

На правах рукописи

**Чжо Мью Хтет**

**РАЗРАБОТКА УЛЬТРАСТРУЙНОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ДИСПЕРГИРОВАНИЯ СУСПЕНЗИЙ**

Специальности:

2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической  
обработки

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: **Галиновский Андрей Леонидович**  
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Барсуков Геннадий Валерьевич**  
доктор технических наук, доцент  
Профессор кафедры машиностроения ФГБОУ ВО «Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева», г. Орел

**Моргунов Юрий Алексеевич**  
кандидат технических наук, доцент  
Профессор кафедры Технологии и оборудования машиностроения, «Московский политехнический университет», г. Москва

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО "ТГТУ", г. Тамбов**

Защита состоится «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г. на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете им. Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., дом 5, стр.1.

Телефон для справок 8 (499) 267-09-63

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направлять на имя ученого секретаря диссертационного совет по вышеуказанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте <http://www.bmstu.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
кандидат технических наук, доцент



А.В. Богданов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследований.** Неотъемлемым фактором машиностроительного производства является широкое использование в технологических процессах различных по составу суспензий, повышение эксплуатационных свойств которых является важной научно-хозяйственной проблемой. Одним из направлений модификации суспензий является введение в их состав функциональных нанодобавок, которые, в конечном итоге, обеспечивают новые эксплуатационно-технологические свойства. Опыт применения наносодержащих суспензий связан с получением строительных и композиционных материалов, красок и чернил, смазок и масел, гелей и тонких пленок и др., обладающих новыми характеристиками и свойствами. Как правило, одним из этапов технологического процесса производства таких суспензий является их диспергирование, необходимость которого продиктована снижением размера агломератов частиц. Размер частиц влияет на эксплуатационные свойства суспензий или изделий, изготовленных на их основе. На сегодняшний день основным методом диспергирования суспензий является ультразвуковой метод. Однако у данной технологии есть ряд существенных недостатков, прежде всего это энергоемкость процесса, высокая длительность обработки, повышение температуры обрабатываемой среды и др. Ее применение зачастую не удовлетворяет предъявляемым требованиям к обработанным этим способом суспензий и ограничивает области практического применения. С другой стороны, в МГТУ им. Н.Э. Баумана были предложены технологии использования сверхскоростной струи жидкости для решения ряда новых научно-технологических задач, таких как диагностика параметров качества поверхностного слоя изделий и покрытий, низкотемпературная стерилизация водных растворов и др. Таким образом, речь идет о семействе новых технологических процессов, которые можно обобщенно назвать «ультраструйные технологии». При этом все из этих технологий в своей основе имеют хорошо известный метод жидкостного и абразивно-жидкостного резания или, по-другому, гидроабразивного резания. Суспензию, содержащую наночастицы можно рассматривать как своеобразный обрабатываемый материал, подвергаемый специфическому комбинированному воздействию: гидростатическое сжатие, резкое ускорение жидкости в струеформирующей фокусирующей трубке, сверхинтенсивное ударно-динамическое торможение о мишень, которое сопровождается диспергированием (распылением) обрабатываемой суспензии до пылеобразного состояния – микрокапель суспензии (спрея). Данный обрабатываемый материал в результате комплексного воздействия, прежде всего в результате ударно-динамических процессов, изменяет свои свойства, а имеющейся в ней агломераты наночастиц разрушаются, т.е. происходит процесс ультраструйного диспергирования (УД) наносодержащей суспензий.

Таким образом, можно говорить о наличии научного противоречия, состоящего в том, что с одной стороны необходимо создание новых более эффективных методов диспергирования наносодержащих суспензий, а с другой

стороны, до конца не раскрыт имеющийся научно-прикладной потенциал ультразвуковой технологии диспергирования.

В данной работе под ультразвуковой технологией диспергирования (УД) наносодержащих суспензий принята совокупность физических явлений и технических средств, обеспечивающих создание и реализацию таких параметров высокоскоростной компактной струи наносодержащей суспензии, которые при ее взаимодействии (ударе) с твердотельной мишенью, способны привести к инструментально фиксируемым целенаправленным изменениям ее структуры, функциональных параметров и потребительских свойств, в частности уменьшения размеров агломератов наночастиц.

В связи с этим, исследования, направленные на комплексное изучение технологии УД представляют актуальную научно-практическую задачу, имеющую важное значение для различных отраслей машиностроения, в первую очередь производства изделий из различных композиционных материалов и лакокрасочных покрытий.

**Целью диссертационной работы** является уменьшение размеров агломератов частиц в суспензиях за счет разработки и реализации ультразвукового метода их диспергирования.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Выполнить анализ информационных источников по вопросам диспергирования суспензий, оценить перспективность разработки метода УД на основе применения методов экспертного оценивания.

2. Разработать модель энергетических превращений при УД и вероятностной математической модели УД наносодержащих суспензий для прогнозирования результативности диспергирования.

3. Провести экспериментальные исследования по диспергированию наносодержащих суспензий на примере порошков графена, бемита и углеродных нанотрубок ультразвуковым и ультразвуковым методами. Оценить полученные результаты.

4. Разработать практические рекомендации по выбору технологических режимов УД наносодержащих суспензий с учетом их влияния на итоговый размер частиц.

5. Провести апробация УД наносодержащих суспензий на примере дальнейшего их использования для получения образцов из нетканых материалов и их модификации.

6. Выполнить численное моделирование процесса УД при модификации нетканого материала медицинского назначения при различных углах взаимодействия ультразвука и мишени. Предложить критерий эффективности данной обработки.

**Научная новизна.** Научная новизна работы состоит в теоретическом обосновании и экспериментальном подтверждении возможности эффективного применения технологии УД суспензий для уменьшения размеров агломератов частиц, содержащихся в ней.

Признаками научной новизны обладают следующие положения:

1. Доказано, что доминирующим технологическим фактором УД наносодержащих суспензий, определяющим эффективность этого процесса, является мощное взаимодействие (соударение) ультразвука с высокотвердой мишенью. При этом размер агломератов уменьшается с увеличением скорости ультразвука вплоть до значений 800 м/с.

2. В результате сравнительно-сопоставительных исследований установлено, что эффективность технологии УД наносодержащих суспензий в значительной степени (до 10 раз) превышает аналогичные показатели (уменьшение размеров агломератов наночастиц) традиционно применяемой ультразвуковой технологии.

3. Разработан комплекс математических моделей, раскрывающих особенности энергетических превращений процесса УД суспензий и оценивающих вероятность проникания наночастиц в структуру нетканого материала с целью его модификации.

**Практическая значимость работы** состоит в следующем:

1. Предложены методические рекомендации по применению обработанных методом УД наносодержащих суспензий в технологических процессах производства изделий из композиционных материалов.

2. Разработана принципиальная схема и конструкторская документация на изготовление установок для высокопроизводительной обработки наносодержащих суспензий на основе использования быстровращающихся мишеней.

3. На основе результатов экспериментальных исследований доказана эксплуатационно-технологическая эффективность метода УД по обработке различных наносодержащих суспензий (графен, бемит, УНТ) и его преимущества в сравнении с методом ультразвукового диспергирования.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты обоснования методом экспертного оценивания перспективности разработки метода ультразвукового диспергирования на основе сравнения с существующими традиционными технологиями.

