

На правах рукописи



ЛЯШЕНКО ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

Специальность 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Волгоград – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Институт архитектуры и строительства Волгоградского государственного технического университета».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Перфилов Владимир Александрович

Официальные оппоненты:

Ткач Евгения Владимировна – доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет», кафедра «Градостроительство».

Буракова Ирина Владимировна – кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тамбовский государственный технический университет», кафедра «Техника и технология производства нанопродуктов».

Ведущая организация - федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова»

Защита состоится «15» января 2026 года в 11:00 часов (по местному времени) на заседании диссертационного совета 24.2.282.06, созданного на базе ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет», по адресу: 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, ауд. Б-203.

С диссертацией можно ознакомиться в информационно-библиотечном центре ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» и на официальном сайте <https://www.vstu.ru>.

Автореферат разослан «___» ____ 20____ г.

Ученый секретарь
 диссертационного совета

Акчурин Т.К.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 материоемкости строительных конструкций. Одним из перспективных направлений для решения проблем в данной области является применение наномодифицирующих добавок для бетонов, в том числе фибробетонов с добавлением углеродных наноразмерных трубок.

Актуальность данной работы обусловлена следующими факторами:

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.

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.

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.

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.

Диссертация Ляшенко Д.А. соответствует паспорту специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки) по номенклатуре научных специальностей, Приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 24 февраля 2021 г. № 118:

П. 1. «Разработка и развитие теоретических и методологических основ получения строительных материалов неорганической и органической природы с заданным комплексом эксплуатационных свойств, в том числе специальных и экологически чистых».

П. 5. «Разработка и внедрение способов активации компонентов строительных смесей путем использования физических и химических методов, способствующих получению строительных материалов с улучшенными показателями структуры и свойств».

Степень разработанности темы

Изучением структурообразования и технологией получения наномодифицированных бетонов, на основе различных наноразмерных добавок занимались многие отечественные и зарубежные авторы: 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 авторами предлагается применять указанный термин для строительных материалов, в составе которых присутствуют наноразмерные супензии. 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.

Научная гипотеза исследований

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.

Цель исследования. Улучшение физико-механических и эксплуатационных свойств фибробетона за счет модификации структуры композита на микро- и наноуровнях путем введения в состав бетона наноразмерных углеродных трубок.

Задачи исследования

Достижение поставленной цели диссертации предполагает решение следующих научных и практических задач.

Произвести подбор наиболее эффективной пластифицирующей добавки, способствующей увеличению подвижности смеси и наилучшей диспергации наноразмерных добавок;

Исследовать влияние совместного применения наномодифицирующих добавок (углеродные нанотрубки) и пластификатора на свойства мелкозернистого бетона;

Исследовать и разработать оптимальную технологию введения малого количества вводимых добавок наномодификаторов в состав бетонной смеси;

Произвести исследования влияния наномодифицирующих добавок на структурные изменения и свойства бетонных композиций;

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

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;

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 модификации микр- 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-З» и технологии их приготовления, что способствовало модификации структуры наnanoуровне 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 и практическая 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.

Определены оптимальные составы фибробетонов, с включением наномодификаторов, которые модифицируют структуру бетона на микро- и nanoуровнях, 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.

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 868 378 рублей за счет отказа от применения арматурной сетки, в пользу применения сталефибробетона.

Положения, выносимые на защиту:

- обоснование выбора компонентов для получения наномодифицированных фибробетонов;
- результаты исследований влияния вводимой наномодифицирующей добавки на свойства мелкозернистого бетона. Приведены результаты сравнения двух технологий введения малого количества нанодобавки в состав бетона;
- результаты исследования структуры наномодифицированных бетонов с помощью методов сканирующей-электронной микроскопии и рентгенофазовой дифрактометрии;
- разработка состава фибробетонов с применением стальной и базальтовой фибры совместно с наномодификатором. Представлены полученные уравнения регрессии, описывающие влияние вводимых добавок на прочность материала;
- результаты апробации наномодифицированного сталефибробетона для обустройства стяжки пола на производственном объекте.

Личный вклад автора. 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.

Степень достоверности результатов.

- проведение исследований осуществлялось при помощи стандартных средств измерений и приборов как разрушающего (гидравлические прессы), 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 «Bruker D8 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 (The International Center for Diffraction Data).

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 международным участием, приуроченной ко Дню Российской Науки 9 февраля 2024 года, в г. Астрахань (Астраханский государственный строительный университет);

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

Публикации. Основные положения диссертации представлены в 19 опубликованных работах, в том числе 2 статьи опубликованы в журналах и сборниках, цитируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science (WoS), 4 статьи опубликованы в журналах, рецензируемых в базе данных Russian Science Citation Index, 7 статей опубликовано в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК, 2 патента на изобретение, 4 работы в сборнике научных трудов.

Исследования проводились в лабораториях и на базе аппаратурного обеспечения Волгоградского государственного технического университета Института архитектуры и строительства (ВолгГТУ ИАиС).

Внедрение результатов исследований осуществлялось на производственной базе ООО «Моцарта-мастерские» (Россия, г. Волгоград), что подтверждено соответствующими актами.

Объем и структура диссертации. Диссертация занимает 185 страниц машинописного текста и включает введение, основную часть из четырех глав, заключение, список использованной литературы из 128 источников и 3 приложения. В работе представлены 56 таблиц и 55 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении были сформулированы цель и задачи научного исследования, обоснована актуальность диссертационной работы, определена научная новизна полученных данных и их практическая значимость, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор исследований в области наномодифицирования бетонных композиций, который демонстрирует значительный потенциал применения наноразмерных добавок в области строительного материаловедения. Множество исследований свидетельствуют о высокой эффективности наноразмерных добавок, которые позволяют улучшить эксплуатационные характеристики. В частности, различные углеродные наномодификаторы при дозировке от 0,001 до 0,01% по массе цемента позволяют увеличить прочность бетона

до 40-50% при оптимальном содержании добавок. Определены наиболее эффективные методы введения малого количества наноразмерных добавок в бетон. Наиболее перспективными технологиями являются применение ультразвуковой диспергации (совместно с использованием суперпластификаторов) и механическая активация в аппаратах вихревого слоя, в частности в линейно-индукционных установках. Таким образом оптимизация составов наномодифицированных бетонов, а также технологических параметров производства позволяет получить бетоны с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Экономическая целесообразность наномодификаторов подтверждается возможностью получения материалов с заданными и существенно улучшенными характеристиками при относительно небольших затратах, а также возможностью регулировать количество цементного вяжущего без изменения прочности.

Во второй главе приведены материалы, оборудования и методики для проведения экспериментальных исследований физико-механических и эксплуатационных свойств бетона.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве вяжущего использовался портландцемент М500Д0 марки Евроцемент АО «Евроцемент групп» московского цементного завода. В качестве мелкого наполнителя был использован песок с модулем крупности 1,9, добытый ООО «Партнер групп» Песковатского карьера, Волгоградской области. В качестве крупного заполнителя применялся щебень ООО «Калининский щебеночный завод», Волгоградской области, фракция 5-20 мм.

В состав комплексной наномодифицирующей добавки входят: суперпластификатор «СП-3», производство ООО «Полипласт Новомосковск», который соответствует требованиям к суперпластифицирующим добавкам, установленным ГОСТ 24211, а также ТУ 5745-006-58042865-2014.

