На правах рукописи



Голых Роман Николаевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВОЗДЕЙСТВИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ НА ПРОЦЕССЫ В СИСТЕМАХ С ЖИДКОЙ ФАЗОЙ

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Работа выполнена в Бийском технологическом институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный консультант	доктор технических наук, доцент, Шалунов Андрей Викторович	
Официальные оппоненты:	Муллакаев Марат Салаватович, доктор технических наук, доцент, ФГБУН Институт общей и неорганиче ской химии им. Н.С. Курнакова РАН в.н.с. лаборатории ультразвуковой тех ники и технологии	
	Веригин Александр Николаевич, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский го- сударственный технологический инсти- тут (технический университет)», про- фессор кафедры «Машины и аппараты химических производств»	
	Хромова Елена Михайловна, доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Томский государственный архитектурно-строительный универси- тет», заведующая кафедрой Охраны тру- да и окружающей среды	

Ведущая организация

ФГБУН Институт проблем химикоэнергетических технологий Сибирского отделения Российской академии наук

Защита диссертации состоится «26» февраля 2021 года на заседании диссертационного совета Д 212.004.08 в Бийском технологическом институте (филиале) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», по адресу 659305, Бийск, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, 27.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.bti.secna.ru Бийского технологического института (филиала) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан « »

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук, доцент

JAC

Шалунов А.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Известно и многократно доказано, что воздействие ультразвуковыми (УЗ) колебаниями (УЗ воздействие) на системы с жидкой фазой реализует кавитационные (ударные волны и кумулятивные струи) и другие нелинейные эффекты (силы ортокинетического и гидродинамического взаимодействия дисперсных частиц в жидкости). Эти эффекты способны изменять структуру и характеристики систем с жидкой фазой (изменять молекулярную массу и вязкость несущей жидкой фазы, фракционный состав частиц дисперсной фазы), что позволяет получать новые материалы или придавать известным материалам новые, уникальные характеристики (многократно увеличенные пропитывающая способность, поверхность взаимодействия, предел прочности после отверждения, сниженное содержание нежелательной примеси и т. д.).

На сегодняшний день режимы (амплитуда колебаний поверхности ультразвукового излучателя и принцип формирования УЗ колебаний) и условия (геометрия технологического объёма) воздействия, позволяющие достичь как можно большей эффективности процессов в системе с жидкой фазой (например, химическая реакция, диспергирование, коагуляция, эмульгирование), в основном, подбираются экспериментальным путём индивидуально на конкретных средах. Однако такой подход обладает рядом принципиальных недостатков, а именно:

– не обеспечивает максимум КПД ультразвукового воздействия с помощью подобранных режимов и условий, поскольку не определяется фактическое отношение затрат энергии на преобразование структуры и характеристик системы с жидкой фазой (энергии на разрыв межатомных и межмолекулярных связей жидкой фазы, разрушение или коагуляцию дисперсных частиц) к введённой акустической энергии;

 не гарантирует, что подобранные режимы и условия обеспечат максимальную энергетическую эффективность процесса на протяжении всего времени его протекания. Это связано с тем, что под действием ультразвука с течением времени меняются свойства и характеристики обрабатываемой среды;

– не позволяет прогнозировать оптимальные режимы и условия воздействия для вновь разрабатываемых процессов. Это обусловлено тем, что такой подход не даёт возможность установить единые закономерности формирования структуры и характеристик систем с жидкой фазой в зависимости от режимов и условий ультразвукового воздействия.

Одно из следствий указанных недостатков – в существующих промышленных образцах ультразвуковых технологических аппаратов, которые реализуют экспериментально подобранные режимы и условия, более 90% энергии теряется в виде нагрева озвучиваемой среды.

В связи с этим для решения проблемы оптимизации ультразвукового воздействия на системы с жидкой фазой необходимо создание комплексной взаимосвязанной модели преобразования энергии УЗ колебаний в целевое изменение структуры и характеристик обрабатываемой среды, которая позволит выявить режимы и условия, обеспечивающие повышение КПД воздействия.

Всё это обуславливает актуальность темы диссертационной работы.

Результаты диссертационной работы получены при проведении работ по Гранту РНФ в рамках Президентской программы исследовательских проектов, реализуемых ведущими учёными, в том числе молодыми учёными № 18-79-00094 «Химическая кинетика гетерогенных реакций в кавитационных полях для получения альтернативных энергоносителей из вторичного сырья» (руководитель), шести Грантам Президента для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук и докторов наук: регистрационные номера № МК-2813.2018.8, МК-4515.2016.8 (руководитель); МК-179.2014.8, **МД-424.2018.8**, **МД-4753.2016.8**, **МК-957.2014.8** (соисполнитель); по Грантам РФФИ №16-08-01298 «Кавитационные эффекты в анизотропных неньютоновских средах для управления свойствами полимерных композиционных материалов» (руководитель); №14-08-31716 «Исследование процесса формирования и развития кавитационной области вблизи границы раздела фаз для выявления эффективных режимов воздействия на различные среды» (руководитель); №17-48-220053 «Физико-химические основы кавитационной интенсификации процессов получения биотоплива» (руководитель); №14-08-31521 «Исследование кавитации в жидкой фазе значительной вязкости и установление взаимосвязи акустических свойств кавитирующей среды с параметрами ультразвукового из-(соисполнитель); государственному лучения» контракту № 14.В37.21.1173 (соисполнитель) и ряда хоздоговорных НИР.

Степень разработанности темы. До сегодняшнего дня теоретические исследования для создания моделей УЗ воздействия на системы с жидкой фазой ограничивались лишь гидродинамикой расширения и схлопывания отдельного кавитационного пузырька и априорными оценками параметров кавитационной области в однородных УЗ полях (Л.Д. Розенберг, Б.С. Когарко, Н.Н. Андреев, В.А. Акуличев, М.Г. Сиротюк, В.К. Кедринский, И.М. Маргулис, С.Е. Brennen, J.R. Blake, D.G. Gibson, P.B. Robinson). При этом не учитывались резонансные явления при УЗ воздействии (R.J. Urick, N. Bretz), которые возникают в реальных технологических объёмах и изменяют эффективность процессов до 1,5...3 раз. Кроме того, до сегодняшнего дня не предпринималось попыток исследований реструктуризации межатомных и/или межмолекулярных связей исходного сырья при ультразвуковом воздействии. В то время как для прогнозирования свойств получаемых материалов и подбора энергетически выгодных режимов и условий УЗ воздействия такие исследования необходимы в первую очередь.

Имеющиеся экспериментальные исследования (R.D. Huang, W. Xie, C. Sheng, А.Ф. Магсумова, М.М. Ганиев, Л.Д. Розенберг, Ю.Ф. Заяс), применяемые, как уже говорилось, для подбора режимов и условий воздействия, проводились лишь при небольшом числе варьируемых параметров УЗ воздействия и исходной среды. Результаты этих экспериментов не позволяют установить единые закономерности и создать обоснованные методики определения оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия, обеспечивающих минимальные энергозатраты на преобразование структуры и характеристик систем с жидкой фазой.

Всё это в результате обуславливало недостаточную энергетическую эффективность УЗ воздействия с помощью существующих промышленных образцов технологических аппаратов. **Цель работы** – разработка научных основ повышения эффективности ультразвукового воздействия на системы с жидкой фазой за счёт создания комплексной взаимосвязанной модели преобразования энергии колебаний в целевое изменение характеристик обрабатываемой среды.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие частные задачи:

1. Выработка единого подхода к определению режимов и условий воздействия за счет анализа процессов химических технологий и определения стадий преобразования ультразвуковой энергии при их реализации.

2. Создать модель формирования и распространения перепадов давлений в технологическом объёме, содержащем систему с жидкой фазой, при воздействии ультразвуковых колебаний.

3. Установить оптимальные условия воздействия, обеспечивающие повышение равномерности распределения перепадов давлений в технологическом объёме.

4. Создать замкнутые кинетические модели эволюции характеристик системы с жидкой фазой (концентраций различных химических соединений, реологических свойств среды, дисперсного состава гетерогенных включений) с учётом перепадов давления в среде, инициируемых ультразвуковыми колебаниями.

5. Выявить оптимальные режимы ультразвукового воздействия, обеспечивающие повышение энергетической эффективности преобразования структуры и характеристик систем с жидкой фазой.

6. Экспериментально подтвердить адекватность созданных моделей формирования и распространения перепадов давлений при воздействии ультразвуковых колебаний и кинетических моделей эволюции характеристик системы с жидкой фазой.

7. Разработать аппаратурное оформление для воздействия УЗ колебаний на системы с жидкой фазой с повышенной энергетической эффективностью на базе полученных теоретических и экспериментальных результатов.

Научная новизна:

1. Впервые создана и реализована численная модель, позволяющая рассчитать форму и положение кавитационной зоны в технологическом объёме обрабатываемой среды с учётом затухания и отражения УЗ колебаний.

2. Впервые предложены кинетические модели формирования характеристик системы с жидкой фазой в зависимости от времени пребывания среды в аппарате и режимов ультразвукового воздействия, а именно:

 модель УЗ кавитационной механодеструкции макромолекул, позволяющая выявить конечные характеристики и изменение энергии связи молекул олигомера от времени и режимов ультразвукового воздействия;

– модель УЗ кавитационного диспергирования твёрдых частиц, позволяющая выявить эволюцию фракционного состава частиц в ходе диспергирования;

– модель УЗ коагуляции в гетерогенных системах с несущей жидкой фазой при воздействии импульсно-модулированных ультразвуковых колебаний, обеспечивающая выявление оптимальных мощностных и временных параметров ультразвукового воздействия, при которых скорость коагуляции будет максимальна.

3. Впервые установлены и подтверждены экспериментальнотеоретические зависимости характеристик озвучиваемой среды – фракционного состава макромолекул и вязкости неотверждённого олигомера (на примере эпоксидной смолы ЭД-20) в ходе процесса механодеструкции макромолекул, фракционного состава дисперсной фазы в ходе процесса диспергирования от режимов и длительности УЗ воздействия.

4. Впервые установлены и подтверждены экспериментальнотеоретические зависимости относительных энергозатрат (удельной мощности, затрачиваемой на изменение межатомных и/или межмолекулярных связей среды в единице объёма, отнесённой к интенсивности ультразвукового воздействия) на преобразование структуры и характеристик среды – сплошной жидкой фазы с наличием или отсутствием дисперсной фазы от режимов ультразвукового воздействия и начальных характеристик озвучиваемой среды.

5. Выявлены оптимальные интенсивности ультразвукового воздействия при реализации эндотермических процессов (диспергирования и механодеструкции) в системах с жидкой фазой (диспергирования на примере частиц алюминия и бурого угля в жидкости и механодеструкции макромолекул олигомера на примере эпоксидной смолы ЭД-20). Выявленные оптимальные интенсивности обеспечивают максимальную долю энергии, трансформируемую непосредственно в преобразование структуры и характеристик среды.

6. Впервые теоретически показана возможность повышения скорости коагуляции дисперсных частиц (на примере растительного сырья – свежеотжатых соков; облепихового виноматериала, содержащего дисперсную фазу; частиц бентонита в воде) до 1,5 раз при воздействии импульсно-модулированными ультразвуковыми колебаниями по сравнению с воздействием непрерывными синусоидальными колебаниями.