2. Результаты практической реализации инженерной методики УД наносодержащих суспензий с количественными информативными показателями эффективности обработки.

3. Экспериментальное доказательство того, что доминирующим фактором диспергирования наносодержащих суспензий является ударно-динамическое взаимодействие ультразвука жидкости с высокотвердой мишенью.

4. Технологические рекомендации по использованию обработанных наносодержащих суспензий методом УД при производстве композиционных материалов.

5. Вероятностная модель УД наносодержащих суспензий, позволяющая осуществить оценку эффективности обработки и вероятности достижения требуемых конечных размеров частиц в суспензии в зависимости от скорости ее соударения с мишенью.

6. Численная модель процесса УД, разработанная для различных технологических параметров обработки, в том числе при варьировании угла взаимодействия ультраструи с мишенью для определения характера ее движения, особенностей удара, распада, спрееобразования и насыщения частицами углеволокна.

**Методы исследований.** Теоретические исследования проводились с использованием элементов теории принятия решений (метода экспертных оценок), имитационного и численного моделирования. Моделирование процесса высокоскоростного взаимодействия суспензии с поверхностью высокотвердой мишени проводилось с использованием лицензионного программного обеспечения. Эксперименты проводились на сертифицированном технологическом и поверенном измерительном оборудовании.

В работе использованы современные экспериментально-промышленные установки зарубежного производства («Flow System Incorporation», «KMT Waterjet» пр-ва США). Для экспериментов была изготовлена специальная технологическая оснастка, используемая для сбора наномодифицированной суспензий, а также мишени, изготовленные с использованием монокристаллов алмаза. В качестве исследовательской аппаратуры использовались: лазерный анализатор размера частиц Microtrac S-3500 («Microtrac Bluewave»), машина для испытания на прочность и сжатие бетонов и др. материалов ZWICK Z100, электронный микроскоп Tescan Vega 3 и оптический инверсный микроскоп металлографический МИМ-1600Б и другое оборудование.

**Апробация работы.** Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований докладывались на 15 научно-технических конференциях: XLV и XLVI Международная молодежная научная конференция «Гагаринские чтения» в МАИ (г. Москва, 2019–2020 г.г.); Всероссийская научно-техническая конференция «Студенческая научная весна» в МГТУ им Н.Э. Баумана (г. Москва, 2019 г.); XII Всероссийская конференция молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» в МГТУ им Н.Э. Баумана (г. Москва, 2019 г.); X Всероссийской межотраслевой молодежной конкурс научно-технических работ «Молодежь и будущее авиации и космонавтики или Aerospace Science Week» в МАИ (г. Москва, 2019 г.); III и IV Международная молодежная конференция «Новые подходы и технологии системного проектирования, производства, эксплуатации и промышленного дизайна изделий аэрокосмической техники» в МГТУ им Н.Э. Баумана (г. Москва, 2019–2020 г.г.); XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С. П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства «Королевские чтения» в МГТУ им Н.Э. Баумана, (г. Москва, 2020 г.); Международный научно-технически семинар «Современные материалы и новые технологии в машиностроения», посвященной 90-летию МАДИ (г. Москва, 2020 г.); II и III Международный форум, Ключевые тренды в композитах: наука и технологии в МГТУ им Н.Э. Баумана (г. Москва, 2019–2020 г.г.). Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий

обработки и оборудования в машиностроении» (г. Севастополь, 2019 г.); Международная конференция по наноструктурам, наноматериалам и наноинженерии «ICNNN» (г. Киото, Япония, 2019 г.); Международная онлайн-конференция по презентациям передовых материалов и требовательных приложений «AMDA» (г. Рексем, UK, 2020 г.); Международная онлайн-конференция по достижениям в области материаловедения «ICAMS » (г. Ахмаднагар, Индия, 2020 г.).

**Реализация и внедрение результатов** работы осуществлялось на предприятии: ООО «Астрелати», г. Москва, РФ и ОХП «НИИ ИП с ОП», г. Минск, Беларусь; Производственная компания «PERFECT FOODS», поселок Шве Пьи Тар, Янгон, Мьянма. Результаты диссертации включены в образовательный процесс, при чтении лекций и проведении лабораторных работ для учащихся факультета «Специальное машиностроение» и для учащихся факультета «Машиностроение» в технологической академии оборонных сил в Мьянме. Данное исследование проводилось в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-3778.2018.8) и гранта РФФИ 18-29-18081.

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в одном патенте и 25 публикациях, в том числе, в пяти изданиях, рекомендуемых ВАК РФ и в 10 статьях, включенных в базы Scopus и WoS. По теме работы опубликовано 15 тезисов докладов на международных и Всероссийских конференциях.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованной литературы из 130 источников и приложений. Работа содержит 191 страниц машинописного текста, в том числе 70 иллюстраций, 15 таблиц.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Введение** раскрывает сущность исследуемой проблемы, ее актуальность и возможные пути решения, используемые понятия, основные положения, выносимые на защиту, определяющие научную новизну и практическую ценность диссертационной работы, а также приведены данные о структуре и объеме диссертации, апробации работы и публикации.

В **Главе 1** приведены результаты анализа информационных источников, посвящённые вопросам применения нанодобавок в различных материалах и изделиях, а также рассмотрены существующие способы диспергирования наносодержащих суспензий. Сделаны выводы об актуальности вопросов создания новых более производительных и эффективных методом диспергирования. Показано, что потенциал ультраструйных технологий позволяет рассмотреть ее как основу для решения задач диспергирования наносодержащих суспензий. Данное технологическое ответвление ультраструйных технологий получило название «ультраструйное диспергирование».

В настоящее время наносодержащие суспензии нашли широкое применение в народном хозяйстве и лежат в основе таких продуктов как: косметические средства, лаки и краски, чернила, технологические смазки различного

назначения, клеи, СОЖ и др. Их используют для приготовления разного рода пленок и покрытий, модификации материалов при проведении фундаментальных физических исследований. Причем, чаще всего, эффективность конечного результата использования наносuspензий зависит от размера частиц в них.

В РФ проблемами повышения функциональной активности суспензий, в том числе в виде СОЖ, посвящено значительное количество исследований, например Л.В. Худобина, А.А. Суворова, А.В. Сгибнева, В.Д. Шашурина, Е.Г. Бердичевского, Г.С. Овсепяна, В.А. Годлевского, В.С. Лобанцовой, В.Ю. Шолома. В них убедительно показана роль состава суспензий при выполнении конкретных технологических операций и обеспечения требуемого качества изделий. Среди методов активации и диспергирования суспензий ключевое место занимает ультразвуковая обработка (УЗО), функциональные возможности которой в наиболее полной мере реализованы в машиностроении для повышения потребительских свойств суспензий. Однако УЗО имеет ряд недостатков: невысокую производительность; особенности излучения, при котором его мощность резко падает с увеличением расстояния от источника; повышению температуры среды; высокие энергозатраты.

Поэтому задача по созданию новых методов диспергирования, позволяющих повысить технологические свойства суспензий, является актуальной.

Предложенный в МГТУ им. Н.Э. Баумана метод УД наносодержащих суспензий является принципиально новым, но основанным на использовании традиционного оборудования для гидроабразивной резки материалов. При осуществлении взаимодействия ультраструи, с разогнанной ею наносодержащей суспензией, с высокотвердой мишенью происходит ударно-динамическая обработка данной суспензий. В целом на суспензиях действует комбинация физико-энергетических воздействий: сжатие, интенсивный разгон в струеформирующей фокусирующей трубке, ударное торможение о мишень.

