вложенные друг в друга) [119]. Во всех модификациях наблюдается примерно одно межслойное расстояние, эта величина составляет около 0,34 нм. В дефектных структурах этот параметр может увеличиться до 0,4-0,5 нм [62]. Но благодаря разнородности структур нанотрубки значительно отличаются по физико-механическим параметрам от прочих наномодификаторов.

Углеродные нанотрубки обладают высокой эластичностью, что позволяет им выдерживать значительные изгибающие нагрузки без существенных структурных изменений. После снятия нагрузки они способны возвращаться в исходное состояние, что делает их перспективным материалом для применения в различных областях [86].

УНТ обладают рядом значимых свойств, которые находят применение в различных областях науки и техники. Углерод имеет уникальные химические, магнитные, сорбционные, тепловые, механические и другие характеристики. Многообразие этих свойств дает возможность перспективного применения данного материала для решения большого спектра задач, в том числе в строительном материаловедении. Для оценки и систематизации физико-механических показателей углеродных нанотрубок в таблице 1.1 приведены основные механические параметры нанотрубок. В таблице также представлены данные для сравнения с характеристиками традиционных материалов, что позволяет оценить преимущества и недостатки нанотрубок в контексте их практического применения.

Таблица 1.1 — Сравнительные характеристики углеродных материалов со сталью [55]

Характеристика	Предел прочности на растяжение, ГПа	Модуль упругости, ГПа	Удельная прочность, Гпа	Удельный модуль упругости, Гпа	Предельное растяжение, ГПа
Графит	100	1000	0	500	10
Сталь	0,4	200	0,05	26	26
Углеродные волокна	3-7	200-800	2,4	100-400	1-3
ОУНТ	300-1500	1000-5000	150-750	500-2500	26
МУНТ	300-600	500-1000	200-300	250-500	20-40

Описанные свойства, благодаря которым углеродные соединения могут образовывать большое количество различных связей делают углерод веществом с

наибольшим числом аллотропических модификаций циклического и линейного строений (рис. 1.5)

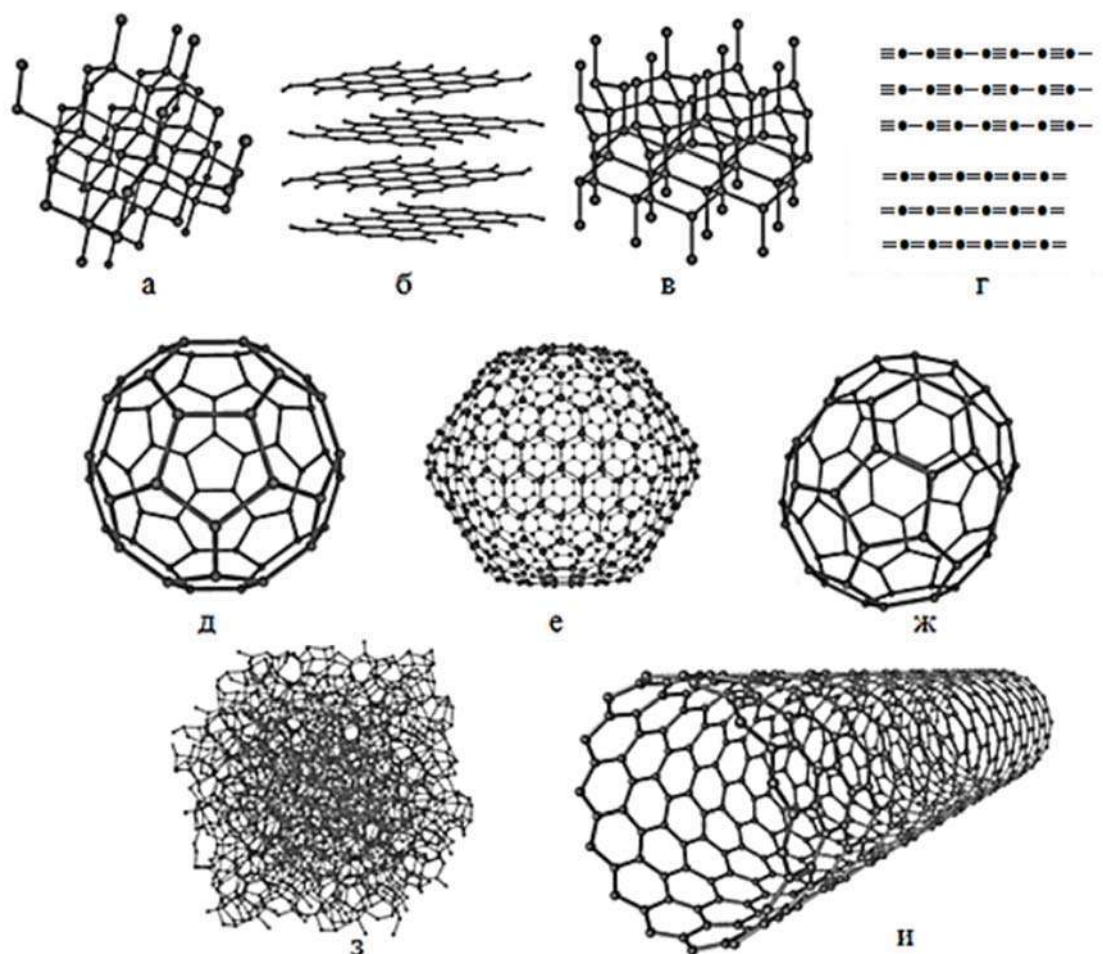


Рисунок 1.5 – Строение аллотропных форм углерода

а - алмаз; б - графит; в - лонсдейлит, г - а- и б- карбины, д, е, ж - семейство фуллеренов C₆₀, C₅₄₀, C₇₀ соответственно, з - аморфный углерод, и- нанотрубка

1.4 Свойства наномодифицированных бетонов

Первые исследования, направленные на применение наноразмерных добавок в строительном материаловедении, были произведены в конце 20 века. Исследования показали, что при введении в состав бетонов углеродных нанотрубок в количестве от 0,001 до 0,0001% по массовому расходу вяжущего вещества,

повышаются прочностные характеристики до 40%, а в некоторых случаях и в 2-3 раза [62,117]. Такой рост прочности обусловлен тем, что введение наноразмерных углеродных трубок провоцирует кристаллизационный рост в минеральном веществе. Занимая место между частичками бетонного раствора, углеродные нанотрубки обеспечивают более плотное расположение кристаллообразований и в процессе гидратации цемента данные новообразования, разрастаясь и переплетаясь между собой, в конечном итоге, придают веществу более плотную структуру и прочность. Такой процесс называется дисперсным самоармированием. Прочность цементного камня таким образом увеличилась на 40%, а бетона на 10%. Связана такая разница с тем, что для бетонной матрицы более важную роль играет макроармирование, по сравнению с микро- и наноуровнями. Проблема применения таких добавок является затруднительной в производственных условиях. Более эффективное диспергирование нанотрубок в бетонной среде получалось в лабораторных условиях, путем применения специализированного оборудования. В противном случае, неэффективное введение нанотрубок может привести к тому, что они выпадут в осадок. Учитывая данную проблему, рассматривалось нанесение наноинициаторов самоармирования на твердые наполнители: по началу в таких экспериментах применяли песок, а затем рассматривались методы нанесения добавок, на базальтовые фиброволокна.

Так коллектив разработчиков, под руководством генерального директора «НТЦ прикладных нанотехнологий» кандидата технических наук А. Н. Пономарева разработали промышленную технологию производства наномодифицированного бетона различных марок и назначения. Практическое применение разработанного бетона можно отметить при реконструкции моста в городе Кимры через реку Волгу. Использование бетонов с повышенными прочностными характеристиками позволило снизить материалоемкость возводимых сооружений. В частности, в мостовых конструкциях применялись элементы с уменьшенной площадью сечения, что способствовало значительному снижению веса конструкций (до четырех раз).

Наноразмерные добавки, вводимые в состав бетонов, позволяют получать материалы различной плотности: легкие (от 0,4 до 1 т/м³), средней плотности (от 1 до 2 т/м³) и плотные (от 2 до 2,5 т/м³). Легкие бетоны нашли широкое применение при реализации специфических задач для строительных конструкций особого назначения. Бетоны, имеющие среднюю плотность, применяют при строительстве мостов, аэродромов и других сооружений. Тяжелые бетоны могут иметь самую высокую прочность, в некоторых случаях их прочность может превышать 150 МПа. Исходя из этого, его применение актуально в высотном строительстве, для снижения веса используемых конструкций.

Для получения наномодифицированных бетонов необходим процесс разработки, учитывающий их экономическую целесообразность, которая особенно важна при использовании дорогостоящих модифицирующих добавок, а также требуются оригинальные технологические решения.

Как было отмечено ранее, основная технологическая проблема для технологии получения наномодифицированных бетонов это равномерное распределение наночастиц по всему объему смеси. Имеются исследования, направленные на решение данной проблемы. Одно из таких направлений заключается в предварительном нанесении астраленов на поверхность базальтового фиброволокна. Указанная нанодобавка характеризуется диаметрами частиц от 100 мкм и до 10 мкм. Насыпная плотность наномодифицирующей добавки составляет 0,8 г/см³. Введение указанной нанодобавки в бетонную смесь оказывает комплексное воздействие на матрицу материала, что и является основой для внедрения разработок данной технологии в промышленное производство базальтовой фибры, модифицированной астраленами с торговой маркой «астро-флекс-МБМ».

Прочностные характеристики наномодифицированных бетонов по сравнению с традиционными составами могут увеличиваться в 5 и более раз, однако это сопровождается существенным возрастанием стоимости таких бетонов до 20%. В связи с этим, наиболее оптимальное содержание астраленов в составе

бетона находится в пределах от 0,01 до 0,001% по массе цемента в зависимости от требования и назначения материалов.

Модифицирующее воздействие углеродных нанотрубок (УНТ) на процессы формирования матрицы цементного камня характеризуется рядом особенностей. Введение наночастиц в цементную систему приводит к образованию структур наноразмерного масштаба. Предполагается, что ненасыщенные связи в поверхностном слое наночастиц способствуют ускорению гидратации вяжущих веществ, однако механизм этого процесса требует дополнительного изучения для получения полной картины и разработки оптимальных технологических решений.

Дисперсные наномодифицирующие добавки также оказывают значительное влияние на физико-химические взаимодействия в цементных системах. Эти добавки изменяют реологические свойства цементно-песчаных смесей, снижая их вязкость. Снижение вязкости способствует повышению удобоукладываемости смеси, а также увеличению прочности и снижению водопроницаемости цементных изделий. Стоит отметить, что особенности влияния наномодифицирующих добавок практически не изучены, что говорит об актуальности исследований в данной области.

Применение углеродных нанотрубок в виде коллоидных растворов сопровождается их седиментацией, что ограничивает их эффективность. Для устранения этого недостатка были предложены поверхностно-активные вещества, однако их использование усложняет технологический процесс. В качестве альтернативы были разработаны гидрофильные кластеры углерода, которые могут стать перспективным решением проблемы седиментации УНТ.

Было определено, что при суммарном воздействии наномодифицирующих добавок максимальный эффект на показатели прочности, а также вязкости цементно-песчаной смеси, может быть достигнут при использовании составов с максимальным содержанием цементного вяжущего. В связи с этим исследования разработчиков имеют направление на разработку технологии получения ячеистых бетонов с показателем плотности до $0,8 \text{ г/см}^3$.

1.5 Модифицированные бетоны

На сегодняшний день в области строительного материаловедения имеется множество разработок высокофункциональных бетонов. Такая тенденция показала, что высокая эффективность использования таких материалов практически вытесняет применение традиционных бетонов без добавок. Одними из часто применяемых добавок стали пластификаторы. Связано это с высокой эффективностью и с отсутствием отрицательных влияний на бетоны и их армирующие элементы. Наилучший пластифицирующий эффект наблюдается у добавок супер- и гиперпластификаторов [88]. В свою очередь, все пластифицирующие добавки различают по способу их получения. Так, существует два основных типа пластификаторов, для первого типа пластификаторов применяется сырье органического типа, животного происхождения, для второго типа пластификаторов используется сырье, полученное искусственным синтезированием. В таблице 1.2 приведена классификация суперпластифицирующих добавок, полученных с помощью различных химических основ [123].

Анализ литературных данных указывает на то, что суперпластификаторы имеют важную роль в строительном комплексе. Об этом свидетельствует их применение в крупных объектах, таких как Олимпийский стадион в Монреале, дымовые трубы отопительных систем Японии и США, бейсбольный стадион в Йокогаме, в мостах, путепроводы и многое другое.

Таблица 1.2 – Классификация суперпластификаторов на разных химических основах

Год открытия	Группа	Тип	Снижение водосодержания	Название
1932	2	Сульфонафталин-формальдегид	5-15	НИЛ-10, 10-03, Конпласт, Мелмент, Зикамент-ФФ
1939	3	Модифицированный лигносульфонат	15-25	ЛСТМ, ХДСК-1, Plastiment BV 40
1960	1	Сульфомеламин-формальдегид	15-30	С-3, Майти, Дофен, Кризо флюид, Кормикс
1993	4	Поликарбоксилат	20-30	Мелафлюкс 1641F, Woerment FM 787
1997	-	Эфир поликарбоксилановый	25-40	Sica ViscoCrete-20HE, 20 GOLD
1997	-	Сополимер акриловый	25-40	Флюкс 1

Использование суперпластифицирующих добавок позволяет:

- повысить пластичность бетонной смеси от П1 до П5;
- снизить водоцементное отношение от 20 до 30%;
- снизить расход вяжущего вещества до 25%;
- увеличить прочность при сжатии от 10% и выше;
- повысить адгезию бетона с армирующими элементами как минимум в 1,5 раза;
- получить высокофункциональные бетоны с повышенными характеристиками морозостойкости, трещиностойкости и влагонепроницаемости [25].

Первые три группы пластификаторов являются самыми старшими, и в связи с этим их называют традиционными.

Суперпластификаторы представляют собой класс поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые находят широкое применение в бетонных композитах. Их действие основано на адсорбции на поверхности частиц и зерен цемента, что

приводит к формированию моно- или бимолекулярных слоев. Эти слои, в свою очередь, изменяют дзета-потенциал частиц, снижая межфазную энергию сцепления и способствуя дезагрегации частиц. Такой эффект очень положительно влияет на структуру бетона благодаря тому, что происходит наиболее равномерное распределение частиц вяжущего, а также вводимых нерастворимых добавок. Благодаря адсорбции ПАВ на поверхности зерен происходит уменьшение микрошероховатости и, как следствие, снижается коэффициент трения между ними, благодаря чему повышается пластичность смеси. В процессе адсорбции на поверхности частиц возникает одноимённый электрический заряд, который препятствует их электрическому сцеплению и, как следствие, снижает вязкость раствора. Однако с течением времени в процессе гидратации цемента и роста кристаллов новообразований одноимённые электрические заряды, способствующие отталкиванию частиц, исчезают. Это приводит к снижению подвижности смеси.

Использование супер- и гиперпластификаторов способствует увеличению массовой доли мелких фракций цементных частиц в бетонной смеси до двух раз. Гиперпластификаторы представляют собой инновационные пластифицирующие добавки. Механизм их действия основан на совместном воздействии пространственных эффектов и электростатических сил. Наиболее важную роль в процессе работы пластификатора имеют боковые гидрофобные полиэфирные цепи молекул поликарбоксилатного эфира.

Согласно исследованиям Батракова В.Г., сферическое отталкивание частиц обусловлено особенностями структуры поликарбоксилатных эфиров. Боковые гидрофобные цепи молекул обеспечивают превосходство над электростатическим взаимодействием и агрегацией частиц. В данном случае, при использовании поликарбоксилатов дзета-потенциал имеет менее значимую роль, в сравнении с традиционными пластификаторами. Данный эффект обусловлен тем, что применяемые добавки приводят к образованию адсорбционных оболочек на

частицах смеси, благодаря установлению поперечных связей двух- и трехмерной молекулярной структуры.

Полученная объемная адсорбционная оболочка создает эффект экранирования ионных сил молекул воды, что сопровождается увеличением времени работы пластификатора в виде поликарбоксилатов в 4 раза в сравнении с традиционными суперпластификаторами, такими как лигносульфонаты или сульфанафталиновые формальдегиды.

Это обеспечивает длительное сохранение пластифицирующих свойств бетонной смеси при транспортировке от завода-изготовителя до строительных площадок.

Механизм действия поликарбоксилатов также включает адсорбцию молекул на поверхности зерен цемента, что является причиной образования отрицательного электрического заряда. В то время как молекулы воды могут спокойно проникать в открытые поверхности флоккул цементного вяжущего, что положительно влияет на процесс гидратации. С помощью изменения структурных параметров полимеров в виде длины основных и боковых цепей, количества этих молекул, а также ионного ряда можно регулировать характеристики полимерных добавок.

В работе [81] в целях исключения сворачивания поликарбоксилатов рассматривается вопрос создания в процессе синтеза полимеров более жесткой структуры. Развитие технологий применения пластифицирующих добавок позволяет получить композиционные бетоны с повышенными технологическими и эксплуатационными показателями. К примеру, имеются составы, включающие применение таких добавок, обладающие свойствами самоуплотняющихся бетонов, которые позволяют исключить технологические операции по уплотнению смесей и обладают повышенными свойствами удобоукладываемости. Для наиболее рационального применения таких бетонов необходимо уделять внимание количественному сочетанию суперпластификаторов и микронаполнителей.

Суперпластификаторы обычно добавляются в бетонную смесь в расчете на массу вяжущего вещества. Обычная концентрация таких добавок находится в

количестве 0,7-1,5% по массе цемента. В некоторых случаях это количество может быть увеличено [46].

Возможно применение суперпластификаторов для замедления сроков схватывания. Такие свойства применимы при изготовлении бетонных смесей для торкретирования. Это позволяет повысить сроки хранения бетонной смеси, а также уменьшить количество воды затворения, что повышает плотность и, как следствие, понижает водопроницаемость материала. Гиперпластифицирующие добавки имеют широкое применение в шпатлевках, а также в бетонных смесях при строительстве полов и объектов с повышенной огнеопасностью. Оптимальное количество данной добавки находится в пределах от 0,009 до 0,05% по массе цемента [14].

Согласно исследованиям реологии цементных систем, значительное влияние на свойства бетона оказывают образование сингенита и этtringита ($K_2SO_4 \cdot CaSO_4 \cdot H_2O$). При введении K_2SO_4 повышается вязкость смеси, особенно заметен эффект при использовании суперпластификаторов на основе поликарбоксилата. В таком случае пластичность может увеличиться в два или более раз по сравнению с нафталинформальдегидными суперпластификаторами [25].

В последние годы наблюдается значительное снижение применения бетонов без модифицирующих добавок, уступая место многокомпонентным составам. Такие составы основаны на применении таких добавок, как пластификаторы, ускорители и замедлители твердения, и прочие модификаторы. Это обусловлено повышением требований к эксплуатационным свойствам бетона в современном строительном комплексе.

Модифицирование систем на основе цементных вяжущих достигается путем введения химических добавок, благодаря которым регулируются процессы гидратации цемента при взаимодействии с водой затворения. Благодаря этому происходит изменение физико-химических свойств и, как следствие, структуры материала без изменения основных компонентов смеси.

В России впервые суперпластификаторы впервые поступили в производство в 1979-1981 годах. Благодаря улучшению свойств удобоукладываемости смеси и равномерному распределению заполнителей они стали важным элементом в производстве бетонов.

В частности, эти факторы очень важны для сталефибробетонов. Так применение суперпластификатора С-3 в составе сталефибробетонной смеси повышает прочностные характеристики и снижает энергозатраты на процесс формирования и производства бетона [113].

Многокомпонентные бетоны на основе суперпластификаторов и микрокремнеземом могут обеспечить обеспечение прочности до 200 МПа. Однако такие составы могут включать до 8 и более компонентов, включая тонкодисперсные наполнители отходов промышленности. Благодаря этому можно управлять процессом структурообразования для получения материалов с заданными свойствами.

Имеются исследования [11,126], согласно которым применение золы-уноса в качестве кремнеземистого компонента значительно повышает прочностные характеристики. Пуццолановая реакция между аморфным кремнеземом в золе и гидроксидом кальция и оксидом алюминия в цементе способствует увеличению прочности бетона.

Имеется разработка кремнеземистых автоклавных бетонов ООО Рефтинское объединение «Теплит» [49]. В качестве кремнеземистого модификатора они применяют золу-уноса Рефтинской ГРЭС. При исследовании влияния данной золы-уноса на тяжелые бетоны было определено, что при замене кремнеземистым компонентом равного количества цементного вяжущего, а именно при 5, 10 и 25% по массе цемента повышаются прочностные характеристики конечного материала [26]. Повышение прочностных характеристик связано с тем, что образуется реакция с гидроксидом кальция, а также оксида алюминия, которые образуются в процессе гидратации цемента с аморфным кремнеземом. Данный процесс называют

пуццолановой реакцией. Влияние введения кремнеземистой добавкой приведено на рисунке 1.6.

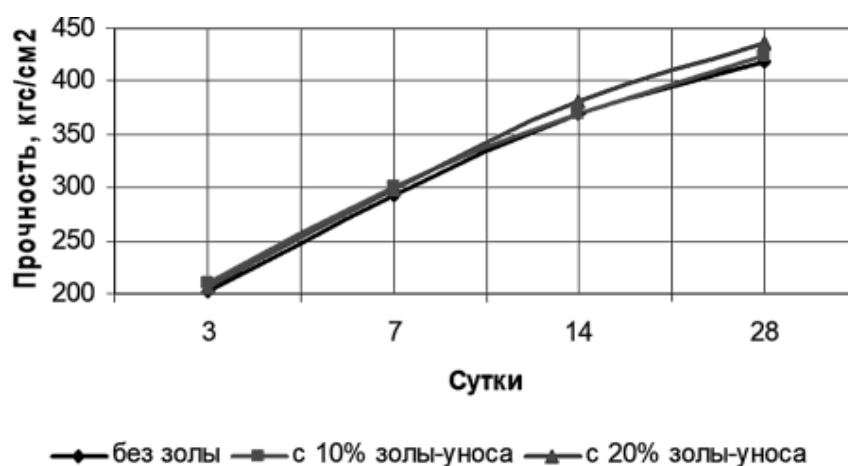


Рисунок 1.6 – Влияние введения золы-уноса на прочность бетона [31]

1.6 Виды, характеристика фибробетонов и армирующих волокон для их производства

Строительные элементы и конструкции, изготовленные с применением дисперсно-армированных бетонов, характеризуются высокими показателями прочности при растяжении, на изгиб и ударной вязкости. Оптимальный выбор типа дисперсно-армирующего волокна определяется исходя из требуемых эксплуатационных характеристик конечного изделия. В области строительных материалов используются разнообразные виды дисперсно-армирующих волокон, включая металлические (стальные), неметаллические (синтетические, минеральные и другие) и высокомолекулярные фибры. Эти волокна различаются по геометрическим параметрам, таким как диаметр и длина, что позволяет адаптировать их свойства к специфическим требованиям конструкций.

Стальные фибры могут быть получены путем резки низкоуглеродистых проволок или экструдирования стальных расплавов. Неметаллические волокна, в свою очередь, изготавливаются из синтетических полимеров, базальта и прочих исходных материалов. Они могут быть представлены в виде моноволокон,

комплексных нитей или фибриллированных плёнок. В ряде случаев для производства фибр используются промышленные отходы соответствующих производственных процессов.

Эффективность фибробетонов заключается в правильном подборе и сочетании свойств всех компонентов смеси. Как было сказано ранее, классификация бетонов происходит в зависимости от типа фиброволокна. В настоящее время в строительном комплексе используют следующие виды фибр:

Стальная фибра. Данный вид фибр представляет собой отрезки стальных проволок. Стальная фибра обладает высоким модулем упругости, который в шесть раз превышает модуль упругости бетона. Данное свойство делает возможным её эффективное применение в составе строительных композитов. В промышленной практике стальные волокна выпускаются в различных формах поперечного сечения, включая круглые, прямоугольные и других конфигураций. Диаметры волокон варьируются в диапазоне от 0,2 до 1,6 мм, а их длина составляет от 5 до 160 мм.

Сталефибробетон представляет собой композитный материал, состоящий из тяжелого мелкозернистого бетона, в объеме которого равномерно распределена стальная фибра. Такие бетоны имеют повышенную трещиностойкость, ударную прочность, морозостойкость, износостойкость и сниженную усадку. Благодаря использованию сталефибробетонов возможны более эффективные конструктивные решения за счет применения тонкостенных неармированных изделий [35].

Стекловолоконная фибра является мононитью из щелочестойкого стекловолокна, имеющего устойчивость к коррозии от щелочной среды, образованной при твердении бетона. Известно применение за рубежом марок «Цем-Фил» (Великобритания), «Эрфайб» (Япония). В России применяются стекловолокна с промышленным масштабом до 200 тонн в год, марки СЦ-6 производства НПО «Стекло» [9].

Базальтовая фибра представляет собой короткие отрезки минерального базальтового волокна с высокой прочностью в диапазоне от 1800 до 4000 МПа.

Благодаря минеральной структуре, фибра обладает различной степенью дисперсности, что позволяет значительно повысить прочность бетона. Базальтофибробетоны характеризуются высокой упругостью, что способствует улучшению показателей сопротивления упругим деформациям при низкой плотности. Это позволяет снизить вес конструкций. Толщина базальтовых волокон колеблется в пределах от 10 до 12 мкм, при этом площадь поверхности их взаимодействия с цементной матрицей составляет до 100 м²/кг.

Полипропиленовая фибра представляет собой тонкие волокна длиной от 6 до 20 мм, которые обычно имеют жёлтый или белый цвет. Её использование способствует улучшению реологических характеристик бетонной смеси и увеличению срока службы бетонных конструкций. Модуль упругости полипропилена может достигать до 800 МПа, а его механическая прочность — до 500 МПа.

Фибра обладает химической стойкостью, что особенно важно в щелочной среде цементной матрицы. Бетоны с полипропиленовой фиброй могут эксплуатироваться в диапазоне температур от -60 °С до 320 °С.

Полипропиленовые волокна обладают неэлектропроводностью и радиопрозрачностью, что делает их привлекательными для применения в различных отраслях. Фибра предотвращает образование микротрещин, расслоений и пыления, что повышает устойчивость к агрессивным средам и влагостойкость. Эти свойства способствуют увеличению сопротивления нагрузкам и деформациям, а также повышают долговечность материала. Основные характеристики наиболее часто применяемых видов волокон приведены в таблице 1.3.

Модификация механических свойств бетона, таких как устойчивость к динамическим нагрузкам, удобоукладываемость, износостойкость и трещиностойкость, может быть достигнута путем изменения геометрических параметров фибры, ее объемного содержания в бетонной смеси, а также плотности и дисперсности распределения в матрице.

Таблица 1.3 – Характеристики основных видов фиброволокон

Характеристика	Вид фибры			
	Стальная	Базальтовая	Полипропиленовая	Стеклянная
Диаметр	0,2-1,2 мм	13-18 мкм	10-25 мкм	13-15 мкм
Длина, мм	30-50	3-15	6-20	4-20
Температура плавления, С°	1550	1450	150	850
Коррозионная стойкость	Низкий показатель	Высокий показатель	Высокий показатель	Высокий показатель

В таблице 1.4 [72] представлены сравнительные данные о механических характеристиках различных типов фибр, используемых в строительной отрасли.

Таблица 1.4 – Физико-механические характеристики фиброволокон

Вид фибры	Плотность, $\Gamma/\text{см}^3$	Модуль упругости, МПа	Прочность на растяжение, МПа	Удлинение при разрыве, %
Стальная	7,8	180000-220000	600-3200	3-4
Базальтовая	2,7	6000-12000	1500-3300	1,5-3,7
Стеклянная	2,6	6000-9000	1700-3800	1,5-3,5
Полипропиленовая	0,8	3400-8000	500-800	10-30
Нейлоновая	1	4100-4600	750-850	15-20
Акриловая	1,1	2000-2100	200-400	25-40
Асбестовая	2,5	65000-70000	900-3000	0,5-0,7
Углеродная	2	200000-250000	2000-3600	1,0-1,5
Карбоновая	1,6	270000-370000	1100-4000	2,0-2,3

Согласно исследованиям [77], оптимальное объемное содержание полимерных волокон в мелкозернистом бетоне находится в диапазоне от 1,5 до 3%. Такое количество обеспечивает сопоставимую эффективность по сравнению со сталефибробетонами. На ударную стойкость влияет увеличение относительной длины фиброволокон. Увеличение содержания дисперсного фиброволокна в бетонной смеси до 5-10% позволяет повысить модуль упругости, что, в свою очередь, положительно влияет на ударостойкость фибробетонов. Многообразие типов фибр открывает широкие возможности для создания дисперсно-

армированных бетонов. Оптимальный подбор различных составов позволяет варьировать плотность и прочностные характеристики этих материалов. Применение дисперсного армирования позволяет исследовать влияние добавок на эксплуатационные, физико-механические свойства и долговечность фибробетонов.

Выводы по главе 1

1. Проведен анализ исследований наномодифицирования бетона. Установлено, что применение наномодификаторов позволяет существенно улучшить физико-механические характеристики бетонных композитов за счет формирования модифицированной структуры на микро- и макроуровне. Имеющиеся разработки свидетельствуют о повышении физико-механических характеристик, улучшении плотности, морозостойкости и водонепроницаемости. Рассмотрены различные наномодифицирующие добавки. По результатам сравнения особое внимание уделяется изучению разработок с применением углеродных наномодификаторов.

2. Выявлено две эффективные технологии введения наномодифицирующих добавок в бетоны: ультразвуковая диспергация и механическая активация с применением аппаратов вихревого слоя. Ультразвуковая обработка с применением пластификатора обеспечивает равномерное распределение наночастиц в водной среде за счет кавитационного воздействия, что позволяет получать стабильные суспензии с предотвращением агломерации частиц. Механическая активация в аппаратах вихревого слоя позволяет эффективно измельчать и модифицировать вяжущие материалы, при наименьших энергетических затратах в сравнении с аналогами. Применение данных технологий в сочетании с рационально подобранными режимами обработки обеспечивает значительное увеличение прочностных характеристик бетона (до 50%) что делает их применение перспективным в области создания высокопрочных наномодифицированных бетонов.

3. Выявлена перспективность применения наномодифицирующих для бетона добавок в строительном материаловедении. Это связано с уникальными физико-механическими характеристиками углеродных структур (фуллерены, нанотрубки, графен), значительно превосходящих традиционные материалы. Особенно перспективными являются углеродные нанотрубки, обладающие высокой эластичностью и способностью выдерживать значительные нагрузки. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности дальнейшего развития технологий применения углеродных наноматериалов для создания строительных композитов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

4. Определено оптимальное количество вводимых углеродных наномодификаторов, а именно: 0,001–0,0001% от массы вяжущего, что обеспечивает увеличение прочности до 40%, а в отдельных случаях — в 2–3. Разработанные технологии позволяют получать бетоны различной плотности (от 0,4 до 2,5 т/м³) с прочностью, превышающей 150 МПа. Перспективными направлением дальнейших исследований являются совершенствование методов равномерного распределения малого количества добавок наночастиц в объеме смеси и разработка новых технологических решений для эффективного применения наномодифицирующих добавок.

5. Выявлена необходимость проведения исследований, направленных на подбор пластифицирующих добавок для их комплексного введения с наномодификаторами. Особое внимание уделялось добавкам на основе поликарбоксилатов, обеспечивающим наилучшие показатели пластичности при наименьшей стоимости.

6. Определено актуальное направление исследований по разработке и изучению фибробетонов с улучшенными физико-механическими характеристиками путем применения наномодифицирующих добавок с целью модифицирования структуры бетона на микро- и макроуровне. Необходимо провести детальное исследование влияния различных модифицирующих добавок специального назначения на микро- и наноструктуру бетона. Это позволит выявить закономерности и механизмы изменения физико-химических и механических свойств материала на указанных уровнях.

ГЛАВА 2. МАТЕРИАЛЫ, ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1 Материалы для проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований в качестве вяжущего использовался портландцемент М500Д0 марки Евроцемент АО «Евроцемент групп» московского цементного завода. Химический состав цемента указан в табл. 2.1. Цемент марки М500 имеет повышенные прочностные характеристики, высокую скорость твердения, что положительно влияет на скорость набора прочности, а также повышенную коррозионную стойкость.

Цемент указанной марки производят путем размалывания портландцементного клинкера совместно с гипсом и активными минеральными добавками. Производитель: АО «Евроцемент групп» (заводы-производители: «Петербургцемент», «Липецкцемент», «Мордовцемент», «Мальцовский портландцемент»).

Данный портландцемент имеет следующие показатели: предел прочности при сжатии в возрасте 2 суток $17,5 \pm 3$ МПа, в возрасте 28 суток – $46,5 \pm 3$ МПа, начало и конец схватывания 190 ± 40 мин, 265 ± 55 мин соответственно, тонкость помола по сити №008 – $92 \pm 3\%$, нормальная густота цементного теста $24,2 \pm 0,5\%$, равномерность изменения объема – $0,5 \pm 0,5$ мм, отсутствует ложное схватывание, насыпная плотность в рыхлом состоянии 1030, насыпная плотность в уплотненном состоянии 1300 кг/м³.

Таблица 2.1 – Химический состав портландцемента «Евроцемент» М500 Д0

Материал	Химический состав, %					
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
Портландцемент	21,21 ± 0,3	6,52 ± 0,3	5,17 ± 0,2	64,1 ± 0,5	2,84 ± 0,15	0,16 ± 0,05

Рекомендуемый минералогический состав клинкера указан в табл. 2.2.

Таблица 2.2 – Минералогический состав клинкера портландцемента
«Евроцемент» М500 Д0

Показатель	Норма по ГОСТ	Значение
Трехкальциевый силикат	не менее 67,0	58,01
Двухкальциевый силикат		17,05
Трехкальциевый алюминат	не нормируется	6,24
Четырехкальциевый алюмоферрит	не нормируется	18,61

Санитарно-эпидемиологические свойства портландцемента «Евроцемент» М500 Д0 приведены в табл. 2.3.

Таблица 2.3 – Санитарно-эпидемиологические свойства цемента
«Евроцемент» М500 Д0

Показатель	Норма по ГОСТ	Значение
Удельная эффективная активность естественных радионуклидов (Аэфф.), Бк/кг	Не более 380	52,1

В качестве мелкого наполнителя был использован песок, добытый ООО «Партнер групп» в Песковатском карьере, Волгоградской области. Характеристики физико-механических свойств и зерновой состав данного песка подробно описаны в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 – Зерновой состав песка ООО «Партнер групп»

Зерновой состав	Диаметр отверстий сит., мм							
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	Менее 0,16
Полные остатки, %	0,0	0,9	2,1	8,9	35,1	77,78	98,8	100,0

Таблица 2.5 – Физико-механические свойства песка ООО «Партнер групп»

Наименование	Значение		Размерность
Насыпная плотность в сухом состоянии	1503		кг/м ³
Содержание пылеватых и глинистых частиц	0,6		%
Содержание глины в камках	0		%
Модуль крупности	2,23		-
Полный остаток на сите 0,63 мм	35,1		%
Класс	I класс		-
Группа	Средний		-
Содержание глинистых частиц определенное методом набухания	-		%
Содержание зерен крупности, % по массе	Св. 10 мм	Св. 5 мм	Менее 0,16 мм
	0,0	0,9	1,2

В целях получения высокопрочных и высокофункциональных бетонов рекомендуется применять высококачественный заполнитель. Для проведения исследований в качестве крупного заполнителя применялся щебень ООО «Ростовский щебеночный завод», Ростовской области, фракция 5-20 мм. Основные свойства щебня указаны в табл. 2.6.

Таблица 2.6 – Основные свойства щебня ООО «Ростовский щебеночный завод»

№п/п	Наименование показателей	Требования ГОСТ 8267-93	Фактически
1	Зерновой состав-полные остатки на ситах, % по массе: D _{нм.} 0,5(D _{нм.} + D _{нб.}) D _{нб.} 1,25 D _{нб.}	90-100 30-80 До 10 До 0,5	97,8 53 7 0
2	Содержание зерен пластинчатой и игловатой формы по массе, % не более Группа по форме зерен: Кубовидная Улучшенная Обычная	15 35 25	17,8
4	Содержание пылевидных, глинистых и илистых частиц, % по массе не более В том числе глина в комках	3 0.25	0,8 0
5	Марка щебня по дробимости (прочность)	200-1400	1000
6	Марка по износу в полочном барабане	От И-1 до И-4	И-1
7	Марка по морозостойкости	15-300	300
8	Объемная насыпная плотность, т/м ³		1.36
9	Удельная эффективная активность естественных радионуклидов (A _{эфф}), Бк/кг	ГОСТ 30108	66,1

В состав комплексной наномодифицирующей добавки входят: суперпластификатор «СП-3», производство ООО «Полипласт Новомосковск», а также углеродные наноразмерные трубки марки «Таунит-М», производство ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов.

Полипласт СП-3 — комплексная добавка для бетонов и строительных растворов, оказывающая умеренный эффект замедления схватывания. В её состав входят сополимер полиметиленафталинсульфоната и лигносульфонат натрия. По техническим характеристикам Полипласт СП-3 (рис. 2.1) соответствует

требованиям к суперпластификаторам и суперводоредуцирующим добавкам, установленным ГОСТ 24211 [18], а также ТУ 5745-006-58042865-2014.



Рисунок 2.1 – Добавка пластификатор «Полипласт СП-3»

При использовании добавки суперпластификатора необходимо соблюдать требования нормативной документации. «Полипласт СП-3» в жидком виде добавляется вместе с водой затворения. В сухом виде добавка предварительно растворяется в воде. Для обеспечения полного растворения рекомендуется интенсивное перемешивание при температуре 40–60 °С. Плотность полученного раствора следует измерять при температуре жидкости 20 °С. После введения добавки в бетонную смесь важно обеспечить достаточное время для равномерного распределения ускорителя в соответствии с нормативными требованиями.

Применение добавки Полипласт СП-3 в бетонных смесях приводит к достижению следующих важных эффектов:

Повышение подвижности бетонной смеси (с П1 до П5) без негативного влияния на прочностные характеристики;

Сокращение объема воды затворения на 21% и более при сохранении требуемой подвижности смеси;

Повышение прочности бетона на сжатие до 20% при сохранении показателя подвижности полученной смеси;

Уменьшение количества используемого цемента до 22% при сохранении показателя подвижности полученной смеси;

Повышение показателей морозостойкости и водонепроницаемости получаемого бетона;

Уменьшение затрачиваемого времени и энергии на процесс виброуплотнения благодаря повышению характеристики удобоукладываемости получаемой смеси;

Увеличение времени сохранения подвижности смеси для определенных типов цемента.

Эти свойства делают добавку Полипласт СП-3 эффективным инструментом для повышения технологичности и качества бетонных работ.

Полипласт СП-3 обладает следующими преимуществами:

Отсутствие хлоридов, что позволяет использовать его при производстве армированных и предварительно напряженных железобетонных конструкций;

Неагрессивность по отношению к стальной арматуре в бетоне.

Оптимальная дозировка добавки варьируется в пределах от 0,4 до 1% от массы цемента. Для получения водного раствора с требуемой концентрацией добавку, представленную в форме растворимого порошка, предварительно растворяют в воде.

Основные физико-химические характеристики добавки «Полипласт СП-3» представлены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Нормируемые физико-химические показатели добавки
«Полипласт СП-3»

Наименование показателей	Норма	
	в форме раствора	в форме порошка
Внешний вид	Жидкость коричневого цвета	Порошок коричневого цвета
Плотность при 20°C, г/см ³	1.18	-
Массовая доля сухого вещества, % не более	≥32%	≥90%
рН	7-9	7-9
Содержание хлоридов	≥0.1%	≥0.1%

В данной работе в качестве наномодифицирующей добавки применялись углеродные наноразмерные трубки марки «Таунит-М», разработки компании «НаноТехЦентр», при сотрудничестве с Тамбовским государственным техническим университетом. Углеродные нанотрубки «Таунит-М» представляют собой полые цилиндрические отрезки, которые состоят из одного или нескольких слоев атомов углерода (рис. 2.2, 2.3).