Углеродные наноразмерные трубы (УНТ) марки «Таунит-М», производство ООО «НаноТехЦентр», г. Тамбов. Углеродные нанотрубки «Таунит-М» с длиной до 2 мкм, внутренним диаметром 5-15 нм и внешним диаметром 10-30 нм. представляют собой полые цилиндрические отрезки, которые состоят из одного или нескольких слоев атомов углерода. Оптимальное количество вводимой добавки находится в пределах 0,01-0,001% по массе цемента.

Армирование на макроуровне происходило с помощью введения стальной и базальтовой фибры. Использованная стальная фибра была оснащена конусообразными анкерами. Диаметр фибры 1 мм, длина до 54 мм, угол раскрытия анкера 60° и диаметр шляпки 1,8 мм. 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. Эта фибра демонстрирует наивысший коэффициент удержания в бетоне среди аналогичных материалов, который достигает 95%.

В качестве базальтового фиброволокна применялась фибра с диаметром 10 мкм и длиной до 12 мм, производства ООО НПО «Вулкан» по ТУ В В.2.7-26.8-32673353-001-2007.

Определение физико-механических свойств мелкозернистого бетона и фибробетона с помощью ультразвуковых неразрушающих и механических методов производилось по: ГОСТ 10180, ГОСТ-18105, ГОСТ-17624, ГОСТ 310.4.

Для определения прочности бетона при сжатии и изгибе в возрасте 28 суток определение прочности производилось с помощью разрушающих методов, на прессах «ПИ-1» и «ВМ-3.4.3». Прочность материала при сжатии в возрасте 1,3,7,14 и 28 суток определялась неразрушающим ультразвуковым прибором - «Пульсар 1.2».

В связи с малой концентрацией нанодобавки применялись три аппарата для ее равномерного распределения по всему объему смеси. Для введения УНТ в воду затворения применялись ультразвуковые диспергаторы (УЗД) марки «УЗГ-13-0,1/22» (частота ультразвука до 22 кГц) и ультразвуковой диспергатор «UCD-950» (частота ультразвука до 25 кГц). Для введения наноразмерной добавки в сухую цементно-песчаную смесь применялся линейно-индукционный вращатель «ЛИВ».

Для оценки устойчивости суспензии воды затворения с наномодификатором использовался фотоколориметр «КФК-3».

Оценка влияния наномодифицирующей добавки на структурные изменения бетона осуществлялась с помощью сканирующей электронной микроскопии на микроскопе «Versa 3d» с кратностью до 150 000. Изменения фазового состава наномодифицированного бетона в сравнении с контрольными образцами исследовали с помощью рентгеновской дифрактометрии на дифрактометре «Bruker D8 Advance».

В третьей главе в рамках исследования была произведена выборка отечественных пластификаторов для анализа их влияния на свойства бетонной смеси. Влияние пластификаторов оценивалось с помощью применения вискозиметра Суттарда. 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. Результаты полученных данных приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристики исследуемых составов

Наименование	Расплыв 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
C-3	105	0,36	2281,25	64,3
ПФМ НЛК	106	0,36	2250,00	62,6
Линамикс 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

Для дальнейших исследований было принято решение выбрать добавку суперпластификатор «Полипласт СП-3», так как составы с применением «Реламикс Т2», «СП-4» имели практически равнозначные показатели прочности, но при этом

меньшие показатели пластичности при равноподвижности смеси. Кроме того, добавка СП-3 имеет наименьшую стоимость из представленных добавок суперпластификаторов.

На следующем этапе исследования была поставлена цель исследования эффективности применения наномодификаторов в составе бетона. Для проведения лабораторных исследований приготавливался мелкозернистый бетон на основе цементно-песчаного состава Ц:П – 1:3, с различным содержанием УНТ. Составы представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Составы исследуемых смесей

Состав	1	2	3	4	5	6	7
СП-3, % по м. Ц	-	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
УНТ, % по м. Ц	-	-	0,001	0,002	0,003	0,004	0,005
$R_{сж}$, МПа	47,4	52,6	56,6	58,9	62,1	61,5	68,2
$R_{изг}$, МПа	7,86	8,23	8,76	9,01	9,21	9,98	10,17

Введение наномодифицирующей добавки УНТ в состав мелкозернистого бетона способствовало увеличению прочностных характеристик материала. При этом, повышение имело ступенчатый вид в зависимости от количества углеродных нанотрубок. Так максимальное (состав 7) увеличение прочности при сжатии и изгибе составило 22,7% и 20% в сравнении с составом 2 (без применения УНТ) соответственно.

Была произведена **оценка методов введения** наномодифицирующей добавки в бетон. Так, в данной работе применялись методы ультразвуковой диспергации и линейно-индукционного вращения.

Технология применения **ультразвукового диспергирования** заключается в введении наномодификатора и пластифицирующей добавки в воду затворения с помощью воздействия ультразвука в течение 5 минут.

В случае с применением **линейно-индукционного вращателя** нанодобавка вводилась в сухую цементно-песчаную смесь в рабочую камеру ЛИВ, совместно с мелющими телами, где происходит обработка во вращающемся слое под действием магнитной индукции 0,1 Тл и частотой 50 Гц в течение 2 минут.

Добавка суперпластификатора вводилась в расчете 0,5% по массе цемента, а добавка 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. Полученные данные представлены на рисунках 1 и 2.

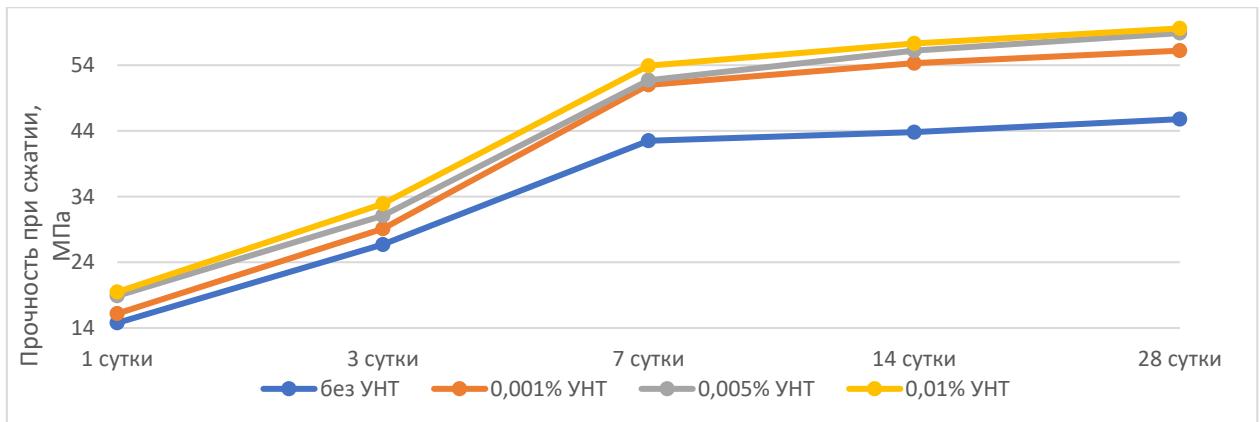


Рисунок 1 – Интенсивность набора прочности бетона (технология-УЗД)