Практическая значимость заключается в открытии новых направлений развития и дальнейшем совершенствовании существующих химических технологий получения материалов различного назначения с улучшенными характеристиками за счёт:

1. Принципиально нового подхода к оптимизации режимов УЗ воздействия, основанного на определении фактических энергозатрат на реструктуризацию межатомных и межмолекулярных связей в системах с жидкой фазой с использованием разработанных феноменологических моделей процессов. Новый подход обеспечивает в 1,3...1,8 раз более высокий КПД по сравнению с существующими способами реализации УЗ воздействия.

2. Создания методологии проектирования технологических объёмов, обеспечивающих оптимизацию условий УЗ воздействия путём внедрения отражающих элементов малой толщины специальной формы, позволяющих существенно увеличить объём кавитационной области (в 1,5...3 раза при равной мощности вводимых УЗ колебаний) и, следовательно, повысить энергетическую эффективность процессов, основанных на кавитационном воздействии (механодеструкция макромолекул олигомера, диспергирование). 3. Разработки новых принципов формирования ультразвуковых колебаний (создание периодических волновых пакетов (импульсов, содержащих несколько периодов УЗ колебаний) конечной длительности со скважностью меньше единицы), позволяющих вводить большие энергии по сравнению с непрерывными синусоидальными колебаниями, одновременно поддерживая бескавитационный режим. Это существенно повышает энергетическую эффективность процесса коагуляции (ускоряют до 1,5 раз), не допускающего возникновения кавитации.

4. Модернизации конструкций УЗ технологических аппаратов для практического применения. Модернизированные аппараты реализуют выявленные оптимальные режимы и условия воздействия. Функциональные возможности аппаратов подтверждены для реализации химико-технологических процессов механодеструкции макромолекул олигомеров, диспергирования и коагуляции на предприятиях и организациях Российской Федерации и зарубежья.

Эффективность созданного оборудования доказана в ходе эксплуатации на предприятиях Российской Федерации и зарубежья: группа компаний OCSiAl (Люксембург), ЗАО «Концерн «Наноиндустрия» (г. Москва), ООО «Плазмохимические технологии» (г. Новосибирск), АО «Сибирский научноисследовательский и проектный институт рационального природопользования» (г. Нижневартовск), ООО «НПП «Метромед» (г. Омск).

Объектом исследования являются химико-технологические процессы в системах с жидкой фазой, которые интенсифицируются или инициируются воздействием ультразвуковых колебаний за счёт кавитационных и других нелинейных явлений (сближения частиц дисперсной фазы под действием сил гидродинамического взаимодействия, разрушения молекулярных связей, адгезии).

Методы исследования. При решении задач диссертационной работы применялись теоретические и экспериментальные методы исследования. Теоретические методы базировались на анализе физики процессов и построении моделей, основанных на законах физической кинетики, гидродинамики и механики твёрдого тела. Модели допускают аналитические и численные решения. При экспериментальном исследовании применялись методы оценки эрозионной активности кавитационной области по разрушению тестовых образцов, дополненные измерениями вводимой в среду акустической энергии. Для определения изменения характеристик веществ и материалов при введении акустической энергии применялись методы капиллярной вискозиметрии; методы седиментационного и микроскопического анализа дисперсной фазы и методы статического нагружения образцов.

Достоверность полученных результатов подтверждается использованием доказанных физических законов и строгостью математических выкладок при построении теоретических моделей, соответствием результатов теоретических расчётов экспериментальным данным, высокой степенью автоматизации процесса регистрации экспериментальных данных, применением общепринятых методик проведения экспериментальных исследований и стандартной измерительной аппаратуры, а также успешной практической реализацией предложенных технологий энергетически эффективного воздействия ультразвуковых колебаний на системы с жидкой фазой для получения материалов.

На защиту выносятся:

1. Выявленные диапазоны интенсивностей, обеспечивающие возникновение кавитации и учитывающие свойства жидкой фазы при непрерывном синусоидальном и импульсно-модулированном ультразвуковом воздействии (воздействии в виде синусоидальных колебаний, модулированных прямоугольными импульсами по амплитуде).

2. Результаты теоретических исследований формирования и распространения перепадов давления в технологических объёмах, обеспечившие выбор диапазона режимов УЗ воздействия и геометрических размеров объёмов, при которых достигается 1,5...3-кратное увеличение формируемой кавитационной области.

3. Кинетические модели механодеструкции макромолекул олигомера, диспергирования и коагуляции под действием ультразвуковых колебаний, позволяющие прогнозировать структуру и характеристики систем с жидкой фазой в зависимости от времени пребывания среды в аппарате и режимов ультразвукового воздействия.

4. Оптимальные интенсивности и принципы формирования ультразвуковых колебаний, обеспечивающие максимальную трансформацию энергии УЗ колебаний в изменение структуры и характеристик системы с жидкой фазой, для различных видов процессов (механодеструкции макромолекул олигомера, диспергирования и коагуляции).

5. Результаты экспериментальных исследований, подтвердившие адекватность модели формирования перепадов давления и показавшие возможность повышения эффективности УЗ кавитационной обработки систем с жидкой фазой за счёт использования в технологических объёмах специальных отражателей.

6. Результаты экспериментальных исследований, подтвердившие адекватность кинетических моделей механодеструкции макромолекул олигомера, диспергирования и коагуляции формирования структуры и характеристик систем с жидкой фазой и энергетическую эффективность теоретически выявленных оптимальных режимов ультразвукового воздействия для интенсификации химико-технологических процессов механодеструкции макромолекул олигомеров, диспергирования и коагуляции.

7. Новые пути развития, принципы формирования колебаний и подходы к оптимизации режимов работы УЗ технологических аппаратов, обеспечивающие повышенную энергетическую эффективность воздействия для интенсификации различных химико-технологических процессов в системах с жидкой фазой.

Личный вклад автора состоит в постановке задач исследования, выработке общего подхода к проведению теоретических исследований ультразвукового воздействия на системы с жидкой фазой; проведении теоретических исследований процесса формирования и распространения перепадов давления в технологических объёмах; подготовке публикаций по выполненной работе; создании кинетических моделей эволюции структуры и характеристик системы с жидкой фазой в зависимости от времени пребывания среды в аппарате и режимов ультразвукового воздействия; проведении экспериментальных исследований, подтвердивших эффективность теоретически выявленных оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия для интенсификации химикотехнологических процессов в системах с жидкой фазой.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались: на Международной научной конференции «Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы» (Республика Беларусь, г. Витебск, 2016 г.); на VIII Международной конференции, посвящённой 115-летию со дня рождения академика М.А. Лаврентьева «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике» (г. Новосибирск, 2015 г.); на Всероссийской конференции с международным участием «Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва», посвящённой 60-летию ИГиЛ СО РАН (г. Новосибирск, 2017 г.); на Всероссийских научно-практических конференциях с международным участием «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности» (г. Бийск, 2013–2019 гг.); на Международных косыгинских форумах по энергоресурсоэффективным химическим технологиям (г. Москва, РГУ им. А.Н. Косыгина, 2017, 2019 гг.); на Международной научной конференции «Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы» (г. Уфа, 2017 г.); на Всероссийской конференции с участием зарубежных учёных «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН) 2011, 2014 г.; на V Всероссийской конференции с международным участием «Полярная механика» (г. Новосибирск, 2018 г.); на Всероссийской конференции «Нелинейные волны: теория и новые приложения», посвящённой 70-летию со дня рождения чл.-корр. РАН В.М. Тешукова (г. Новосибирск, 2016 г.); на Всероссийских семинарах «Моделирование неравновесных систем» (г. Красноярск, 2016, 2017, 2019 гг.); на конференциях EDM (Novosibirsk, 2010–2019 гг.).

Публикации. Материалы диссертации изложены в 50 печатных работах, в том числе 17 статьях в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, 8 статьях в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, 2 монографиях, получен 1 патент на полезную модель.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести разделов, основных выводов и результатов, списка литературы из 258 наименований и содержит 437 страниц машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и задачи исследования.

В первом разделе проведён анализ современных представлений о влиянии ультразвуковых колебаний на системы со сплошной жидкой фазой и выявлены причины, ограничивающие КПД ультразвукового воздействия при получении материалов (даже при использовании УЗ излучателей с развитой поверхностью) в рамках решения первой из поставленных задач.

В первой части раздела выявлены основные механизмы воздействия УЗ колебаний на структуру и характеристики систем со сплошной жидкой фазой в *кавитационном* (когда возникают схлопывающиеся кавитационные пузырьки и локальные перепады давления в среде из-за схлопывания пузырьков достигают 1 ГПа) и *бескавитационном* режимах (когда кавитационные пузырьки не воз-

никают, локальные перепады давления линейно пропорциональны амплитуде колебаний излучателя и, как правило, не превышают 20 МПа).

Установлено, что механизмы воздействия ультразвуковых колебаний на системы с жидкой фазой полностью определяются наличием/отсутствием поверхности раздела фаз в озвучиваемой системе и наличием/отсутствием кавитации. Выявленные механизмы воздействия позволили определить основные направления исследований, современное состояние которых подлежит анализу для установления причин, ограничивающих КПД ультразвукового воздействия.

Далее был проведён обзор современных представлений о формировании кавитационных пузырьков в системах со сплошной жидкой фазой. Согласно обзору, начиная с 50-х годов прошлого века вплоть до сегодняшнего дня, отечественными (Л.Д. Розенберг, Б.С. Когарко, Н.Н. Андреев, В.А. Акуличев, М.Г. Сиротюк, В.К. Кедринский, И.М. Маргулис, В.Н. Хмелёв) и зарубежными учёными (С.Е. Brennen, J.R. Blake, D.G. Gibson, P.B. Robinson, R.J. Urick, N. Bretz) предпринимались, в основном, попытки исследований всех стадий формирования отдельного кавитационного пузырька (зарождение, расширение, схлопывание). В проанализированных работах показана принципиальная возможность управления пороговой интенсивностью, требуемой для возникновения кавитации, путём изменения длительности ультразвукового импульса (волнового пакета).

Далее в разделе был проведён обзор существующих результатов экспериментальных исследований воздействия ультразвуковых колебаний на структуру и характеристики систем со сплошной жидкой фазой (диспергирования твёрдых частиц в жидкостях, ускорения химических реакций, эмульгирования, механодеструкции макромолекул, коагуляции эмульсий и суспензий). Проанализированные экспериментальные исследования были получены с помощью существующих ультразвуковых аппаратов, созданных ведущими отечественными (ООО «Ультразвуковая техника-Инлаб», ФГУП ГЗ «Пульсар») и зарубежными (Hielsher Gmbh, Mastersonic) производителями. Проведённый обзор позволил установить принципиальную возможность изменения структуры и характеристик широкого класса сред (при вязкости жидкой фазы от 1 до 2000 мПа·с; при исходных и/или целевых размерах частиц дисперсной фазы от 0,01 до 100 мкм) наложением УЗ колебаний для получения материалов с улучшенными характеристиками. В то же время, несмотря на доказанную принципиальную возможность изменения структуры и характеристик, проведённый обзор исследований формирования кавитационной области, структуры и характеристик систем со сплошной жидкой фазой позволил выявить основные причины, обуславливающие недостаточный КПД УЗ воздействия на среды:

1. Отсутствие системных научных данных об *оптимальных режимах ультразвукового воздействия*, при которых достигается максимальная доля вводимой энергии колебаний, трансформируемая в изменение структуры и характеристик среды (изменение молекулярной структуры сплошной жидкой фазы, изменение фракционного состава дисперсной фазы).