Рисунок 2.2 – Добавка УНТ «Таунит-М» (ООО «НаноТехЦентр» г. Тамбов)

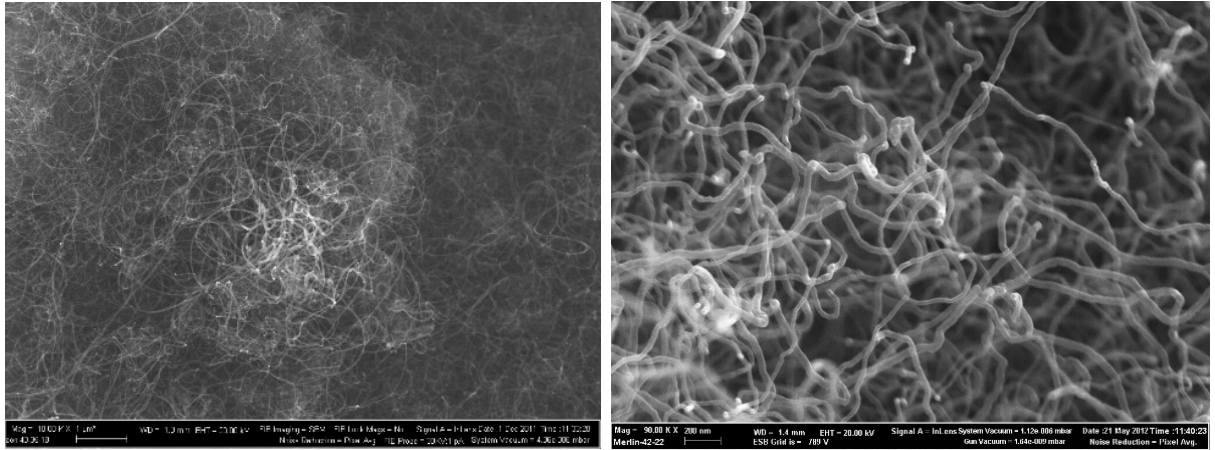


Рисунок 2.3 – Микрофотографии: многослойные углеродные нанотрубки
«Таунит-М» (ООО «НаноТехЦентр» г. Тамбов)

Серия УНТ «Таунит-М» имеет привитые на поверхности карбоксильные группы. Степень их функционализации до 1,5 ммоль/г.

Добавка представляет собой наномасштабные нитевидные образования поликристаллического графита в виде черного сыпучего высокодисперсного порошка.

Способ получения: газофазное химическое осаждение (каталитический пиролиз-CVD) углеводородов (C_xH_y) на катализаторах (Ni/Mg) при атмосферном давлении и температуре $580 \div 650$ °С. Время процесса $10 \div 80$ мин [47].

Результаты множества исследований, а также большое количество публикаций и патентов подтверждают уникальные свойства наноматериалов, что свидетельствует о возможности их применения в широком спектре промышленности. Углерод имеет прочность до нескольких ГПа. Введение данного наномодификатора в бетонные смеси согласно литературным данным [25,44,103] составляет от 0,01 до 0,001% по массе цемента.

Таблица 2.8 – Характеристики углеродных нанотрубок «Таунит-М»

Характеристики	Значение
Внешний диаметр, нм	10-30
Внутренний диаметр, нм	5-15
Длина, мкм	≥ 2
Общее количество примесей, %	
общее	≤ 5
после отчистки	≤ 1
Удельная поверхность, м ² /г	≥ 270
Насыпная плотность, г/см ³	0.025-0.06
Термостойкость, °С	до 600

Армирование на макроуровне происходило с помощью введения стальной и базальтовой фибры. Использованная стальная фибра была оснащена конусообразными анкерами (рис. 2.4). Продукт производства компании AWD, расположенной в Люксембурге. В Российской Федерации аналогичная фибра выпускается ОАО «Северсталь-метиз» под торговой маркой «Миксарм» в соответствии с техническими условиями ТУ 1211-205-46854090-2005 [92]. Эта фибра демонстрирует наивысший коэффициент адгезии к бетону среди аналогичных материалов, который достигает 95%.

Такой высокий показатель достигается формой конусного анкера, полученной авторами при сравнительном расчете различных вариантов расчета [12]



Рисунок 2.4 – Фибра «Миксарм» производства ОАО «Северсталь-метиз», согласно ТУ 1211-205-46854090-2005

Геометрические размеры и свойства фибры «Миксарм» указаны в табл. 2.9.

Таблица 2.9 – Размеры и механические характеристики фибры «Миксарм»

Диаметр фибры, мм	Длина фибры, мм	Диаметр шляпки, мм	Угол, конуса шляпки	Временное сопротивление разрыву, МПа	Плотность стальных фибр, кг/м³
до 1.0±0.03	От 30 до 120	≥ 1.8	70 °	≥1100	7800

Таблица 2.10 – Технические характеристики фибры «Миксарм»

Нормативные сопротивления растяжению R_{fn} и расчетные сопротивления растяжению для предельных состояний второй группы $R_{f,ser}$, МПа	Коэффициент надежности фибровой арматуры γ_f при расчете конструкций по предельным состояниям		Расчетные сопротивления растяжению фибровой арматуры для предельных состояний первой группы R_f , МПа
	I группа	II группа	
1150	1,1	1	1060

В качестве базальтового фиброволокна применялась фибра производства ООО НПО «Вулкан» по ТУ В В.2.7-26.8-32673353-001-2007 (рис. 2.5)



Рисунок 2.5 – Базальтовое волокно ООО НПО «Вулкан»

Базальт — это магматическая горная порода, формирующаяся в результате вулканических извержений. Базальт является сырьем для производства базальтового фиброволокна, которое представляет собой композицию из коротких отрезков комплексных нитей. Базальт является эффективной добавкой для армирования бетона, так как он обладает уникальными физико-механическими характеристиками.

Так, базальтовое фиброволокно обладает высокой механической прочностью и, как следствие, долговечностью, помимо этого данный материал устойчив к воздействию агрессивных сред, имеет высокие экологические показатели, а также негорюч, его рабочая температура находится в пределах от 250 до 760 °С [4]. Указанные выше свойства делают данный материал перспективным для применения в области строительного материаловедения, и в частности, в области наномодифицированных фибробетонов.

Производство выбранной базальтовой фибры осуществляется в соответствии с требованиями государственного стандарта ГОСТ 29101 [19].

Таблица 2.11 – Основные физико-механические показатели базальтовой фибры ООО НПО «Вулкан»

Наименование показателя	Значения показателей с допустимыми нормами
Диаметр волокна, мкм	10
Длина отрезка волокна, мм	12
Массовая доля влаги, не более	0,3
Массовая доля замасливателя, %: - замасливатель «парафиновая эмульсия»; - прямые замасливатели; - неорганические замасливатели;	Не более 0,1 Не менее 0,3 Не менее 0.3
Плотность рыхлой массы, кг/м ³	70-80
Химическая устойчивость (потеря в весе после 3 часов кипячения, г) в: H ₂ O 2n NaOH 2n HCl	 1,6 2,75 2.2
Диапазон рабочих температур, °C	-260 - +700
Коэффициент теплопроводности Вт/мК	0,031 – 0,038
Модуль упругости, ГПа	Минимум 75

2.2. Методы и оборудование для проведения экспериментов

В данной работе, с целью получения экспериментальных и лабораторных данных использовались современные методики и оборудование для определения различных физико-механических показателей, в частности оборудование как разрушающего, так и неразрушающего типа.

Согласно требованиям ГОСТ 10180 [15], проводились механические испытания для определения прочности бетона при сжатии и растяжении при изгибе с помощью специализированных прессов.

Для определения прочности при сжатии использовался пресс ВМ-3.4.3. (рис. 2.4.).

Данный пресс представляет собой универсальную испытательную машину с возможностью стабилизации хода плиты нагружения $3 \pm 0,3$ мм/мин. Пресс может использоваться для распрессовки и прессования образцов бетона с диаметром до 101 мм. Предназначен для испытаний асфальтового и цементного бетона на сжатие по ГОСТ 12801 [16] и щебня на дробимость по ГОСТ 8269 [22].



Рис. 2.4 – Пресс гидравлический испытательный «ВМ-3.4.3»

Таблица 2.12 – Технические характеристики прессы «ВМ-3.4.3»

Характеристика	Значение
Размер плит, мм	диаметром 150
Максимальный просвет, мм	310
Минимальный просвет, мм	70
Ход винта, мм	240
Ход подвижной плиты, мм	50
Ход центр. поршня	150
Питание, Вт/Гц	220/50
Потребляемая мощность, кВт	1
Габаритные размеры, мм	340x440x1000
Масса, кг	130

Для определения прочности бетона при изгибе применялся гидравлический пресс ПИ-1 (рис. 2.6.) в соответствии с ГОСТ 310.4 [21].



Рисунок 2.6 – Пресс гидравлический «ПИ-1»

Таблица 2.13 – Технические характеристики пресса «ПИ-1»

Характеристика	Значение
Диапазон измерения нагрузки, кН	от 0,4 до 10
Максимальная сила, Н	5000
Цена наименьшего разряда силоизмерителя, кН	0,0001
Пределы допускаемой относительной погрешности измерений силы (нагрузки), %	$\pm 1,0$; $\pm 0,5$
Пределы допускаемой абсолютной погрешности измерений перемещений нижней опорной плиты в диапазоне от 0,1 до 10 мм, включ., мм*	$\pm 0,1$
Скорость нагружения (регулируется вручную), кН/с	от 0,02 до 1
Размер плит сжатия, мм, не более	200x200
Габаритные размеры (ДxШxВ), мм, не более	520x470x1550
Масса, кг, не более	205
Электропитание, В/Гц	380/50

Для определения прочностных характеристик как на ранних, так и на поздних сроках твердения применялся прибор неразрушающего метода контроля «Пульсар 1.2» (рис. 2.7), согласно ГОСТ 17624 [17], производства «Интерприбор», Россия.



Рисунок 2.7 – Ультразвуковой прибор для неразрушающего контроля прочности бетона «Пульсар – 1.2»

Принцип работы прибора основан на определении параметров скорости и временного интервала прохождения ультразвуковых волн сквозь исследуемые материалы от датчика излучения к датчику приемнику. Технические показатели прибора «Пульсар 1.2» представлены в таблице 2.14.

Таблица 2.14 – Технические характеристики «Пульсар-1.2»

Характеристика	Ед. измерения	Значение
Диапазон измерений времени распространения УЗ импульсов	мкс	10...9999
Дискретность измерения времени распространения УЗ импульсов	мкс	0.1
Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности измерения времени распространения УЗ импульсов, где t- время измеренное	мкс	$\pm(0.01t+0.1)$
Пределы допускаемой дополнительной погрешности измерения времени распространения УЗ импульсов при отклонении температуры окружающей среды от границ номинальной области на каждые 10°C в пределах рабочего диапазона, в долях от основной погрешности, не более		0.5
Абсолютная чувствительность, не менее	дБ	110
Рабочая частота УЗ импульсов	кГц	60±20
Питание прибора от источника постоянного тока напряжением	В	2.5±0.5
Потребляемая мощность, не более	Вт	0.2
Габаритные размеры: - электронного блока - ультразвукового преобразователя для сквозного прозвучивания - датчика поверхностного прозвучивания в сборе	мм мм мм	160x120x30 Ø36x62 245x50x100
Масса прибора с полной комплектацией, не более	кг	6.0

В связи с тем, что разрабатываемый бетон имеет в составе добавки наноразмерного порядка применялся сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) «Versa 3d» (рис. 2.8) для изучения как микро- так и макроструктуры полученных образцов. Данный прибор комбинирует в себе как возможности сканирующего электронного микроскопа, так и ионного источника. Применяется для исследования не только структуры материала, но и его элементного состава на поверхности и приповерхностных слоев образца. Данный прибор имеет возможность создания микроструктурных покрытий с помощью газо-химии. Оборудование оснащено программным комплексом, с помощью которого можно визуализировать 3D структуры материала.



Рисунок 2.8 – Сканирующий электронный микроскоп «Versa 3d»

Таблица 2.15 – Технические характеристики сканирующего электронного микроскопа «Versa 3d»

Характеристика	Значение
Увеличение, крат	5000
Разрешение электронного луча, нм	2,9
Разрешение ионного пучка, нм	7
Вес образца, г	До 500
Максимальный размер образца, мм	Диаметр 150

Для оценки влияния вводимой добавки на структурные изменения бетона проводился рентгеноструктурный анализ на рентгеновском дифрактометре «Bruker D8 Advance» (рис. 2.9) (модель 2016 г., серийный номер 210247). Анализ дифрактограмм и расшифровка фазового состава осуществляли с помощью программного обеспечения к дифрактометру Diffrac.EVA (version 4.2.1) с использованием лицензионной базы данных Powder Diffraction File-2 (The International

Center for Diffraction Data). Дифракционные исследования осуществляли в излучении медного анода ($\lambda=1,54060\text{\AA}$). Напряжение на трубке - 40 кВ, ток накала - 25мА. Время экспозиции 0,7 с, шаг сканирования $0,02^\circ$. Фокусировка на исследуемом участке и вывод поверхности образца в центр фокусирующей окружности осуществлялись с помощью системы лазерного наведения. Образцы исследовали на отражение, интенсивность дифракционной картины регистрировали с помощью позиционно-чувствительного детектора SSD160 линейного типа с числом каналов 160. Для максимального устранения текстурных эффектов образец во время эксперимента вращали со скоростью 30 об/мин.



Рисунок 2.9 – Рентгеновский дифрактометр «Bruker D8 Advance»

Таблица 2.16 – Технические характеристики «Bruker D8 Advance»

Характеристика	Значение
Мощность генератора, Вт	1000
Тип источника рентгеновского излучения	Отпаянная керамическая трубка с линейным фокусом / отпаянная керамическая трубка с точечным фокусом
Тип гониометра	Вертикальный Theta/Theta
Диаметр гониометра, мм	500–560
Автоматизированный сменщик проб	9-90
Линейный позиционно-чувствительный детектор	SSD-160-2, LYNXEYE-2, LYNXEYE XE-T
Двухкоординатный позиционно-чувствительный детектор	EIGER2 R 250 K, EIGER2 R 500 K
Базы дифракционных и структурных данных	COD, ICDD PDF-2, ICDD PDF-4, ICSD
Габаритные размеры, мм, не более	1135 × 1300 × 1868
Масса, кг, не более	770

В связи с малой концентрацией нанодобавки применялись три аппарата для их равномерного распределения по всему объему смеси. Для введения УНТ в воду затворения применялось оборудование, основанное на использовании ультразвука, а именно ультразвуковые диспергаторы УЗГ-13-0,1/22 (рис. 2.10) и ультразвуковой диспергатор UCD-950 (рис. 2.11). Приборы предназначены для подачи питания на пьезокерамический преобразователь электрического тока в ультразвуковые колебания различного технологического назначения.



Рисунок 2.10 – Ультразвуковой генератор «УЗГ13-0,1/22»

Таблица 2.17 – Технические характеристики «УГ313-0,1/22»

Характеристика	Значение
Мощность выходная, Вт, номинальная	100±10
Регулировка мощности плавная, %	10-100
Рабочая частота, кГц	22±1.65
Точность АПЧ, Гц, не хуже	50
Точность АСА, %, не более	10
Мощность, потребляемая от сети, кВА, не более	0.2
Напряжение однофазной питающей сети, В	220±5(10)%
Частота питающей сети, Гц	50±0.5%
Габаритные размеры, мм, не более	310x285x150
Масса, кг, не более	9.0



Рисунок 2.11 – Ультразвуковой диспергатор «UCD-950»

Таблица 2.18 – Ультразвукового диспергатора «UCD-950»

Характеристика	Значение
Мощность выходная, Вт, номинальная	100±10
Источник питания, В	220
Рабочая частота, кГц	20-25
Стандартный полюс изменения амплитуды, мм	6
Расход, Вт	10-1000
Емкость для дробления	0,1-700
Габариты, мм	470x305x430
Вес, кг	26

Для введения наноразмерной добавки в сухую цементно-песчаную смесь применялся линейно индукционный вращатель (ЛИВ) (рис. 2.12). Принцип функционирования устройства базируется на трансформации энергии электромагнитного поля в механическую энергию вращения мелющих тел, расположенных в рабочей камере, заполненной обрабатываемой смесью. ЛИВ оборудован рабочей камерой, в которую загружается смесь и мелющие тела. Эта камера размещается внутри индуктора, генерирующего вращающееся электромагнитное поле. Ферромагнитные элементы, имеющие длину 5—10 мм и диаметр 0,5—1 мм, составляют 10% от общей массы загружаемой смеси.

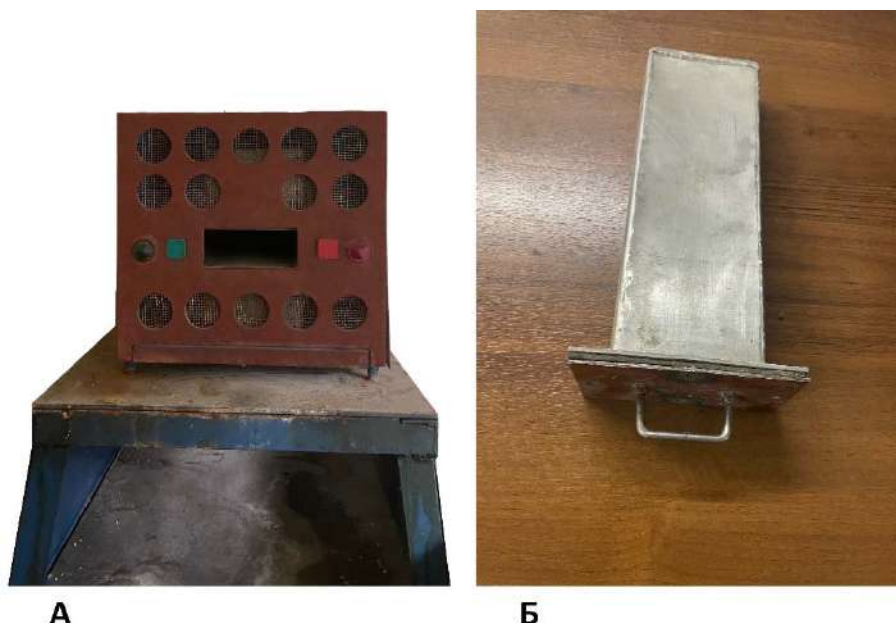


Рисунок 2.12 – Линейно-индукционный вращатель «ЛИВ»

А – ЛИВ, Б – камера ЛИВ

Таблица 2.19 – Технические характеристики «АВС-100»

Характеристика	Значение
Продуктивность максимальная, м ³ /час	12
Рабочее давление, МПа (кгс/см ²), не более:	0,25(2,5)
Диаметр рабочей зоны, мм	90
Магнитная индукция в рабочей зоне, Т	0,15
Частота, Гц	50
Напряжение, В	380
Скорость вращения магнитного поля в рабочей камере, об/мин	3000
Расход мощности, кВт	4,5
Габариты, мм	1200×900×1610
Вес, кг	520

Для оценки устойчивости суспензии использовался фотоколориметр КФК-2 (рис. 2.13). Метод фотоколориметрии базируется на способности окрашенных растворов поглощать свет определенной длины волны, проходящий через них. Степень уменьшения интенсивности светового потока, прошедшего через раствор, прямо пропорциональна концентрации окрашенного вещества в растворе. С помощью данного метода оценивалось оптимальное время применения активированной воды затворения углеродными нанотрубками.



Рисунок 2.13 – Фотоколориметр «КФК-2»

Таблица 2.20 – Технические характеристики фотоколориметра «КФК-2»

Характеристика	Значение
Спектральный диапазон, нм	315-980
Коэффициент пропускания	0-2
Пределы измерения	1-100
Погрешность по пропусканию	1
Источник питания-сеть переменного тока	220 В, 50/60 Гц
Регистрирующий прибор-микроамперметр	М-1792
Источник излучения -лампа галогеновая	КГМН 6,3-15
Рабочие длина кювет, мм	1-100
Габариты, мм	435x355x320
Вес, кг	12

Выводы по главе 2

1. Для приготовления образцов исследования использовались следующие материалы:

- портландцемент «Евроцемент» М500Д0;
- кварцевый песок Песковатского карьера: ООО «Партнер групп»;
- щебень: ООО «Ростовский щебеночный завод»;
- в качестве пластифицирующей добавки применялся Полипласт «СП-3»

ООО «Новомосковск»;

- в качестве наномодифицирующей добавки применялись углеродные нанотрубки «Таунит-М» ООО «НаноТехЦентр» Тамбовского государственного технического университета;

- в качестве фибры применялась стальная фибра «Миксарм» ООО «Северстальметиз» и базальтовая фибра ООО НПО «Вулкан»;

2. Для исследования влияния комплексной добавки наномодификатора и фибры на физико-механические характеристики бетонной композиции применялись современные методики и приборы, которые соответствуют актуальным нормам и требованиям, а также актуальным научным стандартам. Это обеспечивает высокую надежность и точность экспериментальных данных.

3. Для оценки параметров прочности как на ранних, так и на поздних сроках твердения бетона использовалось следующее оборудование: механический гидравлический пресс ВМ-3.4.3., механическая стандартная испытательная машина МИИ-100 для определения прочности при изгибе. При определении прочности материала неразрушающим методом использовался ультразвуковой прибор «Пульсар 1.2.» НПИ «Интерприбор».

4. Для оценки структуры разработанного наномодифицированного фибробетона использовался метод сканирующей электронной микроскопии с помощью СЭМ микроскопа «Versa 3d». Также в целях изучения механизма влияния нанодобавки на свойства материала применялся рентгеноструктурный анализ с помощью рентгеновского дифрактометра «Bruker D8 Advance».

5. С целью равномерного распределения малого количества наномодифицирующей добавки по всему объему смеси использовались ультразвуковые диспергаторы УЗГ-13-0,1/22 и UCD-950 для введения УНТ в воду затворения, а также линейно-индукционный вращатель для введения УНТ в сухую цементно-песчаную смесь.

6. В целях определения устойчивости суспензии воды затворения с УНТ использовался метод фотоколориметрии, основанный на свойстве окрашенных смесей пропускать свет, с помощью фотоколориметра КФК-3.

ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ НАНОМОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК С СОСТАВЕ МЕЛКОЗЕРНИСТОГО БЕТОНА

3.1. Подбор пластификатора

Основными параметрами бетонной смеси, влияющими на технологические процессы, являются пластичность, удобоукладываемость, воздухововлечение, водопотребность, а также устойчивость указанных параметров. Повышение пластических параметров смеси особенно важно при строительстве и производстве строительных конструкций со сложной геометрической формой, а также при большой степени армирования.

Современная строительная отрасль имеет множество различных пластифицирующих добавок для бетона. В зависимости от интенсивности пластифицирующего эффекта, добавки подразделяются на пластификаторы, суперпластификаторы и гиперпластификаторы. Эти водорастворимые вещества, введенные в бетонную смесь, способствуют увеличению прочности затвердевшего бетона. Достигается это за счет сокращения объема воды, используемой для затворения, при этом сохраняется необходимая пластичность смеси. Иными словами, добавки позволяют получить более прочный бетон, не жертвуя удобством его укладки.

Все эти факторы обеспечивают снижение трудозатрат при производстве и строительно-монтажных работах железобетонных изделий [23,43].

Применение добавок-пластификаторов может сократить сырьевые затраты на производство бетонных изделий, так как традиционные бетонные смеси для поддержания необходимых параметров пластичности смеси, как правило, имеют в своем составе избыточное количество воды затворения.

Пластифицирующие добавки позволяют снизить водоцементное отношение при сохранении пластичности смеси, благодаря этому при неизменности прочностных характеристик бетона повышается обрабатываемость смеси.

Одной из ключевых задач современного строительного материаловедения является улучшение эксплуатационных свойств бетона для повышения качества и долговечности бетонных и железобетонных конструкций. Практический опыт и большое количество исследований [4,37,55] свидетельствуют о том, что применение различных химических добавок является эффективным решением данной задачи. Это связано с тем, что применение таких добавок никак не влияет на технологическую последовательность производства, так как зачастую их вводят в состав смеси на этапе смешивания ее компонентов. Таким образом, применение таких добавок является наиболее экономически целесообразным, а также технологически доступным. Благодаря их применению снижается себестоимость единицы продукции, а также повышаются эксплуатационные характеристики и долговечность широкого ассортимента железобетонных изделий.

Исходя из того, что сегодня имеется значительное различие и подходы к стандартизации в различных странах, при этом не разработано единой классификации добавок для бетонов. При этом имеется большое разнообразие химических модифицирующих добавок, направленных на регулирование различных эксплуатационных свойств материала. В связи с этим, бетон с применением различных модификаторов может существенно отличаться от традиционных [99].

Можно классифицировать добавки-пластификаторы по сырью, из которого они производятся. Так существуют добавки на основе лигносульфонатов, нафталинсульфонатов и поликарбоксилатов.

Лигносульфонат является продуктом химической реакции сульфирования лигнина из природного сырья, полимера, извлекаемого из древесины. В процессе сульфирования древесная масса подвергается воздействию химических реагентов, что приводит к образованию лигносульфонатов. Примечательно, что эти добавки

содержат не только модифицированный лигнин, но и различные древесные сахара, которые, в свою очередь, повышают сроки схватывания бетонной смеси, а также увеличивает воздухововлечение. Такие добавки, как правило, способны повысить пластичность от П1 до П4, при этом снижают водопотребность до 15% [87].

Нафталинсульфонаты являются суперпластификаторами и зачастую применяются комплексно с добавками-лигносульфонатами. Их применение позволяет снизить количество воды затворения до 25%. А оптимально подобранное количество пластификатора на основе нафталинсульфонатов не влияет на время гидратации цементного вяжущего. Но их высокая концентрация также замедляет сроки схватывания. В связи с этим пластификаторы на основе нафталинсульфонатов не рекомендуется применять в бетонах с малым расходом вяжущего [93].

Пластификаторы на основе сложных эфиров поликарбоксилатов отличаются наилучшими показателями в сравнении с аналогами. Это достигается за счет высокой гибкости химической структуры данных соединений. Благодаря этим особенностям возможно регулировать свойства молекул при производстве таких добавок. Пластификаторы на основе поликарбоксилатов используются для приготовления самоуплотняющихся бетонных смесей. Однако при их производстве необходим постоянный и строгий технологический контроль за процессом производства, это связано с возможными изменениями свойств добавки [79].

При введении добавок-пластификаторов в бетонную смесь происходит адсорбция их молекул на поверхности твердых частиц в виде тонкого слоя, благодаря которому увеличивается пластичность смеси, а также ее смачиваемость. Образовавшийся слой также положительно влияет на равномерное распределение компонентов бетонной смеси при их совместном перемешивании.

Таким образом целью данного исследования является подбор добавки-пластификатора для дальнейшей разработки оптимального состава бетонной смеси. В рамках данного исследования была произведена выборка отечественных пластификаторов для анализа их влияния на свойства бетонной смеси. Влияние

пластификаторов оценивалось с помощью применения вискозиметра Суттарда, согласно ГОСТ 10181-2014 [15].

Были приготовлены смеси мелкозернистого бетона с соотношением компонентов Ц:П – 1:3 для оценки пластичности. Для оценки влияния пластификаторов на прочность мелкозернистого бетона изготавливались образцы балочки 40x40x160 мм согласно ГОСТ 310.4 [21].

В рамках лабораторных испытаний применялись следующие компоненты: цемент марки М500Д0 от "Цемерос" (Eurocement), песок с коэффициентом крупности 1,9, предоставленный "Партнер групп", а также ряд отечественных суперпластификаторов, включая "С-3", "Полипласт СП-3", "ПФМ НЛК", "ПОЛИПЛАСТ СП-4", "Динамикс СП-180", "Полипласт премиум", "Аэропласт", "Реламикс Т2" и "Полипласт СП Суб".

Добавки вводились в бетонную смесь в дозировке 0,5% от массы цемента, предварительно растворенные в воде. Главная задача исследования заключалась в выявлении наиболее эффективного пластификатора для дальнейшего изучения комплексного воздействия добавок-модификаторов и пластификаторов.

Водоцементное отношение подбиралось экспериментальным путем, с учетом достижения оптимальной, стандартной подвижности смеси. Все образцы бетона хранились в стандартных условиях (температура 22°C, влажность 80-100%). На 28-е сутки проводились испытания на прочность при сжатии и изгибе с разрушением образцов. Для неразрушающего контроля прочности использовался ультразвуковой прибор "Пульсар 1.2", обеспечивающий высокую точность и повторяемость результатов.

Результаты проведенных испытаний представлены в таблице и 3.1 и на графике 3.1.

Таблица 3.1 – Характеристики исследуемых составов с применением различных пластификаторов

Наименование	Распływ стандартного конуса, мм	В/Ц	Плотность кг/м ³	Прочность, МПа
Эталон	105	0,48	2220,70	53,5
СП-4	107	0,36	2277,34	68,2
С-3	105	0,36	2281,25	64,3
ПФМ НЛК	106	0,36	2250,00	62,6
Динамикс СП-180	109	0,36	2286,33	65,6
Полипласт премиум	110	0,36	2264,45	66,5
Аэропласт	108	0,36	2234,38	60,8
Реламикс Т2	106	0,36	2217,58	68,8
Полипласт СП Суб	108	0,36	2235,55	65,7
СП-3	113	0,36	2235,55	67,6

Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что наибольший пластифицирующий эффект оказали добавки «Полипласт СП-3», «Реламикс 2Т», «СП-4» и «Полипласт СП Суб».

Анализ прочности при сжатии мелкозернистых бетонов (рис. 3.1), содержащих различные пластификаторы, выявил, что образцы с «Полипласт СП-3», «Реламикс 2Т» и «СП-4» показали наилучшие показатели прочности. В сравнении с контрольным образцом без добавок, прирост прочности составил 20,5%, 21,9% и 21,3% соответственно.

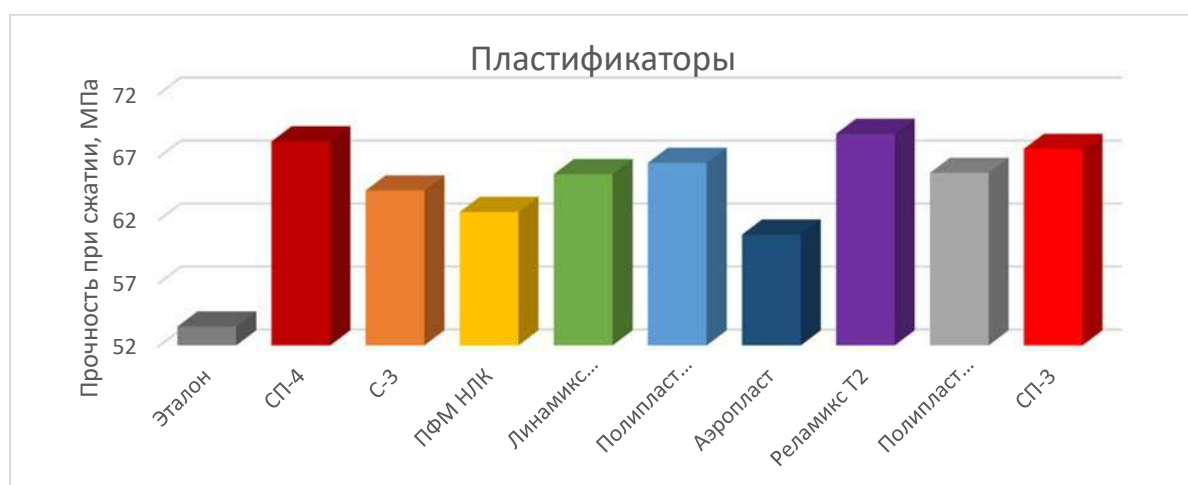


Рисунок 3.1 – График влияния пластифицирующих добавок на прочность мелкозернистого бетона

1 – Эталон; 2 – СП-4; 3 – СП-3; 4 – ПФМ НЛК; 5 – Ламинакс СП-180; 6 – Полипласт Премиум; 7 – Аэропласт; 8 – Реламикс Т2; 9 – Полипласт СП Суб Т2; 10 – СП-3.

Результаты исследования показали, что пластификаторы на основе поликарбоксилатов (такие как: «Полипласт СП-3», «Реламикс 2Т», «СП-4» и «Полипласт СП Суб») оказывают наилучший пластифицирующий эффект по сравнению с другими добавками. Также они являются универсальными для применения в составе бетона, так как они имеют низкую чувствительность к составу и типу вяжущего.

Согласно полученным данным, наилучший пластифицирующий эффект показала добавка «Полипласт СП-3». Применение добавок пластификаторов позволило снизить количество воды затворения на 25%, при этом максимальные показатели прочности имели составы с применением «Полипласт СП-3», «Реламикс 2Т», «СП-4». Для дальнейших исследований было принято решение выбрать добавку суперпластификатор «Полипласт СП-3», так как составы с применением «Реламикс 2Т», «СП-4» имели практически равнозначные показатели прочности, но при этом меньшие показатели пластичности. Кроме того, добавка СП-3 имеет наименьшую стоимость из представленных добавок суперпластификаторов [117].

3.2. Основы структурообразования наномодифицированного бетона

Бетон является одним из самых широко применяемых строительных материалов в мире. В связи с этим, имеется множество исследований, направленных на улучшение свойств и структуры бетона. Перспективным направлением получения бетона с повышенными характеристиками является оптимизация состава бетонной смеси путем применения различных модифицирующих добавок и снижением количества цементного вяжущего. Среди современных модифицирующих добавок можно выделить микро- и

нанокремнезем, различные углеродные материалы, такие как углеродные нанотрубки (УНТ), шлак, золу-уноса и др. [42,48,50,76,94].

Применение наномодификаторов находят все более широкое распространение в строительной отрасли, включая полимерные материалы, стекло и лакокрасочные изделия. Различные исследования [29,39,48,127] показывают, что на продукты гидратации цемента можно воздействовать физически и химически на наноуровне. В связи с этим, необходимо уделить особое внимание применению наномодифицирующих добавок для повышения эксплуатационных характеристик бетона.

Углеродные нанотрубки (УНТ) представляют собой уникальные полые цилиндрические структуры, состоящие из одного или нескольких слоев атомов углерода и обладающие диаметром на уровне нескольких нанометров. Благодаря выдающимся физико-механическим характеристикам, включая прочность на растяжение, достигающую 60 ГПа, УНТ становятся перспективными наноразмерными модификаторами для современных бетонных смесей.

Известно, что традиционные бетоны на основе цементного вяжущего характеризуются низкими показателями прочности на растяжение при изгибе, а также недостаточной стойкостью к деформациям, что приводит к распространению трещин. Процесс разрушения бетонных матриц обычно начинается с формирования трещин на наноуровне, которые под воздействием внешних механических нагрузок могут развиваться и сливаться в более крупные дефекты – микро- и макротрещины. Таким образом, усилия по минимизации трещинообразования на наноуровне непосредственно влияют на механическую прочность бетонных композиций, что делает вопрос использования УНТ особенно актуальным.

В соответствии с результатами проведённых исследований, внедрение углеродных нанотрубок в состав минеральных вяжущих способствует образованию кристаллогидратных новообразований, отличающихся высокой плотностью и прочностью. Армирование бетона углеродными наномодификаторами позволяет

достичь увеличения прочности до 50% по сравнению с традиционными композитами [73]. Такие изменения не только повышают эксплуатационные характеристики бетона, но и обеспечивают его долговечность, что имеет большое значение для строительной отрасли.

Следовательно, углеродные нанотрубки, как высокоперспективные добавки, открывают новые горизонты в разработке импортозамещающих бетонов с улучшенными свойствами, что в свою очередь может привести к революционным изменениям в современных строительных технологиях.

Углеродные нанотрубки имеют высокие показатели прочности, помимо этого они инертны к кислым щелочным средам, что делает его оптимальной добавкой для применения в качестве добавки для бетона. Введение углеродных нанотрубок не только оказывает армирующий эффект, но и регулирует процессы кристаллообразования, структурируя цементный камень в единую композицию. Согласно литературным данным оптимальное количество вводимых углеродных нанотрубок в зависимости от их модификации составляет 0,01-0,001% по массе цементного вяжущего [60,61,67]. Несмотря на очень малую концентрацию, углеродные нанотрубки выступают в роли центров кристаллизации, на которых происходит образование зародышей вытянутых кристаллов цементного камня. Разрастаясь, эти кристаллы переплетаются и образуют пространственные связи, что обеспечивает целостность цементного камня.

Существуют исследования, посвященные анализу свойств бетона при комплексном использовании наномодифицирующих добавок в сочетании с различными типами фиброволокна [5]. Несмотря на обилие научных работ в области наномодификации бетонов, а также на обнаруженное положительное воздействие, в настоящее время практически не разработаны конкретные составы, эффективно использующие наномодификаторы. Отсутствие стандартизированных рецептур и готовых решений по использованию наномодификаторов затрудняет их применение в производстве бетона. Так, создание эффективных композиций, в которые входят как наномодификаторы, так и фиброволокно, требует дальнейших

исследований и критериев оценки, учитывающих их взаимодействие и влияние на механические и физические характеристики бетона.

Следовательно, для успешного применения наномодификаторов в бетонных смесях необходимо сосредоточить усилия на разработке экспериментальных составов и оптимизации существующих технологий, что может значительно повысить эксплуатационные характеристики бетонных изделий и расширить их применение в строительной отрасли.

На данном этапе исследования была поставлена цель на получение экспериментальных данных, исходя из которых можно было подтвердить эффективность применения наномодификаторов в виде углеродных нанотрубок в составе бетона.

Используемые материалы: цемент марки «Eurocement» М500Д0 производства ООО «Цемрос», песок ООО «Партнер групп» с модулем крупности 1,9, исходя из ранее проведенных исследований был выбран суперпластификатор «Полипласт СП-3». В качестве модифицирующей добавки применялись углеродные нанотрубки марки «Таунит-М», производства ООО «НаноТехЦентр» г. Тамбов. УНТ имеет внешний диаметр 10-30 нм, внутренний диаметр 5-15 нм и длину не более 2 мкм. Удельная поверхность нанотрубок составляет $\geq 270 \text{ м}^2/\text{г}$, а насыпная плотность — 0,025-0,06 г/см³.

Для проведения лабораторных исследований приготавливался мелкозернистый бетон на основе цементно-песчаного состава Ц:П – 1:3. Была изготовлена серия образцов с различным содержанием наномодификатора. Для оценки изменения параметров прочности был изготовлен контрольный состав без включения наномодификатора, но с применением суперпластификатора, для исключения влияния количества воды затворения на прочностные характеристики материала. Подвижность смеси оценивалась по стандартным испытаниям, при помощи расплыва конуса, который составил 110 мм, что соответствует требованиям ГОСТ 30744-2001 [20].

Согласно технической документации оптимальное количество введения добавки суперпластификатора СП-3 в виде сыпучего порошка составляет 0,5-1% от массы цемента. Исходя из испытаний по определению оптимального водоцементного отношения, достаточное количество добавки составило 0,5% по массе вяжущего. Введение пластификатора в воду затворения происходило с помощью ультразвукового диспергирования на УЗГ13-0,1/22, с частотой ультразвука – 22 кГц. Обработка ультразвуком составляла 5 минут. Ультразвуковое диспергирование также положительно повлияло на снижение расхода пластификатора до 0,5% без изменения параметров подвижности смеси.

Согласно литературным данным, оптимальное количество введения углеродных нанотрубок составляет 0,005-0,001% по массе вяжущего. Исходя из этого были приготовлены составы с различным содержанием УНТ. В данных составах комплексно вводились добавки суперпластификатор и углеродные нанотрубки с помощью технологии ультразвуковой диспергации с частотой 22 кГц в течение 5 минут.

В таблице 3.2 представлены составы исследуемых смесей, включая контрольный состав 1 без введения пластификатора и наномодифицирующей добавки, состав 2 без применения наномодификатора и составы 3-7 с совместным применением нанотрубок и суперпластификатора.

Таблица 3.2 – Составы исследуемых смесей

Состав	1	2	3	4	5	6	7
Цемент, г	500	500	500	500	500	500	500
Песок, г	1500	1500	1500	1500	1500	1500	1500
Вода, г	240	190	190	190	190	190	190
СП-3, г	-	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
УНТ, % по массе Ц.	-	-	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005

Оценка прочностных характеристик исследуемого материала проводилась с использованием стандартных образцов-балочек размерами 40×40×160 мм, в

соответствии с требованиями ГОСТ 310.4 [76]. В рамках данного научного исследования были определены параметры прочности для всех образцов как при сжатии, так и на растяжение при изгибе. Все образцы подвергались выдержке в стабильных условиях в течение 28 дней, что является стандартной практикой для достижения полной прочности бетонных образцов. По завершении периода выдержки проводились испытания для определения механической прочности с использованием разрушающего метода. Полученные результаты были представлены в таблице 3.3 для оценки влияния добавки на прочностные характеристики материала.