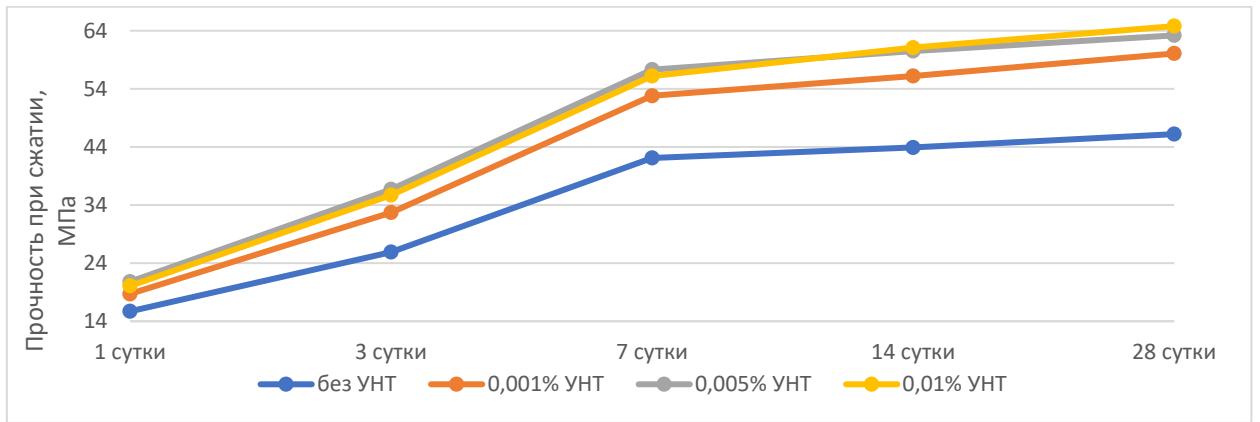


Рисунок 2 – Интенсивность набора прочности бетона (технология-ЛИВ)

При использовании ультразвукового диспергатора на 28 сутки максимальное увеличение прочности бетона при сжатии составило 30%, при изгибе - 17% в сравнении с контрольным образом (без УНТ). Для образцов наномодифицированного бетона с применением линейно-индукционного вращателя увеличение для тех-же параметров составило 35% и 29% соответственно. 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 УЗД и 25% для технологии с применением ЛИВ.

Введение наномодификатора с помощью ЛИВ способствовало получению наибольших приростов показателей прочности на всех сроках твердения бетона. Применение технологии вращающегося слоя позволяет равномерно распределить малое количество добавки по всему объему сухой смеси, а также обеспечивает дополнительный помол цементного вяжущего.

Были произведена **оценка устойчивости супензии** воды затворения и углеродных наномодификаторов с помощью фотоколориметрии. В основу метода положено свойство окрашенных растворов поглощать проходящий через него свет определенной длины волны. При оседании твердых частиц УНТ происходит уменьшение окрашенности воды затворения.

Для данного исследования необходимо сравнение интенсивности прохождения света (в %) в сравнении с контрольным образцом (вода затворения). 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. Оценивались суспензии воды + УНТ, а также воды + УНТ + СП-3 полученные при частоте ультразвукового диспергирования 20 (рис 3, 4) и 25 (рис 5,6) кГц.

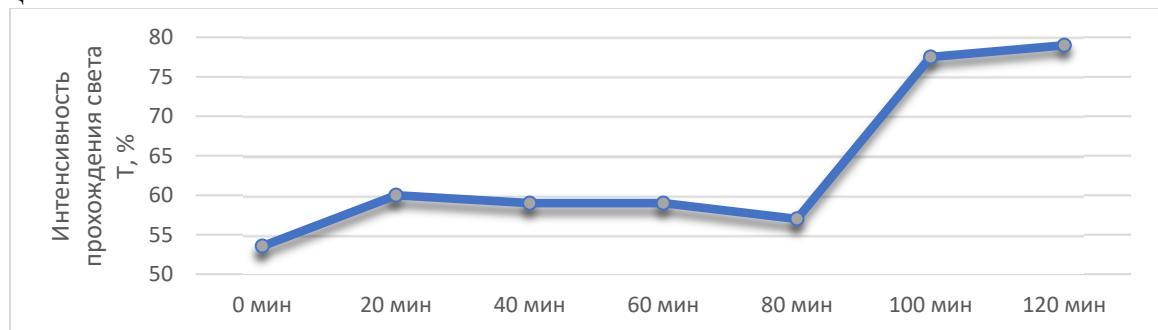


Рисунок 3 – Вода затворения + УНТ (при частоте 20 кГц)

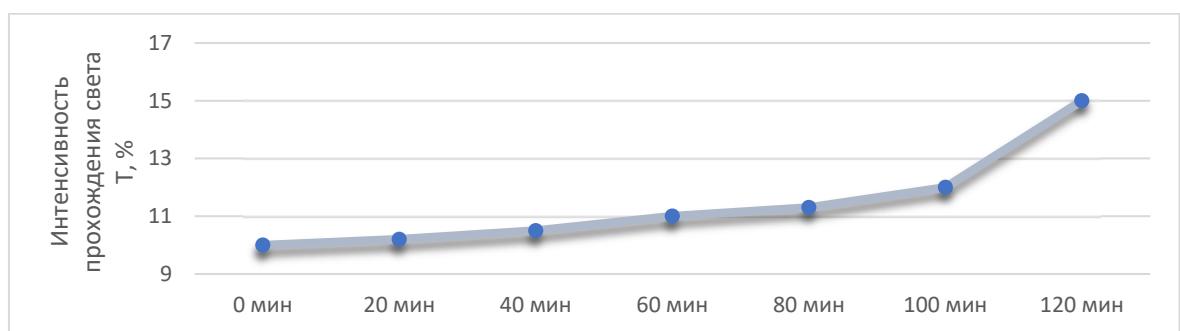


Рисунок 4 – Вода затворения + УНТ + СП-3 (при частоте 20 кГц)

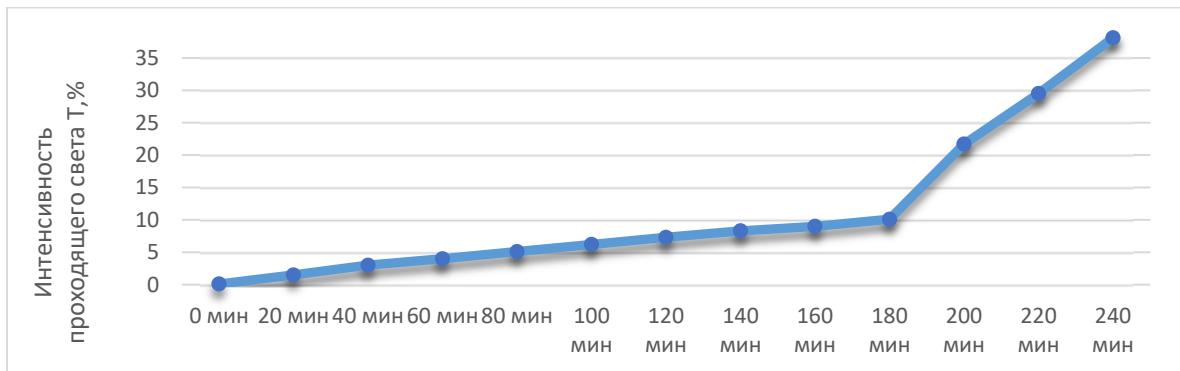


Рисунок 5 – Вода затворения + УНТ (при частоте 25 кГц)