2. Ограниченность активной обрабатываемой кавитационной зоны (распространение на расстояние, как правило, не более 5 см от излучающей поверхности) для большинства сред, как правило, с *высоковязкой и неньютонов*- *ской сплошной жидкой фазой* даже при использовании УЗ излучателей с развитой поверхностью. Для процессов, требующих обязательного наличия кавитации (например, процессов механодеструкции макромолекул и диспергирования) это приведёт к тому, что в большей доле технологического объёма УЗ поле не будет оказывать ни какого влияния на структуру среды, бесполезно нагревая саму среду, из-за высокой дисперсии интенсивности УЗ колебаний.

3. Отсутствие исследований влияния вязкости сплошной жидкой фазы на порог кавитации при воздействии ультразвуковых колебаний, формируемых по принципу последовательных волновых пакетов конечной длительности (*им-пульсно-модулированных колебаний*). Это не позволяет определить оптимальные режимы УЗ воздействия, обеспечивающие максимальную вводимую энергию в бескавитационном режиме для широкого диапазона реологических свойств сред, чтобы повысить эффективность процессов, не допускающих кавитации (например, коагуляции).

Для устранения указанных причин с целью повышения КПД УЗ воздействия, необходимо, в первую очередь, создать единую теорию формирования, распространения и активного воздействия ультразвуковых колебаний на систему с жидкой фазой (с учётом влияния геометрии технологического объёма на распространение колебаний, неньютоновского поведения жидкой фазы, свойств дисперсной фазы, молекулярной структуры жидкой фазы).

Разработанная в рамках диссертационной работы теория описана в 2–4 разделах. В ходе проведённых теоретических и экспериментальных исследований основное внимание уделено оптимизации интенсивности и принципа формирования УЗ колебаний (*режимов воздействия*), геометрии технологического объёма (*условий*) воздействия. Частота ультразвукового воздействия принималась находящейся в фиксированном диапазоне 22 кГц на основании результатов ранее проведённых исследований формирования колебаний в ультразвукового воздействия в михорания колебаний в ультразвукового воздействия.

Во втором разделе описан предложенный общий подход к созданию единой теории формирования структуры и характеристик систем со сплошной жидкой фазой и модель формирования кавитационной области для определения перепадов давления в среде, инициируемых действием ультразвуковых колебаний.

Энергия колебаний поверхности излучателя формирует перепады давления в жидкости. Возникающие перепады давления диссипируются в среде с полным коэффициентом поглощения K (интенсивность ультразвуковой волны при прохождении некоторого малого расстояния x уменьшается на K x).

Удельная мощность, диссипируемая в единице объёма среды 2KI в единицу времени, включает в себя 2 составляющие ($2KI = 2K_mI + 2K_tI$):

1) удельную мощность, затрачиваемую на нежелательный, а в ряде случаев и недопустимый нагрев среды (повышение кинетической энергии хаотичного движения молекул) – $2K_t I$.

2) удельную мощность, затрачиваемую на изменение структуры (разрушение водородных или углеродных связей молекул, диспергирование или коагуляция твёрдых частиц) среды – $2K_mI$.

Структурные изменения среды изменяют её макроскопические характеристики. Макроскопические характеристики среды, претерпевшие изменения в течение некоторого малого промежутка времени, в течение следующего временного интервала начинают уже по другому влиять на поле возмущений давления в жидкости по сравнению с предыдущим интервалом.



 V – объём озвучиваемой системы с жидкой фазой;
 I_{PRIM} – интенсивность первичной ультразвуковой волны, генерируемой ультразвуковым излучателем, Вт/м²

 I – интенсивность ультразвуковых колебаний в отдельной локальной области технологического объёма, Вт/м²;

I – изменение интенсивности ультразвуковых колебаний в результате диссипации (поглощения) при прохождении ульт-

развуковой волны расстояние x (м), Вт/м²; K – полный коэффициент поглощения колебаний, м⁻¹; K_m – структурная составляющая коэффициента поглощения, м⁻¹;

К_t – тепловая составляющая коэффициента поглощения,м⁻¹ Рисунок 1 – Стадии преобразования энергии ультразвуковых колебаний в системах со сплошной жидкой фазой Например, из-за снижения вязкости кавитация начинает протекать более интенсивно. Указанный фактор необходимо учитывать при оптимизации режимов и условий воздействия.

предла-Согласно гаемому представлению задача оптимизации режимов и условий для повышения энергетической эффективности ультразвукового B03действия на системы с жидкой фазой сводится максимизации К суммарной мощности, затрачиваемой на преобразование структуры отнесённой среды, К колебаний, мощности вводимой УЗ излучателем (КПД УЗ воздействия):

$$\eta(I_{PRIM},\Theta,V) = \frac{2\int_{V} K_m(I(I_{PRIM},V,\mathbf{r}),\Theta)I(I_{PRIM},V,\mathbf{r})dV(\mathbf{r})}{I_{PRIM}S} \to \max; \qquad (1)$$

где V – множество точек *озвучиваемого объёма* системы со сплошной жидкой фазой; I – интенсивность УЗ колебаний в точке технологического объёма с координатой **r**, Bт/м²; I_{PRIM} – интенсивность *первичной УЗ волны*, создаваемой УЗ излучателем, Bт/м²; Θ – функция от времени $\Theta(t)$, определяющая принцип формирования УЗ колебаний (непрерывное УЗ воздействие, когда $\Theta(t)=1$ и им-

пульсное УЗ воздействие, когда $\Theta(t) = \begin{bmatrix} 1, ecnu \exists n \in Z \mid 0 \le t - nT_w < T_p \\ 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); где T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \le t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \ge t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \ge t - nT_w < T_p); rde T_p - 0, ecnu \forall n \in Z \mid \neg (0 \land t = T_w \mid \neg (0 \lor$

Проведённые приближённые разложения выражения (1) в ряды Тейлора позволили установить, что КПД УЗ воздействия достигает максимума $\eta(I_{OPT}, V_{OPT}) = \max_{I \ge 0, V \subset R^3} \eta(I, V)$ при одновременном выполнении двух необходимых и достаточных условий (2, 3):

$$K_{m}(I_{OPT},\Theta_{OPT}) = \max_{I \ge 0, T_{w} \ge T_{p} > T} K_{m}(I,\Theta); (2) \quad D(V_{OPT}) = \min_{V \subset R^{3}} D(V); (3) \quad D(V) = \frac{1}{mes \, V} \int_{V} \left(1 - \frac{I(\mathbf{r})}{I_{OPT}}\right)^{2} dV(\mathbf{r}); (4)$$

где I_{OPT} – оптимальная интенсивность первичной волны, генерируемой УЗ излучателем, Вт/м²; Θ_{OPT} – оптимальная функция модуляции УЗ колебаний, определяющая принцип их формирования; T – период УЗ колебаний, с; V – оптимальный озвучиваемый объём системы с жидкой фазой; D(V) – относительная дисперсия интенсивности УЗ колебаний в объёме V, обусловленная явлениями затухания и отражения.

Согласно этим условиям (2, 3) конечная цель создания единой теории формирования структуры и характеристик систем со сплошной жидкой фазой – выявление оптимальных *режимов воздействия* (интенсивности I_{OPT} и принципа формирования Θ_{OPT} первичной УЗ волны, генерируемой излучателем), при которых достигается **максимум структурной составляющей** коэффициента поглощения K_m (как однозначной функции от режимов воздействия), и оптимальных *условий воздействия* (*геометрии технологического объёма V*), обеспечивающих **минимальную дисперсию интенсивности** колебаний в объёме.

Дисперсия интенсивности УЗ колебаний определяется формируемыми перепадами давления в среде (с учётом затухания и отражения волн давления от границ технологического объёма) на первой стадии преобразования УЗ энергии. В свою очередь структурная составляющая коэффициента поглощения колебаний определяется изменением удельной энергии межатомных и межмолекулярных связей структурных элементов среды:

$$K_{m}(I,\Theta) = \frac{T_{w}}{2T_{p}I} \frac{du}{d\tau}(\mathbf{C}) = \frac{T_{w}}{2T_{p}I} \left(\nabla_{\mathbf{C}} u, \frac{d\mathbf{C}}{d\tau}\right);$$
(5)

где τ – время пребывания выделенного объёма среды в аппарате, с; u – удельная энергия межатомных и межмолекулярных связей в единице объёма среды, Дж/м³.

Входящая в выражение (5) удельная энергия u связей определяется как функция от вектора структуры среды ($C(I,\tau) = \sum_{i=1}^{n} C_i \mathbf{e}_i$; $C_i - \mathbf{c}$ чётная концентрация

структурных элементов среды *i*-го типа, например, концентрация дисперсных частиц *i*-го типоразмера d_i , или концентрация макромолекул с числом мономерных звеньев *i*) на основании статистических методов и известных научных данных об энергии связи атомов, удельной поверхностной энергии, силах вязкого трения при перемещении дисперсных частиц:

В соответствии с лагранжевым методом описания движения сплошной среды вектор структуры определяется следующим обобщённым дифференциальным уравнением (6) с начальным условием (7):

$$\frac{d\mathbf{C}}{d\tau} = \mathbf{B}[p(\mathbf{r},t),\mathbf{C}(\tau)] + \mathbf{D}[p(\mathbf{r},t),\mathbf{C}(\tau)]; \qquad (6) \qquad \mathbf{C}(0) = \mathbf{C}_0; \qquad (7)$$

$$\mathbf{B}[p(\mathbf{r},t),\mathbf{C}(\tau)] = \sum_{i} \left(\sum_{j,k} K(i,j,k) \beta(j,k,p(\mathbf{r},t)) C_{j} C_{k} - C_{i} \sum_{j} \beta(i,j,p(\mathbf{r},t)) C_{j} \right) \mathbf{e}_{i}$$
(8)

$$\mathbf{D}[p(\mathbf{r},t),\mathbf{C}(\tau)] = \sum_{k=1}^{n} (L(k)\gamma(k+1,p(\mathbf{r},t))C_{k+1} - \gamma(k,p(\mathbf{r},t))C_{k})\mathbf{e}_{k}; \qquad (9)$$

где τ – время пребывания выделенного малого объёма (по сравнению со всем технологическим объёмом) среды в аппарате, с; **В** – квадратичный оператор, определяющий влияние парного взаимодействия структурных элементов (дисперсных частиц или молекул) между собой на вектор структуры среды; **D** – разностной оператор, учитывающий воздействие внешнего поля (поля перепадов давлений) на отдельный структурный элемент; $p(\mathbf{r},t)$ – поле перепадов давления в среде, зависящее от микроскопических координат **r** и времени *t*, Па; $\beta(j, k, p(\mathbf{r},t))$ – вероятность образования нового структурного элемента *i*-то типа при взаимодействии структурных элементов типов *j* и *k*; K(j,k) – количество структурных элементов *i*-го типа, образуемых при элементарном акте взаимодействия пары структурных элементов среды *j*-го и *k*-го типов; $\gamma(k, p(\mathbf{r}, t))$ – вероятность разрушения структурного элемента k-го типа при воздействии внешнего поля; L(k) – количество структурных элементов *k*-го типа, образуемых при разрушении структурного элемента (*k*+1)-го типа.