Таблица 3.3 – Результаты экспериментальных данных

Состав	1	2	3	4	5	6	7
Прочность при сжатии, $R_{сж}$, МПа	47,4	52,6	56,6	58,9	62,1	61,5	65,8
Прочность при изгибе $R_{изг}$, МПа	7,86	8,23	8,76	9,01	9,21	9,98	10,21

Согласно анализу полученных данных снижение количества воды затворения в составе 2 за счет применения добавки пластификатора привело к увеличению прочности при сжатии на 10% и на 5% для прочности на растяжение при изгибе.

Введение наномодифицирующей добавки УНТ в состав мелкозернистого бетона также увеличило прочностные характеристики материала. При этом, повышение имело ступенчатый вид, в зависимости от количества углеродных нанотрубок. Так минимальное (состав 3) увеличение прочности при сжатии и изгибе составило 7% и 6%, а максимальное (состав 7) 25% и 24% в сравнении с составом 2 (без применения УНТ) соответственно.

В результате анализа полученных лабораторных данных можно сделать вывод, о том, что комплексное введение добавки УНТ и суперпластификатора позволяет значительно увеличить показатели прочности мелкозернистого бетона. Введение пластифицирующей добавки также увеличивает прочность материала, однако максимальные показатели прочности достигаются при совместном применении суперпластификатора «СП-3» и УНТ «Таунит-М».

Ниже приведены графики (рис. 3.2, 3.3.) показателей прочности полученных составов мелкозернистого бетона.

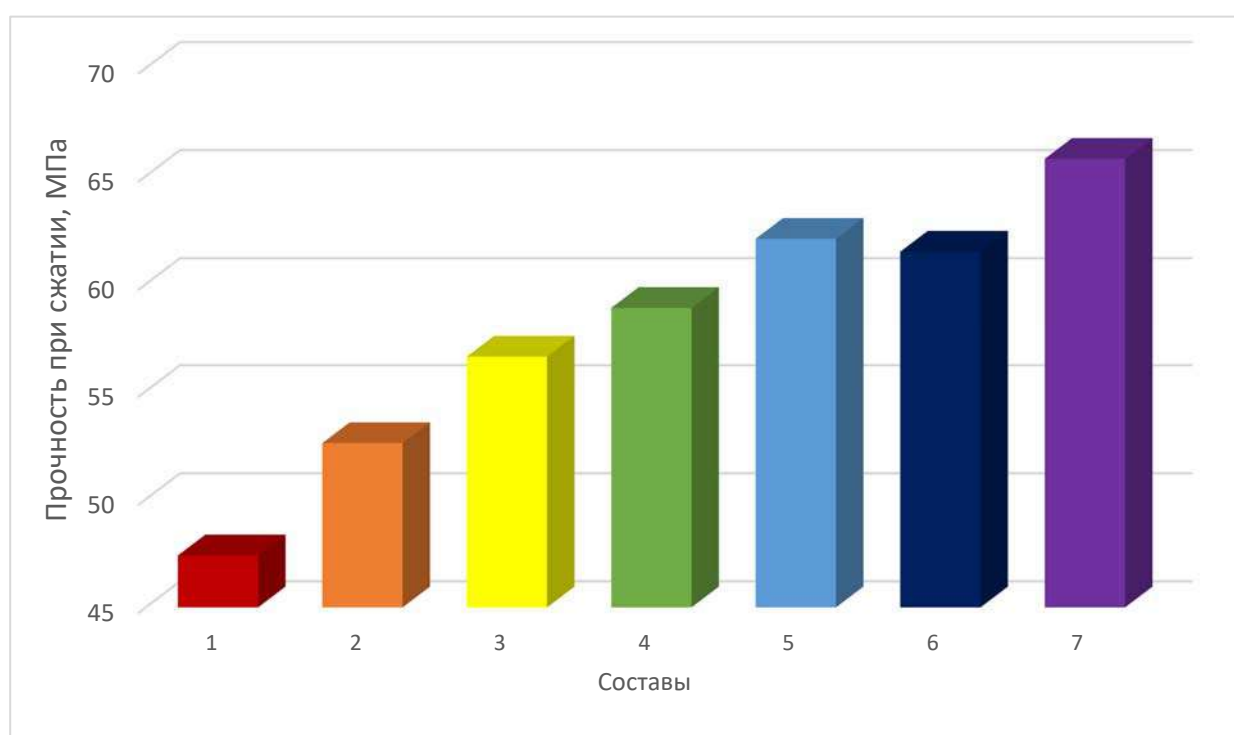


Рисунок 3.2 – График предела прочности при сжатии

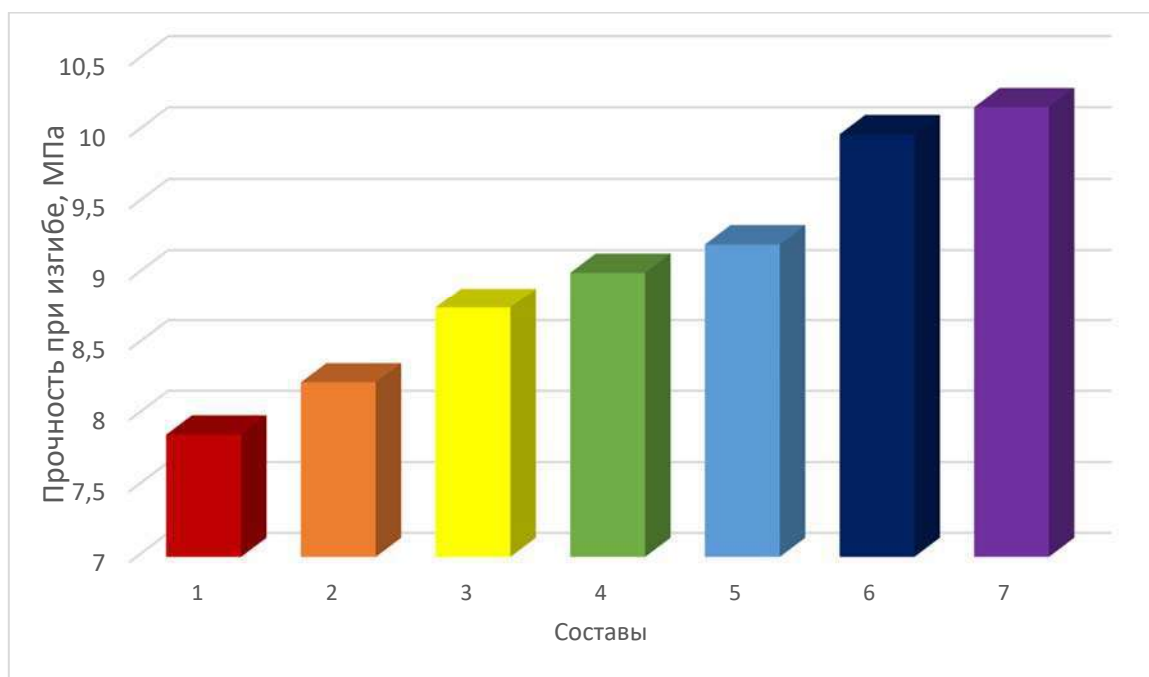


Рисунок 3.3 – График предела прочности при изгибе

Результаты проведенных исследований демонстрируют положительный эффект совместного применения суперпластификатора и углеродных наноразмерных трубок. Введение пластификатора позволяет сократить количество требуемой воды затворения на 16%, что, в свою очередь, повышает прочность материала. Также введение добавки пластификатора совместно с УНТ с помощью ультразвукового диспергирования увеличивает степень равномерного распределения малой концентрации высокодисперсной наноуглеродной добавки как в воде затворения, так и по всему объему смеси.

Так как упрочнение материала происходит постепенно с увеличением количества вводимой добавки, требуются дополнительные исследования, направленные на оценку влияния введения наномодификаторов в виде УНТ, а также исследования, направленные на изучение механизма модификации добавки на наноуровне. Всё это позволит выявить закономерности изменения прочностных показателей в зависимости от количества вводимых добавок, а также поможет в разработке оптимального состава для различных условий эксплуатации бетона.

3.3. Особенности введения наномодификаторов в состав бетона методом механической активации и ультразвуковым диспергированием

Модифицирование структуры бетона наноразмерными добавками является актуальным направлением современного строительного материаловедения, направленное на повышение эксплуатационных характеристик материала [45,59]. Размеры наномодифицирующих добавок варьируются от 1 до 1000 нм в одном направлении, что соответствует характеристикам дисперсных коллоидных систем. Эти добавки состоят из частиц с низкой молекулярной массой, которые формируются из молекулярных цепочек длиной от 10 до 20 единиц. Благодаря своему наноразмеру, такие добавки обладают уникальными физико-химическими свойствами, что позволяет им оказывать значительное влияние на структуры и характеристики материалов, в частности, на прочность бетонов. Наномодификаторы могут быть органическими или минеральными углеводородными цепочками [112].

На сегодняшний день имеется множество исследований и разработок по наномодификации бетонов. Такие добавки очень дисперсны и вводятся в бетоны в очень малых концентрациях (до 0,01% по массе вяжущего). В связи с этим важной технологической особенностью применения наномодифицирующих добавок является способ их введения в бетонную смесь. Простое механическое перемешивание компонентов не обеспечивает равномерного распределения небольших количеств высокодисперсных добавок по всему объему, что может привести к неэффективности их использования и недостаточному проявлению свойств.

Современное строительное материаловедение сталкивается с актуальной задачей разработки композиций, структура и характеристики которых могут удовлетворить специфические эксплуатационные требования и обеспечить максимальную долговечность конструкций. Необходима оптимизация методов введения наномодификаторов, что может включать использование ультразвукового

диспергирования, химических активаторов или других технологий, способствующих равномерному распределению добавок в матрице бетона.

Также важным аспектом являются технологические параметры производства. Так необходимо уделять особое внимание вопросам, связанным с материальными и энергетическими затратами, которые требуются для производства новых, а также существующих строительных материалов и изделий. В связи с этим при разработке технологии наномодифицированных бетонов следует учитывать возможность упрощения технологии их производства.

В связи с малым количеством введения наномодификаторов в состав бетона, особое внимание при разработке составов на их основе необходимо уделять особенностям взаимодействия нанодобавок со структурными компонентами композиционного материала. Улучшение прочностных параметров таких бетонов обусловлено уменьшением размеров структурных элементов и, соответственно, уплотнением бетона. Таким образом, применение наноразмерных добавок позволяет целенаправленно изменять характеристики бетона, что открывает широкие перспективы для разработки и развития технологии наномодифицированных бетонов.

На сегодняшний день можно выделить три основных метода введения углеродных наноматериалов в бетонные смеси:

1. Применение линейно-индукционных вращателей (ЛИВ). ЛИВ – это устройства, которые создают механическое движение мелющих тел и компонентов обрабатываемой смеси за счет воздействия электромагнитного поля. Рабочая камера данных устройств находится в катушке индуктивности. Обрабатываемая смесь погружается в рабочую камеру с расчетным количеством мелющих ферромагнитных тел с заданными параметрами. После этого происходит подача электромагнитного поля, в котором мелющие тела образуют взвешенный, вращающийся слой, который напоминает своей формой вихрь, через данный поток проходит обрабатываемая смесь.

За счет этого в камере обеспечивается активное перемешивание и равномерное распределение всех компонентов смеси. В камере активируется смесь за счет механического помола ее компонентов. Этот процесс механической активации позволяет существенно повысить реакционную способность материалов, улучшая их физико-химические свойства. Активация может осуществляться как для сухих смесей, так и для цементных суспензий. При механическом помоле происходит разрушение агломератов и увеличение межфазной поверхности, что благоприятно сказывается на уровне дисперсии и обеспечивает более равномерное распределение наноразмерных добавок в бетонной матрице. В случае цементных суспензий механическая активация способствует созданию более однородной структуры, что в конечном итоге приводит к улучшению прочностных характеристик и долговечности конечного продукта [71,100].

2. Использование аппаратов на основе гидродинамической кавитации представляет собой эффективный метод для диспергирования эмульсий и суспензий. Эти аппараты функционируют на принципе явления эжекции жидкости. Она возникает при прохождении потока, образовавшегося от давления, через отверстие в виде кольца. С внешней стороны установленного потока действует разрезающее давление, при этом поступающая жидкость из окружающего пространства компенсирует данное воздействие. В центре кольцеобразного потока образуется вакуумная среда, а ее воздействие приводит к смыканию стенок установившейся струи. При этом в процессе гидродинамической кавитации образуется свободный объем куполообразного типа с низким давлением. Когда давление в этом объеме достигает значений, известных как критические, оболочка образовавшегося купола разрывается, и давление начинает выравниваться с окружающей средой. Этот процесс сопровождается выделением энергии, что приводит к интенсивному перемешиванию и разрушению частиц в рабочей суспензии или эмульсии.

Данная цикличность процесса, при котором кавитационные пузырьки образуются и схлопываются, создает мощные микросмешивающие эффекты, способствующие равномерному распределению компонентов смеси. Как результат, происходит эффективное размешивание, что особенно важно для достижения однородности бетонных смесей с добавлением наномодификаторов [6].

3. Применение ультразвуковых диспергаторов является высокоэффективной технологией, основанной на равномерном распределении нерастворимых добавок в воде затворения под действием ультразвуковых волн частотой от 20 кГц и выше. Эти ультразвуковые волны создают локальные области высоких и низких давлений, что приводит к образованию кавитационных пузырьков, которые быстро формируются и схлопываются. Этот процесс сильно усиливает перемешивание, разрушая агломераты и способствуя гомогенизации суспензий [69,70].

Ультразвуковое диспергирование также эффективно применяется для размешивания растворимых добавок, таких как пластификаторы и суперпластификаторы. В результате использования ультразвуковых диспергаторов достигается оптимизация взаимодействия между компонентами бетонной смеси, что способствует улучшению ее рабочей способности и характеристик прочности.

Высокочастотное воздействие ультразвуковых волн способствует измельчению образовавшихся агломератов нерастворимых добавок и их равномерному диспергированию по всему объему воды затворения. Работа ультразвуковых диспергаторов основана на пьезоэлектрическом преобразовании частоты электрического тока в частоту движения пластины рабочего органа, что генерирует ультразвуковые волны. При воздействии рабочего органа на обрабатываемую воду создаются кавитационные пузыри и акустические течения, которые при схлопывании механически воздействуют на частицы вводимых добавок в жидкости.

В результате произведенного анализа литературных данных было принято решение об использовании двух технологий введения нанотрубок, а именно

применение ультразвуковых диспергаторов и линейно-индукционных вращателей. Это связано с наименьшими энергетическими затратами указанных технологий по сравнению с их аналогами.

На данном этапе исследования определялся эффект различных дозировок комплексного введения суперпластификатора СП-3 и углеродных нанотрубок «Таунит-М» на прочностные показатели мелкозернистого бетона. При этом введение добавок осуществлялось по двум технологиям, а именно, с помощью применения ультразвукового диспергатора УЗГ13-0,1/22 и линейно-индукционного вращателя АВС-100.

Для изготовления образцов мелкозернистого бетона с составом Ц:П – 1:3 применялись следующие материалы: цемент марки «Eurocement» М500Д0 производства ООО «Цемрос», песок ООО «Партнер групп» с модулем крупности 1,9, суперпластификатор «Полипласт СП-3». В качестве модифицирующей добавки применялись углеродные нанотрубки марки «Таунит-М», производства ООО «НаноТехЦентр».

Было изготовлено две серии образцов-балочек с размерами 40х40х160 мм для двух технологий введения наномодифицирующей добавки. Каждая серия включала в себя состав без применения надомодификатора и 10 составов с различным содержанием УНТ в количестве от 0,001 до 0,01% по массе цемента.

Технология применения ультразвукового диспергатора имела следующий вид.

В расчетное количество воды затворения вводилась добавка наномодификатор совместно с суперпластификатором. В полученный состав погружался рабочий орган ультразвукового диспергатора УЗГ13-0,1/22 в виде керамической трубки. Далее происходила обработка воды затворения с помощью ультразвуковых волн с частотой 22 кГц в течение 5 минут. Параллельно приготовлению водной суспензии смешивались сухие компоненты бетонной смеси. После активации жидкости все компоненты смеси замешивались механически до

однородного состояния и производилась формовка образцов с помощью вибрационной площадки.

В случае с применением линейно-индукционного вращателя нанодобавка вводилась в сухую цементно-песчаную смесь в рабочей камере ЛИВ, также в камеру загружались мелющие тела в виде мелких стальных цилиндрических отрезков до 0,5 см в длину (в расчете 6% по массе обрабатываемой смеси). После загрузки всех компонентов происходила обработка и активация смеси в течение двух минут. Добавка суперпластификатор вводилась в воду затворения также с применением ультразвукового диспергирования, но уже без наномодификатора. После подготовки всех компонентов смеси также происходило механическое размешивание и формование образцов мелкозернистого бетона.

Для двух серий испытаний приготавливалась цементно-песчаная смесь 1:3 с водоцементным отношением 0,42. Добавка суперпластификатор вводилась в расчете 0,5% по массе цемента, в то время как УНТ в расчете от 0,001 до 0,01% по массе цемента.

На основе этих составов были приготовлены образцы-балочки, которые твердели в нормальных условиях в течение 28 суток после изготовления. Показатели прочности при сжатии оценивались в возрасте 1, 3, 7, 14, 28 суток твердения с помощью применения ультразвукового прибора «Пульсар 1.2» с помощью неразрушающего метода контроля. Прочность при сжатии и изгибе в возрасте 28 суток оценивались с помощью прессов моделей В-3.4.3 и МИИ-100. В таблицах 3.4 и 3.5 представлены экспериментальные данные для двух технологий введения УНТ.

Таблица 3.4 – Показатели прочности мелкозернистого бетона
приготовленного с помощью технологии ультразвукового диспергирования

№	Кол-во УНТ, %	Прочность, МПа					
		1 сутки	3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки	
		$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$
1	-	14,8	26,7	42,5	43,8	45,8	5,8
2	0,001	16,2	29,1	51,0	54,3	56,2	6,2
3	0,002	18,1	29,4	49,2	52,8	55,5	6,4
4	0,003	18,2	30,9	52,8	55,1	57,7	6,2
5	0,004	19,3	30,5	50,9	54,1	56,9	6,4
6	0,005	18,9	31,1	51,7	56,2	58,9	6,8
7	0,006	20,0	33,0	51,2	54,9	57,4	6,6
8	0,007	19,5	32,1	51,7	55,4	57,8	6,5
9	0,008	18,9	34,1	53,2	57,0	58,1	6,7
10	0,009	18,7	30,2	52,7	56,9	58,5	6,8
11	0,01	19,5	32,9	53,9	57,3	59,6	6,8

Таблица 3.5 – Показатели прочности мелкозернистого бетона
приготовленного с помощью технологии линейно-индукционного вращения

№	Кол-во УНТ, %	Прочность, МПа					
		1 сутки	3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки	
		$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{сж}$	$R_{изг}$
1	-	15,7	25,9	42,1	43,9	46,2	6,1
2	0,001	18,7	32,7	51,8	55,2	58,1	6,9
3	0,002	17,2	31,2	51,1	56,8	58,6	7,2
4	0,003	16,9	34,8	55,6	57,2	60,2	7,2
5	0,004	21,1	35,1	56,2	58,5	61,7	6,9
6	0,005	20,8	36,7	56,3	58,5	61,2	7,1
7	0,006	20,5	36,7	55,2	57,7	60,4	7,5
8	0,007	19,5	32,1	54,1	59,9	61,0	7,3
9	0,008	21,7	38,2	57,7	59,1	61,5	7,7
10	0,009	22,1	35,2	56,9	60,0	62,2	7,9
11	0,01	20,1	35,7	55,2	59,1	62,8	7,9

Для оценки влияния введения наномодификатора с помощью двух технологий были построены графики интенсивности набора прочности во времени на рисунках 3.4 и 3.5.

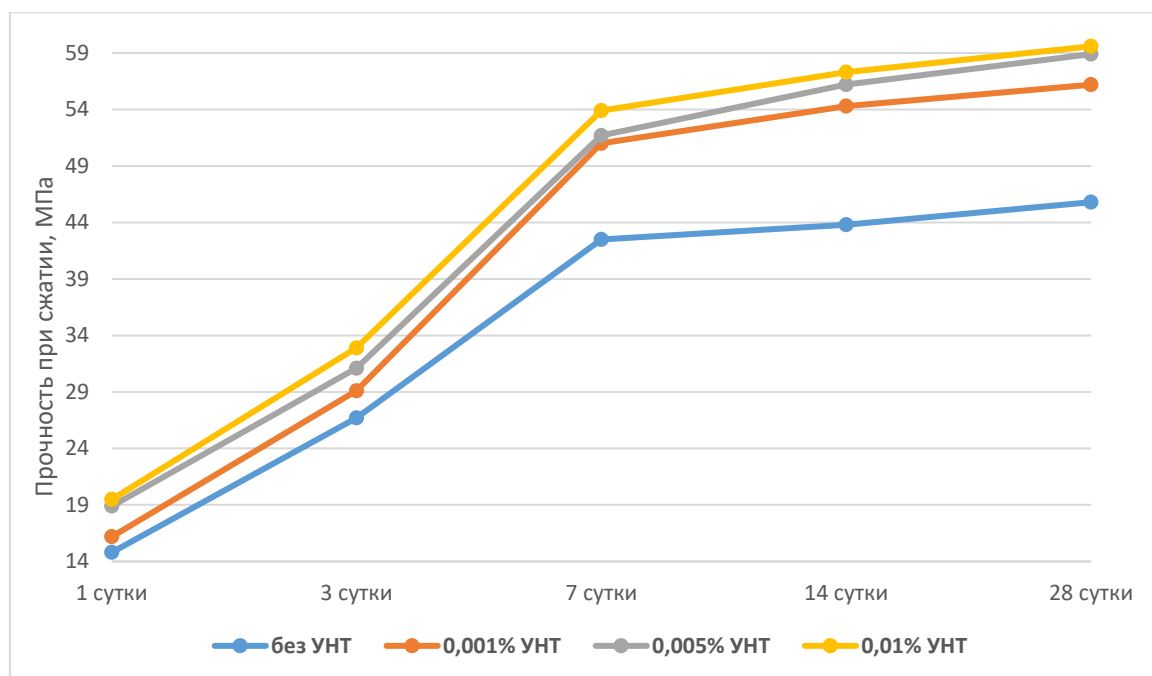


Рисунок 3.4 – График интенсивности набора прочности мелкозернистого бетона с применением технологии УЗД

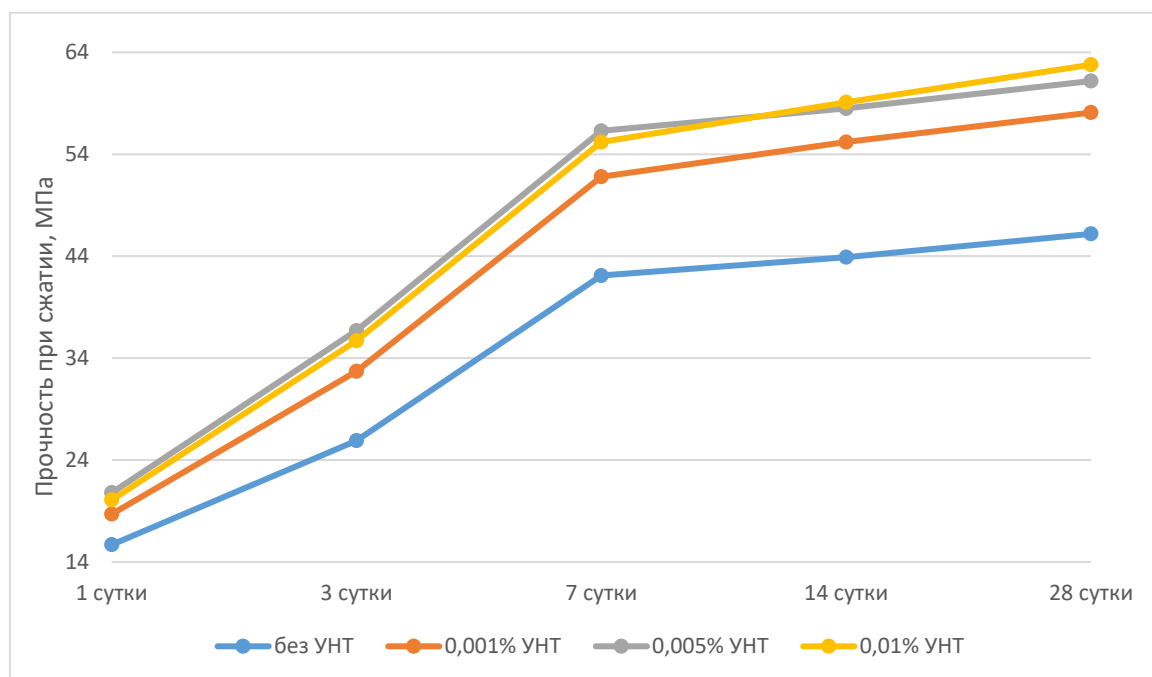


Рисунок 3.5 – График интенсивности набора прочности мелкозернистого бетона с применением технологии ЛИВ

Для обеих технологий введения наномодифицирующей добавки было обнаружено повышение прочности материала в зависимости от количества добавки нанотрубок. С увеличением концентрации нанодобавки наблюдается ступенчатое повышение прочности.

При использовании ультразвукового диспергатора минимальное увеличение прочности составило 17% для предела прочности при сжатии и 6,5% для прочности при изгибе (состав 3) в сравнении с контрольным образцом. Максимальное увеличение прочности при сжатии составило 30,1%, при изгибе 17,2% (состав 11). Для образцов наномодифицированного бетона с помощью введения добавки линейно-индукционным вращателем минимальное увеличение прочности при сжатии и изгибе составило 25,7% и 13,1% (состав 2), а максимальное 35,9% и 29,5% соответственно (состав 11).

Также была произведена оценка интенсивности набора прочности мелкозернистого бетона с помощью неразрушающего метода контроля прибором «Пульсар 1.2.» (рис. 3.4, 3.5). Согласно полученным данным видно, что незначительный прирост прочности происходит на первые сутки (7% в среднем). При этом следует выделить, что на 7 сутки набора прочности в условиях нормального твердения наблюдалось повышение прочности при сжатии на 21% для технологии с применением УЗГ и 25% для технологии с применением ЛИВ. Дальнейший набор прочности для всех образцов протекает по схожему принципу, согласно представленным графикам.

Таким образом, введение наномодифицирующей добавки не только повышает прочностные характеристики конечного материала, но и увеличивает интенсивность набора прочности бетона на ранних сроках твердения. Как известно – повышение прочности бетона на ранних сроках твердения положительно влияет на производственные и строительные процессы.

Все полученные экспериментальные данные свидетельствуют о более эффективном использовании линейно-индукционного вращателя. Введение

наномодификатора данным способом позволило получить большие показатели прочности на всех сроках твердения бетона. При этом наблюдается большая интенсивность набора прочности в ранние сроки твердения по сравнению с применением технологии ультразвуковой диспергации.

Данный эффект можно объяснить комплексным воздействием ЛИВ. Так использование технологии вращающегося слоя позволяет равномерно распределить малое количество добавки по всему объему сухой цементно-песчаной смеси, а также обеспечивает эффект активации цементного вяжущего путем механического помола мелющими ферромагнитными телами.

3.4. Исследование структуры наномодифицированного бетона

Для большего понимания механизма модифицирования структуры бетона нанотрубками было произведено их исследование с помощью сканирующей электронной микроскопии. Оценка структуры проводилась с помощью двулучевого СЭМ «Versa 3d» с кратностью до 150000. Высокий показатель приближения позволит оценить структуру материала на наноуровне. Данный микроскоп комбинирует в себе как возможности сканирующего электронного микроскопа, так и ионного источника. Применяется для исследования не только структуры материала, но и его элементного состава на поверхности и приповерхностных слоев образца. Прибор имеет возможность создания микроструктурного покрытия с помощью газо-химии. Оборудование оснащено программным комплексом, с помощью которого можно визуализировать 3D структуры материала.

В ходе данного исследования было отобрано две серии образцов. Для первого этапа отбирались образцы, разрушенные в ходе испытаний по определению прочностных характеристик, измельчались до порошкообразного состояния, и их небольшое количество помещалось в камеру микроскопа (рис. 3.6).

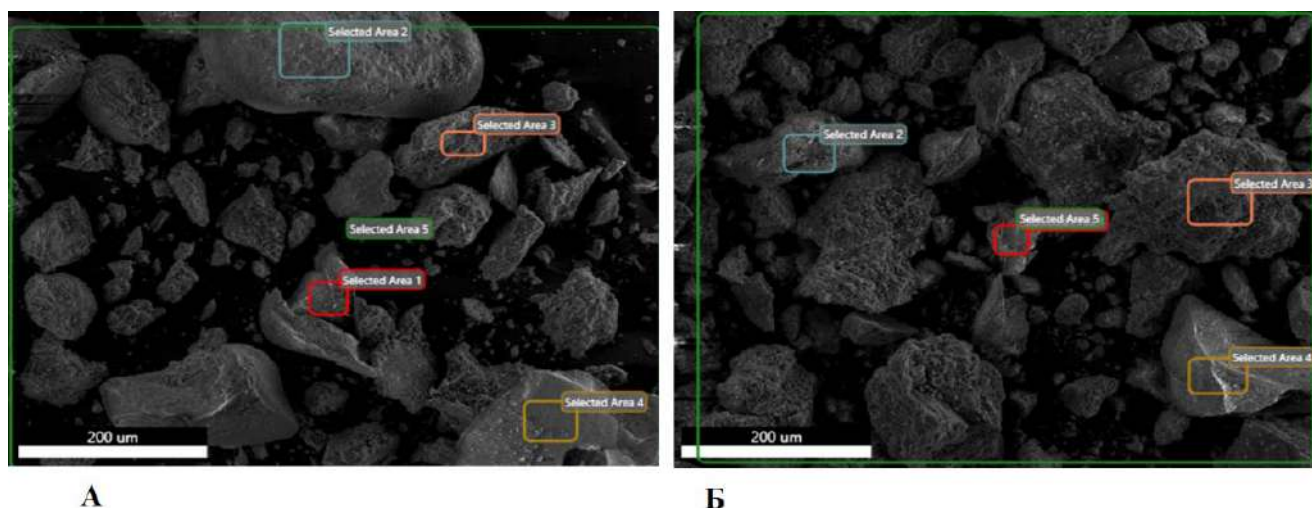


Рисунок 3.6 – Микрофотография СЭМ мелкозернистого бетона

А – без введения наномодификатора; Б – с введением УНТ в количестве 0,01% по массе цемента (увеличение $\times 8000$)

На рисунке 3.6. представлены микрофотографии СЭМ мелкозернистого бетона. Для участков, выделенных на рисунке с помощью EDS-спектрограммы определялся химический состав образцов.

В таблице 3.6 приведены средние показатели химического состава мелкозернистого бетона без применения добавки и с введением УНТ.

Таблица 3.6 – Средние показатели химического состава образцов

Элемент	Содержание элемента в образце, % по массе (А)					Содержание элемента в образце, % по массе (Б)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
MgO			1,41		0,64		0,38	1,48		0,88
Al ₂ O ₃	3,76	6,04	11,27	4,66	11,00	1,46	4,12	5,15	1,62	5,16
SiO ₂	91,6	90,6	21,63	92,72	52,63	6,42	79,9	18,13	89,92	30,37
SO ₃			2,47		0,81			3,33		2,42
CaO	4,64	3,68	58,94	2,62	0,35	92,12	14,59	67,87	8,46	57,28
Fe ₂ O ₃			4,27		34,57		0,89	2,8		3,52

Оксид кальция является основным минералом для производства цементного клинкера. Данный минерал входит в состав синтезированных минералов цементного клинкера и является важным вяжущеобразующим компонентом. В

образцах наномодифицированного бетона (образец Б) наблюдается большее количество основных минералов, влияющих на набор прочности и конечную прочность бетона. Такими элементами являются CaO , Fe_2O_3 , SO_3 и Al_2O_3 . Наличие большего количества указанных химических соединений свидетельствует о положительном влиянии введения УНТ в состав бетона и косвенно подтверждает, что нанотрубки выступают в роли дополнительных центров кристаллизации основных минералов цементного камня. Для полноценной оценки влияния УНТ на структуру бетона требуется дополнительное проведение исследований, направленных на изучение минералогического состава.

На рисунке 3.7 представлены микрофотографии образцов наномодифицированного бетона для оценки механизма модифицирования структуры бетона углеродными нанотрубками.

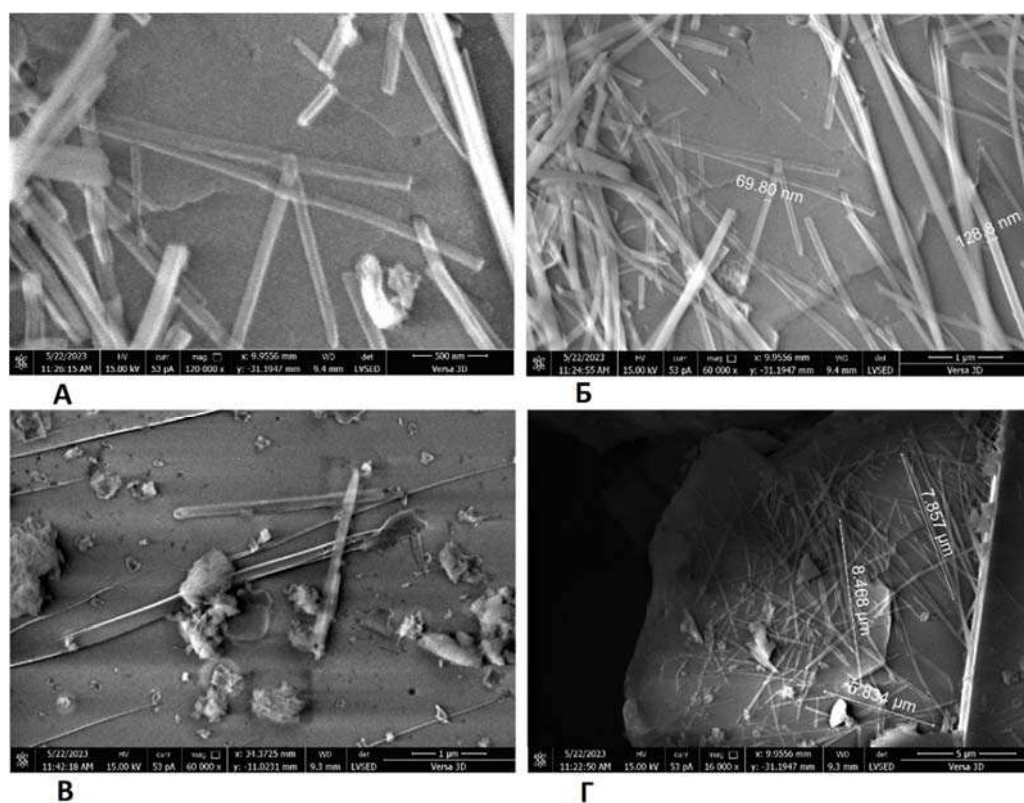


Рисунок 3.7 – Микрофотографии наномодифицированного бетона
 А – Кратность 120000х; Б – Кратность 60000х; В – Кратность 60000х;
 Г – Кратность 16000х

Как видно на снимках, углеродные нанотрубки имеют стабильную величину диаметра по длине волокна, это обеспечивает хорошие условия роста цементного камня вокруг углеродных включений. О модифицировании бетона на наноуровне свидетельствует дискретное армирование цементной матрицы, в которой минералы этtringита совместно с нанотрубками позволяют объединить новообразования в единую структуру.

Также были исследованы образцы, полученные в ходе разрушения бетона при определении предела прочности при сжатии. Отбирались части разрушенных образцов мелкозернистого бетона (с размерами до 5 мм) рис. 3.8

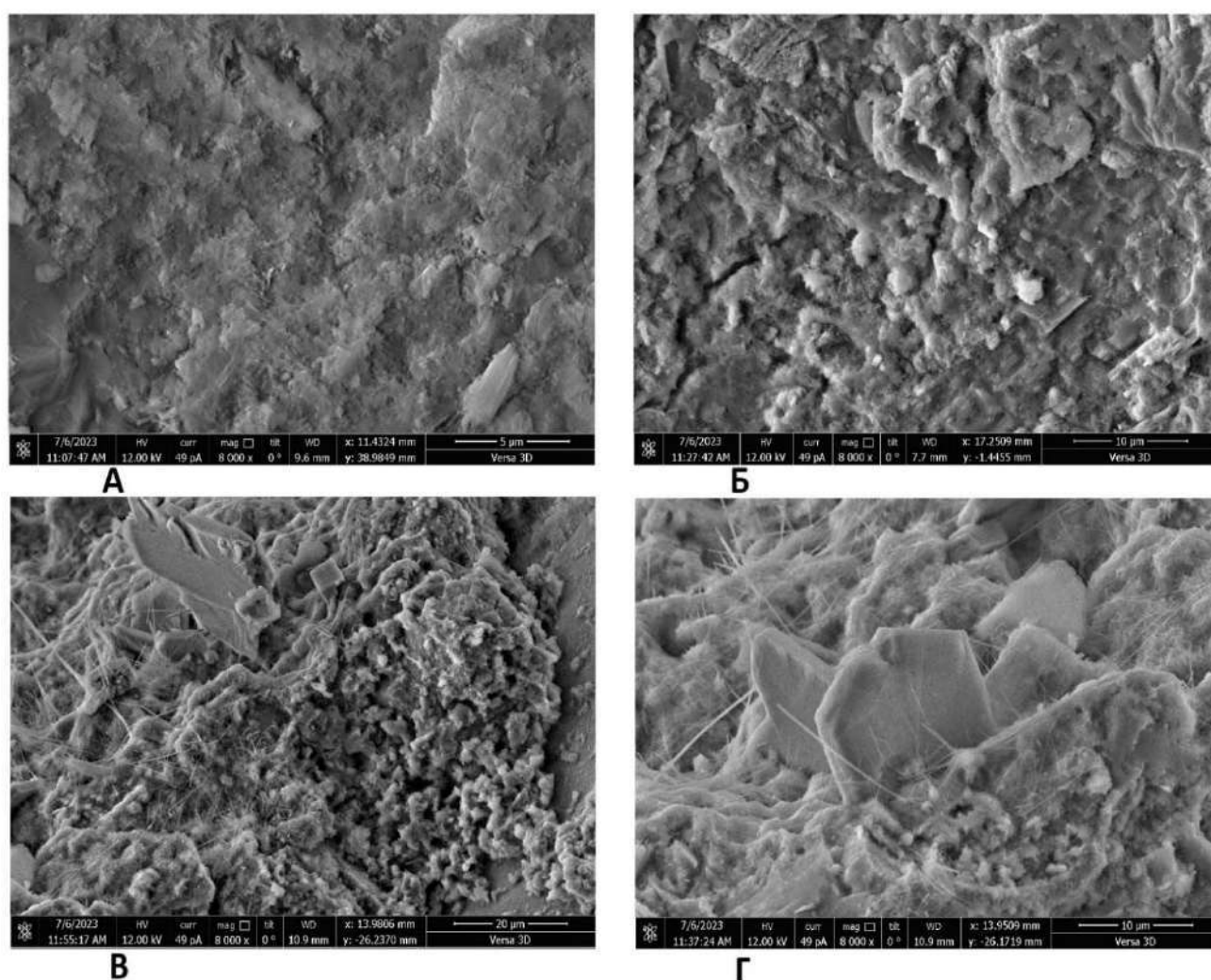


Рисунок 3.8 – Микрофотографии мелкозернистого бетона (кратность 8000х)
 А - образец без применения УНТ; Б – образец с содержанием 0,001% УНТ;
 В – образец с содержанием 0,005% УНТ; Г – образец с содержанием 0,01% УНТ

На рисунке 3.8 А показана структура мелкозернистого бетона без включения УНТ, на рисунке 3.8 Б, В, Г показана структура наномодифицированного бетона. Исходя из сравнения, можно увидеть, что добавка углеродных нанотрубок хорошо взаимодействует с цементной матрицей, как наполнитель на наноуровне, создавая тем самым дополнительные центры кристаллизации основных минералов цементного камня. Благодаря этому, как видно на фотографиях, наномодифицированные бетоны имеют более плотную структуру, что и обуславливает повышение прочностных характеристик материала.

Анализ образцов с включениями углеродных нанотрубок с помощью сканирующей электронной микроскопии демонстрирует наличие участков структуры бетона с включениями наномодификатора. Увеличение количества нанодобавки от 0,001 до 0,01% привело к более широкому распространению наноразмерных трубок в матрице бетона. За счет того, что УНТ выступают как дополнительные центры кристаллизации, а также за счет армирующего эффекта на наноуровне снижается пористость материала. Более плотная компоновка частиц на микрофотографиях свидетельствует о большем образовании гелеобразных продуктов гидратации цемента, как было отмечено множеством исследований.