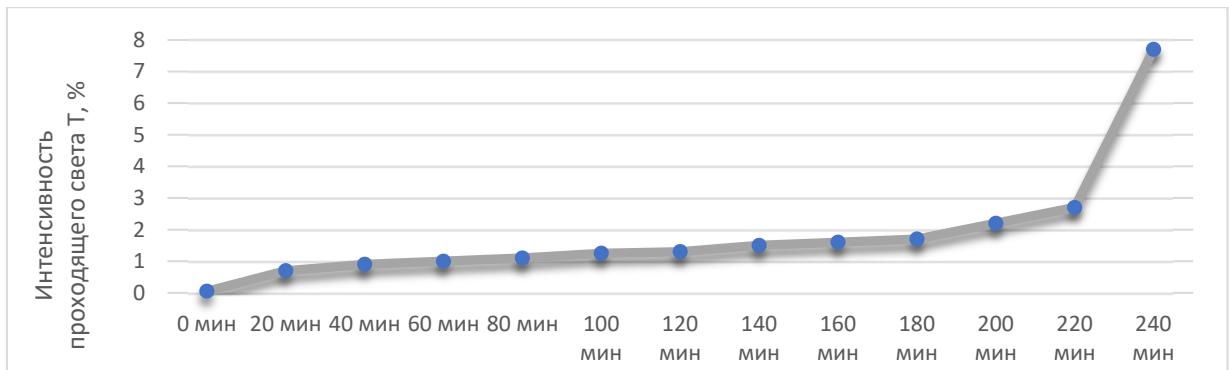


Рисунок 6 – Вода затворения + УНТ + СП-3 (при частоте 25 кГц)

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. Увеличение частоты ультразвука до 25 кГц позволило повысить время устойчивости суспензии без пластификатора до 180 минут, а с применением пластификатора до 220 минут.

Для большего понимания механизма модифицирования структуры бетона нанотрубками было произведено их исследование с помощью **сканирующей электронной микроскопии**. Оценка структуры проводилась с помощью двухлучевого СЭМ «Versa 3d». Были исследованы образцы, полученные в ходе разрушения бетона при определении предела прочности при сжатии. Отбирались фрагменты разрушенных образцов мелкозернистого бетона (с размерами до 5 мм) рис 8.

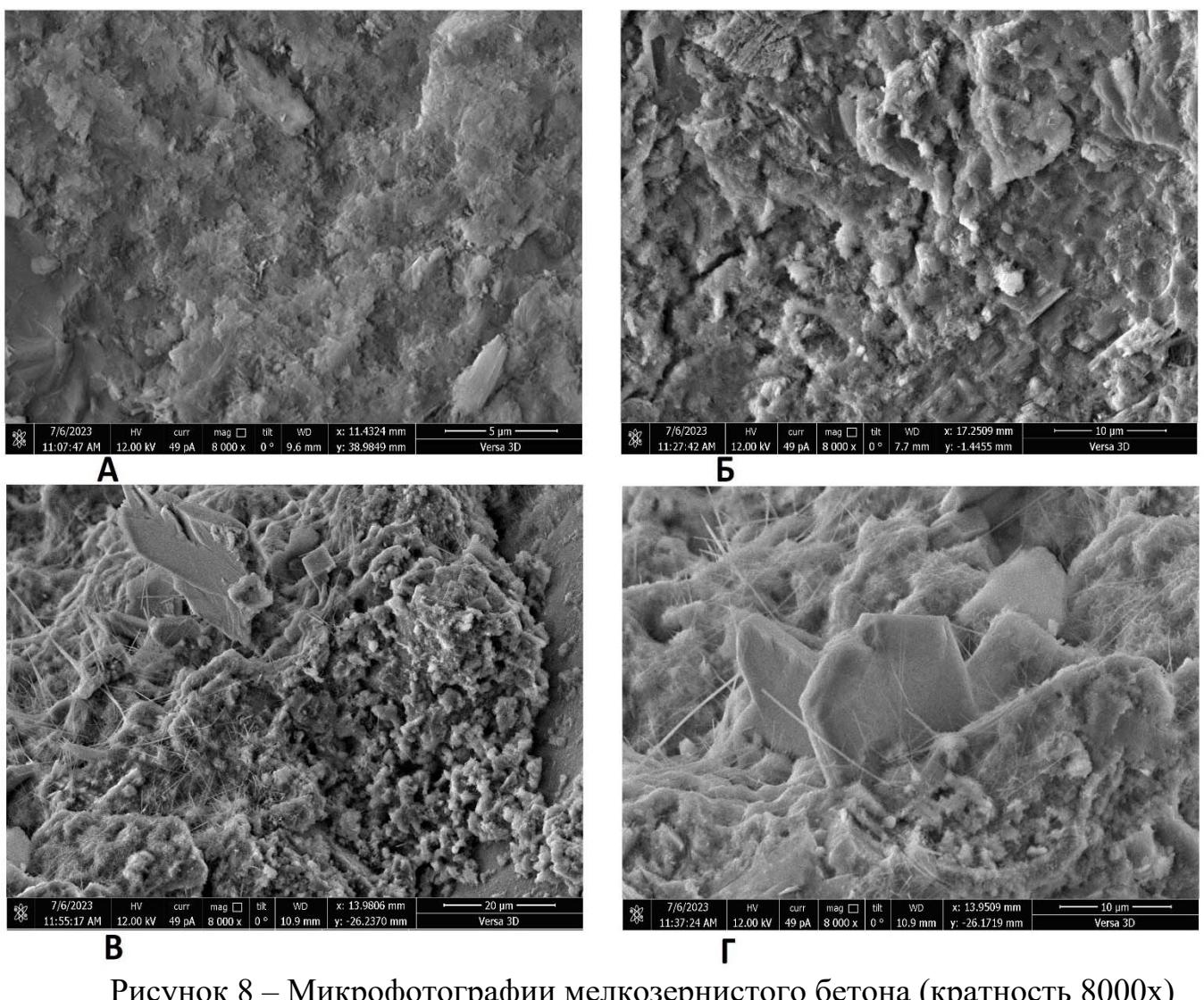


Рисунок 8 – Микрофотографии мелкозернистого бетона (кратность 8000x)
А - образец без применения УНТ; Б – образец с содержанием 0,001% УНТ;
В – образец с содержанием 0,005% УНТ; Г – образец с содержанием 0,01% УНТ

Исходя из сравнения, можно увидеть, что добавка углеродных нанотрубок хорошо взаимодействует с цементной матрицей как наполнитель наnanoуровне, создавая тем самым дополнительные центры кристаллизации основных минералов цементного камня. Благодаря этому, как видно на фотографиях, наномодифицированные бетоны имеют более плотную структуру укрупненных новообразований, что и обуславливает повышение прочностных характеристик материала. При этом увеличение концентрации наномодифицирующей добавки обеспечивает повышение количества дополнительных центров кристаллизации в виде углеродных нанотрубок.

Метод рентгеновской дифрактометрии позволяет получить детальную характеристику микро-, субмикро- и наноструктурных компонентов бетонов.

Оценка параметров проводилась на цементном камне с В/Ц = 0,5, изготовленном из портландцемента ЦЕМ I 42,5 Д0. 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 $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Процесс гидратации цементного вяжущего исследовался при нормальных условиях твердения в течение 28 суток. Были получены рентгенограммы цементного вяжущего (рис. 9), цементного камня без наномодификатора (рис. 10), а также с различным содержанием УНТ в возрасте 1,3,7,14,28 суток твердения (рис.11-13).