Представленное уравнение (6) позволяет выявить эволюцию вектора структуры среды с течением времени пребывания выделенного движущегося объёма среды в аппарате и, в конечном итоге, определить оптимальные режимы воздействия, при которых структурная составляющая коэффициента поглощения максимальна. Однако для решения представленной системы уравнений необходимо определить входящие в выражения (8, 9) поле перепадов давления и вероятности разрушения и образования структурных элементов $\beta(j,k,p(\mathbf{r},t)), \gamma(k,p(\mathbf{r},t))$, зависящие от перепадов давления.

Кроме того, как уже говорилось, поле перепадов давления дополнительно определяет дисперсию интенсивности УЗ колебаний в объёме.

Поэтому стадия формирования и распространения перепадов давления была проанализирована в первую очередь в рамках решения второй из поставленных задач. Перепады давления, формируемые в системе со сплошной жидкой фазой, зависят не только от параметров колеблющейся поверхности (частота и амплитуда колебаний) и геометрии УЗ излучателя, но и от режима развития кавитации.

В связи с этим, перепады давления представляют сумму 2-х составляющих $p(\mathbf{r},t) = p_p(\mathbf{r},t) + p_s(\mathbf{r},t)$; где $p_p(\mathbf{r},t) - nервичное$ звуковое давление; $p_s(\mathbf{r},t) - вторичное$ ударно-волновое давление.

Первичное звуковое давление связано с упругим сжатием сплошной (несущей) жидкой фазы при воздействии на неё колебаниями с помощью твёрдотельного излучателя и линейно пропорционально амплитуде колебаний (или квадратному корню из интенсивности) последнего (согласно теории линейной акустики).

С возникновением кавитационных явлений связано *вторичное ударно-волновое давление*. Оно, в отличие от первичного звукового давления, представляет собой случайный процесс и определяется параметрами кавитационных пузырьков – коэффициента трансформации первичных УЗ колебаний в энергию схлопывания кавитационных пузырьков (полного коэффициента поглощения колебаний K); относительной амплитуды давления ударной волны (отношение давления в точке наблюдения к давлению в ядре кавитационного пузырька p_{sh}); мгновенного радиуса отдельного пузырька R; концентрации кавитационных пузырьков n_{bub} .

Для выявления параметров кавитационных пузырьков предложена модель формирования кавитационной области, описанная во второй части раздела.

Модель учитывает неньютоновское поведение сплошной жидкой фазы, реологические свойства Λ которой характеризуются тремя параметрами: μ_0 – начальная вязкость жидкости, при скорости сдвига, стремящейся к нулю, Па·с; κ – показатель консистенции, Па·с^{N+1}; N – показатель нелинейности.

Анализ характеристик кавитационной области позволил выявить диапазон интенсивностей колебаний (проходящих через локальный объём жидкости, размеры которого много меньше длины волны, но много больше кавитационного пузырька), в котором возникает кавитация (вторичное *ударно-волновое давление* не равно нулю), в зависимости от реологических свойств жидкой фазы. Диапазон выявлялся при **непрерывном** и **импульсном** ультразвуковом воздействие – воздействие синусоидальными колебаниями, постоянными по амплитуде, и **импульсное воздействие** – воздействие синусоидальными колебаниями, модулированными по амплитуде прямоугольными импульсами.

Установлено, что импульсное воздействие увеличивает минимальную интенсивность диапазона до 3-х раз и позволяет вводить интенсивности более 20 Вт/см² (когда начальная вязкость жидкой фазы составляет более 800 мПа·с) без возникновения кавитации (при равенстве нулю вторичного *ударно-волнового давления*). Таким образом, зависимости диапазона дают основание использовать предложенный принцип формирования ультразвуковых колебаний – импульсное ультразвуковое воздействие для повышения эффективности процессов, не допускающих возникновения кавитации (например, коагуляции суспензий и эмульсий), в средах с широким диапазоном реологических свойств.

В свою очередь, если говорить о процессах, требующих обязательного наличия кавитации, следует отметить, что при минимальной интенсивности кавитация только начинает зарождаться, а при максимальной – схлопывания пузырьков практически не происходит (пузырьки вырождаются в долгоживущие, совершающие малые колебания в окрестности среднего радиуса). Для этих процессов при граничных интенсивностях диапазона, очевидно, что структурная составляющая коэффициента поглощения будет равна нулю. Кроме того, как показали расчёты, проведённые с помощью разработанной модели кавитационной области, импульсное ультразвуковое воздействие снижает эффективность схлопывания пузырьков, на эти процессы необходимо воздействовать непрерывными синусоидальными колебаниями $\Theta(t) = 1$.

Поэтому были проведены исследования характеристик кавитационной области при промежуточных значениях интенсивностей из выявленных диапазонов. Для промежуточных значений получены зависимости концентрации кавитационных пузырьков *n*_{bub} и, на основе концентрации, полного коэффициента

поглощения колебаний ($K=K_m+K_t$) от интенсивности ультразвукового воздействия при различных реологических свойствах жидкостей. Зависимости полного коэффициента поглощения имеют экстремальный характер, и положение максимума определяет оптимальную интенсивность, обеспечивающую максимальную степень трансформации энергии первичной УЗ волны в энергию ударных волн, создаваемых кавитационными пузырьками.

Зависимости оптимальной интенсивности ультразвукового воздействия, обеспечивающей максимальный КПД формирования схлопывающихся пузырьков (максимальный полный коэффицент поглощения), и граничных интенсивностей диапазона, в котором возможно возникновение схлопывающихся кавитационных пузырьков, от реологических свойств жидкости, представлены на рисунке 2.



Рисунок 2 – Зависимости оптимальной интенсивности, обеспечивающей максимальный КПД формирования схлопывающихся пузырьков (максимальный полный коэффициент поглощения $K=K_t+K_m$), и граничных интенсивностей УЗ воздействия для различных классов жидкостей

Согласно полученным результатам оптимальная интенсивность ультразвукового воздействия, обеспечивающая максимальный полный коэффициент поглощения (максимальную долю энергии, трансформированную в схлопывание кавитационных пузырьков), сильно зависит от реологических свойств среды и возрастает с увеличением показателей, характеризующих реологические свойства (начальная вязкость, показатель консистенции, показатель нелинейности).

Далее на основе установленных закономерностей влияния интенсивности на характеристики кавитационной области проведены исследования формирования и распространения кавитационных зон в технологическом объёме с учётом отражения и затухания УЗ колебаний с целью выявления оптимальных условий воздействия (геометрии технологического объёма), обеспечивающих минимальную дисперсию интенсивностей. Это является необходимым для повышения КПД УЗ воздействия согласно выражению (3).

В бескавитационном режиме из-за малости полного коэффициента поглощения (в 1000 раз меньше, чем в кавитационном режиме) относительная дисперсия интенсивностей УЗ колебаний (при характерных размерах УЗ

излучателя, сопоставимых с характерными размерами технологического объёма) не превышает 0,1 и, следовательно, не оказывает существенного влияния на КПД УЗ воздействия. В то время как в кавитационном режиме дисперсия интенсивностей может достигать (в нерезонансных технологических объёмах) гораздо больших значений (до 1 и выше). Поэтому далее анализ стадии формирования и распространения перепадов давления будет направлен на оптимизацию *условий воздействия* для снижения дисперсии интенсивностей в кавитационном режиме.

Поскольку для процессов, требующих обязательного наличия кавитации, структурная составляющая коэффициента поглощения $K_m = 0$ при отсутствии схлопывания пузырьков, то задача снижения дисперсии интенсивностей, как следует из выражений (1–3), сводится к максимизации доли суммарного объёма зон развитой кавитации (V_{adv} – множество точек, в которых в котором $K_m > 0$) mes V_{adv} 10004

от общего объёма $\frac{mes V_{adv}}{mes V} \cdot 100\% \rightarrow max$. В рамках предложенной модели

кавитационной области установлено, что максимальная доля суммарного объёма зон развитой кавитации (46% от всего технологического объёма) обеспечивается при одновременном выполнении 2-х условий:

– использования УЗ излучателей с развитой поверхностью (*многозонных* излучателей). Многозонные излучатели обладают наибольшей площадью колеблющейся поверхности среди существующих излучателей;

– наличия отражающих границ на определённом расстоянии от излучающей поверхности, создающих резонансные условия.

При использовании поршневых излучателей объём зоны развитой кавитации составляет не более 15 % от всего технологического объёма. В связи с этим предложена конструкция технологического объёма (рисунки 3–4) с установленным *многозонным излучателем* и кольцевыми пластинчатыми отражателями с перфорациями. Для вычисления оптимальных геометрических параметров данной конструкции с целью обеспечения максимального объёма зоны развитой кавитации (минимальной дисперсии интенсивности УЗ колебаний) была специально разработана программа, интегрированная с внешними модулями для расчёта акустического поля в кавитирующей среде. Полученные распределения кавитационных зон с помощью разработанной программы представлены на рисунке 3.

За счёт кольцевых пластинчатых отражателей доля объёма зоны «развитой» кавитации увеличивается с менее 15 (при использовании поршневого излучателя) или менее 35 (при использовании многозонного излучателя в простом цилиндре без отражателей, рисунок 4a) до 46 % (рисунок 4б). Это свидетельствует об увеличении доли объёма, в которой кавитация способна изменять структуру среды («развитая» кавитация), в 1,5...3 раза. С целью снижения гидравлического сопротивления предложена многокаскадная конструкция проточного реактора с кольцевыми отражателями (рисунок 4), которая защищена патентом РФ №152620. При отсутствии кавитации, когда *вторичное ударноволновое давление* тождественно равно нулю, кольцевые пластинчатые отражателяма.

тели также повышают однородность распределения амплитуды первичного звукового давления по сравнению с простым цилиндром без отражателей.

витации



Рисунок 3 – Распределения кавитационных зон в продольном сечении технологической камеры без отражателей (а) и с кольцевыми пластинчатыми отражателями (б)



Рисунок 4 – Эскиз многокаскадной конструкции проточного реактора с кольцевыми отражателями

Таким образом, анализ стадии формирования и распространения перепадов давления позволил предложить:

- новые пути развития УЗ технологических аппаратов, основанные на onтимизации условий воздействия при использовании многозонных УЗ излучателей с развитой поверхностью. Оптимальные условия воздействия обеспечивают снижение относительной дисперсии интенсивности колебаний за счёт резонансных явлений и заключаются в оптимальных габаритных размерах объёма и внедрении во внутреннюю область объёма пластинчатых отражателей;

- новые принципы формирования УЗ колебаний, основанные на импульсном воздействии (воздействии синусоидальными колебаниями, модулированными по амплитуде прямоугольными импульсами). Импульсное воздействие позволяет вводить гораздо большие энергии колебаний, чем при синусоидальном воздействии, сохраняя бескавитационный режим, требуемый, в частности, для процесса коагуляции;

- определить оптимальные интенсивности, при которых энергетическая эффективность схлопывания пузырьков (полный коэффициент поглощения $K = K_m + K_t$) достигает максимума в кавитационном режиме.

В свою очередь, значительная доля энергии кавитационной области переходит в повышение температуры среды согласно проведённым предварительным экспериментальным исследованиям по определению удельной тепловой мощности кавитации ($K_t/K > 0.5$). В то время как другим необходимым условием максимума КПД УЗ воздействия, является максимум структурной составляющей коэффициента поглощения колебаний (2), и, кроме того, некоторые химико-технологические процессы (например, процесс коагуляции), не допускают кавитации.