Таким образом, углеродные наномодификаторы оказывают значительный эффект на процессы структурообразования цементной матрицы. Благодаря этому формируется большее количество гидросиликатов. Как видно на микрофотографиях, в зонах с включением УНТ образуются более крупные кристаллы новообразований, а также наблюдается более плотная компоновка частиц структуры материала. Этот эффект достигается тем, что стабильный диаметр УНТ по всей длине, а также их полая структура создает благоприятные условия для роста новообразований.

3.5. Устойчивость суспензии

Для оценки устойчивости введения УНТ в воду затворения по времени производилось исследование с помощью фотоколориметрии (рис. 3.9).

В основу метода положено свойство окрашенных растворов поглощать проходящий через него свет определенной длины волны. Снижение интенсивности света при прохождении его через раствор тем больше, чем интенсивнее окрашен раствор. При оседании твердых частиц УНТ происходит уменьшение окрашенности воды затворения. Исследование проводилось с помощью фотоколориметра КФК-3.

Для данного исследования необходимо сравнение интенсивности прохождения света (в %) в сравнении с контрольным образцом. Так прибор тарировался по воде затворения, а далее оценивалась интенсивность прохождения света исследуемых суспензий (Рис. 3.10). Введение добавок происходило из расчета вода – 200 мл, УНТ – 0,025 г, СП-3 – 2,5 г. Это соответствует количеству вводимых добавок для состава мелкозернистого бетона в расчете Ц:П – 500:1500, В/Ц – 0,38, УНТ – 0,001% по массе цемента, СП-3 – 0,5% по массе цемента.



Рисунок 3.9 – Проведение исследований с помощью КФК-2

В качестве образцов была приготовлена вода затворения с введением УНТ, а также УНТ+СП-3 с помощью различных ультразвуковых диспергаторов: УЗГ13-0,1/22 с частотой ультразвука 22 кГц; UCD-950 с частотой ультразвука 25 кГц.

В обоих случаях рабочий орган оборудования погружался в подготовленную воду с введенными добавками и происходила обработка ультразвуком в течение 5 минут. При этом прибор UCD-950 позволяет настраивать режим с переменными паузами и обработкой, так для данного прибора был выставлен режим с 3 секундной обработкой и 3 секундной паузой. Данный режим позволяет усилить эффект кавитационной диспергации частиц добавки в воде затворения. При этом время обработки с применением UCD-950 составило 10 минут, учитывая необходимые паузы.

После активации воды с помощью диспергирования оценивалась интенсивность проходящего света с периодичностью 20 минут. Результаты экспериментальных данных представлены в таблице 3.7 и на рисунках 3.10, 3.11.

Таблица 3.7 – Устойчивость суспензии воды затворения с добавками активированной с помощью «УЗГ13-0,1/22»

Суспензия	Интенсивность проходящего света Т, %						
	Через определенное время отстаивания						
	0 мин	20 мин	40 мин	60 мин	80 мин	100 мин	120 мин
Интенсивность проходящего света Т, % Вода + УНТ	53,5	60	59	59	57	77,5	79
Интенсивность проходящего света Т, % Вода + УНТ + СП-3	10	10,2	10,5	11	11,3	12	15

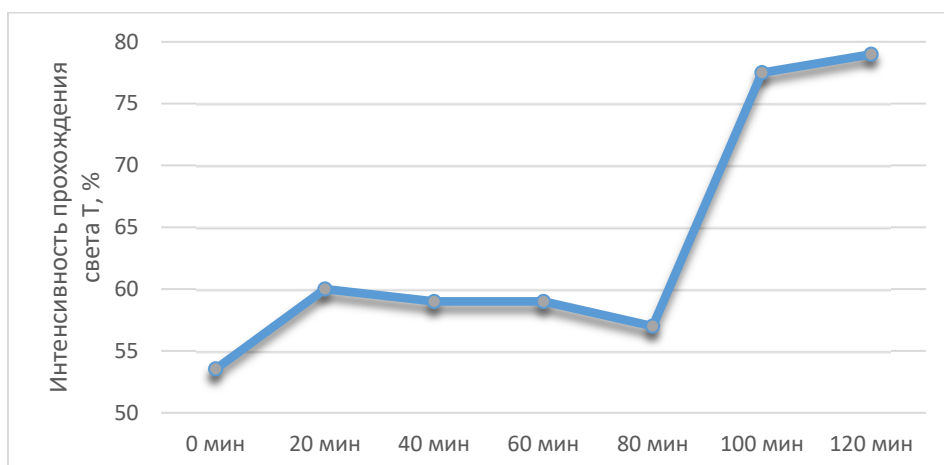


Рисунок 3.10 – Вода затворения + УНТ

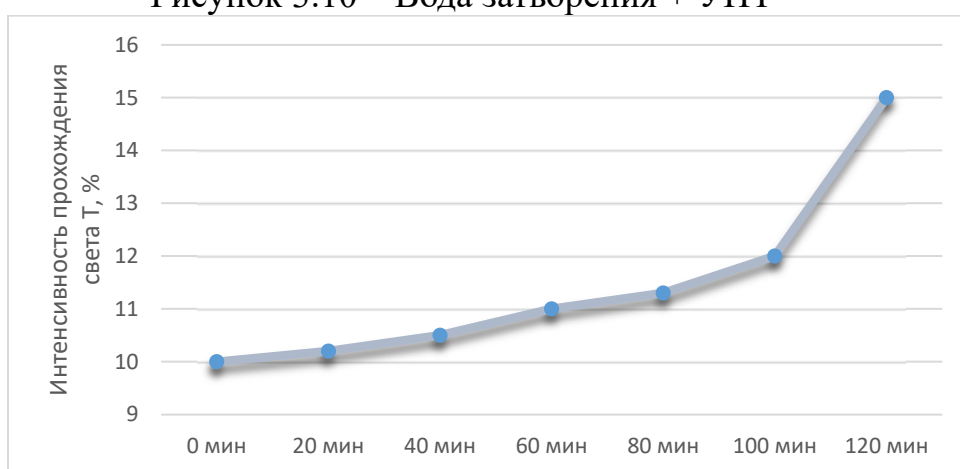


Рисунок 3.11 – Вода затворения + УНТ + СП-3

Исходя из полученных данных можно сделать вывод, что время применения активированной воды затворения после введения УНТ с помощью ультразвукового диспергирования с частотой 20 кГц составляет 80 минут, с применением пластификатора время увеличивается до 100 минут. Последующее отстаивание приводит к увеличению интенсивности прохождения света более чем на 50% в обоих случаях.

Далее были произведены испытания с использованием ультразвукового диспергирования с частотой 25 кГц, полученные результаты изложены в таблице 3.8 и на рисунках 3.12, 3.13, 3.14.

Таблица 3.8 – Устойчивость суспензии воды затворения с добавками активированной с помощью «UCD-950»

Суспензия	Интенсивность проходящего света Т, %												
	Через определенное время отстаивания												
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Вода + УНТ	0,1	1,5	3	4	5,1	6,2	7,3	8,3	9	10,1	21,7	29,5	38,1
Вода + УНТ + СП-3	0,05	0,7	0,9	1	1,1	1,25	1,3	1,5	1,6	1,7	2,2	2,7	7,7
Вода + СП-3	0,08	0,1	0,2	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,1

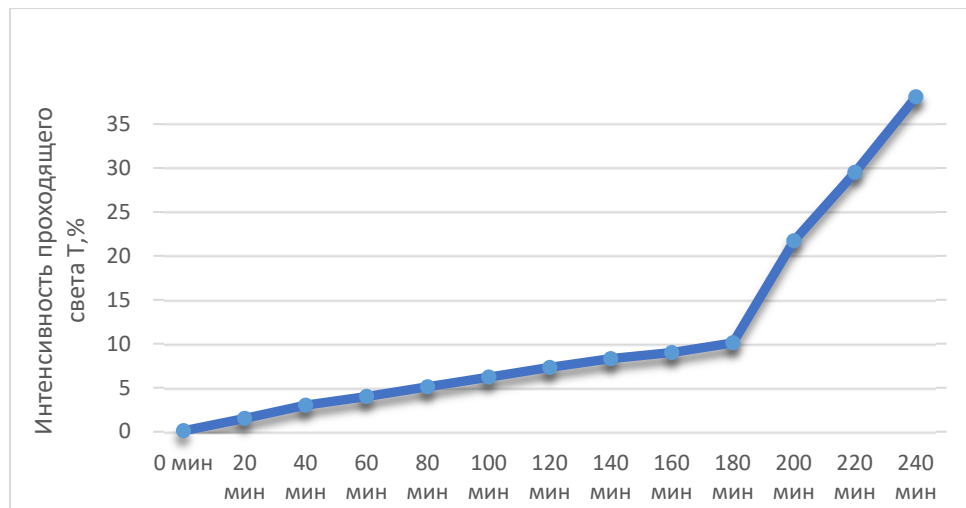


Рисунок 3.12 – Вода затворения + УНТ

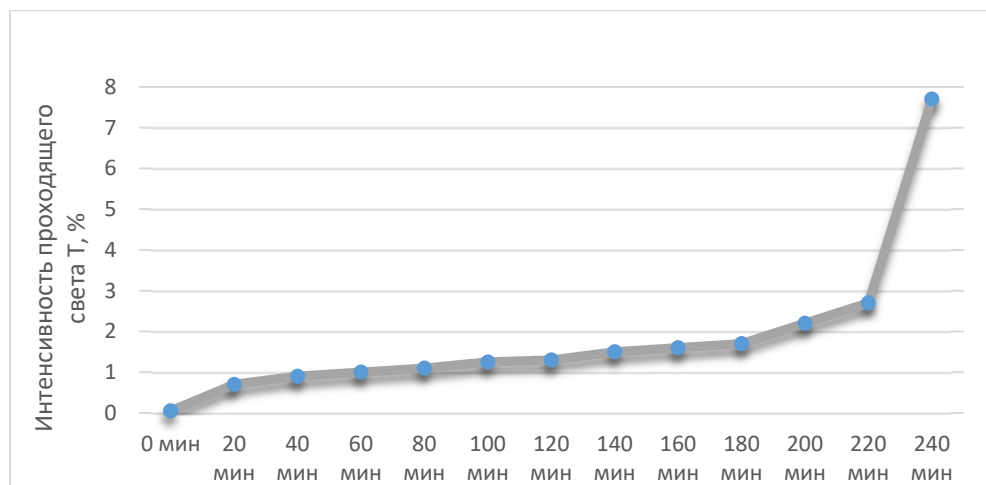


Рисунок 3.13 – Вода затворения + УНТ + СП-3

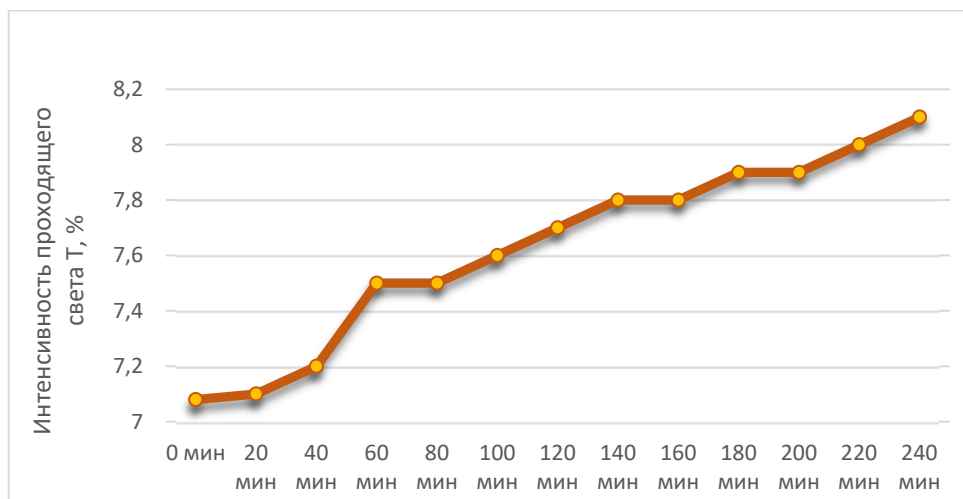


Рисунок 3.14 – Вода затворения + СП-3

Согласно полученным данным, можно сделать вывод, что диспергация ультразвуком частотой 25 кГц приводит к более полному распределению наноразмерных трубок, так как при одинаковой концентрации УНТ в воде углеродных нанотрубок, интенсивность проходящего света для образца с применением УЗГ-13-0,1/22 сразу после активации составила 53,5%, в то время как при использовании UCD-950 — 0,1%.

Также наблюдается повышение времени устойчивости. Во втором случае наблюдается резкое увеличение степени проводимости света на 180 (рис. 3.13) минут для образца без пластификатора и на 220 (3.14) минут с применением пластификатора.

Также оценивалась степень устойчивости раствора воды + СП-3 (рис. 3.15). Через 240 минут отстаивания интенсивность прохождения света увеличилась не более чем на 10%. Это свидетельствует о том, что увеличение интенсивности прохождения света через суспензию вода+УНТ+СП-3 в главной степени происходит за счет оседания нерастворимых углеродных нанотрубок.

Для оценки применения активированной воды затворения в условиях отстаивания свыше оптимального времени проводилось еще одно исследование образцов активированной воды после суточного отстаивания. Спустя 1 сутки интенсивность прохождения света через суспензию воды + УНТ составила 70%, в

то время как для суспензии воды+УНТ+СП-3 она составила 42% (таблица 3.9, рис. 3.15, 3.16).

Таблица 3.9 – Устойчивость суспензии воды затворения с добавками активированной с помощью «UCD-950» спустя 1 сутки

Суспензия	Интенсивность проходящего света Т, %												
	Через определенное время отстаивания												
	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	220	240
Вода + УНТ	0,1	1,7	3,2	4	5,7	7	7,9	9	10,2	10,9	25	33,7	45,2
Вода + УНТ + СП-3	0,05	0,8	1	1	1,15	1,4	1,4	1,65	1,8	1,9	2,5	3,7	10

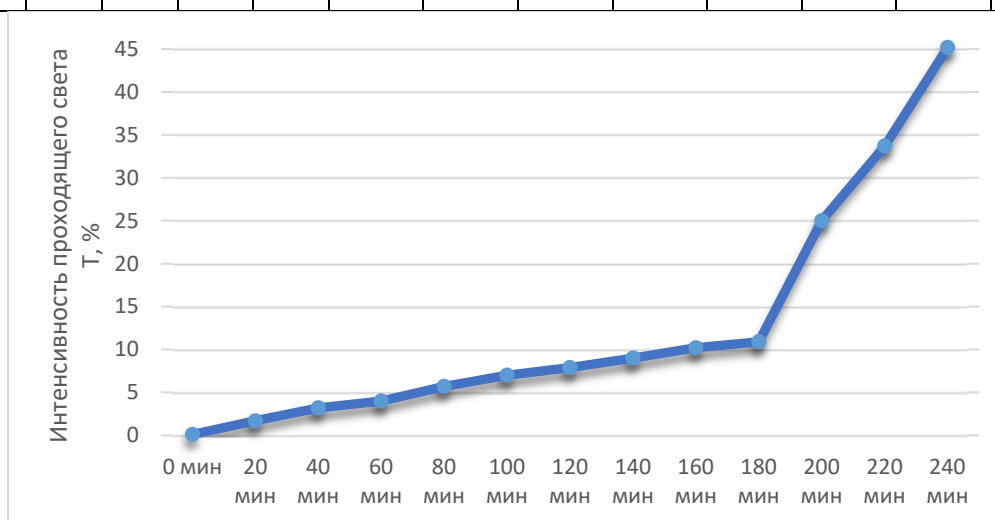


Рисунок 3.15 – Вода затворения + УНТ

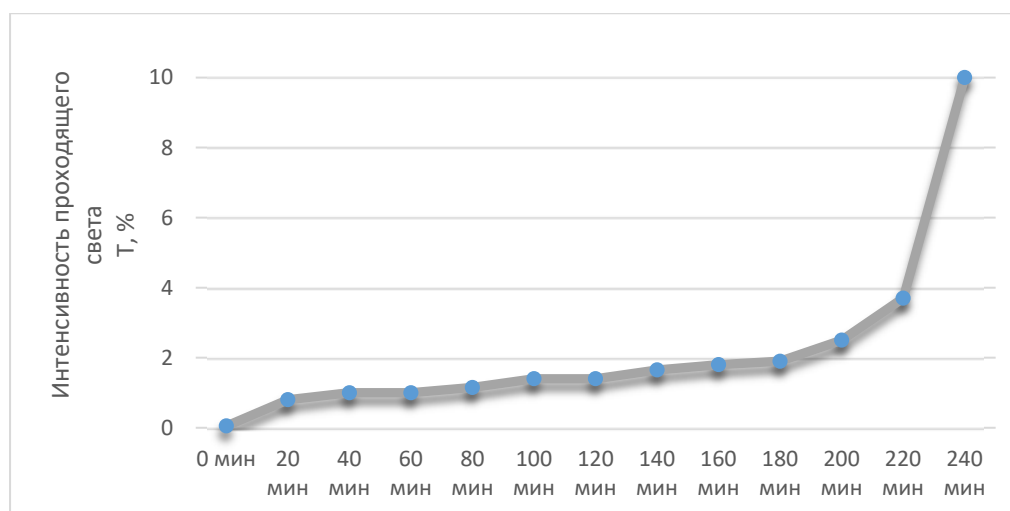


Рисунок 3.16 – Вода затворения + УНТ + СП-3

Повторная диспергация активированной суспензии показала практически идентичный эффект. Из чего следует, что применение активированной воды затворения после повторной диспергации также обеспечит достаточный эффект активации.

3.6. Исследование влияния наномодифицирующих добавок на бетон с помощью рентгеновской дифрактометрии

Метод рентгеновской дифрактометрии позволяет получить детальную характеристику микро-, субмикро- и наноструктурных компонентов бетонов. С его помощью решаются следующие задачи:

1. Исследование химико-минералогического и фазового состава цементного связующего на различных этапах его преобразования и достижения состояния твёрдой фазы системы в виде «цемент – вода» с помощью применения качественного рентгенофазового анализа.

2. Анализ структуры отдельных кристаллических фаз цементного связующего с применением количественного рентгенофазового анализа.

3. Определение кинетических характеристик гидратационных процессов цемента посредством количественного рентгенофазового анализа.

Для исследования материала, относящегося к цементному клинкеру, были отобраны эталонные рентгенограммы минералов, обычно присутствующих в его составе, с максимально интенсивными линиями. Учитывалось возможное расхождение в значениях межплоскостного расстояния d в пределах $\pm 1\%$.

К исследуемым минералам относятся:

1. Трёхкальциевый силикат ($3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) C_3S
2. Двухкальциевый силикат ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$) C_2S
3. Трёхкальциевый алюминат ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$) C_3A
4. Четырёхкальциевый алюмоферрит ($4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) C_4AF

5. Портландит $\text{Ca}(\text{OH})_2$

На рентгенограмме наиболее интенсивным пиком является линия с $2\theta = 32,54^\circ$ ($d = 2,75 \text{ \AA}$), соответствующая фазе C_3S .

Сопоставление дифракционных линий эталонной рентгенограммы трёхкальцевого силиката с аналогичными линиями на исследуемой рентгенограмме выявило их полное соответствие. Данный результат свидетельствует о том, что алит (C_3S) является одной из ключевых фаз цементного клинкера.

В качестве следующей стадии анализа отобранных образцов была выбрана наиболее ярко выраженная линия с углом 2θ , равным $32,71^\circ$ ($d = 2,77 \text{ \AA}$). Эту линию однозначно можно идентифицировать как фазу цементного клинкера C_2S , поскольку остальные характерные линии данного соединения демонстрируют хорошее соответствие между экспериментальной рентгенограммой и эталонными данными.

Остальные линии характеризовались значительно меньшей интенсивностью, а именно эттрингита (C_3A), четырёхкальцевого алюмоферрита (C_4AF) и портландита $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Таким образом, анализируемый образец содержит фазы $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Оценка параметров проводилась на цементном камне с $\text{В/Ц} = 0,5$, изготовленном из портландцемента ЦЕМ I 42,5 Д0, соответствующего ГОСТ 31108. Процесс гидратации цементного вяжущего исследовался при нормальных условиях твердения в течение 1, 3, 7, 14 и 28 суток.

Исходя из полученных результатов прочностных характеристик, были изготовлены образцы для оценки влияния наномодифицирующих добавок на структуру бетона с содержанием углеродных нанотрубок в количестве 0,001 %, 0,005 % и 0,01 % по массе цементного вяжущего. Также оценивался состав без применения наномодификатора.

Фазовый состав эталонного и наномодифицированного цементного камня анализировался рентгенодифрактометрическим методом.

Наиболее часто решаемая задача, решаемая рентгеноструктурным анализом, является определение фазового состава материала. Данный анализ возможен в связи с тем, что каждое кристаллическое соединение обладает уникальной атомной структурой, которая обеспечивает соответствующий дифракционный рисунок. При этом каждый рисунок отличается различным количеством и расположением интенсивностей дифракционных линий на рентгенограмме. Благодаря этим свойствам анализ рентгеновской дифрактограммы дает возможность оценки состояния и природы исследуемого материала. В качестве параметра оценки идентификации фазы применяется межплоскостное расстояние. Их значение рассчитываются по уравнению Вульфа-Брэггов:

$$2d_{hkl} \times \sin \Theta = n\lambda$$

где d_{hkl} – межплоскостное расстояние для плоскости с индексами HKL; Θ – угол отражения, град; n – порядок отражения, целое число; λ – длина волны рентгеновского излучения, нм [67];

Уравнение Вульфа–Брэггов описывает, что рентгеновские лучи с длиной волны λ могут зеркально отражаться от атомных плоскостей с межплоскостным расстоянием d_{hkl} лишь при выполнении определенных условий для угла отражения (или падения) по отношению к атомным плоскостям рассматриваемого семейства.

Таким образом, для анализа фазового состава исследуемой пробы становится возможным избежать необходимости детального определения кристаллической структуры. Это связано с тем, что дифрактограммы, полученные методом рентгеновской дифракции на порошковых образцах, позволяют достаточно точно рассчитать параметры межплоскостного расстояния. Сравнение полученных значений с табличными данными о межплоскостном расстоянии для различных фаз обеспечивает высокую точность идентификации и фазового анализа. Такой подход значительно упрощает процесс исследования материалов и способствует более быстрой интерпретации данных, что особенно важно в области материаловедения

и химии. Совпадения табличных и опытных данных d/n с достаточной точностью позволяют идентифицировать фазу, находящуюся в исследуемом образце.

Рентгеноструктурный анализ проводился на рентгеновском дифрактометре «Bruker D8 Advance» (модель 2016 г., серийный номер 210247). Анализ дифрактограмм и расшифровка фазового состава осуществлялись с использованием программного обеспечения Diffrac.EVA (версии 4.2.1), применяющего лицензионную базу данных Powder Diffraction File-2 (The International Center for Diffraction Data).

Дифракционные исследования выполнялись с использованием рентгеновского излучения медного анода с длиной волны $\lambda=1.54060 \text{ \AA}$. Условия работы дифрактометра включали напряжение на трубке 40 кВ и ток накала 25 мА. Время экспозиции составляло 0,7 с при шаге сканирования $0,02^\circ$. Фокусировка на исследуемом участке и выравнивание поверхности образца в центре фокусирующей окружности осуществлялись с помощью системы лазерного наведения.

Исследование образцов выполнялось на отражение, а интенсивность дифракционной картины регистрировалась с помощью позиционно-чувствительного детектора SSD160 линейного типа, имеющего 160 каналов. Для максимального устранения текстурных эффектов образец вращался со скоростью 30 об/мин во время эксперимента.

Для выполнения полуколичественного фазового анализа использовался метод корундовых чисел (RIR), при этом в качестве внешнего стандарта сравнения применялся синтетический корунд ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$). Данный подход обеспечил высокую точность и достоверность полученных результатов фазового состава исследуемого материала. При наличии в картотеке PDF-2 корундовых чисел для компонентов смеси можно полуколичественно оценить их концентрацию с точностью 1-2 масс. %. Производилась оценка цементного вяжущего (рис. 3.17), цементного камня без модификатора (рис. 3.18) и цементного камня с различным содержанием УНТ (рис. 3.19, 3.20, 3.21).

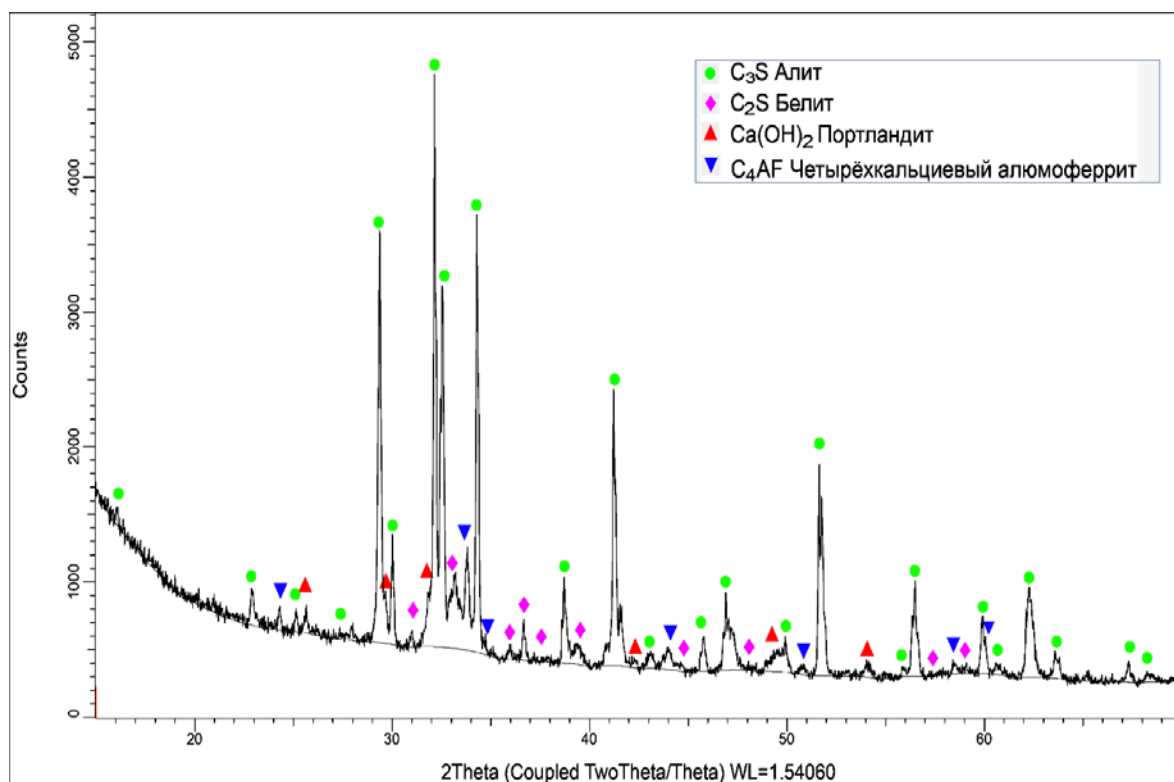


Рисунок 3.17 – Дифрактограмма исходного цементного вяжущего

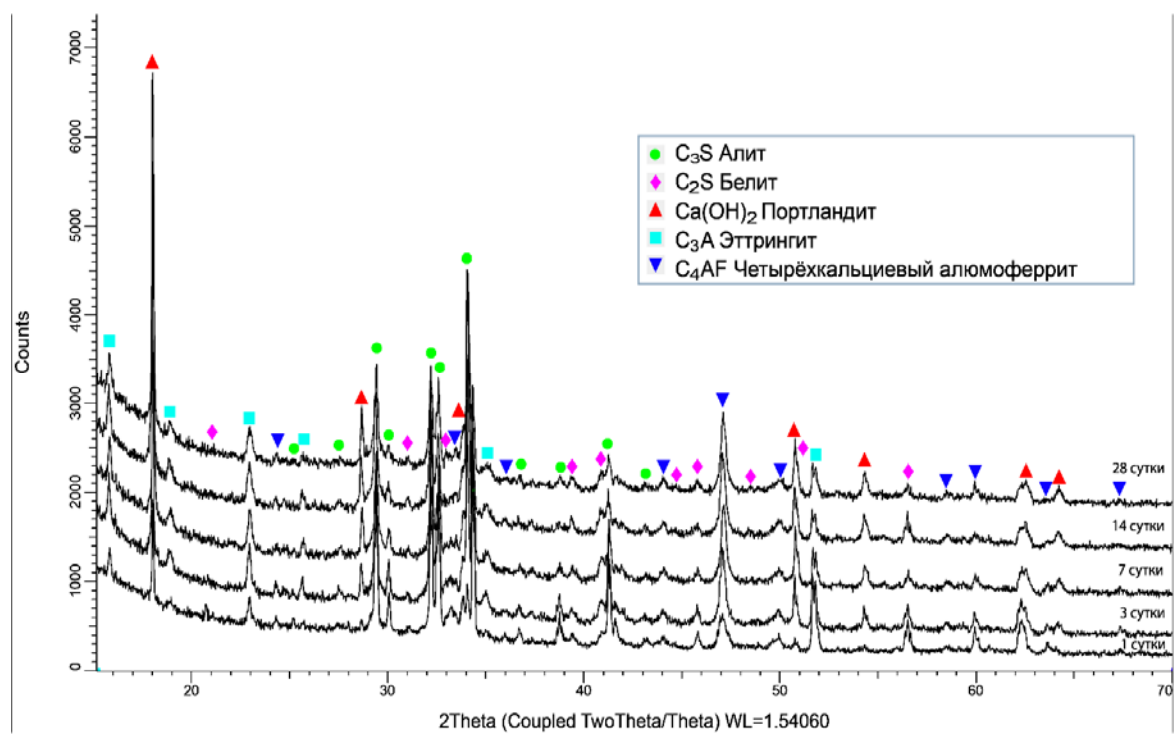


Рисунок 3.18 – Дифрактограмма цементного камня без наномодификатора

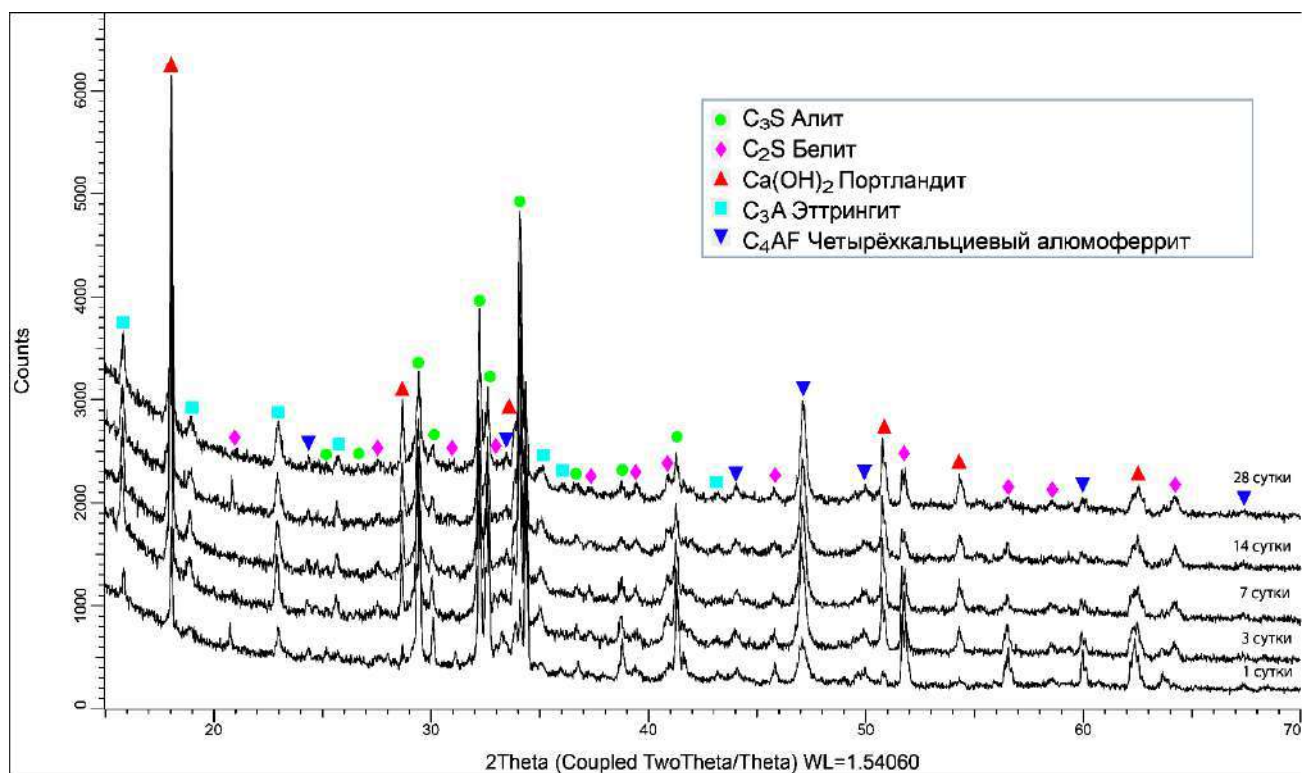


Рисунок 3.19 – Дифрактограмма цементного камня с содержанием УНТ 0,001%

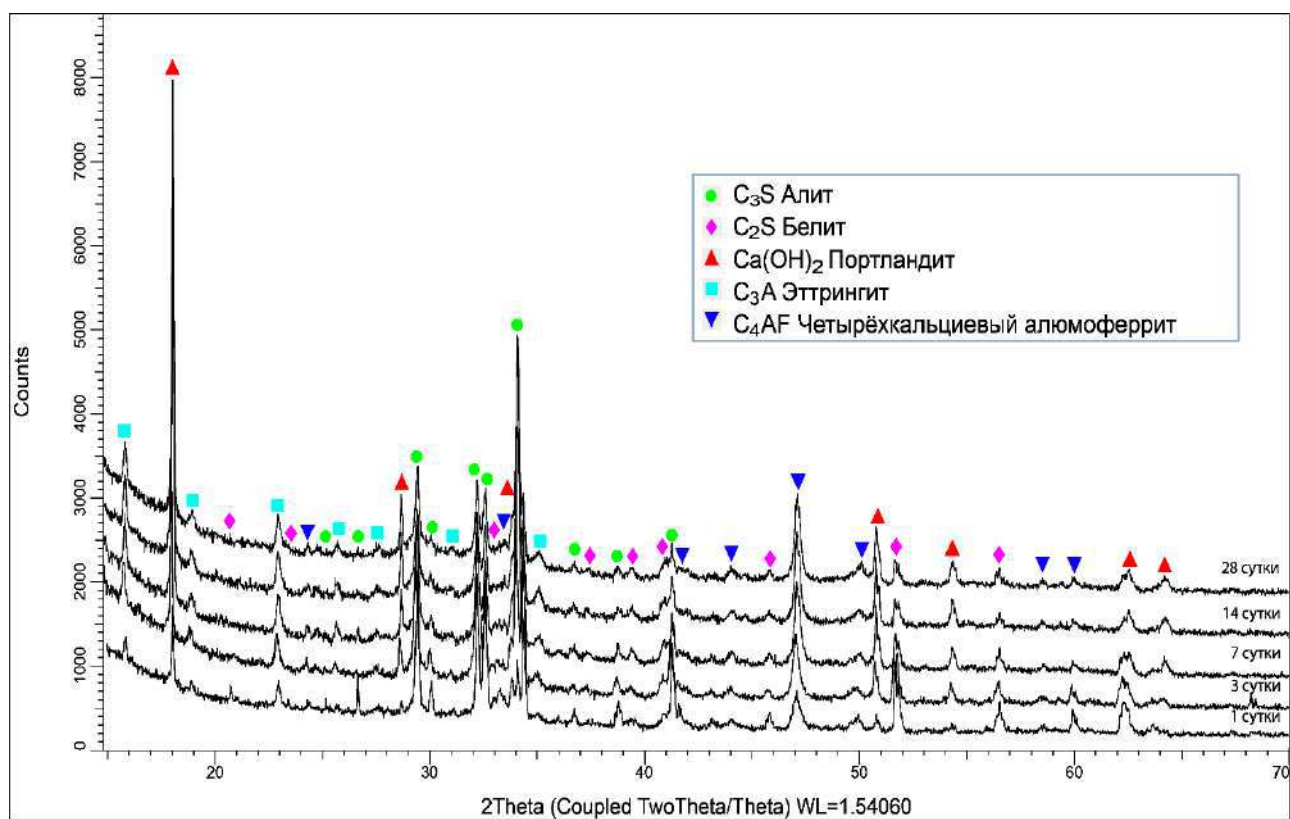


Рисунок 3.20 – Дифрактограмма цементного камня с содержанием УНТ 0,005%

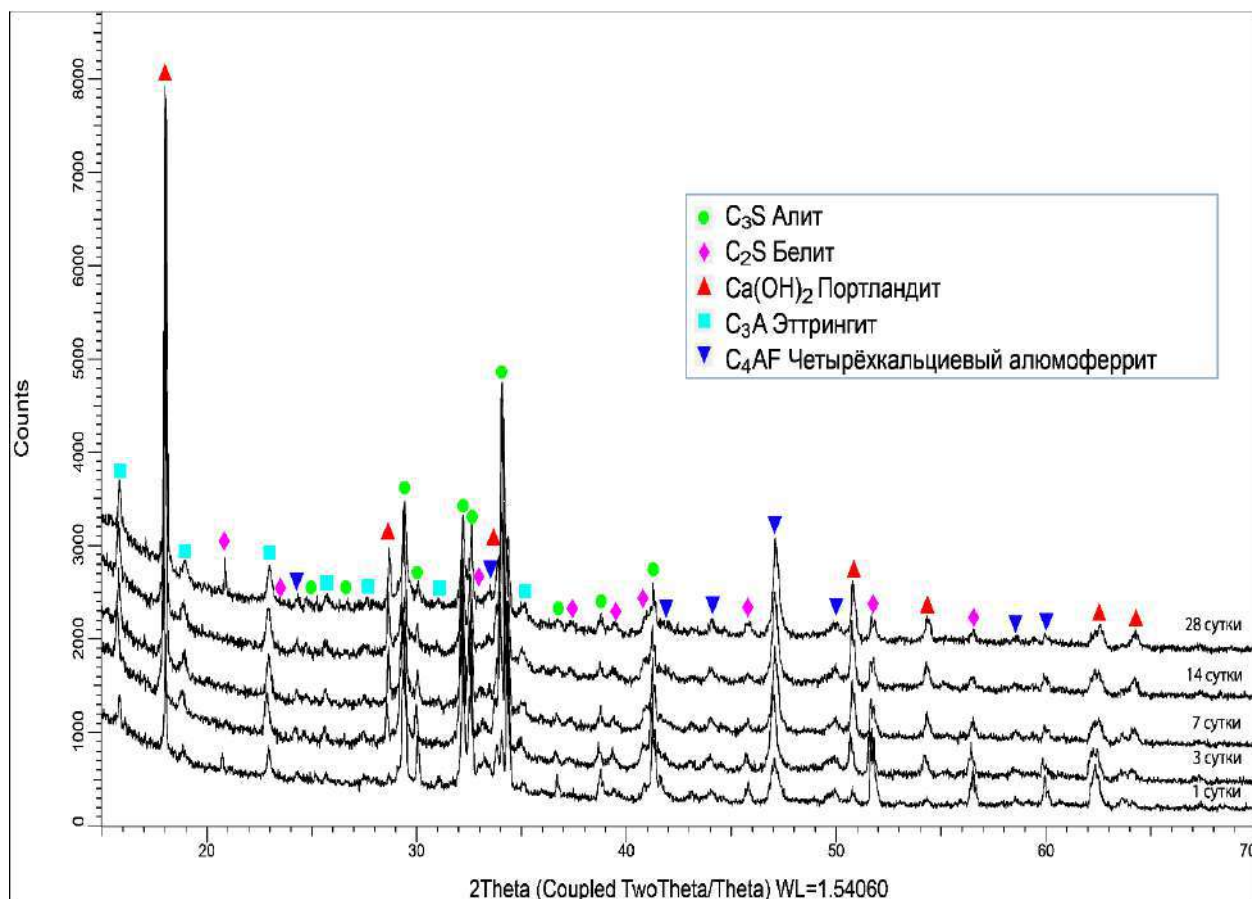


Рисунок 3.21 – Дифрактограмма цементного камня с содержанием УНТ 0,01%

Анализ дифрактограммы (рис. 3.17) цементного вяжущего свидетельствует о том, что основными фазами в этом образце являются трехкальцевый силикат (алит) $\text{Ca}_2(\text{SiO}_4)$ – Natrurite в моноклинной модификации (карточка PDF 01-070-8632) и двухкальцевый силикат (белит) Ca_2SiO_4 – Larnite в моноклинной модификации (карточка PDF 01-070-0388). Также в образце присутствуют алюмоферрит кальция $\text{CaAl}_{0,5}\text{Fe}_{0,5}\text{O}_{2,5}$ – Brownmillerite в орторомбической модификации (карточка PDF 01-072-8039) и полуводный гипс $\text{CaSO}_4 \times 0,5\text{H}_2\text{O}$ – Bassanite в моноклинной модификации (карточка PDF 01-074-2787). Согласно результатам количественного РФА содержание алито-белитовой фазы в цементном вяжущем более 80 %. Алюмоферрит присутствует в количестве 7%, а полуводный гипс ~10%.