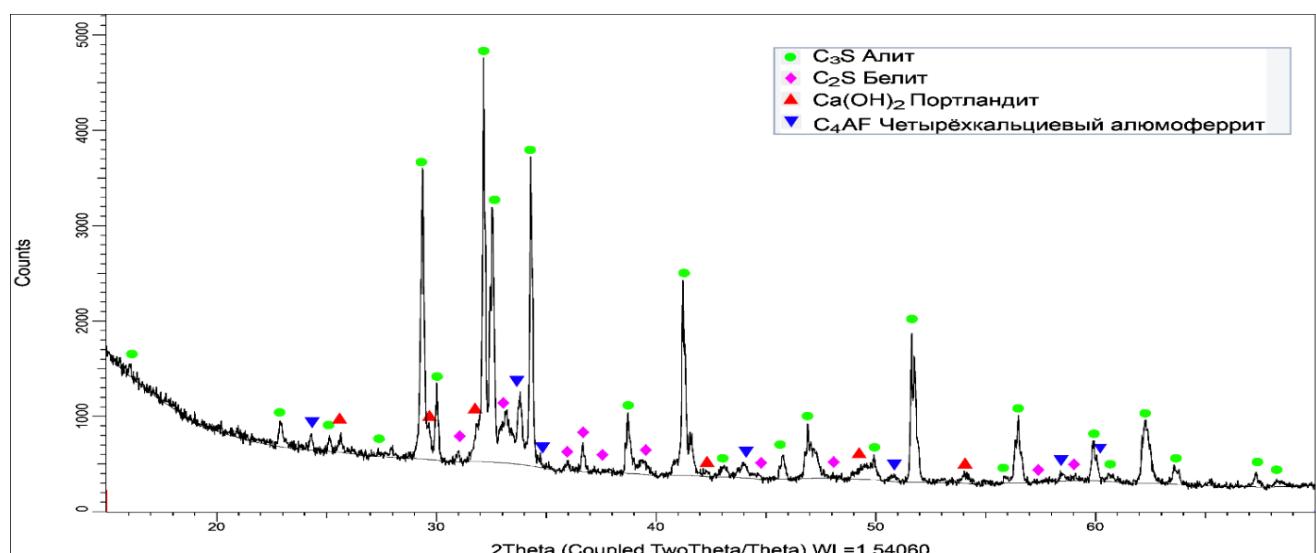


Рисунок 9 – Дифрактограмма исходного цементного вяжущего

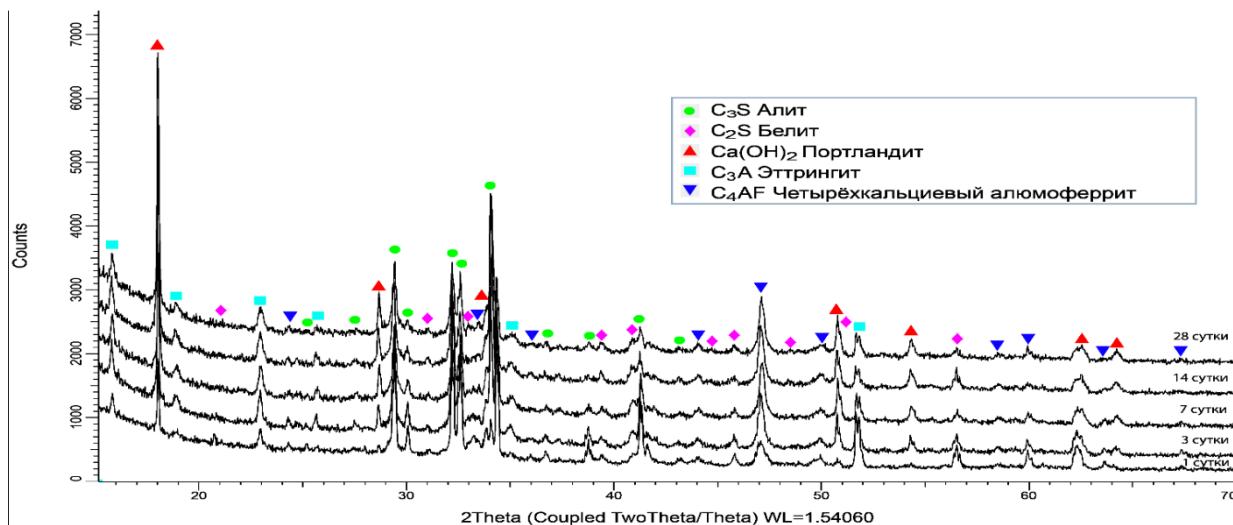


Рисунок 10 – Дифрактограмма цементного камня без наномодификатора

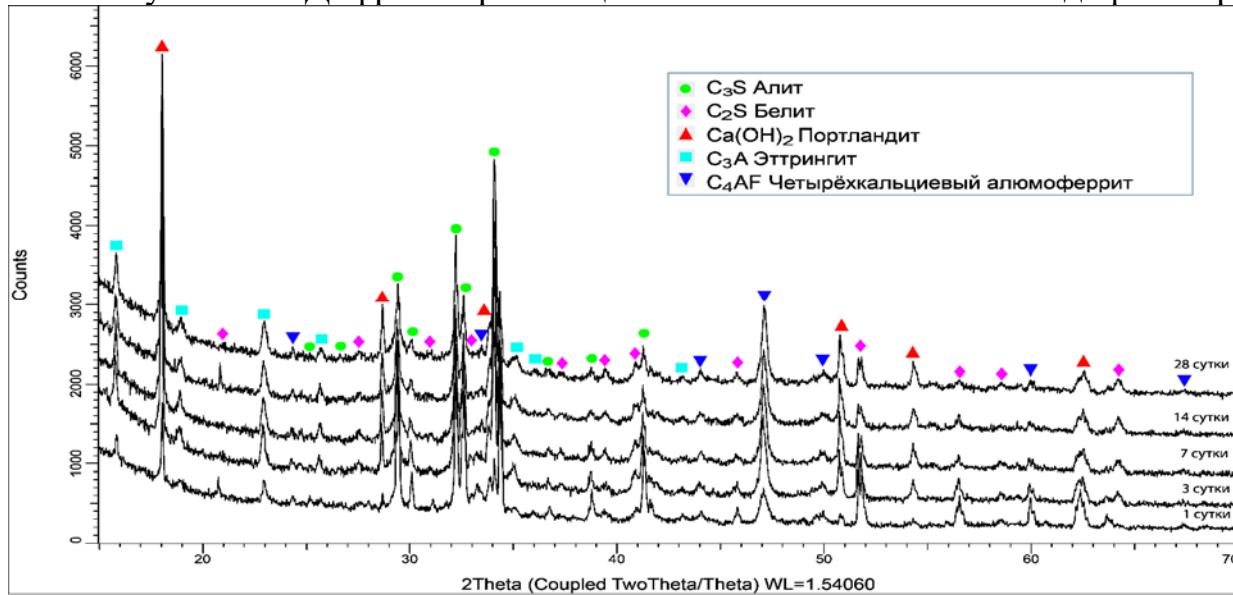


Рисунок 11 – Дифрактограмма цементного камня с содержанием УНТ 0,001%

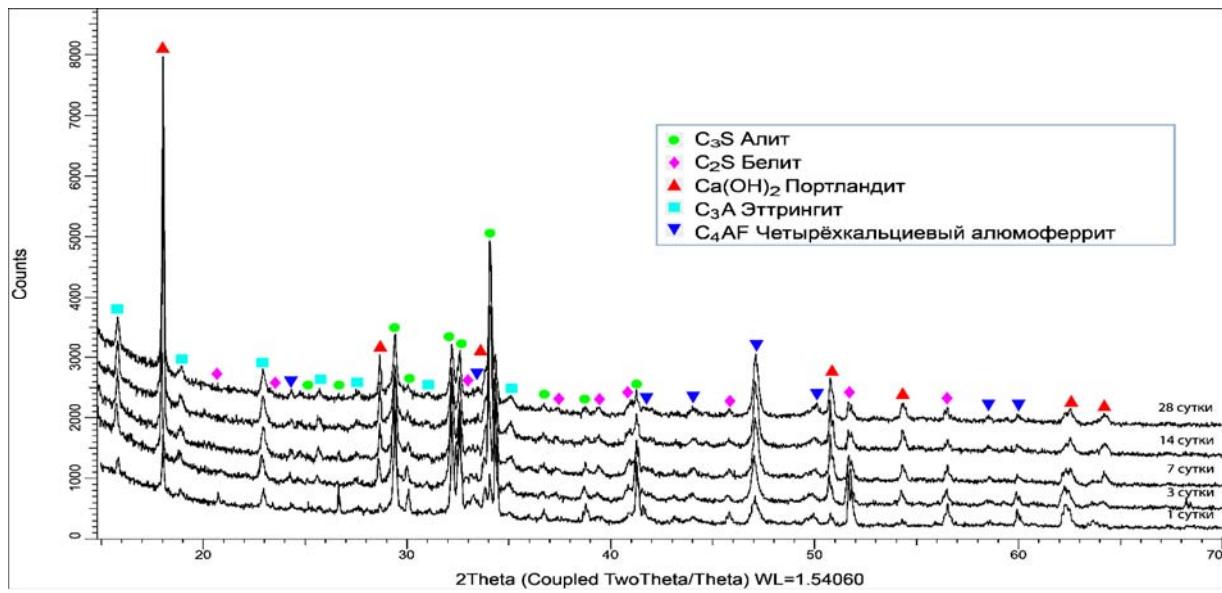


Рисунок 12 – Дифрактограмма цементного камня с содержанием УНТ 0,005%

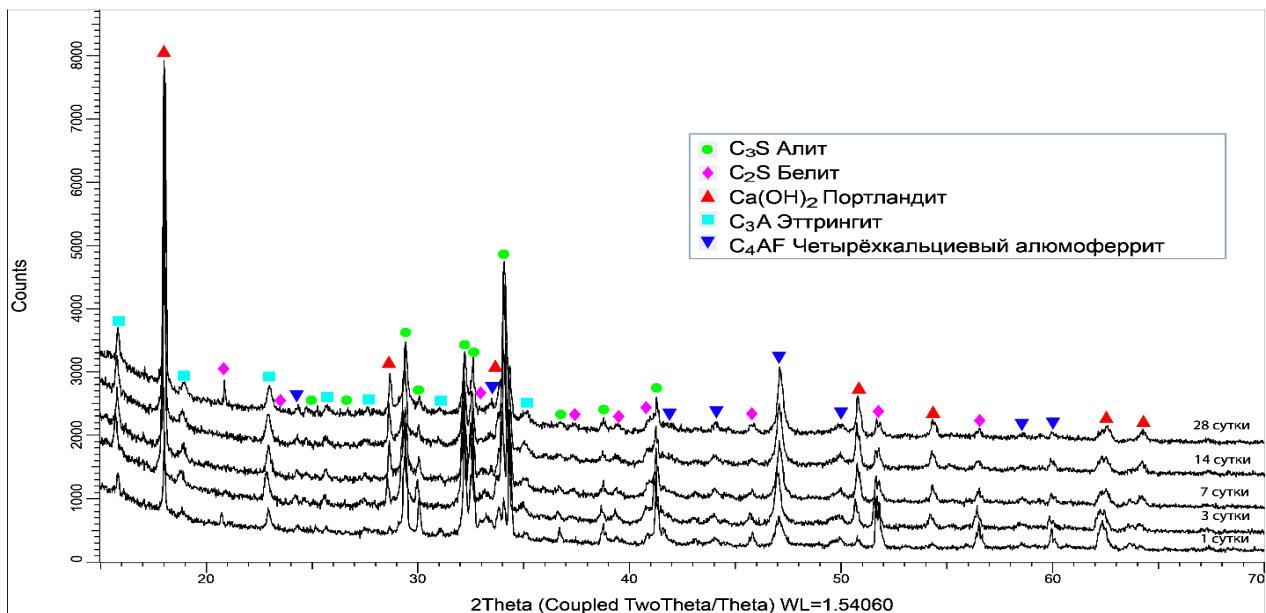


Рисунок 13 – Дифрактограмма цементного камня с содержанием УНТ 0,01%

Анализ дифрактограмм позволяет сделать вывод о том, что уже спустя первые сутки твердения происходит качественное изменение состава образца, подтверждающее протекание процесса гидратации цемента. Происходит количественное изменение соотношения фаз: уменьшается количество алита-белитовой фазы с одновременным увеличением содержания портландита, этtringита и алюмоферрита кальция. В абсолютном выражении наибольший рост демонстрирует фаза портландита. Увеличение степени гидратации алитовой фазы для всех образцов составило более 20%. Все указанные количественные изменения в фазовом составе являются причиной