На основании проведенных литературных исследований были сформулированы цель и задачи диссертационной работы, разработан общий методический план проведения исследования.

Во **второй главе** формируются представления о методическом обеспечении проводимых исследований, касающиеся используемого технологического оборудования, приборов и оснастки. В главе отражены методические особенности проведения теоретических и экспериментальных исследований, а также обработка данных, полученных опытным путем. Кроме того, раскрыта идея применения метода экспертного оценивания для обоснования выбора направлений исследований в диссертации. Суть метода состояла в разработке анкеты эксперты, в которой предлагалось количественно оценить семь методов УД: УЗО, электрическое диспергирование, гомогенизация, эмульгирование, фрезерная обработка, роторно-струйная обработка, дисковая обработка. Критерием сравнения методов было, в частности, определение степени «изученности» и «перспективности» реализации статических и динамических

параметров, характеризующих эти методы. Обработка мнений экспертов проводилась при использовании известных зависимостей математической статистики.

Экспериментальные исследования по УД наносодержащих суспензий проводились на промышленной установке гидроабразивного резания мультипликаторного типа «Water Flow Jet System» (США).

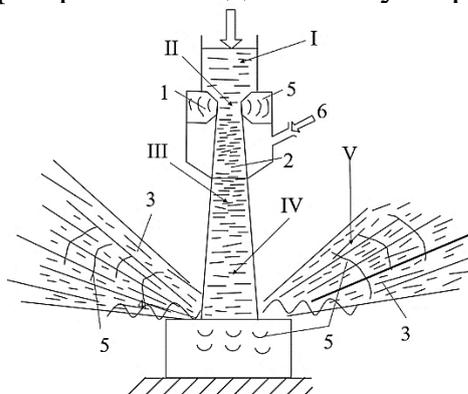
Для сбора обработанной методом УД наносодержащей суспензий была спроектирована и разработана специальная технологическая оснастка, с системой закрепления высокотвёрдой мишени, изготовленной на основе синтетического алмаза.

Изучение размеров частиц после УД проводилось с применением лазерного анализатора частиц Microtrac Bluewave S3500, а результаты обрабатывались на специальном программном обеспечении данного прибора.

Испытания на прочность образцов наномодифицированных бетонов проводились на установке Zwick Z100 на кафедре материаловедения МГТУ им. Н.Э. Баумана, адаптированной для использования образцов цилиндрической формы.

**В третьей главе** проведены теоретические исследования, связанные с вопросами разработки модели энергетических превращений при УД и вероятностной математической модели УД наносодержащих суспензий для прогнозирования результативности диспергирования. Выполнено численное моделирование в среде Autodyn процесса УД при обработке и модификации нетканого материала при различных углах взаимодействия ультраструи и мишени. Выполнено численное моделирование процесса взаимодействия наносодержащей ультраструи с высокотвердой мишенью при различных углах контакта с целью формирования представлений о процессе спреобразования и площади пятна контакта образующегося спрея. Предложен критерий эффективности данной обработки.

На первом этапе теоретических исследований были рассмотрены многократные и различные по интенсивности превращения энергии (интегральные оценки) при УД для различных участков и характерных зон формирования и действия ультраструи (см. Рисунок 1).



I-V – характерные зоны превращения энергий из одного вида в другие; 1 – струеформирующее сопло; 2 – ультраструя; 3 – спрей; 4 – мишень; 5 – волны упругой деформации среды (широкополосное акустическое излучение); 6 – патрубок подачи суспензии с наночастицами (УНТ, графен, бемит)

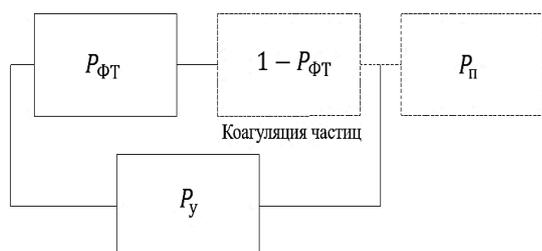
Рисунок 1. Основные зоны энергетических превращений при УД

Зона I - квазистатическое сжатие жидкости, зона II - зона ускорения ультраструи, зона III - зона квазистабильного движения ультраструи с

наносодержащей суспензий вдоль фокусирующей трубки, зона IV - зона удара ультраструи о мишень, V – зона спреобразования.

На основе анализа записанных в работе уравнений энергетического баланса для рассмотренных зон, учитывающих увеличение или уменьшение доли того или иного вида энергии, было установлено, что все пять основных зон энергетических превращений содержат весьма различные, но взаимосвязанные виды энергий. Так же сделаны выводы, что волновые (эмиссионные) процессы, прежде всего в зоне удара ультраструи о мишень, влияют на выходные параметры УД, а рост амплитудно-частотной характеристики сигнала акустической эмиссии может, с высокой степенью вероятности, говорить о производительности данного метода. Завершающий этап УД показывает, что значения скоростей и энергий образующегося спрея по-прежнему достаточно высоки, что позволило сформировать гипотезу о возможности прикладного использования спреобразования для модификации нетканых материалов.

Учитывая статистический характер изменения масс-геометрических параметров распределения частиц в наносодержащей суспензий после их УД, в работе использовался вероятностный подход к изучению диспергирующих возможностей данного метода. Была предложена структурная схема процесса УД, функциональное взаимодействие между которыми представлено на Рисунок 2.



$P_{фТ}$  – вероятность диспергирования в фокусирующей трубке;  $P_у$  – вероятность диспергирования в результате удара ультраструи в мишень;  $P_п$  – вероятность процесса посткоагуляции после УД.

Рисунок 2. Структурная схема процесса УД наносодержащих суспензий

Учитывая только значимые в физико-технологическом отношении этапы УД не трудно показать, что вероятностная модель этого процесса (см. Рисунок 2) имеет следующий обобщенный вид:

$$P = 1 - (1 - P_{фТ})(1 - P_у), \quad (1)$$

где  $P$  – итоговая вероятность процесса диспергирования.

На первом этапе моделирования для конкретизации функционального вида структурных элементов модели (1) использовался аппарат вероятностного моделирования гидродинамических возмущений при УД наносодержащих суспензий. В результате выполнения соответствующих преобразований в рамках физически обоснованных допущений можно показать, что  $P_{фТ}$  и  $P_у$  в первом приближении описываются следующими вероятностными уравнениями:

$$P_{фТ}(V) = k_M \exp(-k_{1фТ}V) [1 - \exp(-k_{2фТ}V)], \quad (2)$$

$$P_у(V) = 1 - \exp(-k_уV), \quad (3)$$

где  $V$  – параметр, фактически характеризующий скорость ультраструи и определяющий кинетику изменения плотности потока её мощности;  $k_{1фТ}$  и  $k_{2фТ}$  – соответственно коэффициенты, определяющие процесс диспергирования в

рабочем канале фокусирующего сопла;  $k_M < 1,0$  – коэффициент действия механизма УД в фокусирующем сопле;  $k_Y$  – коэффициент диспергирования в результате удара ультразвуку суспензии о мишень.

Результаты математического моделирования в соответствии с уравнениями (2) и (3) показаны на Рисунок 3 и 4.