На рис. 3.18-3.21 представлены дифрактограммы образцов цементного камня на различных сроках твердения. Анализ дифрактограмм позволяет сделать вывод о

том, что уже спустя первые сутки твердения происходит качественное изменение состава образца, подтверждающее протекание процесса гидратации цемента. Так, на дифрактограммах появляются рефлексы, соответствующие гидратированным соединениям кальция – портландиту Ca(OH)_2 и эттрингиту $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot (\text{H}_2\text{O})_{26}$. (оба в гексагональной модификации, карточки PDF 00-0444-1481 и 01-075-7554 соответственно). При этом исчезают рефлексы, относящиеся к полуводному гипсу $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$. С ростом времени твердения качественных изменений в составе цементного камня не наблюдается. Происходит количественное изменение соотношения фаз (табл. 3.10): уменьшается количество алито-белитовой фазы с одновременным увеличением содержания портландита, эттрингита и алюмоферрита кальция. В абсолютном выражении наибольший рост демонстрирует фаза портландита. Введение добавок интенсифицирует указанные изменения в количественном составе цементного камня (таблицы 3.10-3.14), что подтверждает его более ускоренную гидратацию.

Таблица 3.10 – Содержание C_3S (Алита) в исследуемых образцах

Образец	УНТ	1 сут	3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
1	-	73,2	54,9	45,7	46,4	40,2
2	0,001	66,8	49,5	47	39,7	31,3
3	0,005	68,1	58,1	43,8	33,2	29,5
4	0,01	66,2	52,8	43,6	36,4	30,6

Таблица 3.11 – Содержание C_2S (Белита) в исследуемых образцах

Образец	УНТ	1 сут	3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
1	-	12,5	16,1	15,5	11	14,5
2	0,001	20,1	17	9,9	12,2	11,1
3	0,005	15,7	9,6	11,9	11,9	12,5
4	0,01	20,8	20,2	9	7,7	13,9

Таблица 3.12 – Содержание C_2A (Эттрингита) в исследуемых образцах

Образец	УНТ	1 сут	3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
1	-	5,2	7,5	15,5	11	14,5
2	0,001	4,2	8,2	9,9	12,2	11,1
3	0,005	3,8	6,9	11,9	11,9	12,5
4	0,01	3,5	3,5	9	7,7	13,9

Таблица 3.13 – Содержание C_4AF (Четырехкальциевого алюмоферрита) в исследуемых образцах

Образец	УНТ	1 сут	3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
1	-	4,8	6.0	6.3	8.4	9.6
2	0,001	4,2	7.4	7.5	7.1	7.8
3	0,005	6.2	8.4	8.5	8.5	8.1
4	0,01	5.3	7.1	7.4	8.0	7.8

Таблица 3.14 – Содержание $Ca(OH)_2$ (Портландита) в исследуемых образцах

Образец	УНТ	1 сут	3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
1	-	4.2	15.5	20.0	21.2	22.7
2	0,001	3.8	17.9	25.0	24.8	27.3
3	0,005	6.2	17.0	26.3	30.8	27.3
4	0,01	4.2	13.3	21.9	25.9	24.6

Степень гидратации рассчитывается по формуле [1]:

$$C_{Г(C_3S)} = \left(1 - \frac{I_{\text{мод}}}{I_0}\right) \cdot 100, \%$$

где $I_{\text{мод}}$ – интенсивность дифракционного максимума при $d = 2.75 \text{ \AA}$ фазы $3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S) образцов, модифицированных добавками в разные сроки твердения; I_0 – интенсивность дифракционного максимума при $d = 2.75 \text{ \AA}$ фазы $3CaO \cdot SiO_2$ (C_3S) исходного цемента.

Результаты расчета представлены на рисунке 3.22 и в таблице 3.15. Анализ полученных данных позволяет сделать вывод о том, что введение УНТ способствует ускорению процесса гидратации вяжущего. Причем наиболее выражено в образце с 0,005 % по массе цемента. Так, если в образце без добавок степень гидратации после 28 суток твердения составляет 62 %, то в образце с 0,005% УНТ по массе – 70%.

Таблица 3.15 – Влияние наномодификатора на степень гидратации цемента

№	Добавка УНТ, % по массе цемента	Степень гидратации, %				
		1 сут.	3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.
1	-	32	39	49	51	52
2	0,001	38	46	60	67	68
3	0,005	42	52	63	68	70
4	0,01	40	50	59	67	67

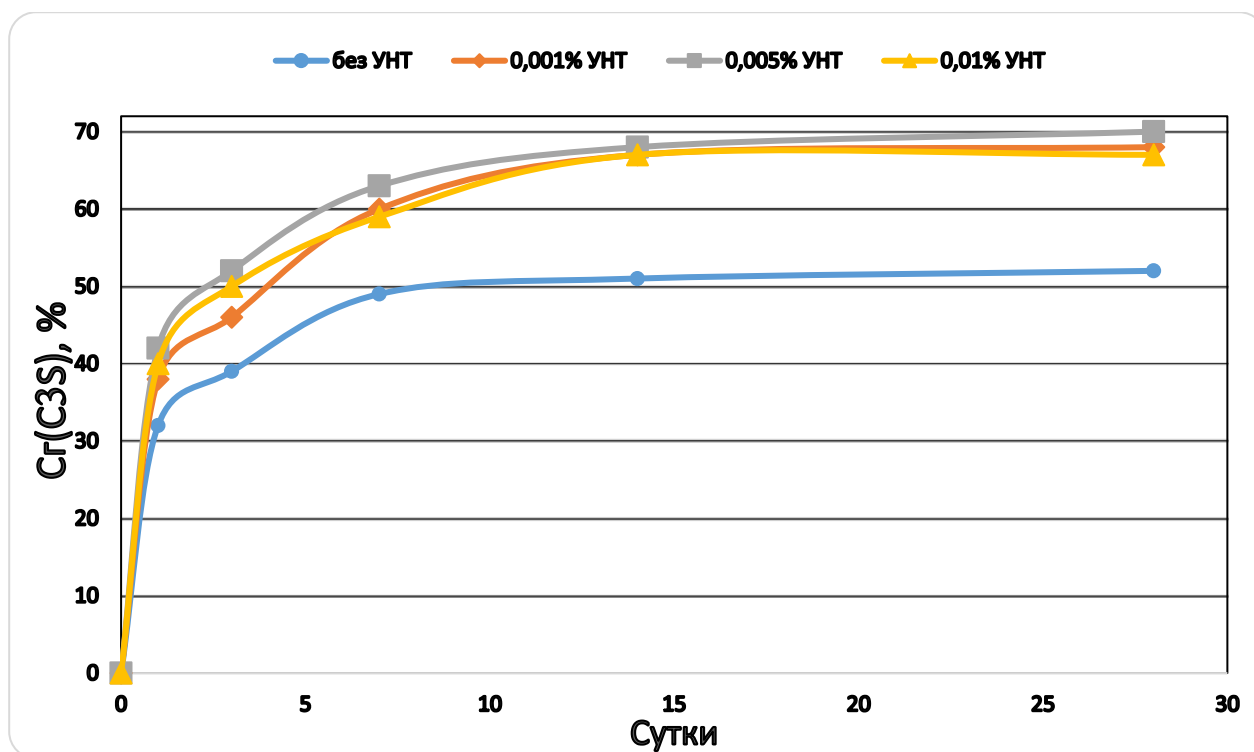


Рисунок 3.22 – Степень гидратации алита

В ходе исследования с использованием рентгеновской дифрактометрии были получены данные, демонстрирующие изменение степени гидратации цемента при введении углеродных нанотрубок.

Введение добавки способствует увеличению прочности бетона. Согласно полученным данным, в образцах с включением наномодификатора наблюдается

увеличение степени гидратации начиная с 1 суток твердения, по сравнению с цементным камнем без наномодификатора. Увеличение степени гидратации алитовой фазы для всех образцов составило более 20%, при этом максимальное увеличение в 25% имел состав с содержанием 0,005% УНТ по массе цемента. Также в ходе анализа фаз материала, наблюдается общая тенденция по увеличению количества портландита по сравнению с контрольным образцом. Все указанные количественные изменения в фазовом составе являются причиной уплотнения компоновки частиц в зонах наномодифицирования бетона, полученных на снимках с помощью сканирующей электронной микроскопии (рис. 3.8), а также причиной повышения прочностных характеристик материала, полученных при введении нанотрубок в состав бетона (табл. 3.3-3.5). При этом наблюдаемое повышение прочности на ранних сроках твердения у наномодифицированных бетонов также можно объяснить повышением степени гидратации и увеличением интенсивности образования минералов цементного клинкера на ранних сроках твердения (рис. 3.4, 3.5).

Выводы по главе 3

1. В результате проведенных исследований было установлено, что пластификаторы на основе поликарбоксилатов, такие как «Полипласт СП-3», «Реламикс 2Т», «СП-4» и «Полипласт СП Суб», оказывают наилучший пластифицирующий эффект на мелкозернистые бетонные смеси по сравнению с другими добавками пластификаторами. Применение этих пластификаторов позволило снизить количество воды затворения на 25%, и увеличить прочностные характеристики материала. Среди рассмотренных отечественных пластификаторов наилучший пластифицирующий эффект и оптимальное соотношение подвижности и прочности показала добавка «Полипласт СП-3». Исходя из чего было принято решение использовать данную добавку для дальнейших исследований по разработке состава наномодифицированного фибробетона.

2. Определено, что комплексное введение углеродных нанотрубок (УНТ) марки «Таунит-М» и суперпластификатора «Полипласт СП-3» в состав мелкозернистого бетона приводит к значительному повышению его прочностных характеристик как при сжатии, так и при изгибе. Применение пластификатора позволило сократить количество требуемой воды затворения, а также способствовало более равномерному распределению добавки в объеме смеси. Максимальное увеличение прочности при сжатии составило – 22,7% и 20% в сравнении с составом без применения УНТ.

Результаты полученных данных свидетельствуют о том, что ультразвуковое диспергирование способствует равномерному распределению малой концентрации высокодисперсной наноуглеродной добавки как в воде затворения, так и по всему объёму смеси. Все это подтверждает эффективность совместного применения наномодификатора и суперпластифицирующей добавки для повышения прочностных характеристик материала.

3. Проведен сравнительный анализ двух технологий введения углеродных нанотрубок в состав бетонной смеси.

При использовании ультразвуковой диспергации с частотой выше 22 кГц было зафиксировано максимальное увеличение прочности — на 30% при сжатии и на 17% при изгибе. Технология с применением линейно-индукционного вращателя продемонстрировала более высокую эффективность: максимальное увеличение прочности составило — 35% при сжатии и 29% при изгибе. Также было отмечено, что интенсивность набора прочности мелкозернистого бетона во времени выше при использовании линейно-индукционного вращателя. Это может быть объяснено комплексным воздействием технологии вращающегося слоя, которая позволяет равномерно распределить добавку по всему объёму сухой цементно-песчаной смеси и обеспечивает эффект активации цементного вяжущего путём механического помола мелющими ферромагнитными телами.

Таким образом, применение линейно-индукционного вращателя для введения наномодификатора является более эффективным способом для повышения прочностных характеристик мелкозернистого бетона.

4. Исследование структуры бетона с помощью сканирующей электронной микроскопии позволило установить, что введение углеродных нанотрубок в состав бетона оказывает положительное влияние на процессы структурообразования цементной матрицы.

На снимках с увеличением наноразмерного порядка видно, что УНТ выступают в роли дополнительных центров кристаллизации основных минералов цементного камня, что приводит к повышению плотности структуры бетона и улучшению его прочностных характеристик. Увеличение количества нанодобавки от 0,001 до 0,01% способствует более широкому распространению наноразмерных трубок в матрице бетона, снижению его пористости и образованию большего количества гидросиликатов. Стабильный диаметр УНТ по всей длине и их полая структура создают благоприятные условия для роста новообразований, что создает единую матрицу цементного камня. Таким образом, углеродные нанотрубки могут применяться как модифицирующие добавки для получения бетона с заданными эксплуатационными характеристиками.

5. В результате проведённого исследования с помощью метода фотоколориметрии было доказано, что ультразвуковая активация воды затворения с введением углеродных нанотрубок «Таунит-М» и пластификатора СП-3 способствует более полному распределению УНТ в воде и повышению устойчивости суспензии. Анализ показал, что использование ультразвукового диспергатора с частотой 25 кГц (UCD-950) приводит к более эффективному распределению наноразмерных трубок по сравнению с частотой 20 кГц (УЗГ13-0,1/22). Это подтверждается более высокой интенсивностью проходящего света сразу после активации в случае применения ультразвука с меньшей частотой.

Установлено, что время устойчивости суспензии увеличивается как при использовании ультразвука больше частоты и при использовании попеременной

паузы и активации, так и при добавлении пластификатора. Однако последующее отстаивание приводит к постепенному увеличению интенсивности, это свидетельствует, что оптимальное время использования активированной воды затворения с помощью обработки ультразвуком с частотой 25 кГц составляет 220 минут. Исследование образцов активированной воды после суточного отстаивания показало, что повторная диспергация активированной суспензии обеспечивает практически идентичный эффект. Это подтверждает возможность применения активированной воды затворения после повторной диспергации.

6. Рентгеноструктурный анализ показал, что основными фазами в образце цементного вяжущего являются трёхкальцевый силикат (алит), двухкальцевый силикат (белит), алюмоферрит кальция и полуводный гипс. Согласно результатам количественного РФА, содержание алито-белитовой фазы в вяжущем составляет более 80%, алюмоферрит присутствует в количестве 7%, а полуводный гипс — около 10%.

Анализ дифрактограмм образцов цементного камня на различных сроках твердения показал, что уже спустя первые сутки происходит качественное изменение состава образца, подтверждающее протекание процесса гидратации цемента. С ростом времени твердения происходит количественное изменение соотношения фаз: уменьшается количество алито-белитовой фазы, увеличивается содержание портландита, этtringита и алюмоферрита кальция.

Введение углеродных нанотрубок (УНТ) способствует ускорению процесса гидратации вяжущего. Наиболее выраженное ускорение наблюдается в образце с 0,005% УНТ по массе цемента. Так увеличение степени гидратации алитовой фазы для всех образцов составило более 20%, максимальное увеличение — 25% — имел состав с содержанием 0,005% УНТ.

Введение УНТ способствует увеличению количества фазы портландита, благодаря чему в материале образуются более плотная компоновки частиц в зонах наномодифицирования. Это является причиной повышения прочностных характеристик материала.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНЫХ СОТАВОВ ФИБРОБЕТОНОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЛЕКСНЫХ НАНОМОДИФИЦИРУЮЩИХ ДОБАВОК

4.1. Способ получения мелкозернистого наномодифицированного бетона

Актуальность данного исследования заключается в разработке бетонных композиций с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Согласно патенту РФ 2355656 (МПК С04В28/02, опубликован 10.05.2007) [51] в состав бетона входят цемент, заполнители и базальтовое волокно, модифицированное полиэфирными многослойными углеродными наноструктурами. При активировании углеродными наноматериалами базальтовое фиброволокно улучшает прочность бетона как при сжатии, так и при изгибе, однако требует дополнительных технологических операций, что увеличивает временные и трудовые затраты.

Другие технологии наномодифицирования бетонов, как указано в патенте РФ 2559269 (МПК С04В28/04, опубликован 11.12.2013) [52], используют зольные нанокремнеземы, которые снижают водопоглощение и повышают прочность, однако процесс механического введения добавки не требует специализированного оборудования. Патент РФ 2545226 (МПК С04В24/00, опубликован 16.10.2013) [54] описывает углеродный наноструктурированный материал «Таунит», используемый совместно с гиперпластификатором и введенный ультразвуковым диспергированием. Также в патенте РФ 2482082 (МПК С04В28/00, опубликован 15.08.2011) [53] представлены мелкозернистые бетонные смеси с низкой пластичностью и высоким содержанием вяжущего. Таким образом, существующие методы требуют дальнейшего исследования для оптимизации составов бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Исходя из имеющихся разработок целью исследований на данном этапе являлась разработка эффективной методики получения мелкозернистой наномодифицированной бетонной смеси, которая обеспечивает равномерное

распределение малого количества наноразмерных компонентов, а также повысит прочностные характеристики бетона, в том числе и на ранних сроках твердения.

Применяемые материалы: цемент марки «Eurocement» М500Д0 производства ООО «Цемрос», песок ООО «Партнер групп» с модулем крупности 1,9. Нанотрубки «Таунит-М», разработанные ООО «НаноТехЦентр», представляют собой квазиодномерные наномасштабные нитевидные образования поликристаллического графита, преимущественно цилиндрической формы с внутренним каналом. Адсорбция частиц добавки «Таунит-М» на поверхности зерен цемента позволяет повысить смачиваемость раствора и снизить его водопотребность, что приводит к ускоренному набору прочности затвердевшего бетона. Пластификатор «Полипласт СП-3» существенно увеличивает подвижность смеси, что дает возможность снизить количество воды затворения на 10-20% и, соответственно, уменьшить водоцементное отношение, что в свою очередь, способствует увеличению прочности на ранних сроках твердения.

В результате проведенных исследований технический результат достигается путем применения технологии линейно-индукционного вращения для приготовления мелкозернистой бетонной смеси. Так, в цементно-песчаную смесь вводится добавка углеродных нанотрубок «Таунит-М» совместно с суперпластификатором «Полипласт СП-3». При этом введение пластификатора в количестве 0,6-1% по массе цемента осуществляется ультразвуковым диспергированием при частоте ультразвука более 20 кГц в течение 5 минут. Цементно-песчаная смесь совместно с наномодификатором в количестве 0,003-0,007% по массе цемента предварительно активируется в аппарате вихревого слоя в течение 2 минут.

Таким образом методика получения бетонной смеси включает в себя введение расчетного количества наномодификатора в цементно-песчаную смесь (Ц:П – 1:3). Полученная смесь подвергается активации, размешиванию и измельчению в камере линейно-индукционного вращателя с ферромагнитными мелющими телами в расчете 6% от массы рабочей смеси в течение 2-х минут.

Параллельно приготавливается раствор воды затворения с суперпластификатором. Далее смесь смешивается с раствором до достижения однородности бетонной смеси. При этом водоцементное отношение устанавливается в пределах 0,34-0,38.

Сущность разработанного способа приготовления заключается в том, что введение наномодификатора происходит с помощью механического перемешивания в линейно-индукционном вращателе. Мелющие тела под действием электромагнитного поля создают вращающий слой, в котором все компоненты бетонной смеси равномерно распределяются по объему, включая малую концентрацию УНТ. Процесс обработки ферромагнитными мелющими телами осуществляется под воздействием переменного электромагнитного поля с индукцией 0,1 Тл и частотой 50 Гц в течение 2 минут. Помимо эффективного размешивания компонентов смеси, используемые ферромагнитные металлические стержни обеспечивают активацию компонентов цементного вяжущего путем его помола. Так введение углеродных нанотрубок в состав добавки способствует значительному повышению прочностных характеристик мелкозернистого бетона, совместно с увеличением удельной поверхности частиц цементного вяжущего.

Для определения механических параметров мелкозернистого бетона, согласно стандартной методике, приготавливались образцы-балочки размером 40x40x160 мм. Твердение образцов происходило в естественных условиях, а определение прочности осуществлялось на 3,7,28 сутки с помощью технологии неразрушающего контроля и на 28 сутки с помощью разрушения образцов на прессах. Данные о проведенных исследованиях представлены в таблице 4.1, где также установлены количественные значения вводимых добавок.

Таблица 4.1 – Составы бетонных смесей

Компоненты	Примеры составов бетонных смесей				
	Контрольный состав	Составы			По схожей технологии [53]
		1	2	3	
Цемент : песок	1 : 3	1 : 3	1 : 3	1 : 3	2 : 3
Вода/Цемент, массовое соотношение	0,36	0,38	0,36	0,34	0,51
УНТ «Таунит-М», % от массы цемента	-	0,0003	0,0005	0,0007	-
Суперпластификатор «Полипласт СП-3», % от массы цемента	0,8	0,6	0,8	1	-
Комплексная наномодифицирующая добавка с введением УНТ, % от массы цемента	-	-	-	-	0,0006

Результаты проведенных исследований по определению влияния комплексной наномодифицирующей добавки на прочность мелкозернистого бетона с использованием технологии линейно-индукционного вращения представлены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты проведенных исследований влияния введения УНТ в состав мелкозернистого бетона

Составы	Предел прочности при сжатии, МПа		
	3 сут.	7 сут.	28 сут.
Контрольный состав	22,6	35,8	43,8
1	27,4	48,8	55,8
2	28,4	50,7	57,3
3	29	49,8	57,0
По схожей технологии [53]	13	29	40

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что технология введения наномодификатора в состав мелкозернистого бетона с помощью линейно-индукционного вращателя приводит к значительному увеличению прочности при сжатии. Это обусловлено равномерным распределением наноразмерных

модифицирующих компонентов добавки по всему объему смеси. При этом наблюдается значительное увеличение прочности как на 3, 7, так и на 28 сутки твердения бетона в сравнении с технологией введения наномодификатора ультразвуковым диспергированием. Увеличение прочности по сравнению с контрольными образцами составила 23%.

Таким образом, рассмотренный способ введения углеродных наномодификаторов является перспективным направлением для качественного улучшения характеристик мелкозернистого бетона, путем обеспечения высокой прочности и водостойкости, что имеет важное значение для более эффективного использования материалов в современном строительстве.

4.2. Влияние совместного применения добавок наномодификаторов и фиброволокна на свойства фибробетона

В современном строительном материаловедении наблюдается тенденция к активному применению фибробетонов, что связано с повышенными требованиями к их физико-механическим и эксплуатационным характеристикам [33,99,100]. Фибробетон, как перспективный материал, удовлетворяет современным нормативам по прочности, трещиностойкости и долговечности. В последние годы наблюдается тенденция к уменьшению толщины строительных конструкций, что обусловлено разработкой бетонов с повышенными прочностными показателями и сложностью инженерных решений [41].

Фибробетон обладает высокой прочностью и сниженной плотностью, что уменьшает нагрузку на опалубку и трудозатраты на армирование. Однако высокая стоимость фиброволокна может ограничивать его применение. Оптимизация составов фибробетонов с использованием модифицирующих добавок может повысить их эффективность [58,68,75]. Введение наномодификаторов, которые усиливают структуру бетона на микроуровне [5], в комбинации с макроарматурой

в виде фибры ожидает синергетический эффект, улучшая прочностные характеристики бетона [13].

Нанодобавки, такие как углеродные частицы, также эффективны для повышения прочности бетона, стимулируя кристаллизацию цементного камня. Это рассматривается как процесс дисперсного самоармирования. В рамках исследования была проведена серия лабораторных исследований для изучения влияния стальной и базальтовой фибры совместно с наномодификатором на физико-механические характеристики бетона, используя ультразвуковую диспергацию и линейно-индукционные вращатели.

4.2.1. Разработка состава сталефибробетона

В рамках исследования применялись следующие материалы: цемент марки «Eurocement» М500Д0 производства ООО «Цемрос», песок ООО «Партнер групп» с модулем крупности 1,9, щебень фракции 5-10, 5-20 мм ООО «Калининский щебеночный завод», углеродные нанотрубки марки "Таунит-М", обладающие внутренним диаметром 5 нм и внешним диаметром 15 нм, длиной не более 2 мкм, суперпластификатор «Полипласт СП-3», а также стальная фибра "Миксарм" с диаметром до 1 мм и длиной до 54 мм с конусообразными анкерами и углом раскрытия 16°. Стоит отметить, что данные анкера обеспечивают фибре высокий показатель коэффициента удержания в бетоне, который составляет 95%, что значительно больше, чем у аналогов (до 70%) [12].

Наиболее рационально подобранная смесь для получения сталефибробетона имела следующий вид: Ц:П:Щ – 1:2:3,85, при водоцементном отношении В/Ц равном 0,45. Исходя из ранее проведенных исследований по влиянию наномодификатора на прочность бетона, введение углеродных нанотрубок осуществлялось в количестве 0,005 и 0,01% по массе цемента, в то время как содержание стальной фибры не превышало 2% по массе всей смеси. Исходя из

условий пластичности и удобоукладываемости смеси, количество пластификатора составило 0,5% по массе цемента.

Учитывая, что углеродные нанотрубки – это нерастворимая добавка, введение производилось двумя способами введения.

Для технологии с применением линейно-индукционных вращателей способ приготовления бетонной смеси имел следующий вид: добавка н вводится в камеру ЛИВ совместно с цементом (цементным вяжущим), песчаным наполнителем и ферромагнитными мелющими телами (металлические стержни), в расчетном количестве, которые благодаря магнитному полю приводятся в движение, таким образом, происходит активация смеси, ее измельчение и равномерное перемешивание компонентов.

Обработка ферромагнитными мелющими телами производится под действием переменного электромагнитного поля индукцией 0,1 Тл и частотой – 50 Гц в течение 2 минут.

По окончании обработки, активированная сухая смесь смешивается с крупным заполнителем и водой затворения совместно с введенным суперпластификатором. Введение добавки стальной фибры осуществляется постепенно по мере размешивания всех компонентов, до получения однородной смеси, после чего происходит формовка и уплотнение образцов.

Были изготовлены образцы-балочки для бетона с включением щебня размером 10x10x400 см, твердение которых происходила в стандартных условиях, при влажности 80-100% и температуре 20°C. Для определения прочностных характеристик бетона в возрасте 3, 7, 14 и 28 суток использовался прибор для неразрушающего контроля "Пульсар 1.2". По завершении периодов твердения образцы испытывались на прессах для определения прочности на изгиб.

Для изучения комплексного применения углеродных нанодобавок и стальной фибры были приготовлены образцы с различными составами, результаты полученных механических характеристик которых представлены в таблицах 4.3., 4.4. Так как в предшествующих работах уже определялось оптимальное количество

наноуглеродной добавки, содержание УНТ составило 0,005% по массе цемента (таблица 4.3.) и 0,01% по массе цемента (таблица 4.4). А введение стальной фибры производилось от 0,25 до 2% по массе готовой смеси.

Таблица 4.3 – Полученные характеристики сталефибробетона с введением УНТ с помощью ЛИВ в количестве 0,005% по массе цемента

№	Стальная фибра «Миксарм», % по массе бетонной смеси	Унт, % по массе цем.	Предел прочности при изгибе (28сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки
1	-	-	6,3	26,7	42,5	47,6	49,1
2	-	0,005	8,9	31,1	52,5	60,7	65,1
3	0,25	0,005	11,1	32,1	52,7	61,9	66,9
4	0,5	0,005	12,7	31,9	53,1	62,6	66,2
5	0,75	0,005	13,9	33,2	55,1	62,9	67,5
6	1,0	0,005	14,9	32,9	54,9	64,0	67,3
7	1,5	0,005	14,9	33,7	56,1	63,9	68,1
8	2,0	0,005	14,5	34,8	55,9	63,6	67,9

Таблица 4.4 – Полученные характеристики сталефибробетона с введением УНТ с помощью ЛИВ в количестве 0,01% по массе цемента

№	Стальная фибра «Миксарм», % по массе бетонной смеси	Унт, % по массе цем.	Предел прочности при изгибе (28сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки
1	-	-	5,7	26,3	42,1	47,6	48,7
2	-	0,01	10,2	31,8	53,5	62,0	66,7
3	0,25	0,01	11,4	33,1	53,5	63,1	67,8
4	0,5	0,01	13,2	33,9	55,1	62,4	67,4
5	0,75	0,01	13,8	33,7	54,8	63,2	67,1
6	1,0	0,01	15,1	34,9	58,1	64,7	67,7
7	1,5	0,01	15,6	34,2	59,2	63,1	68,7
8	2,0	0,01	15,9	35,1	59,8	64,6	68,2

Анализ полученных данных свидетельствует о положительном воздействии армирования стальной фибры на прочностные характеристики наномодифицированного бетона.

Прочностные показатели повышались с увеличением содержания стальной фибры, однако следует отметить, что дальнейшее увеличение концентрации стальной фибры выше 2% является экономически нецелесообразным. Это связано не только со стоимостью добавки, но и с тем, что высокая концентрация дисперсно-армирующей добавки приводит к образованию «ежей», которые отрицательно влияют на прочностные показатели материала.

Повышение прочности наблюдается при увеличении содержания наномодификатора и стальной фибры. Так прочность на растяжение при изгибе увеличилось в 2,3 и 2,7 (состав 8) раз для первой и второй серии испытаний соответственно. Прочность при сжатии также была увеличена. Максимальный прирост составил 38 и 41% (состав 8).

Значительное повышение физико-механических характеристик в случае комплексного применения добавок УНТ и стальной фибры можно объяснить синергетическим эффектом совместного дисперсного армирования наномодификатора на микроуровне и стальной фибры на макроуровне.

Для оценки совместного влияния наномодификатора и стальной фибры на рисунке 4.1 представлен график зависимости прочности при изгибе от количества вводимых добавок.

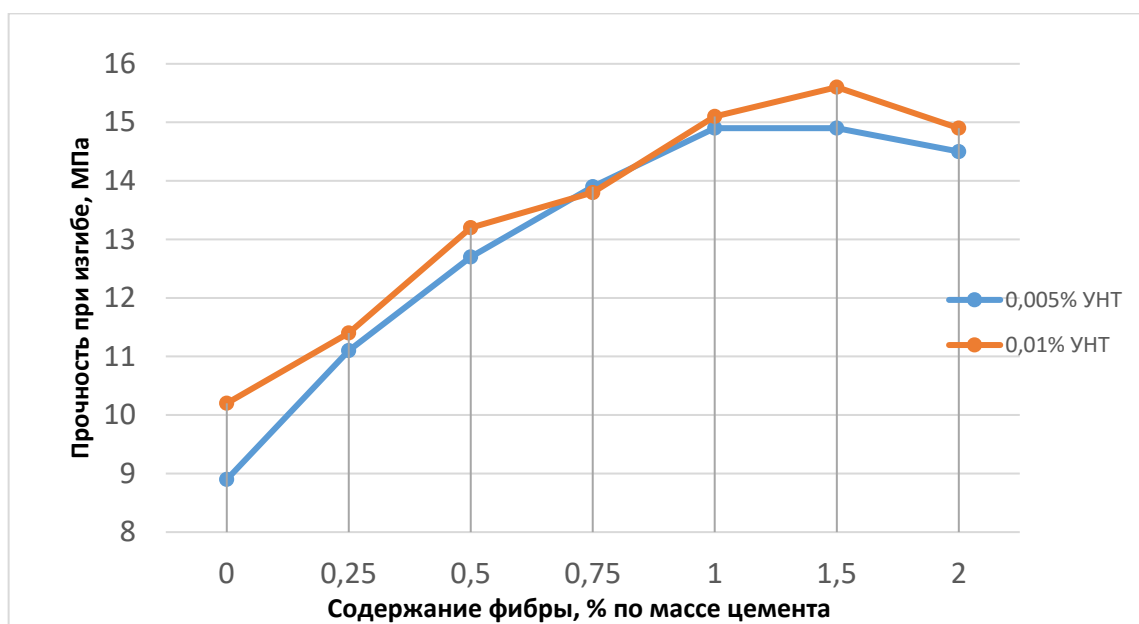


Рисунок 4.1 – Влияние предела прочности при изгибе от количества вводимой стальной фибры (технология ЛИВ)

График свидетельствует о ступенчатом увеличении прочности в зависимости от концентрации стальной фибры независимо от количества наномодификатора. Однако можно наблюдать, что при максимальной концентрации УНТ и стальной фибры в количестве 1,5% и выше приводит к незначительному понижению прочности. Данный эффект можно объяснить увеличением количества агломератов нанодобавки и «ежей» стальной фибры при их чрезмерном количестве. Таким образом, дальнейшее повышение концентрации стальной фибры в бетоне приведет к снижению его прочностных характеристик.

Полученные результаты указывают на целесообразность комплексного применения дисперсно-армирующих добавок и наномодификаторов, что способствует значительному улучшению физико-механических характеристик бетона. При этом требуются дополнительные исследования по определению оптимальных рецептурных решений с конкретными модифицирующими добавками.

В целях оценки интенсивности набора прочности наномодифицированного фибробетона во времени был построен график, изображенный на рисунке 4.2.

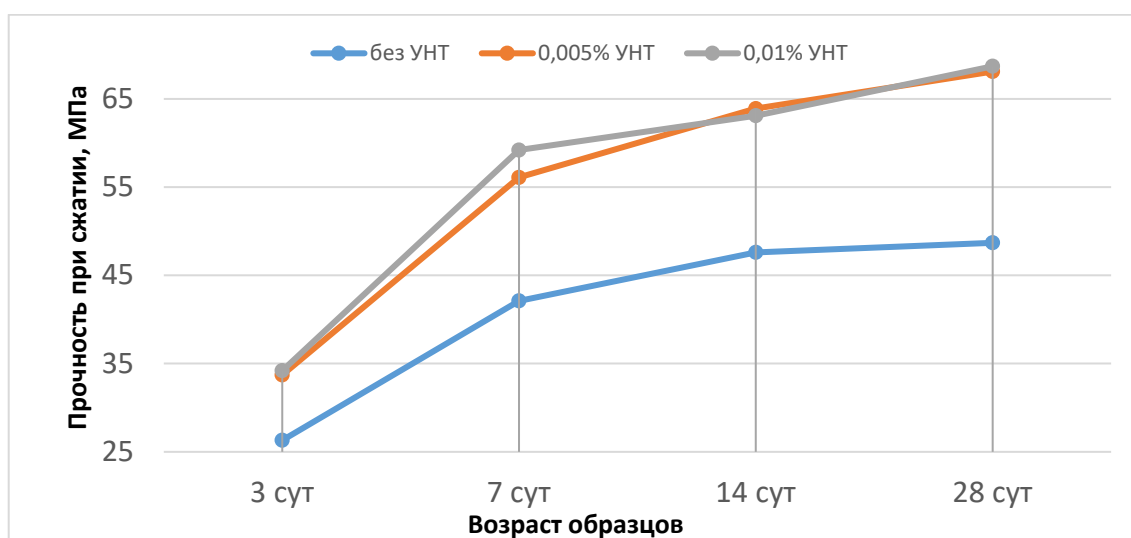


Рисунок 4.2 – График интенсивности набора прочности наномодифицированного сталефибробетона (технология ЛИВ)

Исходя из данных, представленных на графике, можно сделать вывод, что контрольные образцы без включения углеродных наномодификаторов имеют значительно более низкую интенсивность набора прочности бетона во времени. Увеличение данной интенсивности наблюдается в образцах с применением наномодификатора уже на 3 и 7 сутки. Так, увеличение прочности от комплексного введения УНТ и стальной фибры составило 33% уже на 7 сутки. Интенсивность набора прочности возрастает к 28-суточному возрасту до 42% в сравнении с контрольными образцами. Данный эффект свидетельствует о положительном влиянии наномодификатора на структурные изменения цементной матрицы за счет увеличения гидратации минералов цементного камня.

Второй способ приготовления заключается в использовании ультразвуковой диспергации. Нерастворимая добавка углеродных нанотрубок совместно с суперпластификатором вводилась в воду затворения для получения активированной суспензии. Применялся ультразвуковой диспергатор «USD-950», генерирующий ультразвук с частотой до 25 кГц. Обработка ультразвуком происходила в течение 5 минут с попеременными остановками каждые 3 секунды на 3 секунды. Таким образом, общее время обработки составляло 10 минут с учетом технологических пауз. Такая технология обеспечивает наилучшее диспергирование за счет дополнительного кавитационного воздействия на наноразмерные агломераты в момент остановки и повторного возобновления ультразвуковой волны. Сухие компоненты, такие как цемент, песок и щебень, смешивались предварительно, а стальная фибра вводилась после введения в сухую смесь активированной воды затворения. По окончании смешивания всех компонентов до однородности бетонной смеси производилась формовка образцов-балочек для бетона.

Были изготовлены бетонные образцы с таким же составом, что и при использовании технологии ЛИВ. Результаты полученных экспериментальных представлены в таблицах 4.5., 4.6.

Таблица 4.5 – Полученные характеристики сталефибробетона с введением УНТ с помощью УЗД в количестве 0,005% по массе цемента

№	Стальная фибра «Миксарм», % по массе бетонной смеси	УНТ, % по массе цем.	Предел прочности при изгибе (28сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки
1	-	-	6,3	26,7	42,5	47,6	49,1
2	-	0,005	8,6	28,2	50,5	59,6	61,1
3	0,25	0,005	9,7	30,4	50,8	59,2	62,0
4	0,5	0,005	10,5	30,3	52,7	61,6	63,3
5	0,75	0,005	11,3	31,1	53,8	60,9	63,9
6	1,0	0,005	11,8	30,5	53,2	59,8	62,9
7	1,5	0,005	13,7	32,0	54,7	61,9	64,1
8	2,0	0,005	14,0	33,5	55,5	61,1	64,9

Таблица 4.6 – Полученные характеристики сталефибробетона с введением УНТ с помощью УЗД в количестве 0,01% по массе цемента

№	Стальная фибра «Миксарм», % по массе бетонной смеси	УНТ, % по массе цем.	Предел прочности при изгибе (28сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки
1	-	-	5,7	26,3	42,1	47,6	48,7
2	-	0,01	9,1	28,9	50,2	58,5	61,7
3	0,25	0,01	9,1	32,3	51,5	59,1	62,6
4	0,5	0,01	11,3	31,6	52,4	59,5	63,3
5	0,75	0,01	11,7	32,2	52,7	62,9	64,8
6	1,0	0,01	12,8	33,2	55,2	61,8	64,5
7	1,5	0,01	12,3	32,9	56,0	60,8	63,2
8	2,0	0,01	14,7	33,8	55,9	62,5	66,2

Для технологии введения наномодификатора с помощью ультразвукового воздействия, как и при изготовлении мелкозернистого бетона также наблюдалось меньшее повышение прочности, чем для технологии вихревого воздействия. Так

прочность на растяжение при изгибе увеличилось в 2,2 и 2,6 (состав 8) раз для первой и второй серии испытаний соответственно. Максимальный прирост прочности при сжатии составил 32 и 35% (состав 8). На рисунке 4.3 представлен график зависимости прочности при изгибе от количества вводимых добавок.

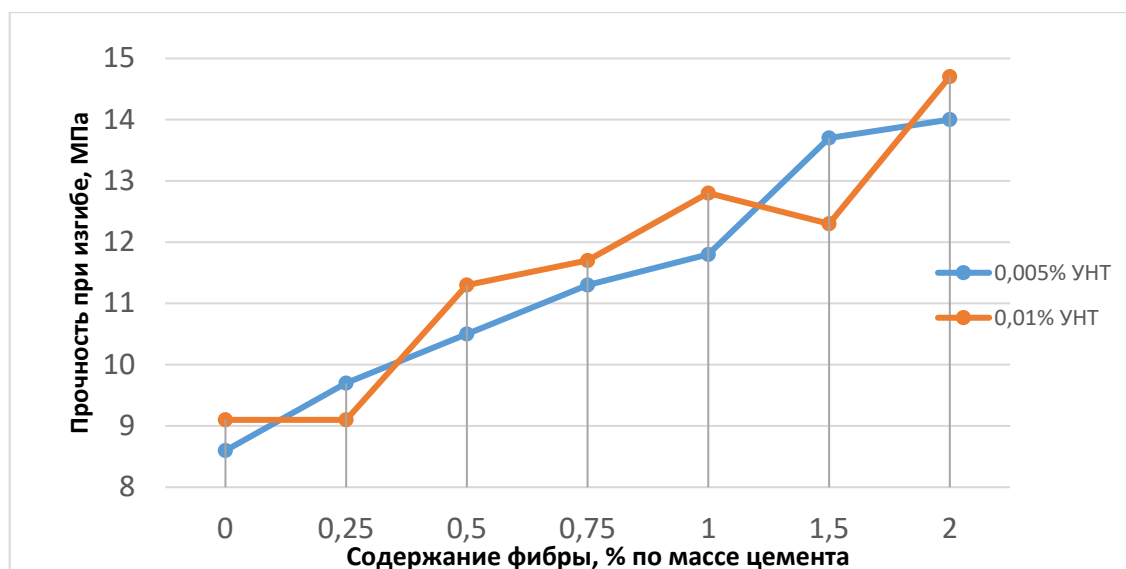


Рисунок 4.3 – Влияние предела прочности при изгибе от количества вводимой стальной фибры (технология УЗД)

Представленный график также отражает зависимость вводимых добавок на прочность материала при изгибе. При этом оптимальное количество вводимой стальной фибры находится в пределах от 1 до 2% по массе смеси. Максимальную прочность имели составы с большим содержанием УНТ, а именно 0,01% по массе цемента. Однако максимальное увеличение прочности при сжатии на изгиб для составов обеих серий было практически равнозначным. Что доказывает большую значимость количества стальной фибры на прочность бетона при изгибе.