уплотнения компоновки частиц в зонах наномодифицирования бетона, показанных на снимках с помощью сканирующей электронной микроскопии, а также причиной повышения прочностных характеристик материала.

В четвертой главе были произведены исследования для разработки составов наномодифицированных фибробетонов. **Разработка состава сталефибробетона.** 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. Количество пластификатора составило 0,5% по массе цемента. Введение наномодификатора осуществлялось по двум технологиям: ЛИВ и УЗД. Образцы-балочки имели размеры 10x10x40 см. Результаты полученных данных представлены на рис. 14, 15.

Повышение прочности наблюдается при увеличении содержания наномодификатора и стальной фибры. Так прочность на растяжение при изгибе для технологий УЗД и ЛИВ увеличилось в 2,3 и 2,7 раз в сравнении с контрольным составом (без применения УНТ и фибры) для первой и второй серий испытаний соответственно. Прочность при сжатии также была увеличена. Максимальный прирост составил 38 и 41% соответственно.

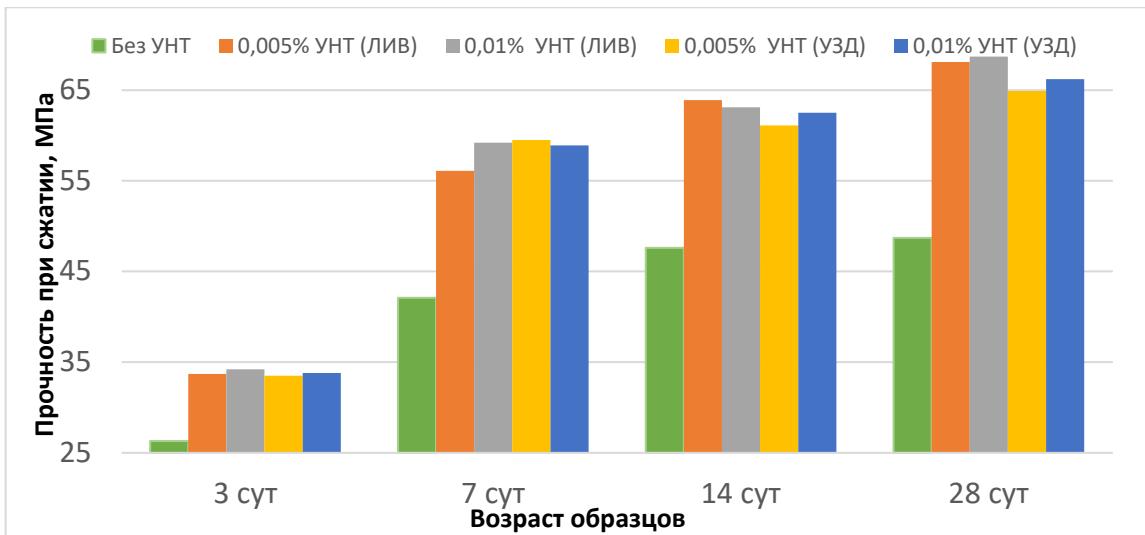


Рисунок 14 – График интенсивности набора прочности наномодифицированного сталефибробетона