Для повышения КПД преобразования энергии ультразвукового аппарата непосредственно в изменение структуры и характеристик среды необходимо проанализировать соответствующие стадии преобразования энергии ультразвуковых колебаний (см. рисунок 1), чтобы выявить зависимости $\frac{dC}{d\tau}$ от *режи*-

мов воздействия при выявленных *оптимальных условиях* распространения колебаний. Это позволит, в конечном итоге, при анализе стадии диссипации энергии оптимизировать режимы для максимизации структурной составляющей коэффициента поглощения колебаний (2).

Для этого проведены исследования кинетики и энергетики процессов эволюции дисперсного и молекулярного составов среды, которым посвящены 3,4 разделы диссертационной работы в рамках решения третьей из поставленных задач. Согласно общепринятой классификации (в зависимости от направления передачи энергии между окружающей средой и веществами системы с жидкой фазой) исследования были проведены отдельно для эндотермических (раздел 3) и отдельно для экзотермических (раздел 4) процессов.

В третьем разделе представлены модели диссипации энергии и изменения структуры и характеристик среды при эндотермических процессах, предназначенные для определения режимов, обеспечивающих максимальный КПД преобразования энергии ультразвукового воздействия (рисунок 5) непосредственно в изменение структуры и характеристик среды (максимальную структурную составляющую коэффициента поглощения) при *диспергировании* и *механодеструкции макромолекул*.



U_{in} – начальная потенциальная энергия структурного элемента среды, Дж;
 U_{out} – потенциальная энергия продуктов разрушения структурного элемента, Дж
 Рисунок 5 – Приращение энергии связей при ультразвуковой интенсификации эндотермических процессов

В первой части раздела приведена общая модель диссипации энергии ультразвуковых колебаний для эндотермических процессов (механодеструкции и диспергирования) (рисунок 5). Согласно модели в эндотермических процессах потенциальная энергия веществ среды всё время увеличивается, т.е. происходит передача энергии ультразвуковых колебаний на разрушение связей, изначально обладавших отрицательной потенциальной энергией. После разрыва связей их энергия становится близкой к нулю.

Для эндотермических процессов энергия, которую необходимо сообщить 1 м³ среды для изменения её структуры, определяется согласно следующему выражению (10):

$$\varepsilon(\mathbf{C}_0 \to \mathbf{C}_1) = u(\mathbf{C}_1) - u(\mathbf{C}_0) = N(U_{out} - U_{in}), \qquad (10)$$

где $u(\mathbf{C})$ – потенциальная энергия межатомных и межмолекулярных связей в единице объёма среды (Дж/м³), зависящая от вектора структуры **C**, Дж/моль; *N* – количество структурных элементов, подвергнутых разрушению в 1 м³ исходной среды, м⁻³; U_{in} – начальная потенциальная энергия отдельного структурного элемента среды, Дж; U_{out} – потенциальная энергия продуктов разрушения структурного элемента, Дж.

Проведены численные оценки энергии, показавшие, что эндотермические процессы необходимо реализовывать в кавитационном режиме при воздействии непрерывными синусоидальными колебаниями ($\Theta(t)=1$).

Представленное выражение (10) даёт возможность получить общее выражение для структурной составляющей коэффициента поглощения (11) при реализации эндотермических процессов:

 $K_{m} = \frac{\sum_{i} U_{si} \frac{dC_{i}}{d\tau}}{2I};$ (11) где $U_{s,i}$ – энергия связей отдельного структурного элемента

i-го типа; \mathbf{e}_i – единичный вектор с ненулевой *i*-й координатой.

На основе общего выражения (11) получены частные выражения для структурной составляющей коэффициента поглощения применительно к процессам механодеструкции макромолекул (12) и диспергирования (13):

Механодеструкция	Диспергирование
$K_m = \frac{-D_\sigma \sum_i (i-1) \frac{dC_i}{d\tau}}{2I}; (12)$	$K_{m} = \frac{\pi d_{0}^{2} \sigma_{s} \sum_{i} 4^{-\frac{i}{3}} \frac{dC_{i}}{d\tau}}{2I};(13)$

где d_0 – условный диаметр наибольшей дисперсной частицы, м; σ_s – удельная поверхностная энергия твёрдого вещества частицы, Дж/м²; D_{σ} – энергия связи между отдельными мономерными звеньями, Дж.

Как отмечалось ранее, для выявления зависимостей структурных составляющих коэффициентов поглощения для различных процессов необходимо определить зависимости вектора структуры среды от времени. Во второй и третьей частях раздела описаны предложенные модели изменения структуры и характеристик среды для процессов *механодеструкции* и *диспергирования*. Предложенные модели позволяют определить неизвестные коэффициенты пропорциональности в уравнении эволюции вектора структуры среды (6) в зависимости от найденных во втором разделе перепадов давления $p(\mathbf{r}, t)$.

Во второй части раздела описана предложенная вероятностная модель ультразвуковой *механодеструкции макромолекул олигомеров* и приведены полученные результаты расчётов с помощью созданной модели. В процессе механодеструкции вектор структуры представляет собой молярные концентрации макромолекул с различными числами мономерных звеньев (C_i – молярная концентрация макромолекул с числом мономерных звеньев – весом *i*). Вероятностная модель механодеструкции основана на физическом механизме, согласно которому разрушение наблюдаемой молекулы может происходить только при её соударении с другими молекулами. При этом кавитация, создающая экстремально высокие давления, увеличивает дисперсию скорости молекул. В резуль-

тате многократно возрастает доля молекул, относительная скорость движения которых превышает критическое значение, требуемое для разрушения. Для определения критической скорости, зависящей от ориентации каждой молекулы, проведён анализ взаимодействия молекул вблизи их контакта между собой согласно уравнению сохранения суммы кинетической и потенциальной энергии, используя функцию потенциала Морзе для расчёта силы взаимодействия между парой отдельных мономерных звеньев.

Поскольку каждый элементарный акт механодеструкции происходит только при парном соударении молекул, коэффициенты разностного оператора тождественно равны нулю:

$$L(i) = 0; (14)$$
 $\gamma(i, p(\mathbf{r}, t)) = 0. (15)$

Коэффициенты квадратичного оператора определяются согласно выражениям (16, 17):

$$K(i, j, k) = \begin{cases} \beta(i, j, p(\mathbf{r}, t)) = \frac{8(i-1)(j-1)N_A n_{bub}}{T\sqrt{\pi}} \sqrt{2\delta_i^2 + 2\delta_j^2} \times \\ j \le i \lor k = 1, \ 0 \\ j > i \And k > i, \ \frac{j+k-2}{(j-1)(k-1)}; \ (16) \times \int_{0}^{T} \int_{R(t)^{-1}0}^{\infty} \int_{0}^{1} \prod_{R(t)^{-1}0}^{\pi} r^2 r_e^2 \sin^2 \theta_i \sin^2 \theta_j e^{-\frac{v_{\min}^2}{2\delta_i^2 + 2\delta_j^2}} \times \\ j > i \And k > 1 \And k \le i, \ \frac{1}{j-1} \qquad \times \left[\frac{v_{\min}^2}{2\delta_i^2 + 2\delta_j^2} + 1\right] d\theta_i d\theta_j d(\cos(\varphi_i - \varphi_j)) dr dt; \end{cases}$$

где r_e – равновесное расстояние между мономерными звеньями, м; δ_i – среднеквадратичное отклонение скорости центров масс макромолекул с весом i, м/с; φ_i и θ_i – азимутальный и полярный углы ориентации молекулы с весом i, рад; N_A – число Авогадро; n_{bub} – концентрация кавитационных пузырьков, м⁻³; R(t) – зависимость радиуса кавитационного пузырька от времени в фазе схлопывания, м; p(r) – зависимость давления ударной волны от расстояния между наблюдаемой молекулой и центром кавитационного пузырька, Па.

Согласно выражению (17) вероятность столкновения и разрушения макромолекул $\beta(i, j, p(\mathbf{r}, t))$ зависит от статического давления, температуры среды и характеристик формируемой кавитационной области, определяемых на основании модели, описанной в разделе 2.

После подстановки выражений для коэффициентов пропорциональности (14–17) путём решения уравнения (6) выявлены распределения макромолекул по весам в различные моменты времени ультразвуковой механодеструкции (рисунок 6).



Рисунок 6 – Распределения макромолекул по весам (числам мономерных звеньев) в различные моменты времени (озвучиваемая среда – эпоксидная смола ЭД-20, частота ультразвуковых колебаний 22 кГц, интенсивность – 25 Вт/см²)

Согласно представленным зависимостям ультразвуковое воздействие позволяет уменьшить моду распределения макромолекул по весам более чем в 2 раза (с 35 в начальный момент времени (рисунок 6а) до 16 в момент времени 300 с (рисунок 6г)), что подтверждается ранее проведёнными экспериментами по гомогенизации высокомолекулярных соединений (Сато, Окияма и Учо). Такое уменьшение моды согласно эмпиричекому выражению, приведённому в монографии Rouse P.E., Хохлова А.Р., Пышнограя Г.В., свидетельствует о снижении вязкости олигомера до 4 раз.

На основании выявленных распределений макромолекул по весам получены зависимости начальной вязкости неотверждённого олигомера (макроскопической **характеристики среды**) от времени (рисунок 7) и интенсивности ультразвукового воздействия.



Рисунок 7 – Зависимости вязкости олигомера µ₀ от времени *t* при различных интенсивностях ультразвукового воздействия (частота воздействия 22 кГц) и вязкостях жидкости в нулевой момент времени

Полученные зависимости могут быть в непосредственном виде использованы для прогнозирования вязкости олигомера на выходе технологического аппарата при заданном времени пребывания и интенсивности воздействия.



Рисунок 8 – Зависимости относительной структурной составляющей коэффициента поглощения K_m/K_m за счёт механодеструкции молекул от интенсивности ультразвукового воздействия *I* при различных начальных вязкостях μ_0 (а) и оптимальной интенсивности I_{OPT} от вязкости μ_0 (б) 1 – оптимальная интенсивность, обеспечивающая максимум K_m ; 2 – оптимальная интенсивность, обеспечивающая максимум *K*

Далее на основании выражения (12) выявлены зависимости структурной составляющей коэффициента поглощения от инвоздействия тенсивности 8a). Зависи-(рисунок мость, приведённая на рисунке 8а, как и зависимополного коэффицисти ента поглощения, имеет экстремальный характер и положение максимума определяет оптимальную интенсивность воздействия (рисунок 8б), при которой наибольшая доля энергии ультразвуковых

колебаний непосредственно переходит в механодеструкцию макромолекул.

Сравнительный анализ зависимостей, представленных на рисунке 96 и зависимостей, представленных на рисунке 2, позволил установить, что отношение оптимальной интенсивности, при которой максимальная доля энергии колебаний переходит в механодеструкцию Iopt.destr., к оптимальной интенсивности, при которой максимальная доля энергии колебаний переходит в схлопывание пузырьков Iopt.cav., при любых значениях вязкости составляет одну и ту же величину. Путём аппроксимации зависимостей (рисунки 86, 2) установлено значение поправочного коэффициента к оптимальной интенсивности воздействия

для формирования кавитационных пузырьков $k_{destr} = \frac{I_{opt.destr.}}{I_{opt.cav}} = 0,63$.

При этом, как следует из представленных зависимостей (рисунок 8), учёт данного поправочного коэффициента повышает КПД процесса в 1,3...1,8 раз (при интенсивности равной $k_{destr}I_{opt.cav.}$) по сравнению с интенсивностью $I_{opt.cav.}$.

В третьей части раздела описана предложенная вероятностная модель ультразвукового диспергирования и приведены полученные результаты расчётов с помощью созданной модели.