В целях оценки интенсивности набора прочности наномодифицированного фибробетона во времени был построен график, изображенный на рисунке 4.4.

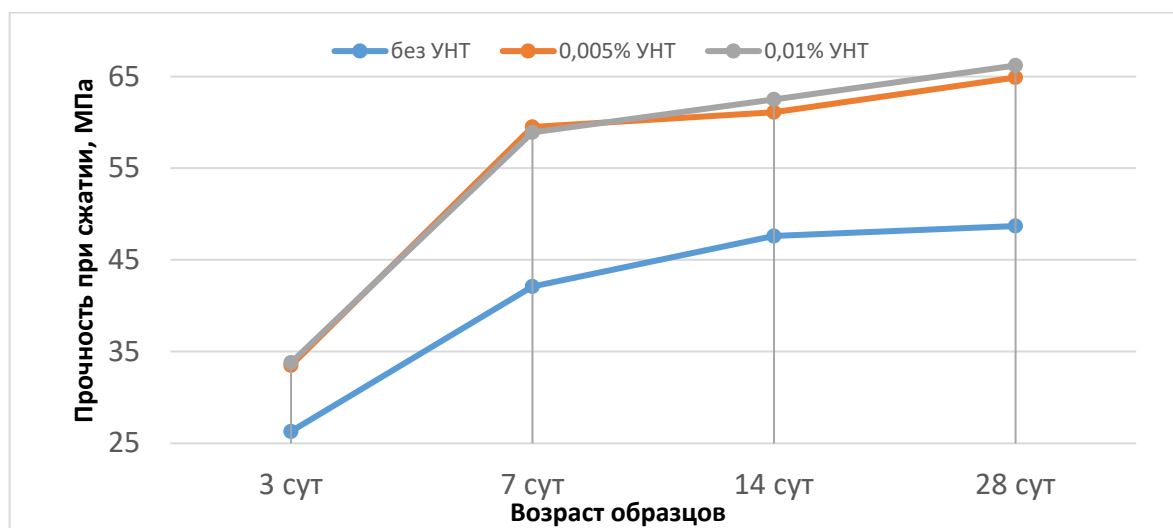


Рисунок 4.4 – График интенсивности набора прочности наномодифицированного сталефибробетона (технология УЗД)

Данные, показанные на графике, свидетельствуют об увеличении интенсивности набора прочности во времени. Так на 7 сутки, повышение прочности при сжатии возросло на 30% для состава 8. Дальнейшее увеличение прочности протекает для всех составов практически равнозначно.

В ходе проведенных исследований экспериментально доказано, что применение нанотрубок в составе сталефибробетона существенно улучшает ее реологические свойства. Это оказывает положительный эффект на физико-механические характеристики бетона за счет более однородного распределения компонентов смеси. Все это является основой для создания высокопрочных и долговечных бетонных изделий, способных воспринимать значительные эксплуатационные нагрузки. Также определено, что введение наномодификатора с помощью линейно-индукционных вращателей позволяет получить наилучшие показатели прочности.

Таким образом, использование углеродных нанотрубок не только улучшает скорость набора прочности в ранние сроки твердения, но и способствует созданию более качественного композитного материала, что важно для достижения современного уровня надежности и долговечности конструкций.

4.2.2 Разработка состава базальтофибробетона

На данном этапе исследования применялись следующие материалы: цемент марки «Eurocement» М500Д0 производства ООО «Цемрос», песок ООО «Партнер групп» с модулем крупности 1,9, углеродные нанотрубки марки «Таунит-М», обладающие внутренним диаметром 5 нм и внешним диаметром 15 нм, длиной не более 2 мкм, суперпластификатор «Полипласт СП-3», а также базальтовая фибра ООО НПО «Вулкан», диаметр волокна 10 мкм и длина 12 мм. Исследовалось влияние совместного применения наномодификатора и базальтового волокна на физико-механические характеристики мелкозернистого бетона. Для испытаний изготавливались образцы-балочки 40х40х160 мм из мелкозернистого бетона с включением цемента и песка Ц:П = 1:3, а также добавками суперпластификатора, углеродными нанотрубками и базальтовой фибры. Водоцементное отношение составило 0,42. Введение наномодификатора также осуществлялось в количестве 0,005 и 0,01% по массе цемента. Содержание базальтовой фибры не превышало 2,5% по массе цемента. Исходя из условий пластичности и удобоукладываемости смеси, количество пластификатора составило 0,5% по массе цемента.

Введение наномодификаторов происходило по аналогичным технологиям, что и для сталефибробетона. Прочностные характеристики материала определялись на 3, 7, 14 и 28 сутки с помощью неразрушающего метода контроля. По завершении периодов твердения образцы испытывались на прессах для определения прочности на изгиб.

Для первой серии исследования влияния наномодификаторов на свойства базальтофибробетона применялась технология линейно-индукционного вращения.

В таблицах 4.7 и 4.8 представлены результаты экспериментальных данных исследования влияния совместного применения базальтовой фибры и наномодифицирующей добавки.

Таблица 4.7 – Полученные характеристики базальтофибробетона с введением УНТ с помощью ЛИВ в количестве 0,005% по массе цемента

№	Базальтовая фибра, % по массе цемента	УНТ, % по массе цем.	Предел прочности при изгибе (28сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки
1	-	-	5,3	21,2	37,9	43,0	45,8
2	-	0,005	7,8	25,1	47,2	53,2	58,3
3	0,5	0,005	9,1	25,8	49,1	55,3	60,5
4	1,0	0,005	11,9	27,5	50,9	58,1	63,1
5	1,5	0,005	11,3	27,2	51,0	59,0	63,2
6	2,0	0,005	12,9	29,9	51,2	58,5	63,7
7	2,5	0,005	12,8	30,1	51,5	59,9	64,1
8	3,0	0,005	12,2	31,2	50,9	58,6	62,9

Таблица 4.8 – Полученные характеристики базальтофибробетона с введением УНТ с помощью ЛИВ в количестве 0,01% по массе цемента

№	Базальтовая фибра, % по массе цемента	УНТ, % по массе цем.	Предел прочности при изгибе (28сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки
1	-	-	6,1	26,2	40,3	46,8	48,2
2	-	0,01	8,9	26,1	44,5	51,2	60,6
3	0,5	0,01	11,2	28,6	52,4	59,1	62,6
4	1,0	0,01	11,6	30,1	51,1	58,2	62,1
5	1,5	0,01	12,3	33,7	53,7	58,5	63,5
6	2,0	0,01	12,1	31,9	52,8	61,1	65,1
7	2,5	0,01	13,5	33,2	54,3	61,9	65,2
8	3,0	0,01	12,4	31,7	52,1	60,7	63,1

Составы с комплексным введением базальтового фиброволокна и углеродных наномодификаторов имеют значительное увеличение прочностных характеристик в сравнении с контрольным составом. Увеличение прочности происходит при повышении расхода базальтовой фибры и углеродного наномодификатора, о чем свидетельствуют данные таблиц 4.7, 4.8. При этом составы с содержанием базальтовой фибры более 2,5% имели снижение параметров прочности. Как и в случае со сталефибробетоном, материал с большим содержанием УНТ отличался большими показателями прочности. Наибольшее увеличение прочности при сжатии наблюдались для составов 7 с содержанием УНТ в количестве 0,005 и 0,01%, которое составило 33 и 35% соответственно. Также

в количестве 0,005 и 0,01%, которое составило 33 и 35% соответственно. Также данные составы отличались повышением прочности при растяжении на изгиб в 1,9 и 2,1 раза соответственно.

В целях исследования комплексного влияния применения базальтовой фибры и наномодификатора на рисунке 4.5 представлен график прочности материала при изгибе.

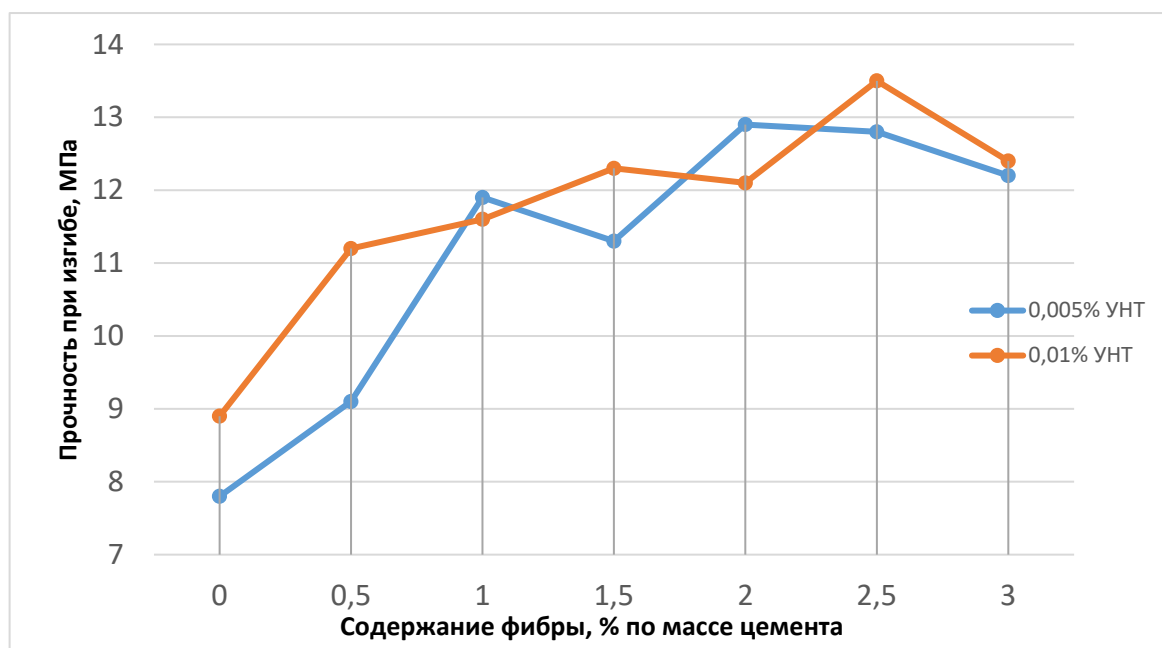


Рисунок 4.5 – Влияние предела прочности при изгибе от количества вводимой базальтовой фибры (технология ЛИВ)

По графику отчетливо видно, что прочность материала зависит от количества вводимой фибры. Так наблюдается повышение прочности до составов 7 (содержание фибры 2,5%) (см. табл. 4.7, 4.8). Далее происходит снижение прочностных характеристик, связанное с большим содержанием базальтового фиброволокна. Это происходит в связи с тем, что большая концентрация легкой добавки в виде базальтового фиброволокна не позволяет распределиться дисперсно-армирующим компонентам равномерно по всему объему смеси и, как следствие, фибра при смешивании компонентов начинает собираться в комки, которые отрицательно влияют на прочность материала.

Для данных составов оценивалась интенсивность набора прочности при сжатии, изображенная на графике 4.6.

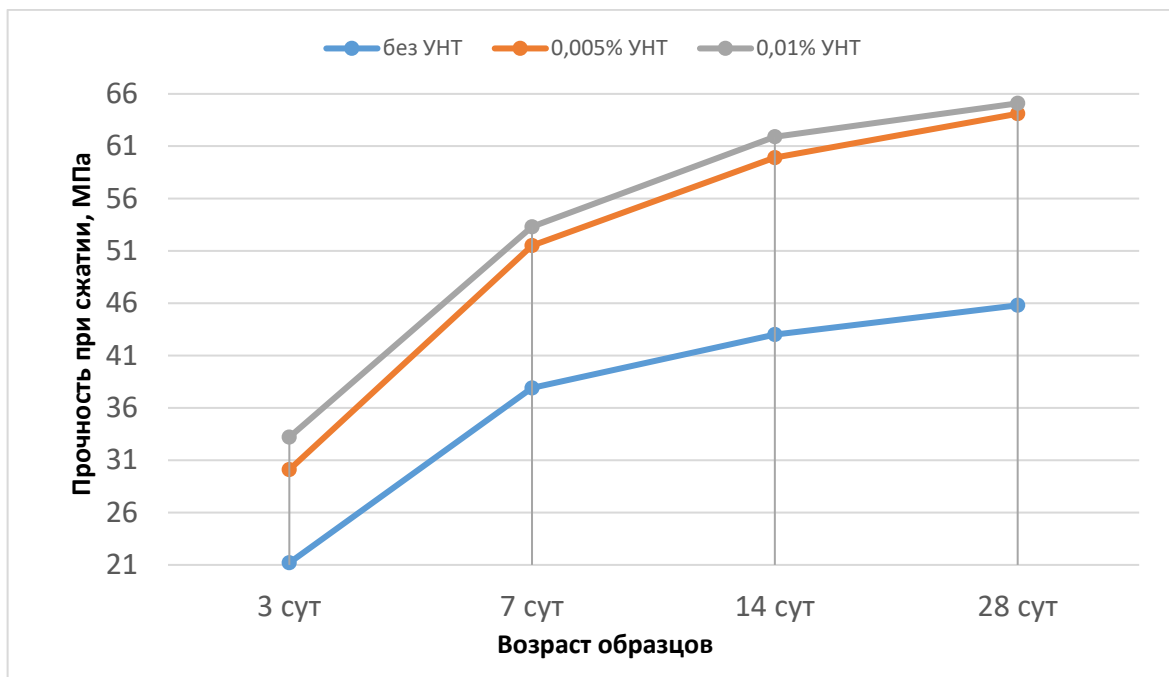


Рисунок 4.6 – График интенсивности набора прочности наномодифицированного базальтофибробетона (технология ЛИВ)

При рассмотрении полученных экспериментальных данных видно, что прочность в начальные сроки схватывания также повышается уже на 7 сутки (21%). Данный эффект наблюдается в наномодифицированных бетонах вне зависимости от типа фибры, что в очередной раз подтверждает эффективность применения наномодификатора в фибробетонных композициях.

Вторая серия исследований по влиянию совместного применения базальтофибробетона осуществлялась на образцах, приготовленных по технологии ультразвукового диспергирования. В таблицах 4.9, 4.10 представлены результаты исследований для базальтофибробетонов с содержанием 0,005 и 0,01% УНТ соответственно.

Таблица 4.9 – Полученные характеристики базальтофибробетона с введением УНТ с помощью УЗД в количестве 0,005% по массе цемента

№	Базальтовая фибра, % по массе цемента	УНТ, % по массе цем.	Предел прочности при изгибе (28сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки
1	-	-	5,3	21,2	37,9	43,0	45,8
2	-	0,005	6,6	24,2	43,7	51,8	55,1
3	0,5	0,005	6,7	24,9	45,9	53,2	56,0
4	1,0	0,005	8,5	25,3	46,2	54,2	54,3
5	1,5	0,005	9,3	26,1	46,5	53,9	56,8
6	2,0	0,005	9,8	28,5	47,1	56,2	58,1
7	2,5	0,005	10,1	27,9	49,2	56,9	58,8
8	3,0	0,005	9,7	28,5	48,0	55,1	57,2

Таблица 4.10 – Полученные характеристики базальтофибробетона с введением УНТ с помощью УЗД в количестве 0,01% по массе цемента

№	Базальтовая фибра, % по массе цемента	УНТ, % по массе цем.	Предел прочности при изгибе (28сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сутки	7 сутки	14 сутки	28 сутки
1	-	-	6,1	26,2	40,3	46,8	48,2
2	-	0,01	8,7	28,8	45,5	55,8	59,2
3	0,5	0,01	8,3	29,0	44,3	56,2	59,2
4	1,0	0,01	9,5	29,7	45,2	55,8	58,2
5	1,5	0,01	10,0	31,5	47,1	57,1	60,7
6	2,0	0,01	11,6	30,7	48,7	60,3	62,0
7	2,5	0,01	12,5	32,1	49,2	61,2	62,3
8	3,0	0,01	10,9	30,5	48,1	57,1	60,2

Составы с комплексным введением базальтового фиброволокна и углеродных наномодификаторов имеют значительное увеличение прочностных характеристик в сравнении с контрольным составом. Увеличение прочности происходит при повышении расхода базальтовой фибры и углеродного наномодификатора, о чем свидетельствуют данные таблиц 4.5, 4.6. При этом составы с содержанием базальтовой фибры более 2,5% имели снижение параметров прочности. Как и в случае со сталефибробетоном, материал с большим содержанием УНТ отличался большими показателями прочности. Наибольшее

увеличение прочности при сжатии наблюдались для составов 7 с содержанием УНТ в количестве 0,005 и 0,01%, которое составило 28 и 29% соответственно. Также данные составы отличались повышением прочности при растяжении на изгиб в 1,9 и 2 раза соответственно.

В целях исследования комплексного влияния применения базальтовой фибры и наномодификатора на рисунке 4.7 представлен график прочности материала при изгибе.

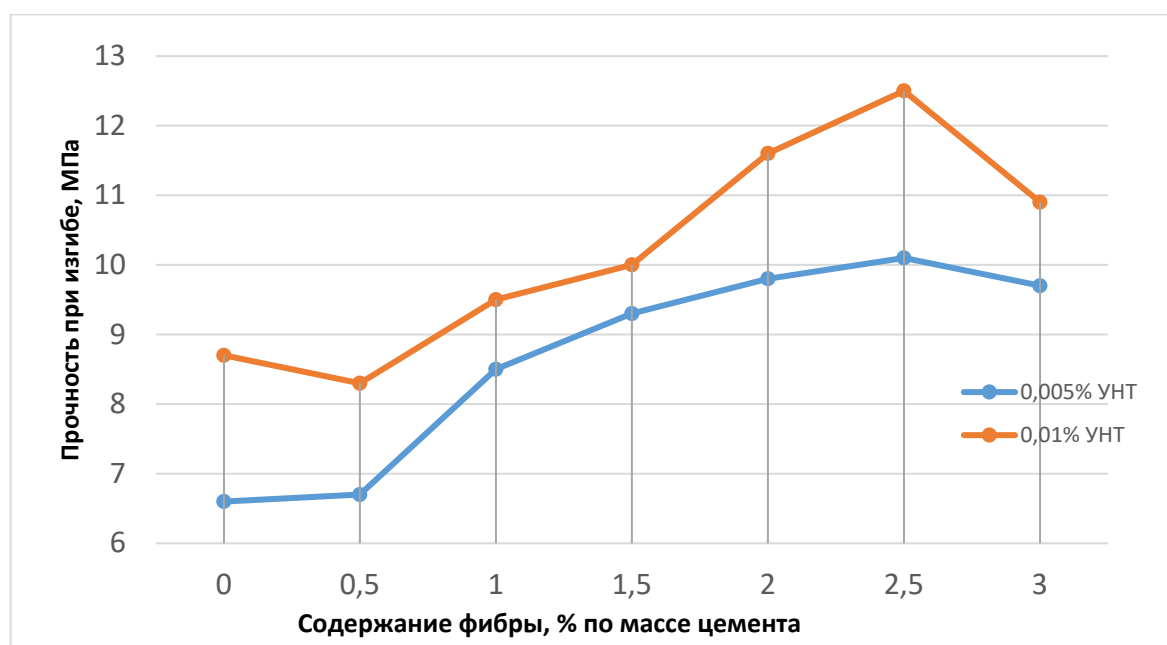


Рисунок 4.7 – Влияние предела прочности при изгибе от количества вводимой базальтовой фибры (технология УЗД)

Да графике 4.7 наблюдается схожая картина, как и для технологии линейно-индукционного вращения, однако максимальная прочность для состава 7 (содержание УНТ 2,5%) составила 28 и 29% для двух серий исследований.

Для данных составов оценивалась интенсивность набора прочности при сжатии, изображенная на графике 4.8.

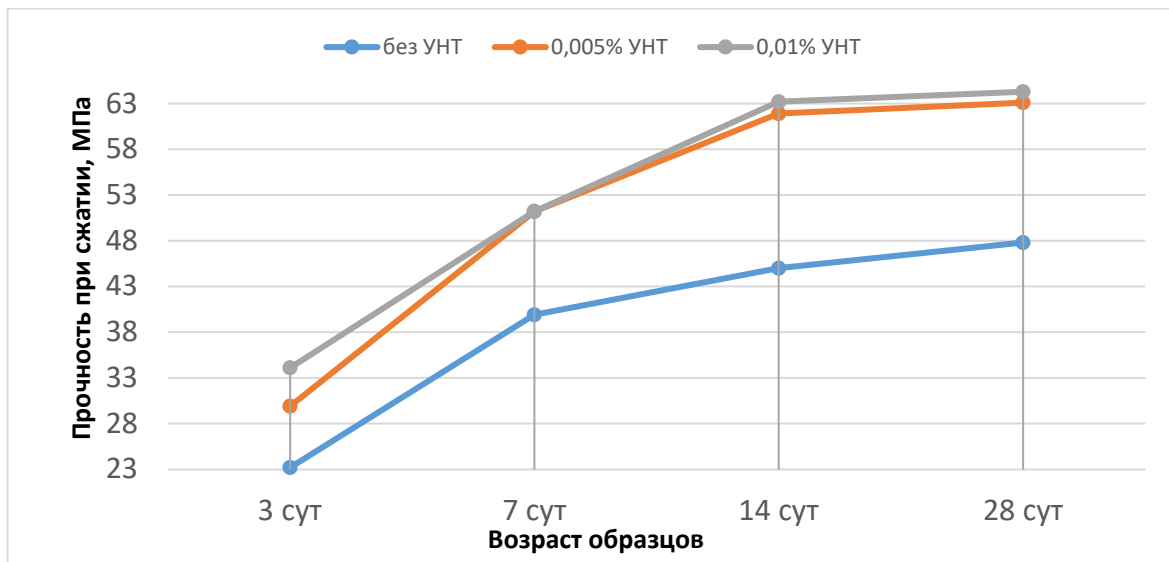


Рисунок 4.8 – График интенсивности набора прочности наномодифицированного базальтофибробетона (технология УЗД)

На графике наблюдается увеличение интенсивности набора прочности образцов во времени. Так на 7 сутки, прочность при сжатии повысилась на 19% в сравнении с контрольным образцом.

Таким образом, в ходе проведенных экспериментальных исследований доказано, что совместное применение базальтового фиброволокна и углеродных нанотрубок значительно повышает физико-механические и эксплуатационные характеристики бетона. Как и для сталефибробетона, максимальные прочностные характеристики имели образцы наномодифицированного бетона с помощью использования технологии линейно-индукционных вращателей.

На базе полученных данных возможна разработка оптимальных составов фибробетонов с применением указанных добавок. В целях рационального подбора состава бетонных смесей в данных исследованиях был проведен двухфакторный эксперимент для получения уравнений регрессии, оценивающих зависимость введения добавок на прочность материала.

4.3. Регрессионный анализ влияния добавок на прочностные характеристики бетона

Для рационального подбора компонентов бетонной смеси было принято решение произвести трехфакторный эксперимент, в результате которого можно получить уравнения регрессии, описывающие влияние количества вводимых добавок на прочностные характеристики бетона.

На основе полученных ранее экспериментальных данных по количеству вводимых наномодификаторов, стальной и базальтовой фибры была произведена оптимизация состава по плану трехфакторного эксперимента с тремя уровнями варьирования. Для оптимизации состава производилось две серии испытаний, а именно для наномодифицированного сталевфибробетона и наномодифицированного базальтофибробетона. Факторами варьирования были выбраны: X_1 – содержание фибры; X_2 – содержание углеродных нанотрубок, X_3 – содержание суперпластификатора. Откликами для данных исследований являлись: Y_1 – предел прочности при сжатии; Y_2 – предел прочности на растяжение при изгибе. Расчет уравнений регрессии производился при помощи программного обеспечения «Minitab».

Для постановки эксперимента была построена матрица планирования для обоих типов фибробетонов (табл. 4.11, 4.12).

Таблица 4.11 – Уровни варьирования для составов сталевфибробетона

Показатель	X_1 – Содержание стальной фибры, % по массе смеси	X_2 – содержание УНТ, % по массе цемента	X_3 – содержание СП-3, % по массе цемента
Нулевой уровень, %	1,5	0,0075	0,5
Интервал варьирования, %	0,5	0,0025	0,2
Верхний уровень, %	2	0,01	0,7
Нижний уровень, %	1	0,005	0,3

Таблица 4.12 – Уровни варьирования для составов базальтофибробетона

Показатель	X_1 – Содержание базальтовой фибры, % по массе цемента	X_2 – содержание УНТ, % по массе цемента	X_3 – содержание СП-3, % по массе цемента
Нулевой уровень, %	1,75	0,0075	0,5
Интервал варьирования, %	0,75	0,0025	0,2
Верхний уровень, %	2,5	0,01	0,7
Нижний уровень, %	1	0,005	0,3

Расчет соответствующих уравнений регрессии был произведен согласно методу, описанному в работах Ч. Хикса [96]. Итогом проведенных экспериментов были получены четыре уравнения регрессии: $R_{сж}$ – предела прочности при сжатии наномодифицированного сталефибробетона; $R_{изг}$ – предела прочности на растяжение на изгибе наномодифицированного сталефибробетона; $R_{сж}$ – предела прочности при сжатии наномодифицированного базальтофибробетона; $R_{изг}$ – предела прочности на растяжение при изгибе наномодифицированного базальтофибробетона.

4.3.1 Регрессионный анализ состава сталефибробетона

Необходимо выбрать вид уравнений регрессии, для которого значения исследуемых факторов расположены рядами параллельных данных. Так как планирование эксперимента было трехфакторным, все данные представлены в виде матрицы сочетания факторных признаков трехуровневого представления трех факторов вводимых добавок. Параметры рядов параллельных данных представлены в таблицах 4.13.

Таблица 4.13 – Полученные экспериментальные данные для сталефибробетона

№	Стальная фибра, % по массе смеси	УНТ, % по массе цемента	СП-3, % по массе цемента	$R_{сж}$, МПа	$R_{изг}$, МПа
1	1,5	0,0075	0,5	64,8	13,2
2	1,5	0,0075	0,3	61,5	13,0
3	1,5	0,0075	0,7	67,9	13,2
4	1,5	0,005	0,5	60,9	12,7
5	1,5	0,005	0,3	58,6	12,7
6	1,5	0,005	0,7	63,9	12,4
7	1,5	0,01	0,5	69,0	13,9
8	1,5	0,01	0,3	66,9	13,9
9	1,5	0,01	0,7	71,8	14,2
10	1,0	0,0075	0,5	64,1	11,7
11	1,0	0,0075	0,3	62,1	11,4
12	1,0	0,0075	0,7	65,3	11,7
13	1,0	0,005	0,5	63,2	11,5
14	1,0	0,005	0,3	60,8	11,6
15	1,0	0,005	0,7	65,9	11,8
16	1,0	0,01	0,5	68,5	12,7
17	1,0	0,01	0,3	65,1	12,7
18	1,0	0,01	0,7	70,2	13,0
19	2,0	0,0075	0,5	66,9	14,6
20	2,0	0,0075	0,3	63,5	14,3
21	2,0	0,0075	0,7	70,5	14,5
22	2,0	0,005	0,5	61,8	14,0
23	2,0	0,005	0,3	60,1	13,8
24	2,0	0,005	0,7	64,6	14,1
25	2,0	0,01	0,5	68,2	15,5
26	2,0	0,01	0,3	66,1	15,1
27	2,0	0,01	0,7	68,2	15,5

Данные, представленные в таблице 4.13 свидетельствуют о том, каким образом изменяются результативные признаки эксперимента при изменении значений факторов. Можно наблюдать, что для обработки экспериментальных данных можно выбрать линейный, полиномиальный, либо параболический тип уравнения регрессии. В результате расчетов, полученных в программном комплексе «Minitab» была подобрана модель и построены графики, для определения значимости указанных факторов. На рисунке 4.9 представлены результаты расчета.

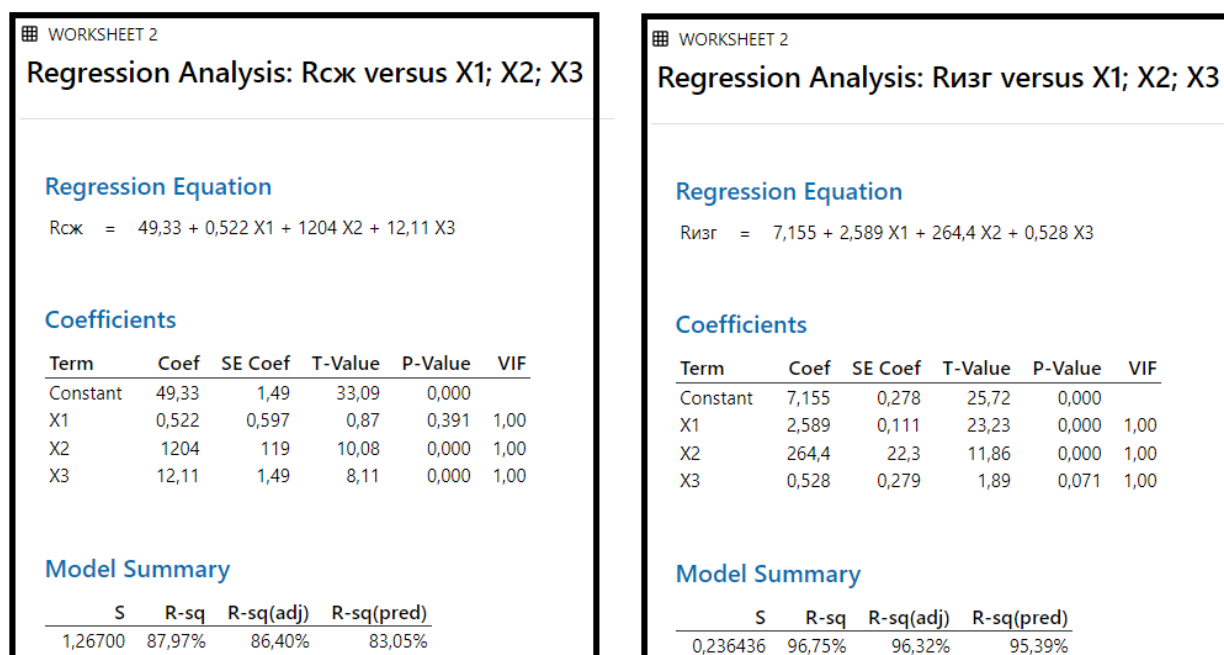


Рисунок 4.9 – Результаты расчета уравнения регрессии зависимости предела прочности при сжатии и изгибе сталефибробетона

На рисунке 4.5 в строке «Coefficients» приведены коэффициенты для полинома расчетной функции, описывающие значимость факторов на предел прочности бетона. В строке «Model Summary» приведены коэффициенты значимости полученного уравнения регрессии.

Таким образом для сталефибробетона были получены следующие уравнения регрессии:

Уравнение регрессии предела прочности при сжатии:

$$R_{сж} = 49,33 + 0,552 \cdot X_1 + 1204 \cdot X_2 + 12,11 \cdot X_3$$

Уравнение регрессии предела прочности при изгибе:

$$R_{изг} = 7,155 + 2,589 \cdot X_1 + 264,4 \cdot X_2 + 0,528 \cdot X_3$$

Где X_1 – расход стальной фибры «Миксарм»; X_2 – расход УНТ «Таунит-М»; X_3 – расход суперпластификатора «Полипласт СП-3».

Показатель S – отклонение экспериментальных значений от полученной модели, составили - 1,28 для первого уравнения регрессии и - 0,24 для второго. Значение R-sq описывает процент объяснения полученных данных, рассчитанной моделью уравнений регрессии. В первом случае данный коэффициент составил

87,97, а во втором 96,75%. Это говорит о том, что пределы прочности материала зависят от указанной доли введения добавок, в то время как оставшаяся величина от 100% приходится на долю других, неучтенных факторов. Статистический расчет производился с учетом доверительной вероятности 0,95. Показатель «p-Value» оценивает значимость полученных коэффициентов уравнения регрессии. Так, для регрессии предела прочности при сжатии значимыми являются постоянный коэффициент и коэффициенты влияния количества вводимых добавок УНТ, и суперпластификатора, так как данный показатель для них менее 0,05. Для уравнения регрессии, описывающее предел прочности при изгибе значимыми являются коэффициенты введения добавок стальной фибры и углеродных нанотрубок. Также данное ПО позволяет построить графики оценки влияния исследованных факторов на полученные уравнения регрессии по нормальному закону распределения и по закону Парето (рис. 4.10., 4.11.)

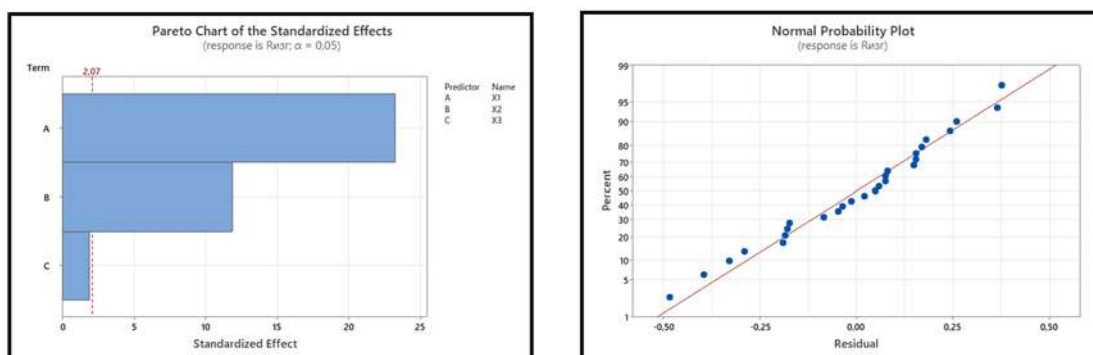


Рисунок 4.10 – Графики влияния факторов вводимых добавок на прочность сталефибробетона при сжатии

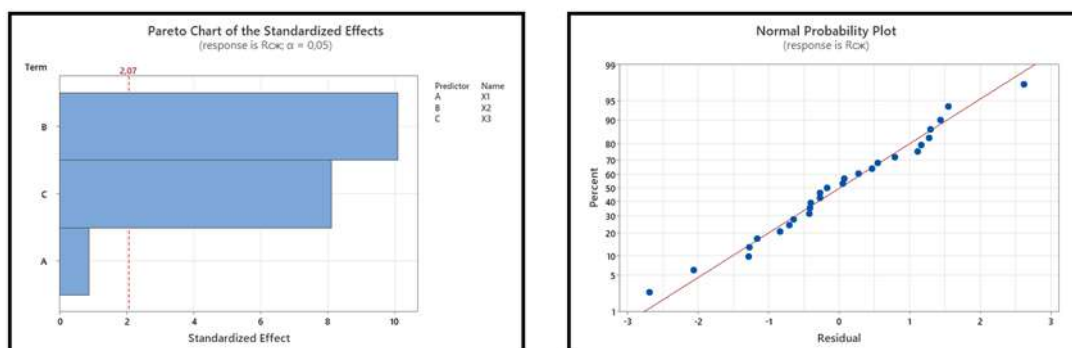


Рисунок 4.11 – Графики влияния факторов вводимых добавок на прочность сталефибробетона при изгибе

Анализ представленных графиков также свидетельствует о том, что уравнение регрессии с достаточной достоверностью описывает зависимость пределов прочности сталефибробетона от вводимых добавок. При этом по графику закона Парето можно сделать вывод о том, что наиболее значимыми факторами для прочности на сжатие является количество вводимых добавок УНТ и суперпластификатора, в то время как предел прочности при изгибе в большей степени зависит от количества стальной фибры и в меньшей от количества наноуглеродных трубок, а параметр содержания пластификатора имеет незначительную значимость. График нормального закона распределения свидетельствует о достаточной точности полученных моделей.

4.3.2 Регрессионный анализ состава базальтофибробетона

Были получены результаты экспериментальных исследований для проведения регрессионного анализа на трех уровнях варьирования для базальтофибробетона. Полученные данные представлены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Полученные экспериментальные данные для
базальтофибробетона

	Базальтовая фибра, % по массе цемента	УНТ, % по массе цемента	СП-3, % по массе цемента	$R_{сж}$, МПа	$R_{изг}$, МПа
1	1,75	0,0075	0,5	58,2	12,1
2	1,75	0,0075	0,3	55,9	12,2
3	1,75	0,0075	0,7	62,0	12,4
4	1,75	0,005	0,5	56,7	11,9
5	1,75	0,005	0,3	53,2	11,2
6	1,75	0,005	0,7	58,5	11,5
7	1,75	0,01	0,5	61,2	12,8
8	1,75	0,01	0,3	59,2	12,9
9	1,75	0,01	0,7	63,9	12,1
10	1,0	0,0075	0,5	58,9	10,5
11	1,0	0,0075	0,3	57,9	10,2
12	1,0	0,0075	0,7	62,1	11,1
13	1,0	0,005	0,5	56,1	10,3
14	1,0	0,005	0,3	53,7	10,6
15	1,0	0,005	0,7	57,1	10,9
16	1,0	0,01	0,5	60,1	10,9
17	1,0	0,01	0,3	56,7	10,2
18	1,0	0,01	0,7	61,2	11,5
19	2,5	0,0075	0,5	59,2	13,2
20	2,5	0,0075	0,3	55,9	12,7
21	2,5	0,0075	0,7	60,3	13,1
22	2,5	0,005	0,5	56,9	12,9
23	2,5	0,005	0,3	54,8	13,4
24	2,5	0,005	0,7	59,9	13,1
25	2,5	0,01	0,5	63,7	13,5
26	2,5	0,01	0,3	61,2	13,7
27	2,5	0,01	0,7	66,5	14,5

Полученные экспериментальные данные были занесены в программный комплекс «Minitab». На рисунке 4.12 представлены результаты расчета.

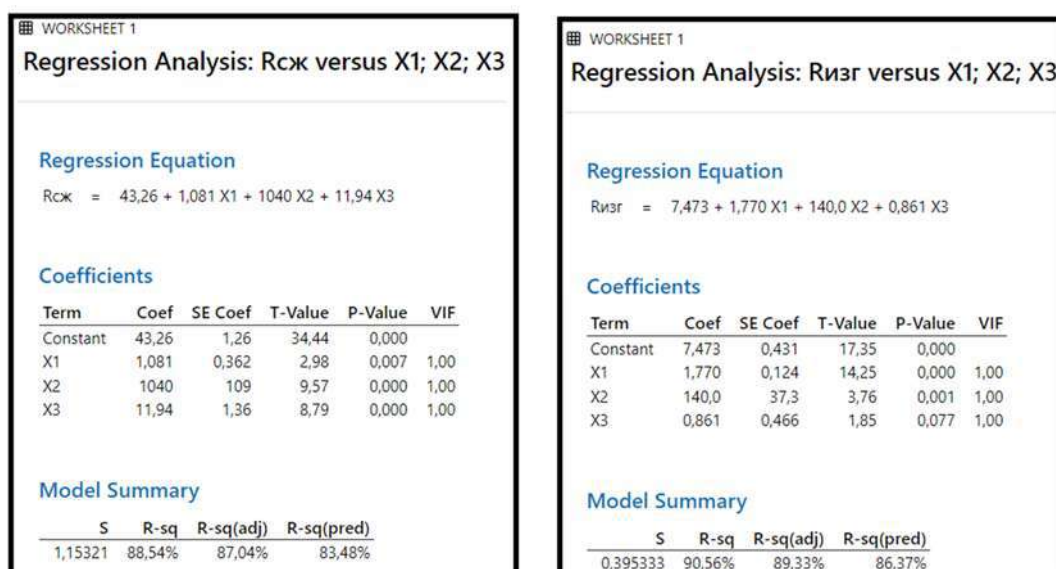


Рисунок 4.12 – Результаты расчета уравнения регрессии зависимости предела прочности при сжатии и изгибе базальтофибробетона

Таким образом для базальтофибробетона были получены следующие уравнения регрессии:

Уравнение регрессии предела прочности при сжатии:

$$R_{сж} = 43,26 + 1,081 \cdot X_1 + 1040 \cdot X_2 + 11,94 \cdot X_3$$

Уравнение регрессии предела прочности при изгибе:

$$R_{изг} = 7,473 + 1,770 \cdot X_1 + 140 \cdot X_2 + 0,86 \cdot X_3$$

Где X_1 – расход базальтовой фибры ООО НПО «Вулкан»; X_2 – расход УНТ «Таунит-М»; X_3 – расход суперпластификатора «Полипласт СП-3».