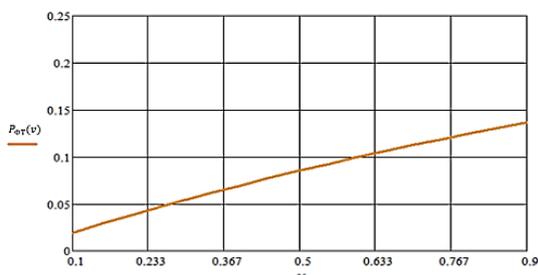


Рисунок 3. Вероятность диспергирования в струеобразующем сопле

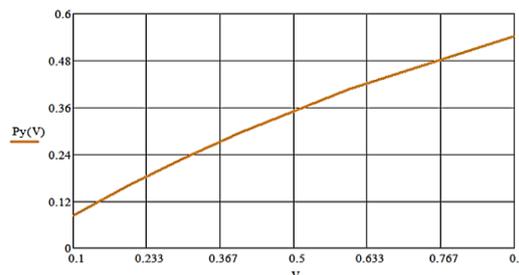


Рисунок 4. Вероятность диспергирования в результате удара ультразвуку о мишень

Вероятностная модель УД наносодержащих суспензий, позволяет осуществить оценку эффективности обработки и вероятности достижения требуемых конечных размеров частиц в суспензии в зависимости от скорости ее соударения с мишенью.

В главе 3 с использованием программного комплекса ANSYS/Autodyn разработана численная модель процесса УД, учитывающая возможности варьирования технологических режимов, в том числе угла взаимодействия ультразвуку с мишенью с целью определения характера ее движения, особенностей удара, распада и спреобразования с последующей модификацией углеткани. Задача решалась численно в двумерной осесимметричной постановке в неподвижной системе координат с использованием идеальной упругопластичной модели взаимодействующих между собой материалов. Расчетная схема (скорость ультразвуку 100...800 м/с; диаметр  $d=1$  мм) и постановка задачи моделирования представлена на Рисунок 5.

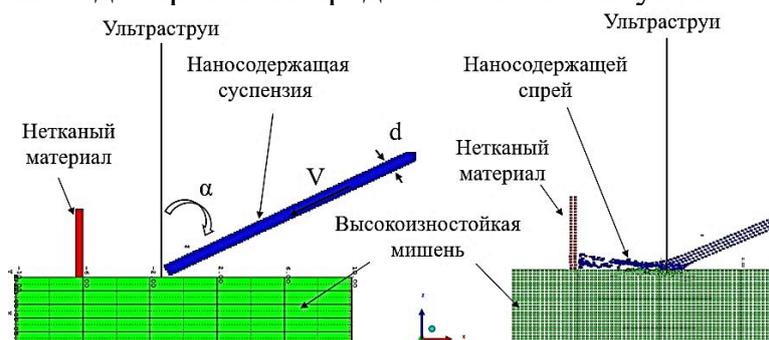


Рисунок 5. Расчетная схема и постановка задачи моделирования УД

В процессе исследования варьировался угол взаимодействия ультразвуку с мишенью  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ ; скорость ультразвуку  $V = 400, 600, 800$  м/с.

В качестве иллюстрации на Рисунок 6 представлены результаты расчетов, проведенные с целью выбора технологических параметров обработки по критерию обеспечения максимальной площади контакта спрея с поверхностью нетканого материала медицинского назначения.

Анализ результатов численного моделирования показал, что площадь взаимодействия спрея и нетканого материала является максимальной при угле взаимодействия ультразвуку с мишенью  $45^\circ$ , при расстоянии от места этого взаимодействия до нетканого 600 мм и скорости ультразвуку 800 м/с.

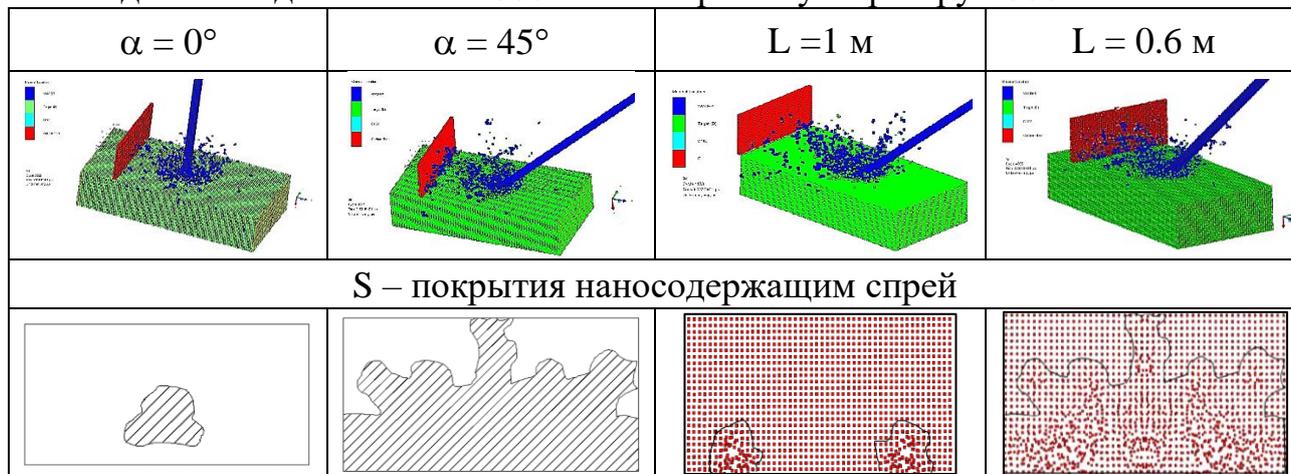


Рисунок 6. Результаты численного моделирования взаимодействия ультразвуку с мишенью и процесса спреобразования при различных углах контакта

**В четвертой главе** проведены экспериментальные исследования по изучению возможностей технологии УД при и использовании различных нанопорошков: углеродные нанотрубки (пр-во «Arkema», Франция), графен (пр-во ООО "НаноТехЦентр, г. Тамбов, РФ), бемит (пр-во НИИ ИП с ОП, г. Минск, РБ). Сформированы представления о технологических возможностях метода и получаемых после обработки размеров частиц указанных порошков и их объемном распределении. Проведен сравнительный анализ результатов технологических возможностей метода ультразвуку диспергирования и УД. Выполнено сравнение данных теоретических расчетов и экспериментов.