Согласно модели процесс ультразвукового диспергирования происходит по следующему определяющему физическому механизму. Каждая выделенная дисперсная частица распадается тогда и только тогда, когда кавитационный пузырёк схлопывается внутри некоторой окрестности, именуемой «окрестностью распада». Указанное предположение справедливо ввиду того, что ударная волна, генерируемая кавитационным пузырьком, затухает обратно пропорционально расстоянию от его центра. Это означает, что кавитационные пузырьки, возникающие на расстоянии от дисперсной частицы, превышающем некоторое пороговое значение, не оказывают влияние на её разрушение. Соответственно, вероятность зарождения и схлопывания пузырька в «окрестности распада» и определяет вероятность разрушения (диспергирования) частицы.

Поскольку возможные парные соударения частиц оказывают слабое влияние на процесс диспергирования, то коэффициенты квадратичного оператора в уравнении (6) принимаются тождественно равными нулю (18, 19):

 $K(i, j, k) \equiv 0;$ (18) $\beta(j, k, p(\mathbf{r}, t)) \equiv 0;$ коэффициенты разностного оператора определяются согласно выражениям (20, 21):

$$L(i) = 2; \qquad (20) \qquad \gamma(i, p(\mathbf{r}, t)) = \zeta f n_{bub} V_{bi}; \qquad (21)$$

(19)

где f – частота УЗ колебаний, Гц; n_{bub} – концентрация кавитационных пузырьков, м⁻³; ζ – поправочный коэффициент, учитывающий усталостную прочность и накопление микротрещин в частице перед её разрушением; V_{bk} - объём «окрестности распада» для частицы диаметром d_k , м³.

Путём решения уравнения (6) после подстановки выражений для коэффициентов (18-21) выявлены распределения частиц по размерам в различные моменты времени ультразвукового диспергирования (рисунок 9).

Представленные гистограммы могут быть в непосредственном виде использованы для прогнозирования размеров частиц суспензии на выходе из аппарата при заданном начальном размере, интенсивности ультразвукового воздействия и времени пребывания суспензии в аппарате. При этом гистограммы на рисунке 9 свидетельствуют о существовании оптимальной интенсивности (для модельной суспензии – 4 Вт/см²), при которой достигается максимальная эффективность диспергирования при одинаковых энергозатратах (для модельной суспензии – *It*=const=3600 Дж/см²).



По оси абсцисс – диапазоны диаметров, по оси ординат – массовая доля а) исходный состав б) *I*=3 Bt/cm² *t*=20 мин в) *I*=4 Bt/cm² *t*=15 мин г) *I*=6 Bt/cm² *t*=10 мин Рисунок 9 – Распределения частиц алюминиевой суспензии в воде при различных интенсивностях *I* и временах воздействия *t* (частота – 22 кГц)

Далее были получены и исследованы зависимости структурной составляющей коэффициента поглощения (13) от интенсивности УЗ колебаний (рисунок 10а). Как и зависимости на рисунке 8а, они имеют экстремальный характер, и положение максимума определяет оптимальную интенсивность УЗ воздействия (рисунок 10б), при которой наибольшая доля УЗ энергии переходит в диспергирование.

В свою очередь, на оптимальную интенсивность, обеспечивающую максимальную энергоэффективность диспергирования, оказывает существенное влияние вязкость несущей жидкости.



тывались зависимости относительной структурной составляющей коэффициента поглощения при различных вязкостях несущей жидкой фазы и оптимальной интенсивноультразвукового сти воздействия, при котоструктурная рой coставляющая достигает максимума.

Поэтому

рассчи-

Сравнительный анализ полученных зависимостей (рисунок 10б) и зависимостей, представленных на ри-

Рисунок 10 – Зависимости относительной структурной составляющей коэффициента поглощения $K_m/K_{m\ max}$ за счёт диспергирования от интенсивности ультразвукового воздействия *I* при различных на-

чальных вязкостях μ_0 (a) и оптимальной интенсивно-

сти I_{OPT} от вязкости μ_0 (б)

1 – оптимальная интенсивность, обеспечивающая максимум *K_m*; 2 – оптимальная интенсивность, обеспечивающая максимум *K*

сунке 2, позволил установить, что отношение оптимальной интенсивности, при которой максимальная доля энергии колебаний переходит в диспергирование $I_{opt.disp.}$, к оптимальной интенсивности, при которой максимальная доля энергии колебаний переходит в схлопывание пузырьков $I_{opt.cav.}$, вне зависимости от вяз-

кости жидкой фазы составляет одну и ту же величину. Путём аппроксимации зависимостей установлено значение поправочного коэффициента $k_{disp} = \frac{I_{opt.disp.}}{I_{opt.cav.}} = 1,75$. При этом, как следует из представленных зависимостей (ри-сунок 10), учёт данного поправочного коэффициента повышает КПД процесса в

сунок то), учет данного поправочного коэффициента повышает Кггд процесса в 1,3...1,5 раза (при интенсивности равной $I_{opt.disp.}$) по сравнению с интенсивностью $I_{opt.cay}$.

Таким образом, анализ кинетики процессов УЗ механодеструкции и диспергирования показал, что оптимальная интенсивность *I*_{OPT}, при которой достигается максимум структурной составляющей коэффициента поглощения колебаний для эндотермических процессов, линейно пропорциональна интенсивности, обеспечивающей максимальный полный коэффициент поглощения (см. раздел 2):

$$I_{OPT} = k I_{opt.cav}; (22)$$

где *k* – поправочный коэффициент, зависящий от наличия/отсутствия межфазной поверхности в озвучиваемой системе с несущей жидкой фазой (*k*=0,63 для гомогенных систем и *k*=1,75 для гетерогенных систем).

На основании полученного соотношения (22) предложена модификация ранее созданного способа автоматического поддержания оптимальной интенсивности в ультразвуковом аппарате в зависимости от свойств системы с жидкой фазой в текущий момент времени. Известный способ содержит в себе алгоритм автоматического определения $I_{opt.cav}$. Предложенная модификация заключается в установлении интенсивности колебаний используемого излучателя на уровне $kI_{opt.cav}$. Вместо $I_{opt.cav}$.

Поскольку реализуемые на практике химико-технологические процессы в системах с жидкой фазой, как правило, не являются в чистом виде гомогенными или гетерогенными, для практического определения поправочного коэффициента k был предложен безразмерный критерий Su на основании разработанных кинетических моделей УЗ механодеструкции макромолекул и диспергирования. Критерий Su определяет влияние межфазной поверхности на протекание процесса, интенсифицируемого УЗ колебаниями. При Su >> 1 процесс является гетерогенным и поправочный коэффициент k = 1,75; а при Su << 1 процесс гомогенный и k = 0,63.

Таким образом, получены следующие результаты теоретического анализа диссипации энергии и изменения структуры и характеристик среды в эндотермических процессах:

 выявлены оптимальные интенсивности, обеспечивающие максимальную структурную составляющую коэффициента поглощения при заданных начальных характеристиках системы с несущей жидкой фазой;

 выявлены зависимости, позволяющие спрогнозировать свойства и характеристики системы с жидкой фазой на выходе технологического аппарата при заданных начальных характеристиках системы, её времени пребывания в аппарате, интенсивности ультразвукового воздействия; – предложена модификация способа автоматического поддержания оптимальной интенсивности воздействия в ультразвуковом аппарате, обеспечивающая повышенный КПД эндотермических процессов.

В четвёртом разделе представлены модели стадий диссипации энергии и изменения структуры и характеристик среды для экзотермического процесса, предназначенные для определения режимов, обеспечивающих максимальный КПД преобразования энергии ультразвукового воздействия непосредственно в изменение структуры и характеристик среды (структурную составляющую коэффициента поглощения) при коагуляции.

В первой части раздела описана предложенная модель диссипации энергии в ходе экзотермического процесса коагуляции. Экзотермические процессы всегда сопровождаются уменьшением внутренней энергии среды, и часть внутренней энергии среды выделяется в окружающее пространство в виде тепла (рисунок 11). Экзотермический процесс реструктуризации среды возможен только при образовании определённых активированных комплексов (например, конгломератов частиц, близко расположенных друг другу, но ещё не слипшихся между собой, при коагуляции). Образование активированных комплексов, очевидно, требует подведения (совершения работы по сближению коагулируемых частиц) энергии внешнего физического поля (в данном случае ультразвукового поля). Структурные элементы, входящие в состав активированного комплекса, вступают между собой во взаимодействия, образуют устойчивые агломераты, и в результате выделяют энергию, по модулю превышающую энергию, подведённую для образования активированного комплекса (рисунок 11).



U_{in} – начальная потенциальная энергия коагулируемых структурных элементов среды, Дж; U_{act} – потенциальная энергия активированного комплекса, Дж; U_{out} – потенциальная энергия агломерата, Дж

Рисунок 11 – Трансформация энергии при ультразвуковой интенсификации экзотермического процесса (коагуляции)

В соответствии с этим энергия, которую необходимо сообщить 1 м³ среды, для изменения ее структуры – это энергия, необходимая для формирования именно активированных комплексов. Она определяется согласно следующему выражению (для экзотермического процесса):

$$\varepsilon(\mathbf{C}_0 \to \mathbf{C}_1) = N(U_{act} - U_{in}), \qquad (23)$$

где N – количество активированных комплексов, которые необходимо образовать для изменения вектора структуры 1 м³ среды с C_0 на C_1 .

Основываясь на выражении (23), проведены предварительные оценки минимальной амплитуды перепадов давления, необходимых для преодоления потенциального барьера, чтобы сформировать хотя бы один новый активированный комплекс.

Проведённые оценки показали необходимость создания локальных перепадов давлений не менее 50 кПа для реализации экзотермических процессов. Таким перепады давления можно создать даже в бескавитационном режиме воздействия, когда вторичное ударно-волновое давление $p_s(\mathbf{r}, t) \equiv 0$. При этом в кавитационном режиме перепады давления могут превышать 1 МПа. Такое превышение приведёт к вторичному разрушению уже образованных активированных комплексов, сводя на нет эффект от применения ультразвукового воздействия для экзотермических процессов. Поэтому экзотермические процессы следует реализовывать в бескавитационном режиме.

Далее в рамках модели диссипации энергии в экзотермических процессах проведены априорные оценки структурной составляющей коэффициента поглощения. Проведённые априорные оценки показали, что для частиц диапазона размеров 1...50 мкм, которые наиболее трудно поддаются отделению традиционными способами без дополнительной ультразвуковой коагуляции (гравитационная, инерционная фильтрация), структурная составляющая коэффициента поглощения слабо зависит от интенсивности ультразвукового воздействия в диапазоне интенсивностей, обеспечивающем докавитационный режим (см. раздел 2). Таким образом, для достижения максимальной эффективности коагуляции в систему с несущей жидкой фазой необходимо вводить максимально допустимую энергию, при которой кавитация не возникает.

Для выявления максимально допустимой энергии и предсказания концентрации коагулируемых частиц на выходе из аппарата при заданных свойствах несущей жидкой фазы, концентрации на входе, размерах и плотности вещества частиц, времени пребывания суспензии в аппарате и режимах ультразвукового воздействия предложена вероятностная модель ультразвуковой коагуляции, описанная во второй части раздела.