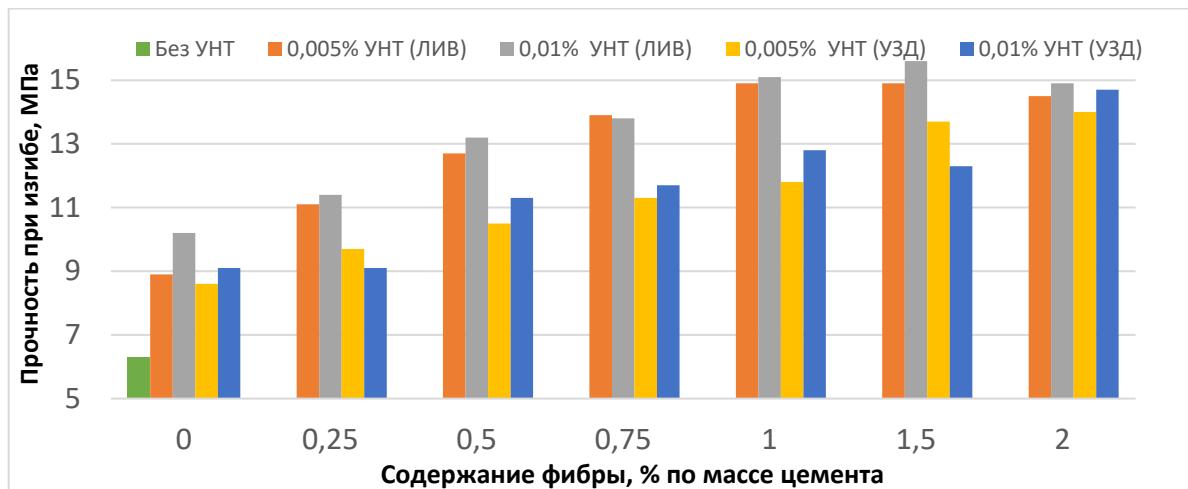


Рисунок 15 – Влияние предела прочности при изгибе от количества вводимой стальной фибры

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.

Произведен трехфакторный эксперимент на трех уровнях варьирования, в результате которого были получены уравнения регрессии для прочности при сжатии и изгиба наномодифицированного сталефибробетона.

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.

Разработка состава базальтофибробетона. Исследовалось влияние совместного применения наномодификатора и базальтового волокна на физико-механические характеристики мелкозернистого бетона. Для испытаний изготавливались образцы-балочки 40x40x160 мм из мелкозернистого бетона с включением цемента и песка Ц:П = 1:3. Количество УНТ варьировалось от 0,005 до 0,01% по массе цемента. Содержание базальтовой фибры было от 0,5 до 3% по массе цемента. Количество пластификатора 0,5% по массе цемента. Введение наномодификатора также осуществлялось по технологии ЛИВ и УЗД. Полученные данные представлены на рисунках 16 и 17.

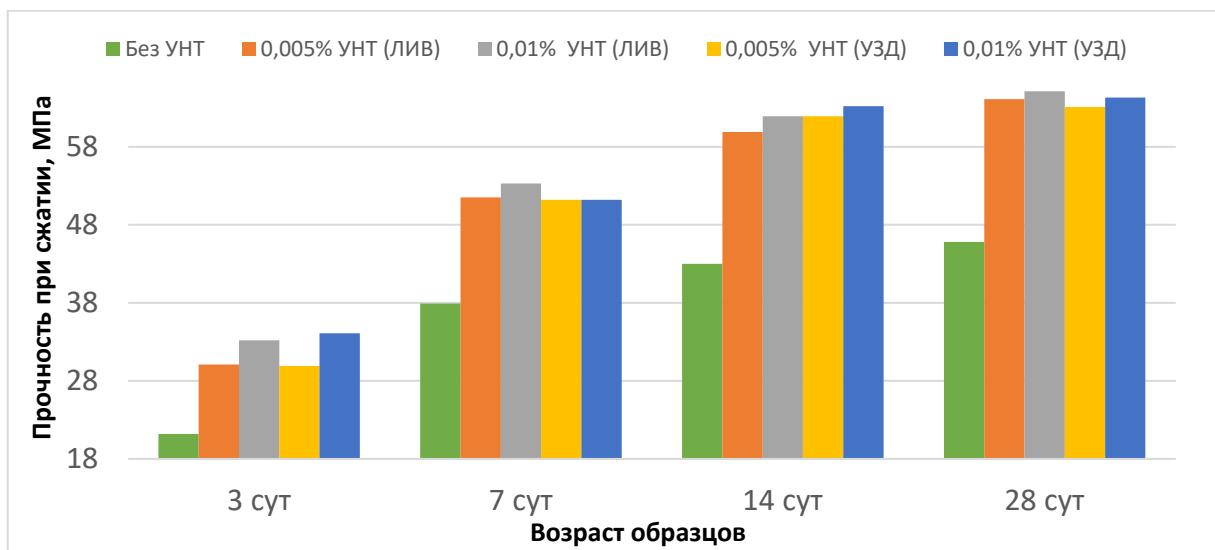


Рисунок 16 – График интенсивности набора прочности наномодифицированного базальтофибробетона

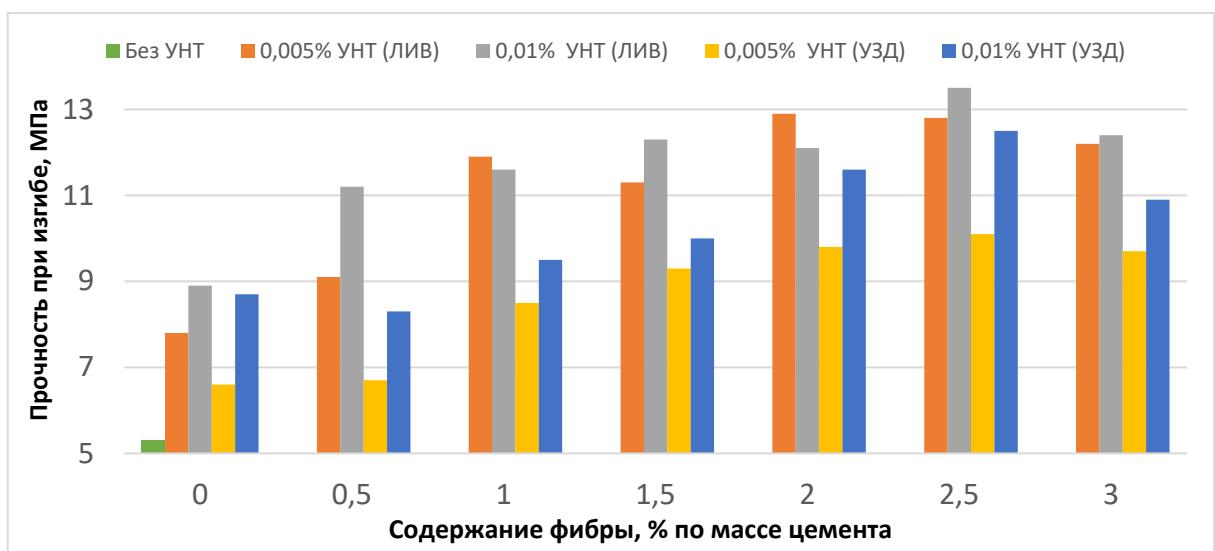


Рисунок 16 – Влияние предела прочности при изгибе от количества вводимой базальтовой фибры

Составы с комплексным введением базальтового фиброволокна и углеродных наномодификаторов имеют значительное увеличение прочностных характеристик в сравнении с контрольным составом (без применения УНТ и фибры). Как и в случае со сталефибробетоном, материал с большим содержанием УНТ отличался повышенными показателями прочности. Наибольшее увеличение прочности при сжатии наблюдались для составов с содержанием УНТ 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.