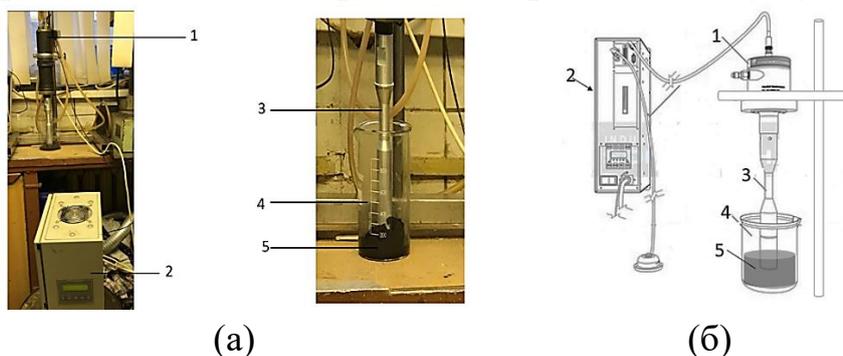


Рисунок 7. Установка для ультразвуку обработки наносодержащих суспензий (а) и схема процесса диспергирования (б), где 1 – корпус, 2 – ультразвуку генератор, 3 – ультразвуку волновод, 4 – емкость для диспергирования, 5 – наносодержащая суспензия

Эксперименты по диспергированию наносодержащих суспензий ультразвуку методом проводились согласно схемам, представленным на Рисунке 7. Нанопорошки массой 0,3 г, вводились в стеклянную мерную емкость с дистиллированной водой объемом 10 мл и предварительно механически размешивались. Технические характеристики УЗО: входная мощность - 500-400 Вт; напряжение питания и частота - 220+/-22В, 50 Гц; габаритные размеры 10

генератора – 400x300x200 мм; диаметр и длина преобразователя – 70x420 мм; масса - 3,5 кг; режим работы – непрерывный.

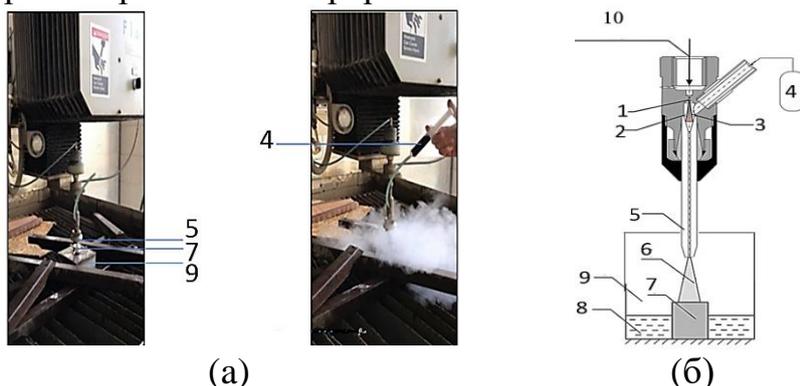
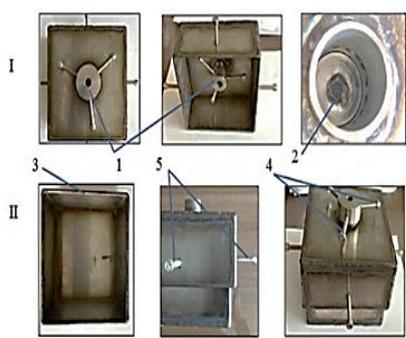


Рисунок 8. Установка (а) и схема (б) для УД наносодержащих суспензий, где 1 – формирующее гидросопло, 2 – камера смешивания, 3 – высокоскоростная струя жидкости, 4 – емкость для премикса (наносодержащая суспензия), 5 – фокусирующая трубка, 6 – высокоскоростная струя суспензии, 7 – мишень из синтетического алмаза, 8 – обработанная суспензия, 9 – емкость-уловитель для сбора суспензии, 10 – подача воды под давлением 800 МПа

Эксперименты по УД наносодержащих суспензий проводились согласно схеме на Рисунок 8. Наносодержащая суспензия на основе дистиллированной воды подавались в камеру смешивания ультразвуковой установки с помощью специального мерного дозатора. В результате эжекции суспензия увлекается высоконапорной струей, разгоняется в фокусирующей трубки до скоростей порядка 800 м/с и тормозится о высокотвердую мишень. Сбор обработанной суспензии осуществлялся в специально изготовленную технологическую оснастку (см. Рисунок 9).



1 – патрубков для установки в нем фокусирующей трубки; 2 – цилиндрическая мишень с закрепленным в ней монокристаллом алмаза; 3 – емкость для сбора суспензий, 4 – винты - элемент фиксации мишени; 5 –винты - элемент фиксации верхней крышки к днищу емкости для сбора суспензий;

Рисунок 9. Технологическая оснастка для УД наносодержащих суспензий, где I - верхняя крышка емкости, II – емкость в сборе

До и после диспергирования наносодержащие суспензий были изучены с помощью лазерного анализатора размеров частиц Microtrac Bluewave, что позволило получить данные по статистическому количественному распределению частиц (см. Рисунок 10).

На основе анализа полученных данных было установлено, что в сравнении с ультразвуковым диспергированием метод УД позволяет уменьшить размеры частиц от 2 до 8 раз в зависимости от используемого в суспензиях нанопорошка.

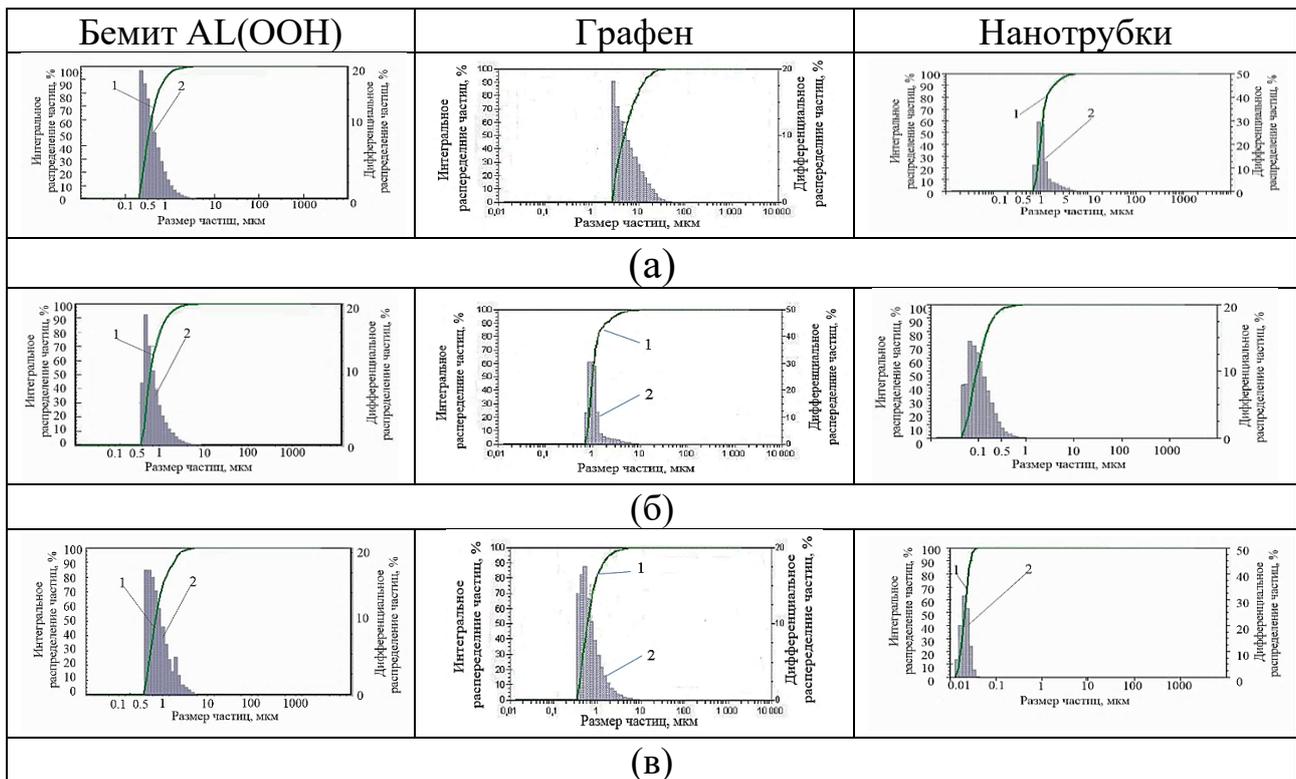
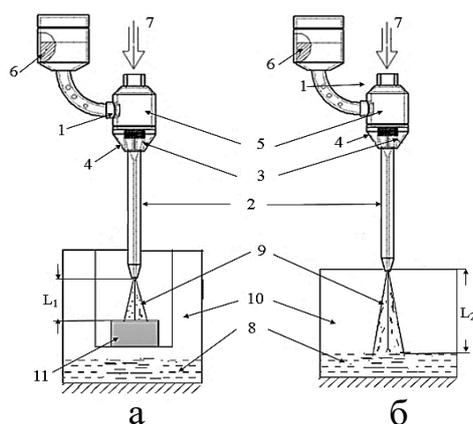