Вероятностная модель основана на уравнении Смолуховского, описывающем кинетику коагуляции при парных столкновениях частиц. Правая часть уравнения Смолуховского служит выражением для квадратичного оператора (8), входящего в уравнение (6). Поскольку коагуляция происходит только при парном взаимодействии частиц, разностной оператор (8) тождественно равен нулю. В соответствии с этим справедливы следующие выражения для коэффициентов пропорциональности квадратичного (24, 25) и разностного оператора (26, 27):

$$K(i, j, k) = \frac{1}{2} \begin{cases} j+k=i, & 1\\ j+k\neq i, & 0 \end{cases}; (24) \ \beta(i, j, p(\mathbf{r}, t)) = \beta_{Oi,j}(I, \tau, T) + \beta_{Hi,j}(I, \tau, T); (25) \end{cases}$$

$$L(i) = 0; (26) \qquad \gamma(i, p(\mathbf{r}, t)) = 0;$$
(27)

$$\beta_{Oi,j} = \frac{1}{2} \frac{T_p}{T_w} (d_i + d_j)^2 \sqrt{\frac{2I}{\rho c}} H_{i,j}; \quad \beta_{Hi,j} = \frac{T_p}{T_w} \frac{I}{I_0} \frac{(d_i + d_j)^2}{6\mu} \left(\frac{1}{d_i} + \frac{1}{d_j}\right)_0^{\pi} h(f_{21}) f_{21} \sin \theta d\theta;$$

где d_0 – условный диаметр наименьшей частицы (исходный размер), м; $H_{i,j}$ – модуль разности комплексных коэффициентов увлечения частиц в УЗ поле; I – интенсивность УЗ колебаний, Вт/м²; T_p – длительность импульса, с; T_w – период следования импульсов, с; I_0 – опорная интенсивность, равная 0,0001 Вт/м²; f_{21} – сила гидродинамического взаимодействия частиц при интенсивности воздействия 0,0001 Вт/м²; ρc – волновое сопротивление жидкости, Па с/м; μ – начальная вязкость жидкости, Па с.

Путём подстановки коэффициентов (24-27) в уравнение (6) и решения этого уравнения выявлены зависимости степени укрупнения частиц в жидкости

от времени $\left(\frac{d_{30}(t)}{d_{30}(0)}\right) = \sqrt[3]{\frac{\sum_{k=1}^{\infty} C_k(0)}{\sum_{k=1}^{\infty} C_k(t)}}; d_{30}$ – средний объёмный диаметр частиц в мо-

мент времени *t*) при непрерывном и импульсном ультразвуковом воздействии (рисунок 12) на модельной суспензии бентонитового глинопорошка (плотность бентонита 1040 кг/м³, концентрация 17 мг/л) с целью выявления возможности повышения эффективности тонкой очистки суспензий от дисперсных примесей методом ультразвуковой коагуляции. Интенсивность при непрерывном воздействии выбиралась максимально возможной, при которой кавитация не возникает (см. рисунок 2).

Интенсивность и длительность ультразвукового импульса выбирались таким образом, чтобы суммарная вводимая энергия, отнесённая к периоду следования импульсов $\frac{T_pI}{T_w}$, была максимальной и при этом кавитация не возникала. При выборе интенсивности и длительности ультразвукового импульса учиты-

валась конечность скорости восстановления (уменьшения) размера кавитационного зародыша до первоначального значения после прекращения воздействия предыдущего импульса.



а) 1 мкм, 1 мПа·с б) 7 мкм, 1 мПа·с в) 1 мкм, 30 мПа с г) 1 мкм, 100 мПа с Рисунок 12 – Зависимости относительной концентрации частиц суспензии от времени при различных размерах частиц и вязкостях несущей жидкости при непрерывном и импульсном ультразвуковом воздействии

На следующем рисунке 13 представлены зависимости времени коагуляции от размера частиц (а) и вязкости сплошной жидкости. Под временем коагуляции понимается время, требуемое для снижения относительной концентрации до 0,1 (степень укрупнения достигает значения 2,15). Из представленных зависимостей следует, что УЗ воздействие в импульсном режиме позволяет на

15...20 % ускорить коагуляцию частиц в жидкости, имеющей вязкость, равную вязкости воды (по сравнению с воздействием в непрерывном режиме). Для жидкостей, имеющих вязкость 100 мПа с, УЗ импульсное воздействие ускоряет коагуляцию до 1,5 раз. Если суспензия является более высококонцентрированной, то сокращается время её коагуляции (например, при массовой концентрации модельной суспензии 1 г/л и выше время коагуляции сокращается до долей секунды).



Рисунок 13 – Зависимости времени коагуляции от размера частиц и вязкости жидкости

Таким образом, проведённый анализ стадий диссипации энергии И изменения структуры И характеристик среды (разделы 3–4) позволил реализовать новый подход оптимизации К режимов воздействия (по интенсивности и принципу формирования колебаний - непрерывное синусоидальное

или импульсное воздействие), который заключается в максимизации доли энергии, переходящей в изменение структуры и характеристик среды, от суммарной введённой энергии колебаний. По сравнению с ранее известным подходом, основанным на максимизации энергоэффективности схлопывания кавитационных пузырьков, предложенный подход обеспечивает:

 в 1,3...1,8 раза больший КПД эндотермических процессов (механодеструкции, диспергирования), требующих обязательного наличия кавитации;

– увеличение скорости экзотермических процессов (коагуляции), не допускающих кавитации.

Далее проводилось экспериментальное подтверждение созданной единой теории (разделы 2–4) формирования структуры и характеристик систем с жид-кой фазой под действием ультразвуковых колебаний.

В пятом разделе описаны проведённые экспериментальные исследования формирования перепадов давления, структуры и характеристик среды под действием высокоинтенсивных УЗ колебаний, направленные на подтверждение адекватности предложенных моделей (разделы 2–4) в рамках созданной единой теории.

На первом этапе экспериментальных исследований подтверждалась адекватность модели, описывающей стадию преобразования энергии «формирование и распространение перепадов давления» (см. раздел 2). Первичное звуковое давление, как было отмечено во втором разделе, описывается согласно теории линейной акустики, которая на сегодняшний день наиболее широко развита и подтверждена экспериментально. Гораздо меньшее количество экспериментальных исследований имеется для формирования и распространения вторичного ударно-волнового давления. Поэтому далее экспериментально подтверждались теоретические результаты исследований формирования и распространения вторичного ударно-волнового давления, а именно экспериментально выявлялись характеристики кавитационной области (вторичного ударноволнового давления) в зависимости от режимов и условий УЗ воздействия.

В таблице 1 приведены теоретически и экспериментально полученные максимальные значения полного коэффициента поглощения (определяемого долей энергии колебаний, трансформируемой в схлопывание пузырьков) и оптимальные интенсивности, при которых обеспечивается максимум.

Таблица 1 – Максимальные значения полного коэффициента поглощения и оптимальных интенсивностей, обеспечивающих его максимум

Наименование жидкости (в скобках		Вода (на-	Моторное масло	Эпоксидная смола ЭД-20 по ГОС	
указаны реологические свойства)		чальная вяз-	10W-40 по клас-	10587-84 (начальная вязкость 520	
		кость	сификации SAE	мПа с; показатель консистенции	
		1 мПа∙с)	(начальная вяз-	$K=3,9 \Pi a \cdot c^{N+1}$; показатель нелиней-	
			кость 200 мПа·с)	ности <i>N</i> =-0,15)	
Макс. коэффи-	Теория, K _T	1,29	0,65	0,36	
циент поглоще-	Эксперимент, К _Е	1,25±0,05	0,60±0,05	0,32±0,03	
ния (при опт.	Относительная по-	8	18	25	
инт.), дБ/см	грешность,				
	$ K_{T}-K_{E} \cdot 100\%/K_{E},\%,$				
	не более				
Оптимальная	Теория, I _т	1,73	8,3	12,5	
интенсивность	Эксперимент, I _Е	1,75±0,25	8±1	12±2	
воздействия,	Отн. погрешность,	14	19	25	
BT/cm ²	$ I_T - I_E \cdot 100\% / I_E$, %, не				
	более				

Далее выявлялась зависимость объёма зоны развитой кавитации от интенсивности УЗ воздействия путём определения размеров области кавитационной эрозии металлической (алюминиевой) фольги, погружённой в жидкость, находящуюся под воздействием УЗ колебаний. Обрабатываемая жидкость – моторное масло 10W-40, УЗ излучатель – пьезоэлектрический поршневого типа с диаметром рабочего инструмента 40 мм, время воздействия – 2 мин. Фотографии зон кавитационной эрозии фольги при различных амплитудах колебаний ультразвукового излучателя представлены на рисунках 14а–в, а при различных расстояниях между излучающей поверхностью и отражающей границей – на рисунках 14г–е.

Полученные экспериментальные зависимости доли объёма обрабатываемой жидкости, занимаемой зоной развитой кавитации, от расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей для различных сред (по вязкости жидких фаз) приведены на рисунке 15.





а) 10,8 мкм (0,1±0,01 %) б) 17,5 мкм (6,4±0,05 %)

в) 21,6 мкм (6,7±0,1 %)



(6,7±0,1 %)







е) 130 мм (6,2±0,05 %)

Рисунок 14 – Распределения зон развитой кавитации при различных интенсивностях УЗ воздействия (а-в) и расстояниях между излучателем и отражающей границей (г-е) (в скобках указаны полученные значения доли объёмов зон развитой кавитации)



Рисунок 15 – Зависимости доли объёма, занимаемого зоной развитой кавитации (*V_{adv}*·100%/*V*), от расстояния *L* между излучателем и отражающей границей для различных жидкостей: а) вода (амплитуда колебаний 8,3 мкм); б) подсолнечное масло (13 мкм); в) эпоксидная смола ЭД-20 (24 мкм)

Экспериментальные значения максимально достигаемой доли объёма, занимаемого зоной развитой кавитации, и оптимальных расстояний между излучателем и отражающей поверхностью для различных по реологическим свойствам несущих жидких фаз сведены в таблицу 2.

Как следует из представленной таблицы, полученные результаты подтверждают возможность увеличения доли объёма зоны развитой кавитации до 1,5 раз (например, для эпоксидной смолы ЭД-20 с начальной вязкостью не менее 0,5 Па с) путём оптимизации расстояния между излучателем и отражающей границей при неизменной интенсивности воздействия. Таким образом, экспериментально подтверждается теоретически установленный факт, что установка отражающей границы уменьшает дисперсию интенсивностей УЗ колебаний по объёму среды.

При этом согласно экспериментальным данным, приведённым в таблицах 1, 2 и на рисунках 14, 15, относительная погрешность между теоретическими и экспериментальными значениями не превышает 25%.

Таблица 2 – Экспериментальные значения долей объёмов зоны развитой кавитации и оптимальных расстояний между излучателем и отражающей поверхностью

	Экспериментальные значения доли		Значения оптимальных расстояний между		
	объёма жидкости, занимаемого		излучающей поверхностью и отражающей		
Наименова-	зоной развитой кавитации, %		границей		
ние несущей жидкой фазы	При оптимальном рас- стоянии между излуча-	Без отра-	Teop.,	Экспер.,	Относительная погрешность,
	телем и отражателем	жателя	L_T , 10 ⁻⁵ м	$L_E, 10^{-5}$ M	$ L_T - L_E \cdot 100\%/L_E,$ %, не более
Вода	12,5	11,4	123	120±3	2,5
Моторное масло 10W- 40	8,1	5,3	102	90±3	12
Эпоксидная смола ЭД-20	6,4	3,2	71	60±3	18,3

Кроме того, проведенные экспериментальные исследования влияния отражателей на энергию схлопывания кавитационных пузырьков позволили установить, что внедрение кольцевых пластинчатых отражателей приводит к повышению энергетической эффективности кавитации (даже с учётом потерь энергии в электронном генераторе) до 1,25 раз. Всё это свидетельствует об адекватности модели формирования кавитационной области и, в конечном итоге, модели формирования и распространения перепадов давления.