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 S от полученных моделей составило - 1,15 и - 0,4.

В данной работе в качестве практического применения был разработан **состав сталефибробетонной стяжки для пола** с использованием наномодифицирующей добавки в производственном помещении, расположенном в г. Волгограде. 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 3, где показан разработанный состав 1 и контрольный состав 2 с использованием арматурной сетки, но без применения добавок.

Таблица 3 – Расход материалов на 1м³ для обустройства бетонной стяжки

Состав	Расход материалов на 1 м ³								
	Цемент ПЦ 500-Д0, кг	Песок, кг	Щебень, кг	Вода, л	Стальная фибра, кг	УНТ, кг	СП-3, кг	Арм- ная сетка, м ²	
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 на основе сталефибробетона. Общая площадь покрытия составила 3040 м². Толщина стяжки составляет 50 мм. 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. Общий экономический эффект составил 868 378 р.

ИТОГИ ВЫПОЛНЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Произведены исследования по подбору оптимальной пластифицирующей добавки. В результате анализа экспериментальных данных для исследований был выбран пластификатор «Полипласт СП-3», который обеспечил наилучшие показатели пластичности и прочности.

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. Введение добавок в количестве 0,005-0,01% по массе цемента позволяет повысить прочность мелкозернистого бетона при сжатии на 25% и при изгибе на 22%.

Проведен сравнительный анализ и определены оптимальные режимы двух технологий введения наномодификатора в бетонную смесь: применение ультразвуковых диспергаторов (повышение прочности при сжатии и изгибе 30 и 17%) и линейно-индукционных вращателей (увеличение прочности при сжатии и изгибе на 35 и 29%).

Произведено исследование структуры бетона с использованием методов сканирующей электронной микроскопии и рентгенофазового анализа. Полученные данные 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.

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. Также был произведен 3-х факторный эксперимент на 3-х уровнях варьирования. Получены уравнения регрессии, описывающие влияние вводимых добавок на пределы прочности бетона при сжатии и изгибе.

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.

Перспективы дальнейших исследований. Целесообразно рассматривать полученные результаты для проектирования опытных образцов различных фибробетонов для производственных покрытий, что позволит уточнить исходные положения и рассмотреть задачу оптимизации для массовых конструкций исследуемого типа.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международных научометрических базах данных «Scopus»/ «Web of Science»:

1. 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; Moscow Polytechnic University. – Springer Cham – 2024. – pp. 132-142. 10.1007/978-3-031-47810-9_13.

2. 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; Moscow Polytechnic University. – Springer Cham – 2025. – pp. 107-115. 10.1007/978-3-031-80482-3.

Работы, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК:

3. **Ляшенко, Д. А.** Вспученный фиброгипсовый материал [Текст] / Д. А. Ляшенко, П. Э. Соколов, В. А. Перфилов // Инженерный вестник Дона. – 2021. – № 4. – 8 с.

4. 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.

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

6. 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.

7. Пустовгар, А. П. Активированная сухая смесь для приготовления растворов и мелкозернистых бетонов [Текст] / А. П. Пустовгар, В. А. Перфилов, **Д. А. Ляшенко** // Инженерный вестник Дона. – 2023. – № 12. – 9 с.

8. Перфилов, В. А. Влияние совместного применения наномодификаторов и стального фиброволокна на свойства бетона [Текст] / В. А. Перфилов, **Д. А. Ляшенко** // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2025. – № 2(99). – С. 51-58.

9. Ляшенко, Д. А. Влияние введения углеродных нанотрубок на свойства бетонных композиций [Текст] / **Д. А. Ляшенко** // Инженерный вестник Дона. – 2025. – № 9. – С. 9 с.

Работы, опубликованные в журналах, рецензируемых в базе данных Russian Science Citation Index:

10. 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.

11. 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.

12. 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.

13. 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.

Патенты на изобретение:

14. Патент № 2781876 Российской Федерации, МПК C04B 28/04 Бетонная смесь: № 2022108634: заявл. 31.03.2022: опубл. 19.10.2022 / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко, Е. Ю. Козловцева; заявитель ФГБОУ ВО ВолгГТУ.

15. Патент № 2832473 C1 Российской Федерации, МПК C04B 28/02 Способ получения мелкозернистой наномодифицированной бетонной смеси: №2024121818: заявл. 31.07.2024: опубл. 24.12.2024 / В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко, М. Е. Николаев; заявитель ФГБОУ ВО ВолгГТУ.

Отраслевые издания и материалы конференций:

16. **Ляшенко, Д. А.** Определение влияния фиброволокон различного типа на физико-механические свойства фиброгипса [Текст] / В. Б. Черников, А. А. Рунг, Д. А. Ляшенко, П. Э. Соколов // Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса : сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., 7-8 декабря 2021 г., Волгоград : в 2 ч. / гл. ред. О. В. Бурлаченко ; М-во науки и высш. образования Рос. Федерации, Волгогр. гос. техн. ун-т. –2021. – Ч. 1. – С. 372-378.

17. **Ляшенко, Д. А.** Мелкозернистый наномодифицированный бетон [Текст] / Д. А. Ляшенко, В. А. Перфилов // Инновационное развитие регионов: потенциал науки и современного образования: материалы VII Националь. науч.-практ. конф. с междунар. участием, приуроч. ко Дню рос. науки (9 фев. 2024 г.) / под общ. ред. Т. В. Золиной ; М-во образования и науки Астрахан. обл., Астрахан. гос. архит.-строит. ун-т. – 2024. – С. 17-21.

18. **Ляшенко, Д. А.** Применение наномодифицированных бетонов в объектах нефтегазовой отрасли [Текст] / Д. А. Ляшенко, В. А. Перфилов, 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.) / отв. ред. И. В. Ковалев. – 2024. – С. 116-121.

19. **Ляшенко, Д. А.** Дисперсное армирование бетона на микро- и макроуровне [Электронный ресурс] / Д. А. Ляшенко // Нефть и газ: опыт и инновации. – 2025. – Т.9. №5. – 8 с. – URL: <https://nigaz.ru/wp-content/uploads/2025/10/дисперсное-армирование-бетона-на-микро-и-макроуровне.pdf>

ЛЯШЕНКО ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

**2.1.5 Строительные материалы и изделия
(технические науки)**

Подписано в печать 13.11.2025 г. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Печать трафаретная. Гарнитура «Таймс»
Усл.печ.л. 1,5. Тираж 100. Заказ №86.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»
Издательство ВолгГТУ
400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1, В-210
Типография ИАиС ВолгГТУ
400074, г. Волгоград, ул. Академическая, 1