Рисунок 10. Графики значений средних размеров частиц по количественному распределению (а) - для исходных образцов, (б) - для образцов после ультразвукового воздействия, (в) – для образцов после ультраструйного воздействия: 1 – интегральное распределение частиц, 2 – дифференциальное распределение частиц

С целью подтверждения гипотезы о доминирующем технологическом факторе УД суспензий, содержащих наночастицы, определяющим эффективность процесса диспергирования, которым является удар ультраструи с высокотвердой мишенью, было проведено сравнительное исследование в соответствии со схемами Рисунок 11.



$L_1$  - расстояние между срезом фокусирующей трубки и поверхностью мишени, мм;  
 $L_2$  - расстояние между срезом фокусирующей трубки и поверхностью емкости для сбора суспензий; 1 – всасывающий канал; 2 - фокусирующая трубка; 3 – зажимная гайка; 4 – зажимная втулка; 5 – гидросопло; 6 – подача наносодержащей суспензий; 7 – подача воды; 8 – обработанная суспензия; 9 – ультраструя; 10 – емкость-уловитель; 11 – мишень;

Рисунок 11. Принципиальная схема УД наносодержащих суспензий с мишенью (а), без мишени(б)

Результаты сравнительного анализа размеров частиц в составе суспензий представлены на Рисунок 12 в исходном состоянии, после ультраструйной обработки с мишенью и без мишени соответственно.

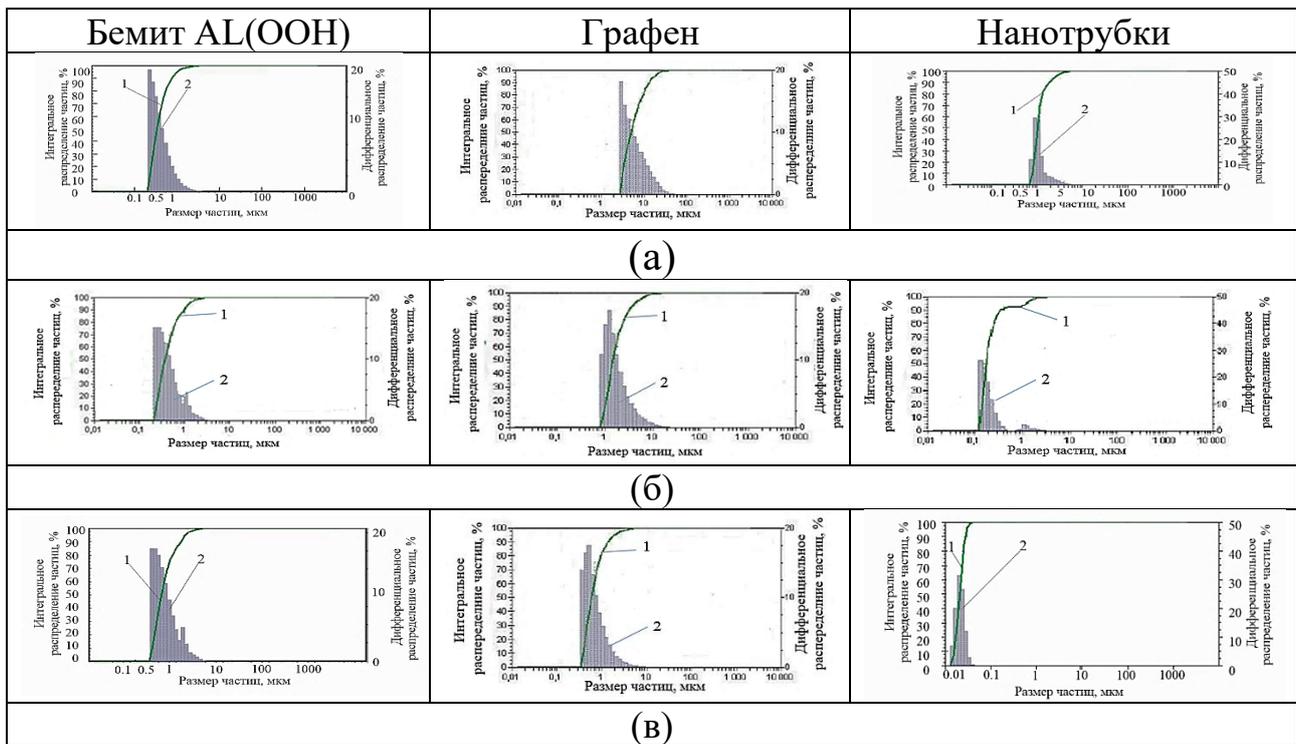


Рисунок 12. Графики значений средних размеров частиц по количественному распределению: (а) - для исходных образцов; (б) - для образцов после ультразвукового воздействия без мишени; (в) - для образцов после ультразвукового воздействия с мишенью; 1 – интегральное распределение частиц, 2 – дифференциальное распределение частиц

Установлено, что диспергирование осуществляется не только при ударе о твердую мишень, но и в процессе прохождения тракта гидроустановки, т.е. камеру смешивания и фокусирующую трубку (см. Рисунок 12б). Причем результаты диспергирования по схеме Рисунок 12б, близки результатам ультразвуковой обработки (см. Рисунок 10б).

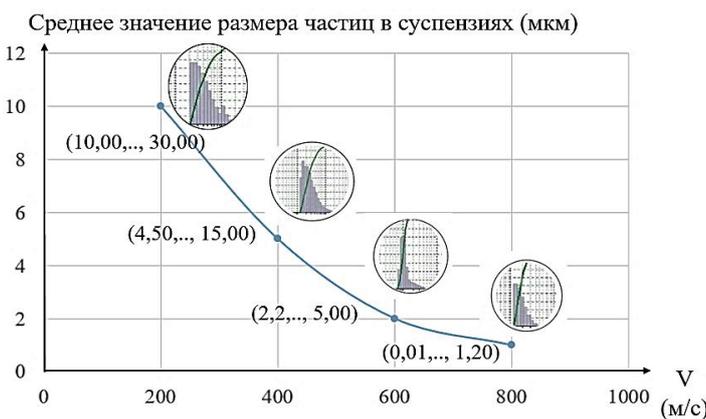


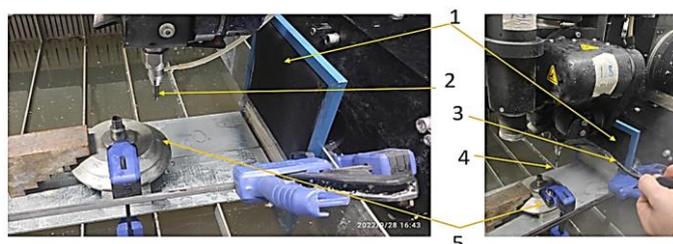
Рисунок 13. Взаимосвязь скорости ультразвука и размеров агломератов наночастиц

Так же в ходе экспериментов было установлено, что размер агломератов наночастиц уменьшается с увеличением скорости ультразвука вплоть до значений 800 м/с, а доминирующим технологическим фактором УД является мощное взаимодействие (соударение) ультразвуковой суспензии с высокотвердой мишенью.