Среднее отклонение экспериментальных данных от полученных моделей составило - 1,15 и - 0,4. Показатель R-sq указывает на то, что предел прочности при сжатии можно считать зависимым на 88,54% от применяемых добавок, в то время как предел прочности на растяжение при изгибе на 90,56%. Для первого уравнения, согласно показателю «p-Value» значимым можно считать, как и в случае со сталефибробетоном количество вводимых УНТ. Для второго уравнения значимыми является введение обеих добавок.

Для регрессионного анализа состава базальтофибробетона в программном комплексе «Minitab» были построены график распределения по закону Парето и график нормального распределения для двух уравнений регрессии (рис. 4.13, 4.14).

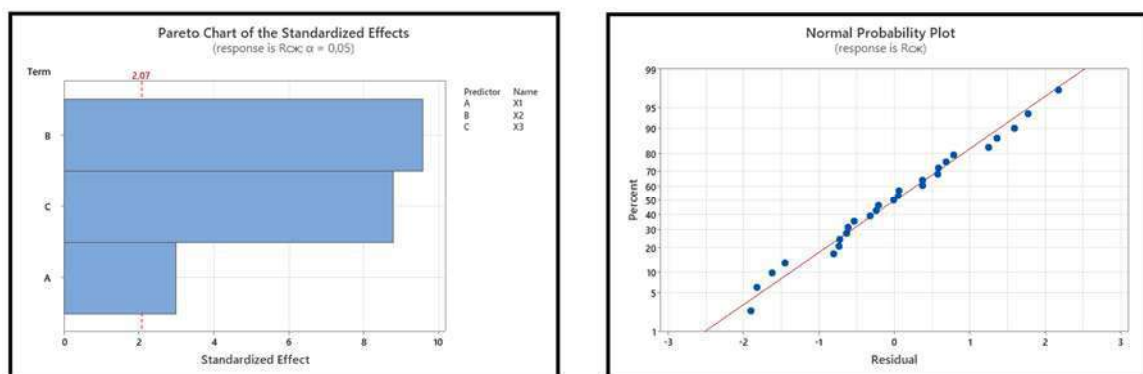


Рисунок 4.13 – Графики влияния факторов вводимых добавок на прочность базальтофибробетона при сжатии

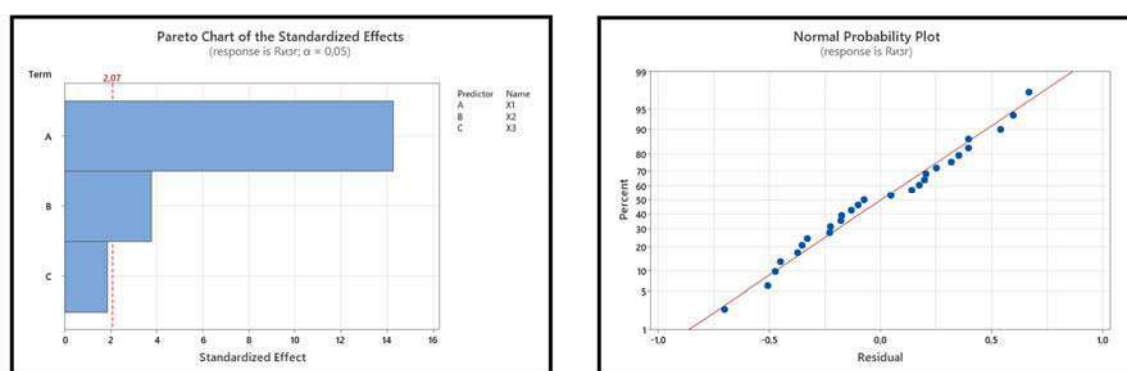


Рисунок 4.14 – Графики влияния факторов вводимых добавок на прочность базальтофибробетона при изгибе

Согласно полученным данным, уравнения регрессии описывают зависимость между введением добавок наномодификатора, суперпластификатора и базальтового фиброволокна на прочностные характеристики с необходимой точностью. Как и предполагалось, прочность наномодифицированного базальтофибробетона в значительной степени зависит от количества наномодификатора. Наибольшее влияние на предел прочности при изгибе оказывает базальтовое фиброволокно, а наименьшее — углеродные нанотрубки, в то время как коэффициент учитывающий введение суперпластификатора имеет недостаточную значимость. Об этом свидетельствует красная контрольная линия, которая указывает табличные значения критерия Стьюдента. В то время как превышение табличных значений говорит о статистической значимости фактора.

4.4. Фибробетонная стяжка как альтернатива армирования стальной арматурной сеткой

Сталефибробетон представляет собой современный строительный материал, который объединяет свойства традиционного и армированного бетона. Оптимальные рецептура и равномерное распределение стальной фибры в матрице бетона обеспечивают высокие показатели прочности, достигаемые при использовании фибры диаметром 0,5–1,5 мм и длиной 30–60 мм. Стальная фибра значительно увеличивает прочность на растяжение (10 МПа и выше) и на сжатие (60 МПа и выше) [63,93,101].

Области применения сталефибробетонов включают:

Стяжки и полы. В производственных помещениях, таких как цехи и склады, сталефибробетон обеспечивает долговечность и выдерживает высокие нагрузки. Например, в производственном цехе "Флотман Верке ГмбХ" использовалось покрытие из сталефибробетона толщиной 20 см.

Дорожные покрытия и мосты. Сталефибробетон находит широкое применение в Японии и США для дорожных покрытий и мостов, включая мост "Аляска" в России, с процентом армирования 0,8-1,5% (70-130 кг/м³).

Жилые и общественные здания. В проекте "Город будущего" в Швейцарии сталефибробетон использовался в фундаментах и других конструкциях. Аналогично, на стадионе "Фенербахче" в Турции он применялся для укрепления полевых покрытий.

Несмотря на преимущества, сталефибробетон имеет недостатки, такие как сложности в производстве, требующие строгого соблюдения технологий и расчетов, из-за риска снижения прочности при высокой концентрации фибры. Кроме того, отсутствие нормативной базы для его применения требует разработки новых стандартов. Таким образом, активное внедрение сталефибробетонов исключает необходимость в дальнейших исследованиях составов и технологий их приготовления [65,74].

В данной работе был разработан состав сталефибробетонной стяжки с применением наномодифицирующей добавки. Применение данного состава позволило отказаться от использования стальной арматурной сетки и, как следствие, от арматурных работ при обустройстве стяжки. Разработанный состав включает в себя цемент марки ПЦ 500-Д0, строительный песок с модулем крупности 1,9, щебень фракции 5-20 мм, стальную фибру с диаметром 1 мм и длиной до 54 мм, с конусообразными анкерами с углом 16°. Расход компонентов на обустройство стяжки приведен в таблице 4.15, где показан разработанный состав и состав с применением арматурной сетки.

Таблица 4.15 – Расход материалов на 1 м³ для обустройства бетонной стяжки

Состав	Расход материалов на 1 м ³						СП-3, кг	Арм- ная сетка, м ²
	Цемент ПЦ 500-Д0, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, л	Стальная фибра, кг	УНТ, кг		
1	302	777	1080	212	43,2	0,015	1,5	-
2	382	705	1080	220	-	-	-	101

Для проведения работ произведены расчеты технико-экономических затрат на устройство стяжки с применением арматурной сетки и стяжки с применением сталефибробетона. Общая площадь покрытия составила 3040 м². В связи с тем, что стяжка обустраивалась в производственном помещении, согласно нормам СП 52-104-2006, СП 360.1325800.2017 [82,83] марка бетона для стяжки должна быть не менее М300 (В22,5), а толщина стяжки должна быть не менее 50 мм. В таблицах 4.16, 4.17 приведены составы стяжек и их стоимость.

Таблица 4.16 – Состав бетонной стяжки М300 для арматурной сетки

Компоненты	На 1 м ³	
	Расход	Стоимость, руб
Цемент ПЦ 500-Д0, кг	382	2430
Песок, кг	705	397
Щебень, кг	1080	1854
Вода, л	220	7,96
Арматурная сетка, м ²	101	1447
Итого:		6135,96

Таблица 4.17 – Разработанный состав бетонная стяжка М300

Компоненты	На 1 м ³	
	Расход	стоимость
Цемент ПЦ 500-Д0, кг	302	1920
Песок, кг	777	437
Щебень, кг	1080	1854
Вода, л	212	7,63
СП-3, кг	1,5	140
УНТ, кг	0,015	150
Стальная фибра, кг	43,2	1296
Итого:		5804,63

Себестоимость кубического метра наномодифицированного сталефибробетона оказалась ниже стоимости армированной стяжки на 331 руб. Данное различие объясняется полным отказом от арматурной сетки в пользу применения сталефибробетона. Применение наномодифицирующей добавки позволило сократить количество цементного вяжущего без изменения прочностных характеристик материала.

Значительный экономический эффект наблюдается при расчете общих трудовых и материальных затрат для обустройства стяжки. За счет отказа от арматурной сетки из комплекса работ полностью исключаются мероприятия, связанные с укладкой, обвязкой и сваркой армирующих сеток, что значительно снижает не только временные расходы, но и суммарные трудозатраты на выполнение данной стяжки (см. приложение №3). Таким образом можно сделать вывод, что применение наномодифицированных бетонов для обустройства стяжек является актуальным направлением современного строительного комплекса, так как данный материал имеет высокие эксплуатационные показатели и достаточную экономическую выгоду.

Выводы по главе 4

1. В результате проведенного исследования была подтверждена высокая эффективность применения технологии линейно-индукционного вращения для введения углеродных наномодификаторов в состав мелкозернистого бетона. Установлено, что данная методика обеспечивает равномерное распределение наноразмерных добавок по всему объему бетонной смеси, что способствует значительному повышению прочностных характеристик конечного продукта. Экспериментальные данные показывают, что прочность при сжатии образцов на 3, 7 и 28 сутки твердения увеличивается на 23%-30% в сравнении с образцами, полученными методами ультразвукового диспергирования и контрольными образцами. Это свидетельствует о том, что линейно-индукционное вращение не только оптимизирует процесс смешивания, но и позволяет более эффективно активировать компоненты бетонной смеси, что приводит к ускорению процесса формирования прочного цементного камня вокруг углеродных нанотрубок. Таким образом, исследуемая технология является перспективным направлением для улучшения эксплуатационных характеристик мелкозернистого бетона, что имеет важное значение для повышения качества строительных материалов и их

надежности в современных строительных конструкциях. Результаты данного исследования могут быть использованы для дальнейшей разработки и оптимизации бетонов с улучшенными механическими и физическими свойствами.

2. В ходе проведенного исследования было установлено, что комплексное применение углеродных нанотрубок и фиброволокна, как базальтового, так и стального, значительно улучшает физико-механические характеристики фибробетонов. Наномодификаторы, введенные в состав бетонной смеси, способствуют упрочнению структуры цементной матрицы на микроуровне, в то время как дисперсное армирование волокнами обеспечивает повышение прочности на макроуровне. Проведенные испытания показали, что при использовании углеродных нанотрубок в концентрациях 0,005% и 0,01% по массе цемента повышают прочность бетона при сжатии и изгибе, на 28-42% по сравнению с контрольными образцами. Одновременно применение базальтового и стального фиброволокна позволяет достичь синергетического эффекта, что подтверждается значительным увеличением прочности на растяжение и улучшением трещиностойкости. Данные результаты свидетельствуют о потенциале использования наномодифицированных фибробетонов в современных строительных конструкциях, что открывает новые возможности для оптимизации их состава и расширения области применения в строительной отрасли. Таким образом, результаты исследования имеют практическое значение для дальнейшей разработки высокопрочных и долговечных бетонных материалов, отвечающих современным требованиям к эксплуатационным характеристикам.

3. В результате проведенного двухфакторного эксперимента, направленного на оптимизацию состава наномодифицированного сталефибробетона и базальтофибробетона, были получены уравнения регрессии, описывающие влияние содержания стальной и базальтовой фибры, а также углеродных нанотрубок на прочностные характеристики бетонов. Анализ экспериментальных данных с помощью программного обеспечения «Minitab» позволил установить значимость исследуемых факторов и их влияние на пределы

прочности при сжатии и изгибе. Для сталефибробетонов было выявлено, что прочность на сжатие значительно определяется количеством наномодификатора, тогда как предел прочности при изгибе более существенно зависит от содержания стальной фибры. Кроме того, уравнения регрессии для базальтофибробетонов подтвердили, что прочностные характеристики в значительной мере зависят от количества вводимых добавок, с наибольшим влиянием базальтового фиброволокна на прочность при изгибе. Результаты эксперимента обеспечивают надежную базу для дальнейшего исследования и оптимизации составов бетонов, что может привести к созданию более эффективных строительных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Данные выводы подчеркивают важность комплексного подхода к выбору составных компонентов бетона при проектировании современных строительных конструкций.

4. В результате проведенного исследования было разработано и оптимизировано применение наномодифицированного сталефибробетона для обустройства стяжек, что позволило значительно повысить экономическую эффективность и эксплуатационные характеристики строительного материала. Проведенные технико-экономические расчеты показали, что себестоимость кубического метра наномодифицированного бетона на 331 рубль ниже, чем у традиционной армированной стяжки, что обусловлено полным отказом от арматурной сетки и сокращением расхода цементного вяжущего без потери прочностных характеристик. Исключение этапов, связанных с укладкой и фиксацией армирующих сеток, также приводит к снижению трудозатрат и сокращению времени на выполнение работ. Таким образом, применение наномодифицированных сталефибробетонов в строительстве стяжек является перспективным и эффективным направлением, способствующим улучшению качества строительных работ и экономии ресурсов, что подчеркивает значимость дальнейшего исследования и внедрения таких технологий в стройиндустрию.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Произведен анализ териретических данных модифицирования бетона наномодифицирующими добавками. Обоснована эффективность применения углеродных наномодификаторов, а также технологий для их введения. Определена актуальность разработки составов бетона комплексными наномодифицирующими добавками.

2. Произведены исследования по подбору оптимальной пластифицирующей добавки. Исходя из произведенной выборки определено, что наибольший пластифицирующий эффект имеют добавки на основе поликарбоксилатов, такие как «Полипласт СП-3», «Реламикс 2Т», «СП-4» и «Полипласт СП Суб». В результате анализа экспериментальных данных для дальнейших исследований был выбран пластификатор «Полипласт СП-3», который обеспечил наилучшие показатели пластичности и прочности.

3. Установлено, что комплексное введение углеродных нанотрубок марки «Таунит-М» и суперпластификатора «Полипласт СП-3» значительно повышает показатели прочности мелкозернистого бетона, как при сжатии, так и при изгибе. Определено, что оптимальное количество вводимой наномодифицирующей добавки находится в пределах от 0,005 до 0,01% по массе вяжущего. Введение добавок в указанной концентрации позволяет повысить прочность мелкозернистого бетона при сжатии на 25% и при изгибе на 24%. Полученные результаты подтверждают высокую эффективность применения указанных добавок для получения многокомпонентных высокопрочных бетонов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

4. Проведен сравнительный анализ и определены оптимальные режимы двух технологий введения наномодификатора в бетонную смесь. Первый метод заключается в введении наномодификатора в воду затворения с помощью ультразвуковой диспергации с частотой 25 кГц в течение 5 минут. Введение наномодификатора по указанной технологии повысило предел прочности при сжатии и изгибе на 30,1% и 17,2% соответственно. Второй метод заключается в

использовании линейно-индукционного вращателя, при котором нанодобавка вводится в сухую цементно-песчаную смесь, которая активируется с помощью обработки ферромагнитными мелющими телами под воздействием переменного электромагнитного поля с индукцией 0,1 Тл и частотой 50 Гц в течение 2 минут. При данном методе наблюдается увеличение прочности при сжатии и изгибе на 35,9% и 29,5% соответственно. Определено, что технология с применением линейно-индукционного вращателя обеспечивает наибольшее увеличение прочности бетона. Это связано с двойным эффектом, а именно равномерным перемешиванием всех компонентов и дополнительным помолом цементного вяжущего.

5. Произведено исследование структуры бетона с использованием методов сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Полученные снимки свидетельствуют о том, что углеродные нанотрубки положительно влияют на структурообразование цементной матрицы, выступая в роли центров кристаллизации и способствуя повышению плотности и прочности бетона. Увеличение содержания УНТ от 0,001 до 0,01% повышает плотность компоновки частиц бетона за счет образования большего количества гидросиликатов. Рентгеноструктурный анализ позволил определить влияние наномодифицирующих добавок на основные фазы цементного вяжущего. Установлены положительные изменения в структуре бетона в процессе твердения. Об этом свидетельствует ускорение степени гидратации алито-белитовой фазы и увеличение количества порталандита в образцах наномодифицированного бетона.

6. Разработаны составы на основе комплексного применения стальной («Миксарм») и базальтовой (ООО НПО «Вулкан») фибры совместно с нанотрубками «Таунит-М» и суперпластификатором «Полипласт СП-3». Определено что оптимальная концентрация стальной фибры составляет от 1 до 2% по массе смеси, в то время как базальтовой фибры 2-2,5% по массе цемента. Разработанные составы сталефибробетона позволили увеличить прочность при изгибе в 2,5-2,7 раза, а также прочность при сжатии на 35-41% в сравнении с

контрольными образцами. Для базальтофибробетона увеличение прочности при изгибе и сжатии составило 2-2,2 раза и 30-35% соответственно.

7. Для наиболее рационального подбора состава наномодифицированного фибробетона и оценки влияния добавок на прочностные характеристики материала, был произведен 3-х факторный эксперимент на 3-х уровнях варьирования. Получены уравнения регрессии, описывающие влияние вводимой стальной и базальтовой фибры, а также наномодификатора на пределы прочности бетона при сжатии и изгибе.

8. Произведено внедрение результатов экспериментальных исследований. Разработанный состав наномодифицированного сталефибробетона применялся при устройстве стяжки производственного помещения. Экономический эффект на 1 м³ бетона составил 331 рубль. Удешевление связано с отказом от применения арматурной сетки в пользу сталефибробетона. Помимо этого, применение разработанного состава позволило сократить трудозатраты и уменьшить количество цементного вяжущего. Благодаря указанным факторам не только снижается стоимость, но и повышается скорость возведения напольного покрытия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Артамонова, О. В. Метод рентгеновской дифракции в материаловедении строительных материалов и наноматериалов: учеб. пособие [Текст] / О. В. Артамонова, Г. С. Славчева // Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет» – 2018. – 104 с.
2. Артамонова, О. В. Синтез наномодифицирующих добавок для технологии строительных композитов [Текст] / О. В. Артамонова // Воронеж. Воронежский государственный архитектурно-строительный университет – 2016. – 100 с.
3. Атаханова, М., Материалы изделия, применяемые в строительстве [Текст] / М. Атаханова, Б. Бегмырадова, М. Ресулов // Вестник науки. – 2024. – №12(81). – 4 с.
4. Бабаев, В. Б. Термическая обработка базальтового волокна как способ повышения его щелочестойкости [Текст] / В. Б. Бабаев, В. В. Нелюбова, И. В. Жерновский // Construction materials – 2013. – №10. – С. 58-61.
5. Баженов, В. К. Применение модифицированной базальтовой микрофибры в бетоне [Текст] / В. К. Баженов, М. А. Червонцева // Вестник Московского информационно-технологического университета – Московского архитектурно-строительного института – 2018. – №3. – С. 21-16.
6. Баженов, Ю. М. Высококачественные декоративные мелкозернистые бетоны, модифицированные наночастицами диоксида титана [Текст] / Ю. М. Баженов, Е. В. Королев, Н. П. Лукутцова, С. И. Завалишин, О. А. Чудакова // Вестник МГСУ – 2012. – №6. – С. 73–78.
7. Бикбау, М. Я. Нанотехнологии в производстве цемента [Текст] / М. Я. Бикбау. – М., ОАО «Московский ИМЭТ». 2008. – 768 с.
8. Буракова, Е. А. Синтез и применение углеродных наноматериалов: лабораторные работы [Текст] / Е. А. Буракова, А. Е. Бураков. - Тамбов : Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ». – 2012. – 32 с.

9. Вардак, М. А. Совершенствование технологии приготовления бетонных смесей за счет применения суперпластификатора С-3 [Текст] / М. А. Вардак // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. – 2022. – №2(53). – С. 82-86.
10. Веригин, Ю. А. Многократная обработка вяжущих в активаторах-смесителях непрерывного действия [Текст] / Ю. А. Веригин, В. В. Соколов // Строительные материалы – 1971. – № 1. – С. 18–20.
11. Вишневский, А. А. Выбор технологии производства автоклавного газобетона: ударная или литьевая [Текст] / А. А. Вишневский, Г. И. Гринфельд // Construction materials. – 2015. – №8. – С. 4-7.
12. Войлоков, И. А. Технико-экономическое обоснование применения сталефибробетона в конструкциях промышленных полов [Текст] / И. А. Войлоков, А. М. Горб // Минск – 2009. – С. 187-199.
13. Войлоков, И. А. Базальтофибробетон. Исторический экскурс [Текст] / И. А. Войлоков, С. Ф. Канаев (Ястржембский) // Magazine of Civil Engineering – 2009. – №4. – С. 26-31.
14. Гальцева, Н. А. Применение высокофункциональных бетонов при модернизации технологии производства предварительно напряженных аэродромных плит [Текст] / Н. А. Гальцева, И. А. Грунина, Е. Н. Булдыжова, В. С. Чернигов, Д. Д. Зуева // ИВД. – 2021. – №4(76). – 10 с.
15. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 2013-07-01. – М.: Стандартиформ, 2018. – 32 с.
16. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – Введ. 2020-01-01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 16 с.
17. ГОСТ 17624-2021. Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности. – Введ. 2022-09-01. – М.: Стандартиформ, 2021. – 20 с.
18. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. – Введ. 2011-01-01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 15 с.

19. ГОСТ 29101-91. Материалы стеклянные текстильные. – Введ. 1993-01-01. – М.: Стандартинформ, 2004. – 6 с.
20. ГОСТ 30744-2001. Цементы. Методы испытаний с использованием полифракционного песка. – Введ. 2002-03-01. – М.: Стандартинформ, 2001. – 31 с.
21. ГОСТ 310.4-81. Методы испытаний для определения предела прочности при изгибе и сжатии. – Введ. 1983-07-01. – М.: Стандартинформ, 2003. – 11 с.
22. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. – Введ. 1998-07-01. – М.: Стандартинформ, 2018. – 56 с.
23. Гуляков, Е. Г. Влияние суперпластификаторов на размолоспособность портландцемента при получении цементов низкой водопотребности [Текст] / Е. Г. Гуляков, В. Г. Хозин, И. В. Боровских, Ю. М. Ганеева // Известия КГАСУ – 2024. – №2(68). – С. 77-91. 10.48612/NewsKSUAE/68.7.
24. Дейнека, В. В. Исследование возможности получения композиционных материалов специального назначения [Текст] / В. В. Дейнека // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы – 12013. – №1(4). – С. 272-274.
25. Дьячкова, Т. П. Методы функционализации и модифицирования углеродных нанотрубок [Текст] / Т. П. Дьячкова, А. Г. Ткачев // – М.: Издательский дом «Спектр» – 2013. – 152 с
26. Елишев, К. С. Механизм действия суперпластифицирующих добавок [Текст] / К. С. Елишев // The Scientific Heritage – 2021. – №78-1. – С. 15-17.
27. Жаканов, А. Н. Природные пористые заполнители легкого бетона [Текст] / А. Н. Жаканов // Наука и техника Казахстана – 2023. – №2. – С. 155-162.
28. Жданок, С. А. Синергетическое влияние наночастиц SiO₂ и углеродных нанотрубок на свойства бетона [Текст] / С. А. Жданок, С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2022. – Т.66. – №1. – С. 109–12.

29. Жерновский, И. В. Алмосиликатное наноструктурированное вяжущее на основе гранитного сырья [Текст] / И. В. Жерновский, М. С. Осадчая, А. В. Череватова, В. В. Строкова // Строительные материалы. – 2014. – №1–2. – С. 38-41.
30. Золотарёв, А. А., Бетон, наноструктурированный водорастворимыми фуллеренолами [Текст] / Золотарёв А. А., Н. А. Чарыков, К. Н. Семёнов, В. И. Намазбаев, Д. Г. Летенко, В. А. Никитин, Ю. В. Пухаренко, С. В. Скачков, А. И. Лушин // Вестник СПбГУ. Серия 4. Физика. Химия. – 2011. – №3. – С. 72-79.
31. Ибе, Е. Е., Предпосылки использования многокомпонентных вяжущих на основе зол-унос для бетонов ультравысоких технологий [Текст] / Е. Е. Ибе, Г. Н. Шиббаева, С. Е. Миронов, Д. А. Литвин // Вестник евразийской науки. – 2021. – №5. – 9 с.
32. Ибрагимов, Р. А. Прочность тяжелого бетона на портландцементе, обработанном в аппарате вихревого слоя [Текст] / Р. А. Ибрагимов, Е. В. Королёв, Т. Р. Дебердеев, В. В. Лексин // Construction materials. – 2017. – №10. – С. 28-31.
33. Ибрагимов, Р. А. Фазовый состав цементного камня, полученного активацией вяжущего в вихревом электромагнитном слое [Текст] / Р. А. Ибрагимов, Е. В. Королёв, А. А. Шинкарев, Т. Р. Дебердеев // Техника и технология силикатов – 2022. – Т.29. – № 3. – С. 284—294.
34. Ибрагимов, Р. А., Прочность композитов на основемодифицированного портландцемента, активированного в аппарате вихревого слоя [Текст] / Р. А. Ибрагимов, Е. В. Королёв // Промышленное и гражданское строительство – 2021. – №.1. – С. 35-41. 10.33622/0869-7019.2021.01.35-41.
35. Изотов, В. С. Бетоны с добавками гиперпластификаторов [Текст] / В. С. Изотов, Р. А. Ибрагимов // Наука и современность – 2010. №3-2. – 7 с.
36. Иноземцев, А. С. Особенности реологических свойств высокопрочных легких бетонов на полых микросферах [Текст] / А. С. Иноземцев, Е. В. Королёв // Вестник МГСУ – 2013. – №6. – С. 100-108.
37. Калашников, В. И. Терминология науки о бетонах нового поколения [Текст] / В. И. Калашников // Строительные материалы. – 2011. – № 3. – С. 103-106.

38. Камалова, З. А., Суперпластификаторы в технологии изготовления композиционного бетона [Текст] / З. А. Камалова, Р. З. Рахимов, Е. Ю. Ермилова, О. В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – №8. – С. 148-152.
39. Климов, Е. С. Разработка методик введения дисперсий многостенных углеродных нанотрубок в полимерную и металлическую матрицы [Текст] / Е. С. Климов, М. В. Бузаева, О. А. Давыдова, Е. С. Ваганова, И. А. Макарова, Н. А. Бунаков, Д. В. Козлов. // Известия Самарского научного центра РАН. – 2018. – №4-3. – С. 376-382. (
40. Ладохина, М. Н. Влияние методов диспергирования углеродных наноматериалов на прочность бетонов [Текст] / М. Н. Ладохина, Е. А. Буракова / Сборник научных статей молодых ученых и студентов. – Тамбов: ТГТУ. – 2007. – №20. – С. 35-37.
41. Козлова, И. В. Нанотехнологии в производстве строительных материалов: теоретическое исследование [Текст] / И. В. Козлова, С. В. Самченко // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31. – № 3. – С. 284-297.
42. Копанина, Н. О. Вторичные ресурсы в производстве композиционных строительных материалов на основе цемента [Текст] / Н. О. Копанина и др. // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 10. 49–60
43. Кротов, О. М. Влияние пластифицирующих добавок на предельную высоту сооружений при строительной 3d-печати [Текст] / О. М. Кротов, М. В. Кузнецов, И. С. Птухина // Инновации и инвестиции – 2023. – №5. – С. 387-390.
44. Крючков, В. А. наномодифицирование бетона многослойными углеродными нанотрубками, синтезированными каталитическим пиролизом на пленочных катализаторах [Текст] / В. А. Крючков, М. В. Крючков, Р. Ю. Юсифов, М. В. Чернышов, И. В. Ерофеева // Эксперт: теория и практика. – 2022. – №3 (18). – С. 47-53

45. Кудрявцев, П. Г. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы [Текст] / П. Г. Кудрявцев, О. Л. Фиговский // Инженерный вестник Дона – 2014. – №2(29). – С. 1-51.
46. Макушина, Ю. В. К вопросу об идентификации добавок-пластификаторов для бетонов [Текст] / Ю. В. Макушина // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета – 2022. – №2(51). – С. 90–96.
47. Мищенко, С. В. Углеродные наноматериалы. Производство, свойства, применение. [Текст] / С. В. Мищенко, А. Г. Ткачев // Москва: Машиностроение – 2008. – 318 с.
48. Морарь, С. Р. Анализ и перспективы применения нанобетонов [Текст] / С. Р. Морарь, Б. Н. Аманова // In The World Of Science and Education. – 2025. – №15. – С. 33-37.
49. Моховиков, Е. С. Самоуплотняющиеся бетонные смеси с отдельным введением суперпластификатора [Текст] / Е. С. Моховиков, Б. А. Усов. — Текст: непосредственный // Технические науки в России и за рубежом: материалы I Междунар. науч. конф. (г. Москва, май 2011 г.). Москва: Ваш полиграфический партнер. – 2011. — С. 91-98.
50. Мукимов, А. С. Получение эффективной добавки для повышения марки цемента [Текст] / А. С. Мукимов и др. // Universum: технические науки: электрон. научн. журн. – 2025. – №5(134). – 5 с
51. Патент № 2355656 С2 Российская Федерация, МПК C04B 28/02, B82B 1/00, B82B 3/00, C04B 111/20. Бетонная смесь: № 2007117485/03: заявл. 10.05.2007: опубл. 20.05.2009 / А.Н. Понаморов, М.Е. Юдович; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "Научно-Технический Центр прикладных нанотехнологий".
52. Патент № 2559269 С2 Российская Федерация, МПК C04B 28/04, C04B 111/20 Наномодифицированный бетон и способ его получения: № 2013155156/03: заявл. 11.12.2013: опубл. 20.06.2015 / Е. Н. Прудков, А. Н. Гордеева, М. С. Закуражнов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное

учреждение высшего профессионального образования "Тульский государственный университет (ТулГУ).

53. Патент № РФ 2482082 С2 Российская Федерация, МПК С04В 24/00, В82В 1/00. Наномодификатор строительных материалов и способ его получения: № 2011134208/03: заявл. 15.08.2011: опубл. 15.08.2011 / А. Г. Ткачев, А. А. Пасько, В. Н. Артемов и др. / заявитель Общество с ограниченной ответственностью "НаноТехЦентр".

54. Патент № РФ 2545226 С1 Российская Федерация, МПК С04В 24/00, В82В 1/00. Комплексная добавка для бетонной смеси и способ ее приготовления: № 2013146335/03: заявл. 16.10.2013: опубл. 27.03.2015 / В. С. Изотов, Р. А. Ибрагимов, А.И. Пименов / заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Казанский государственный архитектурностроительный университет" КГАСУ/

55. Патент WO 2014148944 А1. Способ производства наноцемента и наноцемент / Бикбау М. Я. ; заявл. 17.10.2013 ; опубл. 25.09.2014.

56. Перфилов В. А. Мелкозернистый наномодифицированный бетон [Текст] / Д.А. Ляшенко, В.А. Перфилов, Л.М. // Инженерный вестник Дона. – 2022. – №10. – 10 с.

57. Перфилов, В. А. Подбор состава мелкозернистого бетона с применением различных пластификаторов [Текст] / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко, А. М. Буров, М. Е. Николаев, А. А. Коноваленко // Инженерный вестник Дона – 2023. – №12. – 10 с.

58. Перфилов, В. А. Fine-aggregate concrete with polymer and basalt fiber [Text] / В.А. Перфилов // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.: International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety (ICCATS-2019) (25-27 September 2019, Chelyabinsk, The Russian Federation). Issue 2. Building materials and products / eds.: A. A. Radionov, D. V. Ulrikh ; South Ural State University (Chelyabinsk), Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk and

Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg. – [Published by IOP Publishing] – 2019. – Vol.687. – 7 P.

59. Перфилов, В. А. Modification of Fine Concrete with Carbon Nanotubes [Текст] / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко, М. Е. Николаев, Е. Ю. Козловцева // Proceedings of the 7th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety ICCATS 2023 (10-16 September 2023, Sochi, Russia) / eds.: A. A. Radionov [et al.] ; Moscow Polytechnic University [et al.]. – Springer Cham – 2024. – pp. 132-142. 10.1007/978-3-031-47810-9_13.

60. Перфилов, В. А. Modification of fine-grained concrete with carbon nanotubes [Текст] / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко // Journal of Advanced Materials and Technologies – 2024. – Vol.9. – №2. – pp. 091-099.

61. Перфилов, В. А. Study of the Influence of Carbon Nanotubes on the Characteristics of Fine-Grained Concrete [Текст] / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко, М. Е. Николаев, Е. Ю. Дубцова, И. И. Глазунов // Proceedings of the 8th International Conference on Construction, Architecture and Technosphere Safety ICCATS 2024 (8–14 September 2024, Saint Petersburg, Russia)/ eds.: A. A. Radionov [et al.] ; Moscow Polytechnic University [et al.]. – Springer Cham – 2025. – pp. 107-115. 10.1007/978-3-031-80482-3.

62. Перфилов, В. А. Влияние полых стеклянных микросфер на свойства лёгких мелкозернистых бетонов [Текст] / В. А. Перфилов, А. В. Котляревская, У. В. Канавец // Вестник Волгоградского гос. архитектурно-строительного ун-та. Серия: Строительство и архитектура. – 2016. – № 43. – С. 93-103.

63. Перфилов, В. А. Влияние стальной фибры "миксарм" на прочность фибробетона [Текст] / В. А. Перфилов, У. В. Алаторцева, Д. Л. Неизвестный // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: материалы V Междунар. науч.-техн. конф., Волгоград, 23-24 апр. 2009 г.: [в 3-х ч.]. Ч. I. / ВолгГАСУ. - Волгоград – 2009. – С. 211-213.

64. Перфилов, В. А. Конструкционные бетоны повышенной трещиностойкости и долговечности с применением макроупрочнителей и

модифицирующих нанодобавок [Текст] / В. А. Перфилов. - Волгоград: ВолгГАСУ, 2009 (Волгоград). - 128 с.: ил. - (Строительные материалы и изделия). - Библиогр.: с. 104-126 (397 назв.). - 300 экз. - ISBN 978-5-98276-297-9.

65. Перфилов, В. А. Конструкционные фибробетоны с применением модифицирующих нанодобавок [Текст] / В. А. Перфилов, У. В. Алаторцева // Проведение научных исследований в области индустрии наносистем и материалов : материалы Всерос. конф. с элементами науч. шк. для молодежи г. Белгород, 16-20 ноября 2009 г. / Белгор. гос. ун-т. - Белгород – 2009. – С. 206-209.

66. Перфилов, В. А. Наномодифицированная цементная композиция [Текст] / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко // Вестник МГСУ. – 2024. – Т.19. Вып. 7. – С. 1116–1124. 10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124.

67. Перфилов, В. А. Повышение прочности мелкозернистого бетона с применением углеродных нанотрубок и механоактивации смеси [Текст] / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко, М. Е. Николаев, С. В. Лукьяница, Р. А. Бурханова // Строительные материалы – 2023. – №12. – С. 49-54. 10.31659/0585-430X-2023-820-12-49-54.

68. Перфилов, В. А. Применение модифицирующих нанодобавок для повышения прочности фибробетонов [Текст] / В. А. Перфилов, У. В. Алаторцева, М. И. Дмитрук, И. Л. Жога // Известия вузов. Строительство – 2009. – N 8. – С. 17-20.

69. Перфилов, В. А. Применение наномодифицированных бетонов в объектах нефтегазовой отрасли [Текст] / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко, Р. Э. Аверьянов, Д. А. Алфимов, К. Е. Булатов // Наука, технологии, общество: экологический инжиниринг в интересах устойчивого развития территорий (НТО-V-2024): сб. науч. ст. по материалам V всерос. (нац.) науч. конф. (Красноярск, 7-8 ноября 2024 г.) – Красноярск – 2024. – С. 116-121.

70. Перфилов, В. А. Разработка состава наномодифицированного цемента [Текст] / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко, С. В. Лукьяница, В. В. Лупиногин // Инженерный вестник Дона. – 2022. – № 5. – 10 с.

71. Перфилов, В. А. Способ введения углеродных нанотрубок в состав мелкозернистого бетона [Текст] / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко, Е. Ю. Дубцова, М. Е. Николаев, В. И. Клименко // Строительные материалы. – 2024. – № 9. – С. 58-62. [10.31659/0585-430X-2024-828-9-58-62](#).

72. Перфилов, В. А. Фибробетон ускоренного твердения [Текст] / В. А. Перфилов, У. В. Алаторцева, А. А. Тюрин // Известия вузов. Строительство. – 2009. – №1. – С.48-51.

73. Перфилов, В. А. Фибробетонные композиции для напольных покрытий при строительстве производственных и гражданских сооружений [Текст] / В. А. Перфилов, Г. А. Чуканов, А. В. Калачев // ИВД. – 2021. – №11(83). – 8 с.

74. Перфилов, В. А. Фибробетоны повышенной прочности, трещиностойкости, морозостойкости и водонепроницаемости на основе наноструктурных вяжущих [Текст] / В. А. Перфилов // Наноматериалы и нанотехнологии. Научный потенциал Волгоградской области: информ.-аналит. сб. / ВолгГТУ. - Волгоград – 2008. – С. 49-54.

75. Перфилов, В. А. Фибробетоны с базальтовыми наполнителями и суперпластификаторами [Текст] / В. А. Перфилов, М. О. Зубова, Д. Л. Неизвестный // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов: материалы VI Междунар. науч.-техн. конф., 13-14 окт. 2011 г., Волгоград / ВолгГАСУ. – Волгоград – 2011. – С. 248-250.

76. Потапов, В.А. Модифицирование цементных материалов малыми дозами гидротермального нанокремнезема и пластифицирующими добавками [Текст] / В. А. Потапов, Е. В. Гордеева, Е. С. Шитиков, А. А. Сердан // Вестник ИШ ДВФУ. – 2021. – №3(48). – С. 94-103.

77. Пустовгар, А. П., Дисперсное армирование бетонов и строительных растворов [Текст] / А. П. Пустовгар, А. Ю. Абрамова // Новые технологии в строительстве – 2023. – №3. – С. 126-140.

78. Ребиндер, П. А. Физико-химические основы водонепроницаемости строительных материалов [Текст] / П. А. Ребиндер // М.: Гостройиздат. – 1953. – 153 с.
79. Самигов, Н. А. Физико-химическая структура и свойства водостойких и высокопрочных композиционных гипсовых вяжущих [Текст] / Н. А. Самигов и др. // Universum: Технические науки: электрон. научн. Журн – 2015. – №10(21). – 12 с.
80. Саркисов, Ю. С. О некоторых аспектах применения наноматериалов и нанотехнологий в строительстве [Текст] / Ю. С. Саркисов, Н. О. Копаница, А. В. Касаткина // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – №4. – С. 226-234.
81. Сейитмырадов, С. Пластификаторы и суперпластификаторы бетонных смесей [Текст] / С. Сейитмырадов, О. Батыров, А. Аннамаммедов, С. Джумамамырадов // Инновационная наука. – 2023. – №4-2. – С. 49-50.
82. СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. – Введ. 2018-06-12. – М.: Стандартиформ, 2018. – 74 с.
83. СП 52-104-2006. Сталефибробетонные конструкции. – Введ. 2018-09-01. – М.: Стандартиформ, 2010. – 67 с.
84. Страхова, Н. А. Композиционные материалы специального назначения [Текст] / Н. А. Страхова, Б. Б. Утегенов, Н. А. Белова, Л. П. Кортovenko // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2020. – №2(32). – С. 12-15.
85. Строкова, В. В. Технологии золь-гель синтеза нанокремнезема как модификатора материалов на основе цемента. Форсайт-анализ [Текст] / В. В. Строкова, В. В. Нелюбова, Е. О. Кузьмин, И. Г. Рыльцова, Е. Н. Губарева, П. С. Баскаков // Строительные материалы. – 2023. – №3. – С. 43–72.
86. Сухно, И. В. Углеродные нанотрубки [Текст] / И. В. Сухно, В. Ю. Бузько // Краснодар: изд-во КубГУ. – 2008. – 55 с.
87. Талантова, К. В. Строительные конструкции с применением композиционных материалов на основе бетона [Текст] / К. В. Талантова // Известия

Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС. — 2025. — Т.22. — С. 206–214. 10.20295/1815-588X-2025-1-206-214.