В главе представлен постановочный эксперимент по наномодификации графеном и материалом мишени нетканого материала медицинского назначения на основе результатов численного моделирования по выбору рационального угла

взаимодействия ультразвука с мишенью  $45^\circ$  и расстояния от места этого контакта до нетканого материала, 600 мм.

Результаты исследования с помощью электронного анализатора частиц определены массовая концентрация ультразвуковых суспензий, форма, размеры, а также сравнительное распределение частиц до и после УСД.



1 - образец углеткани; 2 - фокусирующая трубка; 3 - подача наносодержащей суспензии; 4 - ультразвуковая суспензия; 5 - мишень  $45^\circ$ ;

Рисунок 14. Схема проведения эксперимента по наномодификации нетканого материала

В качестве иллюстрации на Рисунке 15 представлены изображения наномодификатора - графена до обработки и на волокнах углеткани (см. Рисунок 15а, в). А также частицы мишени на Рисунок 15б.

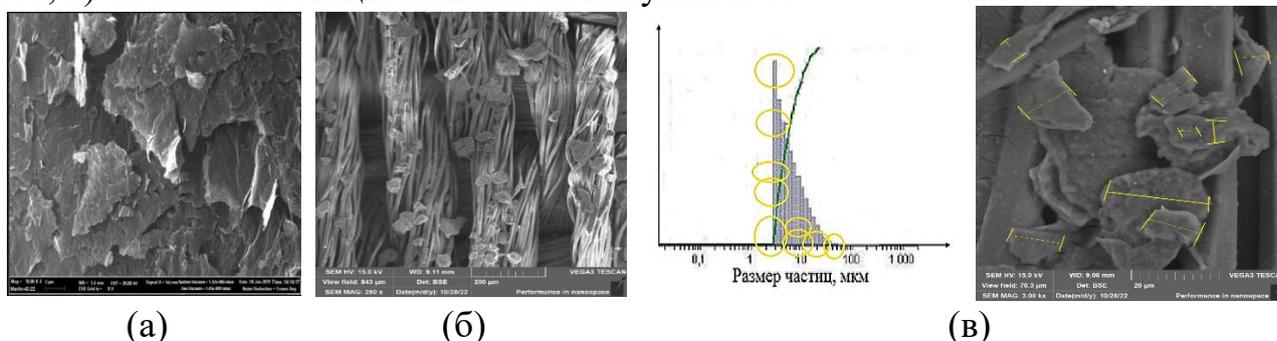
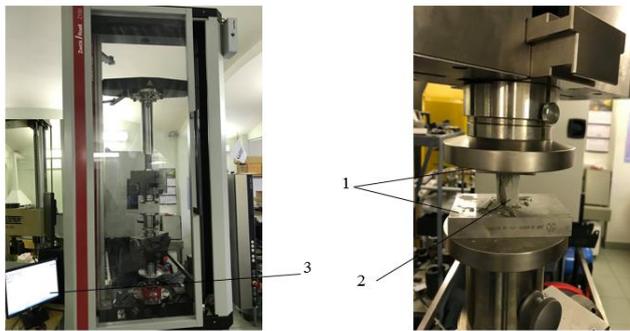


Рисунок 15. Изображение наномодификатора - графен (а) - графен в исходном состоянии, (в) - графен после УСД и спреобразования, (б) – частицы мишени на нетканом материале

Гипотеза, сформулированная на этапе разработки модели энергетического баланса подтвердилась в процессе эксперимента и было установлено, что метод УСД может быть использован и для формирования высокоскоростного спрея с целью использования его для пропитки (модификации) нетканого материала медицинского назначения.

В заключении главы с целью иллюстрации потенциальных возможностей результатов УСД представлены эксперименты по модификации композиционного материала – бетона. На основе наносодержащих суспензий после их УСД были изготовлены образцы из бетона марки М150. Для минимизации порообразования и трещинообразования, в процессе заливки бетонной смеси в выкладные формы, осуществлялось вибрационное воздействие на них в горизонтальной плоскости. После выдержки полученных образцов в течение 28 дней и набора ими прочности были проведены прочностные испытания на сжатие. Эксперименты проводились на кафедре МТ8 МГТУ им. Н.Э. Баумана на установке ZWICK Z100 (см. Рисунок 16). Испытания партии бетонов показали, что введение наномодификаторов после их УСД позволяет увеличить как прочность данного материала, так и улучшить эстетические показатели (снижена трещинообразование).



- 1 - подвижная и неподвижная платформы;
- 2 – образец бетона;
- 3 – система управления и фиксации информации.

Рисунок 16. Процесс испытаний на прочность образцов наномодифицированных бетонов с помощью установки станка Zwick Z100  
 Результаты испытаний на прочность представлены в Таблице 1.

Таблица 1

Результаты испытаний на прочность при сжатии партии образцов бетонов с помощью испытательной машины ZWICK Z100

№ образца	Образец бетона	$\sigma$ , МПа
1	Бетон (без наномодификаторов)	14,9
2	Бетон на основе суспензии с графеном после УД	22,0
3	Бетон на основе суспензии с бемитом после УД	17,1
4	Бетон на основе суспензии с углеродными нанотрубками после УД	22,7

Выполненный анализ показал, что разработанная инженерная методика обладает общностью, и может быть использована для решения смежных задач (см. Рисунок 17).