88. Ткачев, А. Г. Аппаратура и методы синтеза твердотельных наноструктур [Текст] / А. Г. Ткачев // Учебн. Пособие. — М.: изд-во машиностроение — 2007. — 170 с.

89. Ткачев, А. Г. Оценка влияния модификатора на основе углеродных нанотрубок с сурфактантами на физико-механические характеристики строительных композитов [Текст] / А. Г. Ткачев, Р. Д. А. Слдозян, З. А. Михалева, Ю. Н. Толчков // Вестник Тамбовского государственного технического университета. — 2019. — Т. 25. № 4. — С. 660-670.

90. Толстой, А. Д., Высокопрочные бетоны на композиционных вяжущих с применением техногенного сырья [Текст] / А. Д. Толстой, В. С. Лесовик, К. Ю. Новиков // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. — 2016. №2(17). — С. 174-180.

91. Толчков, Ю. Н. Анализ структурных параметров углеродных наноматериалов «Таунит» методом комбинационного рассеяния света [Текст] / Толчков Ю.Н. // Материаловедение. — 2022. — № 10. — С. 38-47.

92. ТУ 1211-205-46854090-2005. Фибра стальная проволочная для армирования бетона. — Введ. 2005-06-01. — М.: ЗАО Северсталь-Метиз, 2005. — 9 с.

93. Урханова, Л. А. Бардаханов Базальтофибробетон с улучшенными физико-механическими и эксплуатационными свойствами с применением нанодисперсных модификаторов [Текст] / Л. А. Урханова, С. А. Лхасаранов, В. Е. Розина, С. Л. Буянтуев, С. П. Бардаханов // Вестник ИрГТУ — 2014. — №11(94).

94. Хамидов, А., Строительные материалы на основе золо-шлаковых щелочков [Текст] / А. Хамидов, С. Хакимов, М. Тургунбаева // ТЕСНика — 2023. — №2(11). — 4 с.

95. Харченко, А. И., Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе композиционных вяжущих [Текст] / А. И. Харченко, В. А. Алексеев, И. Я. Харченко, Д. А. Баженов // Вестник МГСУ. — 2019. — №3(125). — С. 322-331.

96. Хикс, Ч. Основные принципы планирования эксперимента [Текст] / Ч. Хикс // – М.: Мир – 1973. – 200 с.
97. Чайка, В. А. Медведская Применение механохимической обработки графита в планетарных шаровых мельницах для получения легированных кремнием углекомполитных окатышей [Текст] / В. А. Чайка, В. В. Савин, Л. А. Савина, А. В. Осадчий, И. С. Жеребцов, П. Н. Медведская // Известия ВУЗов. Химия и химическая технология. – 2018. – №11. – 38-42.
98. Чернышов, Е. М. Концепции и основания технологий наномодифицирования структур строительных композитов. Часть 3. Эффективное наномодифицирование систем твердения цемента и структуры цементного камня (критерии и условия) [Текст] / Е. М. Чернышов, О. В. Артамонова, Г. С. Славчева // Строительные материалы. – 2015. – №10. – С. 54-64.
99. Широкова, Е. С. Использование продуктов химической переработки полиэтилентерефталата для модификации битумов [Текст] / Е. С. Широкова, М. А. Вохмянин // Изв. вузов. Химия и хим. технология. – 2025. – Т.68. – №1. – С. 93–100. 10.6060/ivkkt.20256801.7137.
100. Шлыков, Н. Д. Хранение и восстановление активности цемента [Текст] / Н. Д. Шлыков // ИВД – 2019. – №3(54). – 7 с.
101. Щербань, Е. М. Влияние различных видов фибры на физико-механические свойства центрифугированного бетона [Текст] / Е. М. Щербань, С. А. Стельмах, М. П. Нажуев, А. С. Насевич, В. Е. Гераськина, А.У.-Б. Пошев // Вестник Евразийской науки – 2018. – №6. – 7 с.
102. Щукин, Е. Д. Коллоидная химия [Текст] / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина // М.: Высшая школа. – 2004. – 445 с.
103. Яковлев, Г. И. Влияние дисперсий многослойных углеродных нанотрубок на физико-механические характеристики и структуру строительной керамики [Текст] / Г. И. Яковлев, Ю. Н. Гинчицкая, О. Кизиневич, В. Кизиневич, А. Ф. Гордина // Строительные материалы. – 2016. – №8. – С. 25–29.

104. Яковлев, Г. И. Мелкозернистый бетон, модифицированный суспензией хризотилowych нановолокон [Текст] / Г. И. Яковлев, Р. Дрохитка, Г. Н. Первушин, В. П. Грахов, З. С. Саидова, А. Ф. Гордина, А. В. Шайбадуллина, И. А. Пудов, А. Э. М. М. Эльрефаи // Construction materials. – 2019. – №1-2. – С. 4-10.

105. Яковлев, Г. И. Модификация цементных бетонов многослойными углеродными нанотрубками [Текст] / Г. И. Яковлев, Г. Н. Первушин, А. Корженко, А. Ф. Бурьянов, И. А. Пудов, А. А. Лушникова // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С. 47–51.

106. Ajayan, P. M. Nanotubes from carbon [Text] / P. M. Ajayan // Chemical Reviews. – 1999. – P. 1787-1799.

107. Bezgodov, I. M. Relationship between strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting concrete [Text] / I. M. Bezgodov, S. S. Kaprielov, A.V. Sheynfeld // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2022. – Vol.18. – №2. – pp. 175–183.

108. Bihari, P. Optimized dispersion of nanoparticles for biological in vitro and in vivo studies [Text] / P. Bihari, M Vippola, S. Schultes et al. // Particle and Fibre T. – 2008. – Vol.5. – P.14.

109. Cherkashin, A. V. Mechanical properties of nanocarbon modified cement [Text] / A. V. Cherkashin, K. A. Pykhtin, Y. E. Begich, P. A. Sherstobitova, T. S. Koltsova // Magazine of Civil Engineering. – 2017. – №4(72). – pp. 54-61.

110. Dag, S. Adsorption and dissociation of hydrogen molecules on bare and functionalized carbon nanotubes [Text] / S. Dag, Y. Ozturk, S. Ciraci, T. Yildirim // Phys. Rev. B. – 2005. – Vol.72. – №15. – pp. 155-404.

111. Gowripalan, N. Autogenous Shrinkage of Concrete at Early Ages [Text] / N. Gowripalan // 25th Australasian Conference on Mechanics of Structures and Materials. Singapore: Lecture Notes in Civil Engineering, Springer, 2020.

112. Hawreen, A. Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Diferent Types of Carbon Nanotubes [Text] / A. Hawreen, J. Bogas, R. Kurda // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2019. – Vol.44. – pp. 8361-8376.

113. Hou, P. Modification effects of colloidal nano SiO₂ on cement hydration and its gel property [Text] / P. Hou, S. Kawashima, D. Kong, Corr. David, J. Qian, S.P. Shah // Composites, Part B. – 2013. – Vol.45. – pp. 440-448.

114. Khurshed, A. S. Synthesis of carbon nanotubes by catalytic chemical vapour deposition: A review on carbon sources, catalysts and substrates [Text] / A. S. Khurshed, A. T. Bilal // Materials Science in Semiconductor Processing. – 2016. – Vol. 41. – pp. 67-82.

115. Konsta-Gdoutos, M. S. Highly dispersed carbon nanotube reinforced cement based materials [Text] / M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, S. P. Shah // Cement and Concrete Research. – 2010. – Vol.40. – pp. 1052–1059.

116. Li, Z. Multifunctional cementitious composites modified with nano titanium dioxide: a review [Text] / Z. Li, S. Ding, X. Yu, B. Han, J. Ou // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing – 2018. – Vol.111. – pp. 115–137.
10.1016/j.compositesa.2018.05.019

117. Liu, T. Dispersion of carbon nanotubes by the branched block copolymer Tetronic 1107 in an alcohol–water solution [Text] / T. Liu, G. Xu, J. Zhang, H. Zhang, J. Pang // Colloid and Polymer Science. – 2013. – Vol. 291. – № 3. – pp. 691-698.

118. Madani, H. The pozzalanic reactivity of monodispersed nanosilica hydrosols and their influence of the hydration characteristics of Portland cement [Text] / H. Madani, A. Bagheri, T.Parhizkar // Cement and Concrete Research. –2012. – Vol. 42. – P.1563-1570.

119. Mann, S. Nanotechnology and Construction [Text] / S. Mann // Nanoforum.org. European Nanotechnology Gateway. – 2006. – 55 c.

120. Marushchak, U. Development of nanomodified rapid hardening fiberreinforced concretes for special-purpose facilities [Text] / U. Marushchak, M. Sanytsky, S. Korolko, Yu. Shabatura, N. Sydor // БЕЖИТ – 2018. – №6(92). – pp. 34-41.

121. Mischenko, M. V. Activation of technological processes of materials in the device rotary electromagnetic field. [Text] / M. V. Mischenko, M. M. Bokov, M. E. Grishaev // Technical Sciences – 2015. – №2. – pp. 3508–3512.

122. Ramezani, M. Carbon nanotube reinforced cementitious composites: A comprehensive review [Text] / M. Ramezani, A. Dehghani, M. M. Sherif // Construction and Building Materials – 2022. – Vol.315. – 125100. 10.1016/j.conbuildmat.2021.125100

123. Ruoff, R. S. Mechanical properties of carbon nanotubes: theoretical predictions and experimental measurements [Text] / R. S. Ruoff, D. Qian, W.K. Liu // C. R. Physique. – 2003. – No. 4. – P.993-1008.

124. Saran, N. Fabrication and characterization of thin films of single-walled carbon nanotube bundles on flexible plastic substrates [Text] / N. Saran, K. Parikh, D. S. Suh et al. // J. Am. Chem. Soc. – 2004. – Vol. 126. – №14. – pp. 4462-4463.

125. Shan, S. P. Nanoscale modification of cementitious materials [Text] / S. P. Shan, M. S. Konsta-Gdoutos, Z. S. Metaxa, P. Mondal // Proceeding of the Third International symposium on nanotechnology in construction. Springer. – 2009. – P. 125-130.

126. Stefanidou, M. Influence of nano-SiO₂ on the Portland cement pastes [Text] / M. Stefanidou, I. Papayianni // Composites Part B. Engineering. – 2012. – Vol.43. – pp. 2706-2710.

127. Taurozzi, J. S. Ultrasonic dispersion of nanoparticles for environmental, health and safety assessment— Issues and recommendations [Text] / J. S. Taurozzi, V. A. Hackley, M. R. Wiesner // Nanotoxicology. – 2011. – Vol.5, №.4. – pp. 711–729.

128. Zapata, L. E. Rheological performance and compressive strength of superplasticized cementitious mixtures with micro/nano SiO₂ additions [Text] / L. E. Zapata, G. Portela, O. M. Suarez, O. Carrasquillo // Construction and Building Materials. – 2013. – Vol. 41. – P. 708-716.

Приложение 1



Приложение 2

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

Статус: действует (последнее изменение статуса: 24.12.2024)

(19)

RU⁽¹¹⁾ 2 832 473⁽¹³⁾ C1

(51) МПК

C04B 28/02 (2006.01)

(52) СПК

C04B 28/02 (2024.08); C04B 40/00 (2024.08); C04B2103/32 (2024.08); C04B 24/16 (2024.08); C04B 24/26 (2024.08); B82B 3/00 (2024.08); C04B2111/20 (2024.08)

(21)(22) Заявка: 2024121818, 31.07.2024

(24) Дата начала отсчета срока действия
патента:
31.07.2024

Дата регистрации:
24.12.2024

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 31.07.2024

(45) Опубликовано: 24.12.2024 Бюл. № 36

(56) Список документов, цитированных в
отчете о поиске: RU 2482086 C1,
20.05.2013. RU 2421423 C2, 20.06.2011.
RU 2718443 C1, 06.04.2020. RU 2559269
C2, 10.08.2015. RU 2355656 C2,
20.05.2009. EP 1958926 A1, 20.08.2008.

Адрес для переписки:

400005, г. Волгоград, пр-т им. В.И.
Ленина, 28, ФГБОУ ВО "ВолгГТУ",
Кузьмин Сергей Викторович

(72) Автор(ы):

Перфилов Владимир Александрович (RU),
Ляшенко Дмитрий Александрович (RU),
Николаев Максим Евгеньевич (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования "Волгоградский государственный
технический университет" (ВолгГТУ) (RU)

(54) Способ получения мелкозернистой наномодифицированной бетонной смеси

Приложение 3



ООО «Моцарта Мастерские»

ОГРН 1173443010399, ИНН 3461061917
 р/с № 40702810006590000015 Фиднал «Центральный» Банка ВТБ (ПАО) в г. Москве
 адрес: 400080, г. Волгоград, ул. Моцарта 45 а; телефон: (8-960) 881-80-90;
 почта: 985289@mail.ru

Утверждаю
 Заместитель директора
 ООО «Моцарта Мастерские»

 /Михина Ю.В./
 15.05.2025 г.

АКТ

О внедрении научно-исследовательской работы

Мы нижеподписавшиеся, заместитель директора ООО «Моцарта Мастерские» Михина Юлия Вячеславовна и мастер Колесников Юрий Валентинович составили настоящий акт о том, что при устройстве стяжки для пола толщиной 50 мм на объекте: здание цеха нарезки стекла с пристройкой, расположенной по адресу: город Волгоград, ул. Моцарта, д. 45 "А", состоящего из двух производственных помещений, была использована бетонная стяжка марки М300, дисперсно-армированная стальным волокном, и углеродным наномодификатором состоящий из следующих компонентов:

Цемент ПЦ400-Д0 – 302 кг/м³;

Щебень – 1080 кг/м³;

Песок – 777 кг/м³;

Вода – 212 л/м³;

Фибра стальная с диаметром 1 мм и длиной 54 мм - 43,2 кг/м³;

Углеродные нанотрубки – 0,015 кг/м³;

Суперпластификатор – 1,5 кг/м³.

Данный состав был разработан аспирантом кафедры «Нефтегазовые сооружения» Волгоградского государственного технического университета института архитектуры и строительства Ляшенко Дмитрием Александровичем. Общая площадь покрытия составил 3040,8 м². Экономический эффект на 1 м³ бетонной смеси составил 331 руб. за счет уменьшения количества цемента. Общий экономический эффект от использования согласно утвержденным сметным расчетам (Приложение к настоящему акту) составил 868 387 рублей.

Данный эффект был достигнут за счет отказа от использования технологии армирования бетонной стяжки металлическими сетками и как следствие снижение материалоемкости и трудоемкости.

Мастер



/Колесников Ю.В./

Гранд-СМЕТА

УТВЕРЖДАЮ:
Заведующий директором
ООО «Миллер» на территории
Миллерово
15.05.2025 г.
Здание цеха нарезки стекла с пристройкой, расположенной по адресу: город Волгоград, ул. Мокрый Д. 45 "А"
(наименование объекта)

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕСУРСНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ №
(с оглядкой смета)

на устройство полов
(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание:
Сметная стоимость строительных работ 2296,84 тыс. руб.
Средства на оплату труда 465,55 тыс. руб.
Сметная трудоемкость 945,923 чел.час
Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 2 квартал 2025г.

№ п/п	Обоснование	Наименования	Ед. изм.	Ко т.		Сметная стоимость в текущих (прогнозных) ценах, руб.	В том числе				Т/з осн. раб.		
				мат.	маш.		на од.	общая	З.н.З.п.	Эк. маш.		З.н.Маш.	Мат.
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Раздел 1. ПОЛЫ													
1 объект													
1. Стройство: покрытие: бетонных толщиной 20 см — 100 м2. Общая площадь покрытия 283 м2													
ГЭСН 11-01-015-03	1-100-22	Затрата труда рабочих (Средний разряд - 2,2)	100 м2 ст.з.р.	25,538	25,538 / 100	1016088	23352	36185,8			680050	731,408	33,819
2	91.21.22-61	Затрата труда машинистов	чел.час	25,90	686,172	402,71	276671						
		Погрузки однокошковые пневмоколесные, номинальная вместимость основного ковша 2,6 м3, грузоподъемность 1 т	чел.час маш.-ч	1,74	44,1672	386,63	17181,2	17181,2			15905		
91.06.06-48		Подъемники однокошковые, грузоподъемность до 500 кг, высота подъема 45 м	маш.-ч	0,75	10,1555	27,23	521,933				521,933		

Гранд-СМЕТА

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	91.21.22-438	Пылесосы промышленные, мощность до 2000 Вт	мощ.-ч	0,7	17,5766	3,23	58,814		58,814				
	91.07.04-02	Вибраторы поверхностные	мощ.-ч	2,8	71,5064	5312,11	379852				379852		
	04.1.02.05	Смесь бетонная тяжелого бетона	м3	2,04	52,05752	581	302687				302687		
	01.7.03.01-	Вода	м3	3,85	98,5213	35,71	3511,05				3511,05		
	0001												
	Устройство покрытия: на каждые 5 мм изменения толщины покрытия, добавлять к норме 11-01-015-01 — 100 м2												
	ГЭСН 11-01-	до толщ. 50 мм - увеличение на 20 мм	100 м2	25,538	25,538		182986	12264,1	95095,2	0	75806,5	30,8456	2,1022
	015-04	Затраты труда рабочих (Средний)	ставки	1,01	2553,8/100	402,74	10388	10388					
	1-100-22	разряд - 2,2)	чел.час		25,75338								
	2	Затраты труда машинистов	чел.час	0,19	4,85222	368,63	1876,11	1876,11					
	91.06.05-48	Подъемники одноиментовые, грузоподъемность до 500 кг, вых. ота	мощ.-ч	0,19	4,85222	27,23	132,223		132,223				
		подъем в 45 м											
	91.07.04-02	Вибраторы поверхностные	мощ.-ч	0,7	17,5766	5312,11	94983		14983				
	04.1.02.05	Смесь бетонная тяжелого бетона	м3	0,51	13,05438	580	75606,5				75606,5		
		Сумма по 6 слоев по 5 мм.						85849	615567	0	529246	214,519	24,716
	Итого прямые затраты по смете в текущих ценах												
	Итого по смете:												
	Материалы						2296849	293852	36185,8		686050		
	ОС						1215295						
	Машин и мех. износ						379701						
	НДС 20%						701852						
							459370						
	Всего по смете						2296849					945,928	59,535

Гранд-СМЕТА

УТВЕРЖДАЮ:
Заместитель директора
ООО «Мощамастерские»
Мощама Ю.В.
[Подпись]
[Печать]

Здание цеха нарезки стекла с пристройкой, расположенной по адресу: город Волгоград, ул. Мошата, д. 45 "А"
(наименование объекта)

2025 г.

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕСУРСНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ № _____
(локальная смета)

на устройство полов
(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание:
Сменная стоимость строительных работ _____ 3026,313 тыс. руб.
Средства на оплату труда _____ 713,137 тыс. руб.
Сменная трудоемкость _____ 1700,63 чел.час
Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на _____ 2 квартал 2025г.

№ п/п	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.		Сметная стоимость, в том числе (прогнозные) цены, руб.							Т/з осн. раб.	Т/з мех.
				на ед.	всего	на ед.	общая	Эк. 3/м	Эк. Маш.	3/м Мех	Мат			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
Раздел 1. ПОЛЫ														
1 объект														
Армирование														
ГЭСН08-02-007-01	Армирование полов		1 т		11,8	2050,57	729990	147598	3433,02	0	478965	754,728	6,372	
В ред. пр. 1/б			мет. плечес ких изделий		2050,57									
253														
Минералов РФ														
	Затраты труда рабочих-строителей (ср. 2,2)		чел. час	63,7	752,014	327,5	246360	146360				752,014		
	Затраты труда машинистов		чел. час	0,23	2,714	451,93	1226,54	226,54				2,714		
1. 020129	Краны, зашнурованные при работе на других видах строительства 8 т		маш. ч	0,23	2,714	622,62	1689,79	1689,79				2,714		
2. 400001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т		маш. ч	0,31	3,658	477,92	1748,23	1748,23					3,358	

Гранд-ЭМЕТ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Прайс	Сетка гладкая		м ²		2809,78 1053,871	170,5	478965				478965		
! строение токрытий: бетонных тощиной 20 см — 100 м ² . Общая площадь покрытия 2553,8 м ²													
ГЭСН 11-01-0			100 м ²	25,538	25,538		1015567	293852	36185,8	0	685529	731,408	33,819
015-03			ст.ж.к		2553,8/100								
1-100-22	Затраты труда рабочих (Средняя разряд - 2,2)		ч.ч.ч.с	26,90	686,5722	402,74	276671						
2	Затраты труда машинистов		ч.ч.ч.с	1,74	44,45612	386,65	17181,2						
91.21.22-61	Погрузки однокошковые пневмоколесные, номинальная вместимость основного ковша 2 м ³ , грузоподъемность 1 т		м.ш.-ч	0,99	25,26262	1408,23	35605		15605				
91.06.06-48	Подъемники однокошковые, грузоподъемность до 500 кг, выката подвеса 45 м		м.ш.-ч	0,75	19,1535	27,25	521,933		521,933				
91.21.22-38	Пылесосы промышленные, мощность до 2000 Вт		м.ш.-ч	0,7	17,8766	3,23	58,814		58,814				
91.07.04-02	Вибраторы поверхностные		м.ш.-ч	2,8	71,064	5312,11	379852				379852		
04.1.02.01	Смесь бетонная тяжелого бетона		м ³	2,04	52,06752	5803	302166				302166		
01.7.03.01-0001	Вода		м ³	3,85	96,3213	35,71	3511,05				3511,05		
! строение токрытий: на каждые 5 см изменения толщины покрытия, добавлять или исключать к норме 11-01-015-01 — 100 м ²													
ГЭСН 11-01-0	до толщ. 50 мм - увеличение на 20 мм		100 м ²	25,538	25,538		182966	12264,1	95095,2	0	75606,5	30,6456	2,1022
015-04			ст.ж.к		2553,8/100								
1-100-22	Затраты труда рабочих (Средняя разряд - 2,2)		ч.ч.ч.с	1,01	25,71338	402,74	10398						
2	Затраты труда машинистов		ч.ч.ч.с	0,19	4,85222	386,65	1876,11						
91.06.06-48	Подъемники однокошковые, грузоподъемность до 500 кг, выката подвеса 45 м		м.ш.-ч	0,19	4,85222	27,25	132,223		132,223				
91.07.04-02	Вибраторы поверхностные		м.ш.-ч	0,7	17,8766	5312,11	94963		94963				
04.1.02.01	Смесь бетонная тяжелого бетона		м ³	0,51	13,07438	5803	75606,5				75606,5		
	Сумма по 6 строкам по 5 мм.							85849	615667	0	529246	214,519	24,716
Итого прямые затраты по смете в текущих ценах													
Итого по смете:													
Материалы													
ФОС													
Машин и механизмы													
НДС 20%													
Всего по смете													
							3026318					1700,66	64,907

Гранд-СМЕТА

УТВЕРЖДАЮ:
Заместитель директора
ООО «Мастерта-мастерские»
Михайлов Ю.В.
15.10.2025
2025 г.

Здание цеха нарезки стекла с пристройкой, расположенной по адресу: город Волгоград, ул. Мухоморова, д. 45-А
(наименование объекта)

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕСУРСНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ №
(локальная смета)

на устройство полов
(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание:
Сметная стоимость строительных работ 254,479 тыс. руб.
Средства на оплату труда 56,669 тыс. руб.
Сметная трудоемкость 98,031 чел.час
Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 2 квартал 2025г.

№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.		Сметная стоимость в текущих (прогнозных) ценах, руб.								Т/з осн. раб.	Т/з мех
				на ед.	всего	на ед.	общая	в том числе				Мат			
								Осн	З/п	Эк.Маш.	З/пМех				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Раздел 1. ПОЛЫ															
1 объект															
Устройство покрытий: бетонных толщиной 20 мм — 100 м2. Общая площадь покрытия 283 м2															
ГЭСН 11-01-015-03	0		100 м2 стяжки	2,83	2,83		112569	32563,3	4009,93		0	75995,9	81,0512	14,8292	
1-100-22		Затраты труда рабочих (Средний разряд - 2,2)	чел.час	26,90	76,127	402,74	30659,4	30659,4							
2		Затраты труда машинистов	чел.час	1,74	4,9242	386,65	1903,94	1903,94							
91.21.22-161		Погрузчики однокошечные универсальные фронтальные пневмоколесные, номинальная вместимость основного кузова 2,6 м3, грузоподъемность 5 т	маш.-ч	0,89	2,8017	1408,28	3945,58	3945,58		3945,58					
91.06.06-048		Подъемники однокошечные, грузоподъемность до 500 кг, высота подъема 45 м	маш.-ч	0,75	2,1225	27,25	57,8381					57,8381			

Гранд-СМЕТА

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	91.21.22-4.38	Пылесосы промышленные, мощность до 2000 Вт	мш.-ч	0,7	1,981	3,29	6,51749		6,51749				
	91.07.04-4.02	Вибраторы поверхностные	мш.-ч	2,8	7,924	5312,14	42093,4				42093,4		
	04.1.02.05	Смесь бетонная товарного бетона	м3	2,04	5,732	5805	33513,4				33513,4		
	01.7.03.01-	Вода	м3	3,85	10,6955	35,71	389,078				389,078		
	0001												
	Устройство покрытий: на каждые 5 мм изменения толщины покрытия добавлять или исключать к норме 11-01-015-01 — 100 м2												
	ГЭСН 11-01-015-04	до толщ. 50 мм - увеличение на 20 мм стяжки	100 м2	2,83	2,83		20275,4	1359,05	10538	0	8378,36	3,396	27,7677
	1-100-22	Затраты труда рабочих (Средний разряд - 2,2)	чел.час	1,01	2,6583	402,74	1151,15	1151,15					
	2	Затраты труда машинистов	чел.час	0,19	0,5377	356,65	207,902	207,902					
	91.06.06-4.48	Подъемники одноимтовые, грузоподъемность до 500 кг, вынота подъема 45 м	мш.-ч	0,19	0,5377	27,25	14,6523		14,6523				
	91.07.04-4.02	Вибраторы поверхностные	мш.-ч	0,7	1,981	5312,14	10523,3		10523,3				
	04.1.02.05	Смесь бетонная товарного бетона	м3	0,51	1,433	5905	8378,36				8378,36		
	Суммарно по 6 слоев по 5 мм.												
	Итого прямые затраты по смете в текущих ценах												
	Итого по смете:												
	Материалы												
	ФСТ												
	Машины и механизмы												
	НДС 20%												
	Всего по смете												
							254497	32553,3	4609,93	0	41891,8	16,98	138,939
							117886						
							51590,1						
							56699,9						
							50899,4						
							254497					98,0312	153,768

Грант-СМЕТА

УТВЕРЖДАЮ:
Заместитель директора
ООО «Мощарт мастерскую»
Мухомов Ю. В.
2025 г.

Здание цеха нарезки стекла с пристройкой, расположенной по адресу: город Волгоград, ул. Моцарта, д. 45 "А"
(наименование объекта)

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕСУРСНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ №
(локальная смета)

на устройство полов
(наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание:
Сметная стоимость строительных работ 335,2 тыс. руб.
Средства на оплату труда 78,866 тыс. руб.
Сметная трудоемкость 181,971 чел.час
Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 2 квартал 2025г.

№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.		Сметная стоимость в текущих (прогнозных) ценах, руб.		В том числе				Т/з осн. раб.	Т/з мех.
				на ед.	всего	на ед.	общая	Осн.З/п	Эк.Маш.	З/пМех	Мат		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Раздел 1. ПОЛЫ													
1 объект													
Армирование													
ГЭСН03-02-007-01	Армирование полов	1 т	металлических изделий		1,307	2050,57	80731,9	27276,5	378,765	0	53076,7	83,148	0,702
В ред. пр. № 253 Минрегиона РФ					331,412,7000								
	Затраты труда рабочих-строителей (ср. 2,2)	чел.час	63,73		82,849	327,6	27141,3	27141,3				82,849	
	Затраты труда машинистов	чел.час	0,23		0,299	451,93	135,127	135,127				0,299	
1. 020129	Краны башенные при работе на других видах строительства 8 т	маш.-ч	0,23		0,299	622,62	186,163		186,163				0,299
2. 400001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т	маш.-ч	0,31		0,403	477,92	192,602		192,602				0,403

Гранд-СМЕТА

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Прайс	Сетка класочная	м2		311,3	170,5	53075,7				53075,7		
Устройство покрытий: бетонных толщиной 20 мм — 100 м2. Общая площадь покрытия 283 м2													
ГЭСН 11-01-015-03	0		100 м2	2,83	2,83		112540	32563,3	4009,93	0	75967	81,0512	14,8292
1-100-22		Затраты труда рабочих (Средний разряд - 2,2)	чел.час	28,90	76,127	402,74	30659,4						
2		Затраты труда машинистов	чел.час	1,74	4,9242	386,65	1903,94						
91.21.22-161		Погрузчики одноковшовые универсальные фронтальные пневмоколесные, номинальная вместимость основного ковша 2,6 м3, грузоподъемность 5 т	маш.-ч	0,99	2,8017	1408,28	3945,38		3945,38				
91.05.06-048		Подъемники одноамбовые, грузоподъемность до 500 кг, высота подъема 45 м	маш.-ч	0,75	2,1225	27,25	57,8381		57,8381				
91.21.22-638		Пылесосы промышленные, мощность до 2000 Вт	маш.-ч	0,7	1,981	3,29	6,51749		6,51749				
91.07.04-002		Вибраторы поверхностные	маш.-ч	2,8	7,924	5312,14	42033,4				42033,4		
04.1.02.05		Смесь бетонная тяжелого бетона	м3	2,04	5,7732	5800	33434,6				33434,6		
01.7.03.01-0001		Вода	м3	3,85	10,8955	35,71	389,078				389,078		
Устройство покрытий: на каждые 5 мм изменения толщины покрытия добавлять или исключать к норме 11-01-015-01 — 100 м2													
ГЭСН 11-01-015-04		до толщ. 50 мм - увеличению на 20 мм	100 м2	2,83	2,83		20275,4	1359,05	10538	0	8378,36	3,396	27,7677
1-100-22		Затраты труда рабочих (Средний разряд - 2,2)	чел.час	1,01	2,8583	402,74	1151,15						
2		Затраты труда машинистов	чел.час	0,19	0,5377	386,65	207,902						
91.05.06-048		Подъемники одноамбовые, грузоподъемность до 500 кг, высота подъема 45 м	маш.-ч	0,19	0,5377	27,25	14,6523		14,6523				
91.07.04-002		Вибраторы поверхностные	маш.-ч	0,7	1,981	5312,14	10523,3		10523,3				
04.1.02.05		Смесь бетонная тяжелого бетона	м3	0,51	1,4433	5800	837,36				8378,36		
		Суммарно 6 слоев по 5 мм.					9513,37	73766	0		58648,5	23,772	194,514
Итого прямые затраты по смете в текущих ценах													
Итого по смете:													
Материалы													
ФОТ													
Машины и механизмы													
НДС 20%													
ВСЕГО по смете													
							335200				187,971	210,045	

Гранд-СМЕТА

УТВЕРЖДАЮ:
Заместитель директора
ООО «Мощарт Мастерс»
Михаил Ю. В.
«15» 05 2025 г.

Здание цеха нарезки стекла с пристройкой, расположенной по адресу: город Волгоград, ул. Мощарта д. 45 "А" (наименование объекта)

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕСУРСНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ № (локальная смета)

на устройство полов (наименование работ и затрат, наименование объекта)

Основание:
Сметная стоимость строительных работ 183,475 тыс. руб.
Средства на оплату труда 37,188 тыс. руб.
Сметная трудоемкость 70,666 чел. час
Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 2 квартал 2025г.

№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.		Сметная стоимость в текущих (прогнозных) ценах, руб.		В том числе				Т/з осн. раб.	Т/з мех.
				на ед.	всего	на ед.	общая	Осн З/п	Эк.Маш.	З/пМех	Мат		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Раздел 1. ПОЛЫ													
1 объект													
Устройство покрытий: бетонных толщиной 20 мм — 100 м2. Общая площадь покрытия 204 м2													
ГЭСН 11-01-015-03	0		100 м2 стяжки	2,04	204/100	2,04	81166,1	23473,2	2890,55	0	54802,3	58,4256	10,6896
1-100-22		Затраты труда рабочих (Средний разряд - 2,2)	чел.час	26,90	54,876	402,74	22100,8	22100,8					
2		Затраты труда машинистов	чел.час	1,74	3,5496	386,65	1372,45	1372,45					
91.21.22-161		Погрузчики одноковшовые универсальные фронтальные пневмоколесные, номинальная вместимость основного ковша 2,6 м3, грузоподъемность 5 т	маш.-ч	0,89	2,0196	1408,28	2844,16		2844,16				
91.06.06-048		Подъемники одномачтовые, грузоподъемность до 500 кг, высота подъема 45 м	маш.-ч	0,75	1,53	27,25	41,6925		41,6925				

Гранд-СМЕТА

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	91.21.22-638	Пылесосы промышленные, мощность до 2000 Вт	маш.-ч	0,7	1,428	3,29	4,69812		4,69812				
	91.07.04-002	Вибраторы поверхностные	маш.-ч	2,8	5,712	5312,14	30342,9				30342,9		
	04.1.02.05	Смесь бетонная тяжелого бетона	м3	2,04	4,1616	5910	24178,9				24178,9		
	01.7.03.01-0001	Вода	м3	3,85	7,854	35,71	280,466				280,466		
Устройство покрытий: на каждые 5 мм изменения толщины покрытия добавлять или исключать к норме 11-01-015-01 — 100 м2													
	ГЭСН 11-01-015-04	до толщ. 50 мм - увеличение на 20 мм	100 м2	2,04	2,04		14615,5	979,671	7596,3	0	6039,52	2,448	27,6376
	1-100-22	Затраты труда рабочих (Средний разряд - 2,2)	чел.час	1,01	2,0604	402,74	829,805	829,805					
	2	Затраты труда машинистов	чел.час	0,19	0,3876	386,65	149,866	149,866	10,5621				
	91.06.06-048	Подъемники одномачтовые, грузоподъемность до 500 кг, высота подъема 45 м	маш.-ч	0,19	0,3876	27,25	10,5621						
	91.07.04-002	Вибраторы поверхностные	маш.-ч	0,7	1,428	5312,14	7585,74		7585,74		6039,52		
	04.1.02.05	Смесь бетонная тяжелого бетона	м3	0,51	1,0404	5805	6039,52			0	30197,6	12,24	138,188
		Суммарно 6 слоев по 5 мм.						6857,7	37981,5		54802,3		
Итого прямые затраты по смете в текущих ценах													
Итого по смете:													
Материалы													
ФОТ													
Машины и механизмы													
НДС 20%													
ВСЕГО по смете							183475	23473,2	2890,55			70,6656	148,878

Гранд-СМЕТА

УТВЕРЖДАЮ:
Заместитель директора
ООО «Мощарт Мастерские»
Михайлов Ю.В.
2025 г.
Мощарт 15-05
2025 г.
2025 г.

Здание цеха нарезки стекла с пристройкой, расположенной по адресу: город Волгоград, ул. Мощарта, д. 45 "А"
(наименование объекта)

ЛОКАЛЬНЫЙ РЕСУРСНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ №
(локальная смета)

на устройство полов
(наименование работ и затрат, наименования объекта)

Основание:
Сметная стоимость строительных работ 241,690 тыс. руб.
Средства на оплату труда 56,911 тыс. руб.
Сметная трудоемкость 130,778 чел.час
Составлен(а) в текущих (прогнозных) ценах по состоянию на 2 квартал 2025г.

№ пп	Обоснование	Наименование	Ед. изм.	Кол.		Сметная стоимость в текущих (прогнозных) ценах, руб.								Т/з осн. раб.	Т/з мех.
				на ед.	всего	на ед.	общая	Осн.З/м	Эк.Маш.	З/мМех	Мат				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
Раздел 1. ПОЛЫ															
1 объект															
Армирование															
ГЭСН03-02-007-01	Армирование полов		1 т		0,04 204,47±21920	2050,57	58257,1	19723	273,876	0	38260,2	60,1224	0,5076		
Б.ред. пр. № 253															
Минимальная															
РФ															
	Затраты труда рабочих-строителей (ср. 2.2)		чел.час	63,73	59,9062	327,6	19625,3	19625,3				59,9062			
	Затраты труда машинистов		чел.час	0,23	0,2162	451,93	97,7073	97,7073				0,2162			
1. 020129	Краны башенные при работе на других видах строительства 8 т		маш.-ч	0,23	0,2162	822,62	134,61		134,61				0,2162		
2. 400001	Автомобили бортовые, грузоподъемность до 5 т		маш.-ч	0,31	0,2914	477,92	139,266		139,266				0,2914		

Гранд-СМЕТА

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Прайс	Сетка кладочная	м2		224,4 РАТ.1	170,5	38260,2				38260,2		
Устройство покрытий: бетонных толщиной 20 мм — 100 м2. Общая площадь покрытия 204 м2													
ГЭСН 11-01-015-03	0		100 м2 стяжки	2,04		2,04 204/100	81124,5	23473,2	2890,55	0	54760,7	58,4256	10,6896
1-100-22		Затраты труда рабочих (Средний разряд - 2,2)	чел.час	26,90		54,876	402,74	22100,8					
2		Затраты труда машинистов	чел.час	1,74		3,5496	366,65	1372,45					
91.21.22-161		Погрузчики одноковшовые пневмоколесные, номинальная вместимость основного ковша 2,6 м3, грузоподъемность 5 т	маш.-ч	0,99		2,0196	1408,28	2844,16					
91.06.06-048		Подъемники одномачтовые, грузоподъемность до 500 кг, высота подъема 45 м	маш.-ч	0,75		1,53	27,25	41,6925	41,6925				
91.21.22-638		Пылесосы промышленные, мощность до 2000 Вт	маш.-ч	0,7		1,428	3,29	4,69812	4,69812				
91.07.04-002		Вибраторы поверхностные	маш.-ч	2,8		5,712	5312,14	30342,9			30342,9		
04.1.02.05		Смесь бетонная тяжелого бетона	м3	2,04		4,1616	5900	24137,3			24137,3		
01.7.03.01-0001		Вода	м3	3,85		7,854	35,71	280,466			280,466		
Устройство покрытий: на каждые 5 мм изменения толщины покрытия добавлять или исключать к норме 11-01-015-01 — 100 м2													
ГЭСН 11-01-015-04		до толщ. 50 мм - увеличение на 20 мм	100 м2 стяжки	2,04		2,04 204/100	14615,5	979,671	7596,3	0	6039,52	2,448	27,6376
1-100-22		Затраты труда рабочих (Средний разряд - 2,2)	чел.час	1,01		2,0604	402,74	829,805					
2		Затраты труда машинистов	чел.час	0,19		0,3876	366,65	149,866					
91.06.06-048		Подъемники одномачтовые, грузоподъемность до 500 кг, высота подъема 45 м	маш.-ч	0,19		0,3876	27,25	10,5621	10,5621				
91.07.04-002		Вибраторы поверхностные	маш.-ч	0,7		1,428	5312,14	7585,74	7585,74				
04.1.02.05		Смесь бетонная тяжелого бетона	м3	0,51		1,0404	5805	6039,52			6039,52		
Итого прямые затраты по смете в текущих ценах								6857,7	37981,5	0	30197,6	12,24	138,188
Суммарно 6 слоев по 5 мм.								23473,2	2890,55		54760,7		
Итого по смете:								241690					
Материалы								123219					
ФОТ								50053,9					
Машины и механизмы								41145,9					
НДС 20%								49338					
ВСЕГО по смете								241690				130,788	149,385