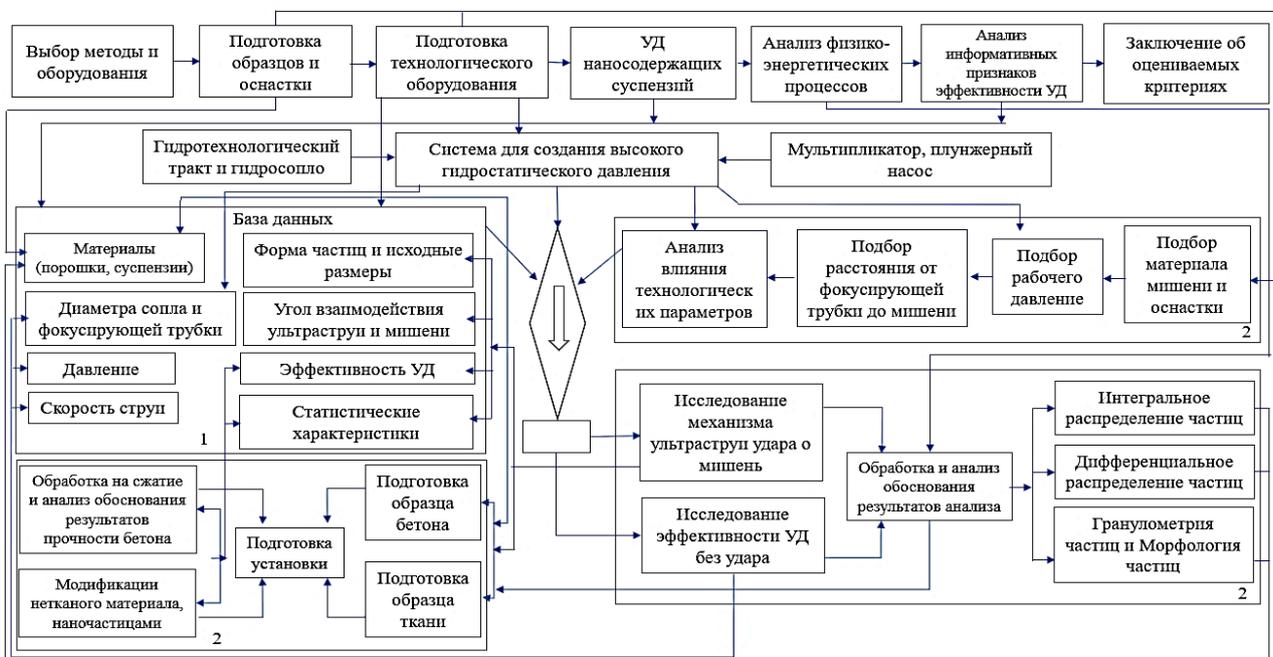


Рисунок 17. Инженерная экспресс-методика оценки эксплуатационных свойств наносодержащих суспензий, где 1 — подготовка к проведению эксперимента, 2 — выбор режимов модельного эксперимента, УД — ультразвуковое диспергирование

## **Общие выводы по работе**

1. На основе анализа информационных источников по вопросам диспергирования суспензий установлено, что существующие технологии не удовлетворяют потребностям потребителей и имеют существенные недостатки, показывающие необходимость разработки новых более эффективных методов обработки.

2. На основе результатов теоретических исследований и их экспериментальной проверки показано, что эффективность УД наносодержащих суспензий зависит от скоростных параметров ультразвука, формируемой в тракте гидроустановки, а основным фактором, влияющим на размер частиц, является ее удар о мишень.

3. Установлено, что размер частиц в составе суспензий после УД зависит от вида порошка (графен, углеродные нанотрубки, бемит) и находится в диапазоне от 1 до 0,01 мкм, что в 2...8 раз меньше, чем аналогичный размер частиц, полученный после ультразвуковой обработки.

4. На основе результатов экспериментальных исследований предложены основные технологические режимы УД, разработаны рекомендации по введению наночастиц, разгону и торможению суспензий, представленные в виде инженерной схемы обработки.

5. На основе результатов анализа энергетических превращений и численного моделирования процесса УД при различных углах взаимодействия ультразвука и мишени, проведены эксперименты по модификации нетканого материала медицинского назначения, доказывающие возможность введения материала мишени или частиц суспензии в его структуру.

6. Экспериментально показана эффективность применения наносодержащих суспензий после УД при модификации и изготовлении образцов из бетона, в том числе, на примере их сравнительных прочностных испытаний на сжатие, показавших увеличение прочности модифицированных бетонов в зависимости от используемых порошков от 13 до 28%.

## **Основные публикации по теме диссертации**

1. Заявка 2020124689 Российская Федерация, МПК В01F 3/12, G01N 29/14. Способ обработки неоднородных гидросред (жидкостей) / Чжо Мью Хтет [и др.], заявл. 15.07.2020. опублик. 16.03.2022. Бюл. № 8. (0.54 п.л. / 0.06 п.л.) Проведение патентного поиска по тематике патента и подготовка рисунки и схемы для патента.

2. Анализ технологии и оборудования, применяемого для диспергирования наносуспензий / Чжо Мью Хтет [и др.] // Справочник. Инженерный журнал. 2022. №10(307). С. 26. (0.50 п.л. / 0.11 п.л.) Выполнение анализа возможности применения технологии и оборудования для диспергирования.

3. Сравнительный анализ результатов гомогенизации наносуспензий методом ультразвуковой обработки / Чжо Мью Хтет [и др.] // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2020. № 9(282). С. 13-19. (0.45 п.л. / 0.09 п.л.)

п.л.) Разработка конструкции для диспергирования ГТС, обработка и обобщение полученных результатов.

4. Разработка метода гидроэрозионного насыщения жидкостей микрочастицами материалов мишеней с использованием ультразвуку / Чжо Мью Хтет [и др.] // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2020. № 3(720). С. 3-14. (0.66 п.л. / 0.22 п.л.) Разработка конструкцию перспективного инструмента для диспергирования.

5. К вопросу эффективности различных методов диспергирования наносодержащих суспензий / Чжо Мью Хтет [и др.] // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2019. № 11. С. 2-7. (0.66 п.л. / 0.22 п.л.) Разработка эксперименты по ультразвуку и ультразвуковой отработки.

6. Наномодифицирование бетонов суспензиями, обработанными по ультразвуку технологии / Чжо Мью Хтет [и др.] // Все материалы. энциклопедический справочник. 2021. С. 16-22. (0.45 п.л. / 0.11 п.л.) Проведение эксперименты для испытания на прочность бетона и выполнение регрессионного анализа данных эксперимента.

7. Kyaw Myo Htet, Galinovskiy A.L., Provatorov A.S. Ultra-Jet as a Tool for Dispersing Nanosuspensions / Polymer Science. Series D. 2020. Vol. 13. P. 209-213. DOI: 10.1134/S1995421220020070. (0.33 п.л. / 0.11 п.л.) Разработка конструкцию инструмента для ультразвуку диспергирования, обработка и обобщение полученных результатов.

8. Kyaw Myo Htet, Galinovskiy A.L. Homogenization of nanocontaining suspensions using ultra-jet methods / IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 934. №. 012035. DOI: 10.1088/1757-899X/934/1/012035. (0.50 п.л. / 0.25 п.л.) Выполнение экспериментального исследования для получения диспергирования и обобщение полученных результатов.

9. Nano-Modification of Concrete with Slurries Using Ultra-Jet Technology / Kyaw Myo Htet [et al.] // Key Engineering Materials. 2021. Vol. 882. P.263-270. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.882.263. (0.45 п.л. / 0.11 п.л.) Проведение эксперименты для испытания на прочность бетона и выполнение регрессионного анализа данных эксперимента.

10. Kyaw Myo Htet, Galinovskiy A.L., Glotova M. P. Innovative research of ultra-jet dispersion and suspension technologies for processing and modifying liquids / Advanced materials and technologies. 2020. №. 3(19). P. 68-75. DOI: 10.17277/amt.2020.03.pp.068-075. (0.50 п.л. / 0.25 п.л.) Проведение анализа литературных источников, обработка и обобщение полученных результатов.

11. Kyaw Myo Htet, Galinovskiy A.L., Glotova M. P. New method of ultra-jet dispersion technologies for processing and modifying liquids // AIP Conference Proceedings/ 2021. Vol. 2318. №. 100004. DOI: 10.1063/5.0035925. (0.33 п.л. / 0.11 п.л.) Проведение анализа литературных источников, обработка и обобщение полученных результатов.