На следующем этапе экспериментальных исследований подтверждалась адекватность моделей **формирования структуры и характеристик среды.** Экспериментальные исследования формирования структуры и характеристик проводились для всех 3-х теоретически рассмотренных процессов – *демеханодеструкции макромолекул, диспергирования* и *коагуляции* (рисунки 16–20). На рисунках 16, 18, 19 проведены сравнительные теоретические и экспериментальные данные по каждому процессу. На рисунках 17, 18, 20 приведены данные об эффективности каждого процесса при неоптимальных и оптимальных режимах воздействия.

Для эндотермических процессов *механодеструкции* и *диспергирования* под неоптимальными режимами воздействия понимается воздействие с интенсивностью, обеспечивающей максимум полного коэффициента поглощения. А под оптимальными – с интенсивностью, обеспечивающей максимум структурной составляющей коэффициента поглощения. В обоих режимах (рисунки 17, 18) время воздействия выбиралось из условия постоянства суммарных энергозатрат It=E=const. Для процесса *механодеструкции* E=2000 Дж/см², для *диспергирования* E=3600 Дж/см².

Результаты экспериментальных исследований *механодеструкции* позволили подтвердить теоретически установленный факт, что учёт изменения структуры среды при оптимизации интенсивности ультразвукового воздействия (при одинаковых суммарных энергозатратах) приводит к дополнительному уменьшению конечной вязкости до 1,7 раз.







Рисунок 17 – Результаты экспериментальных исследований ультразвуковой *механодеструкции* при различных исходных вязкостях олигомера при неоптимальных и оптимальных режимах воздействия

Аналогичный факт подтверждён для процесса *диспергирования*. После оптимизации с учётом изменения структуры среды уменьшается модальный размер частиц алюминия с 320...640 мкм до 160...320 мкм (рисунок 18), и появляется заметная доля мелкой фракции (частиц размером менее 80 мкм). При оптимизации без учёта изменения структуры среды таких мелких частиц в результате диспергирования практически не наблюдалось.

Микрофотография (цена деления 100 мкм)





Рисунок 18 – Результаты экспериментальных исследований *диспергирования* частиц алюминия в воде

Для процесса *коагуляции* были проведены сравнительные теоретические расчёты с помощью разработанной модели коагуляции (см. раздел 4) и экспериментальные исследования фракционного состава частиц бентонитового глинопорошка в воде (Хакасский бентонит) (рисунке 19, 20). Полученные данные свидетельствуют об адекватности предложенной модели.

Представленные на рисунке 21 зависимости относительной концентрации частиц (обратно пропорциональной d_{30}^{3} ; d_{30} – средне-объёмный диаметр, м) от времени свидетельствуют о возможности сокращения времени коагуляции на 20...30 % путём воздействия в импульсном режиме. Зависимости (рисунок 21) получены для несущей жидкости с вязкостью 30 мПа·с; частота воздействия – 22 кГц; интенсивность непрерывного воздействия – 0,3 Вт/см²; интенсивность импульсного воздействия – 1 Вт/см²).

Представленные рисунки 16–21 позволяют судить об адекватности всех трёх предложенных моделей **формирования структуры и характеристик** сре-

ды для процессов *механодеструкции*, *диспергирования* (раздел 3) и *коагуляции* (раздел 4).



Рисунок 19 – Гистограммы фракционного состава частиц бентонита до и после ультразвуковой коагуляции (время ультразвукового воздействия 5 мин)



Рисунок 20 – Теоретические и экспериментальные гистограммы фракционного состава частиц бентонита в результате ультразвуковой коагуляции



Рисунок 21 – Зависимости относительных счётных концентраций частиц при энергиях, обеспечиваемых различными видами ультразвукового воздействия

Затем на основании полученных экспериментальных данных по структуре и характеристикам среды косвенно определялись энергозатраты на изменение состояния среды, отнесённые к введённой ультразвуковой энергии (структурная составляющая коэффициента поглощения (28, 29)) и сравнивались с теоретически полученными данными. Структурная составляющая вычислялась для процессов *механодеструкции* (28) и *диспергирования* (29), при которых она имеет оптимум при определённой интенсивности.

$$K_{m} \approx -\frac{1}{\delta - 1} \frac{15}{4\Delta t} \frac{D_{\sigma} \rho}{mI} \ln \frac{\mu_{0}(\Delta t)}{\mu_{0}(0)}; (28) \qquad K_{m} = \frac{3\rho\sigma_{s}\varphi(D_{32}(0) - D_{32}(\Delta t))}{I\rho_{p}D_{32}(\Delta t)D_{32}(0)\Delta t}; (29)$$

где ρ – плотность несущей жидкой фазы, кг/м³; ρ_p – плотность вещества дисперсной фазы, кг/м³; Δt – интервал времени между двумя последовательными измерениями, с; D_{32} – средний объёмно-поверхностный диаметр частиц, м; μ_0 – начальная вязкость несущей жидкой фазы, Па·с; δ – эмпирический параметр, определяющий зависимость вязкости олигомера от фракционного состава макромолекул, для большинства полимеров равный 2,4 согласно литературным данным.

Полученные сравнительные теоретические и экспериментальные зависимости *K_m* представлены на рисунках 22–23.



Рисунок 22 – Теоретические и экспериментальные зависимости структурной составляющей коэффициента поглощения в ходе *механодеструкции* при различной начальной вязкости несущей жидкой фазы



Рисунок 23 – Теоретические и экспериментальные зависимости структурной составляющей коэффициента поглощения в ходе *диспергирования* при различной вязкости несущей жидкой фазы

Согласно представленным зависимостям теоретически и экспериментально выявленные оптимальные интенсивности для каждого вида технологических процессов соотносятся с погрешностью не более 24%. Это позволяет сделать вывод об адекватности созданных моделей диссипации энергии, формирования структуры и характеристик систем с жидкой фазой.

Таким образом, результаты проведённых экспериментальных исследований дают основание использовать созданную единую теорию формирования структуры и характеристик систем с жидкой фазой для проектирования технологических аппаратов, обеспечивающих повышенный КПД УЗ воздействия.

В шестом разделе описано созданное аппаратурное оформление для воздействия ультразвуковых колебаний интенсивности на системы со сплошной (несущей) жидкой фазой. Согласно теоретически разработанным путям развития, УЗ аппараты укомплектованы многозонными излучателями с площадью поверхности от 200 до 1000 см²; специализированными технологическими объёмами оптимальных габаритных размеров, с внедряемыми отражателями, которые обеспечивают минимальную дисперсию интенсивности вводимых колебаний. Для реализации разработанных принципов формирования колебаний и подходов к оптимизации режимов воздействия модифицируется программа управления интенсивностью УЗ излучения. Таким образом, предложенные УЗ аппараты обеспечивают максимум структурной составляющей коэффициента поглощения колебаний и, следовательно, повышенный КПД реализации технологических процессов (в 1,5...2,5 раза) в системах с жидкой фазой по сравнению с существующими УЗ аппаратами. Аппараты созданы на базе малого инновационного предприятия ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ».

Результаты исследований функциональных возможностей созданных аппаратов показали, что при равных суммарных потреблённых энергиях УЗ аппаратов и объёмах конечного продукта аппараты способны обеспечить:

– снижение вязкости эпоксидной смолы (время воздействия 5 мин) до 10 раз (при оптимальном УЗ воздействии) и до 6 раз (при неоптимальном УЗ воздействии);

 повышение прочности композитов на 44 % (при оптимальном воздействии) и на 30% (при неоптимальном воздействии) за счёт УЗ диспергирования замешанного наполнителя; – сокращение времени осветления жидкостей до 10 раз за счёт УЗ коагуляции по сравнению с гравитационной фильтрацией. Энергия колебаний, обеспечиваемая импульсным ультразвуковым воздействием, способствует дополнительному уменьшению показателя NTU на 30% по сравнению с непрерывным воздействием.

Таким образом, проведённые исследования доказали, что созданное оборудование способно обеспечить решение научно-технической проблемы повышения энергетической эффективности воздействия ультразвуковых колебаний в системах с жидкой фазой.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлено, что основными причинами, обуславливающими недостаточный КПД УЗ воздействия на системы с жидкой фазой, являются отсутствие научных данных об оптимальных режимах и условиях воздействия, обеспечивающих максимальную долю энергии колебаний, переходящую в преобразование структуры среды; ограниченность кавитационной области в высоковязких и неньютоновских жидкостях и отсутствие исследований влияния вязкости жидкой фазы на порог кавитации при импульсно-модулированном воздействии.

2. Создана феноменологическая модель формирования перепадов давлений при колебаниях (как непрерывных, так и импульсно-модулированных) излучателя с ультразвуковой частотой, которая впервые учитывает влияние нелинейно-вязких свойств жидкой фазы на поведение кавитационного пузырька, влияние вязкости на порог кавитации при импульсно-модулированном воздействии и позволяет установить следующие новые закономерности:

– применение импульсно-модулированного воздействия даёт возможность создавать УЗ колебания в жидкостях с интенсивностью более 20 Вт/см² без кавитации (когда вязкость жидкости составляет 1000 мПа с и более);

– интенсивность воздействия, обеспечивающая трансформацию максимальной доли энергии ультразвуковых колебаний в схлопывание кавитационных пузырьков, зависит от реологических свойств системы с жидкой фазой и составляет от 1,6 до 80 Вт/см².

3. Впервые выявлены оптимальные условия ультразвукового воздействия (наличие кольцевых отражателей на резонансном расстоянии от излучающей поверхности в проточных технологических объёмах с многозонным излучателем), обеспечивающие увеличение доли суммарного объёма зон развитой кавитации, в которых изменение структуры среды принципиально возможно до 1,5...3 раз.

4. Впервые созданы замкнутые кинетические модели эволюции характеристик системы с жидкой фазой с учётом перепадов давления, иниции¬руемых ультразвуковыми колебаниями, а именно:

 модель ультразвуковой механодеструкции высокомолекулярных жидко¬стей (гомогенных систем);

 модели ультразвукового диспергирования и коагуляции гетерогенных систем с несущей жидкой фазой.

Созданные модели впервые позволяют прогнозировать характеристики системы с жидкой фазой в результате наложения ультразвуковых колебаний и

определять энергозатраты на процесс в зависимости от режимов, условий воздействия и характеристик исходного сырья.

5. Выявлены оптимальные режимы, обеспечивающие повышение энергетической эффективности преобразования характеристик среды в 1,3...1,8 раза.

6. Проведены экспериментальные исследования формирования кавитационной области в среде со сплошной жидкой фазой, позволившие подтвердить адекватность созданной модели формирования перепадов давления и установленных с помощью неё закономерностей (относительная погрешность не превышает 23 %).

7. Проведены экспериментальные исследования формирования характеристик систем с жидкой фазой под действием ультразвуковых колебаний для подтверждения адекватности созданных кинетических моделей (относительная погрешность не превышает 20 %). Доказана возможность улучшения характеристик обработанной среды (достижение более низкой вязкости при механодеструкции макромолекул, более мелкого размера частиц при диспергировании; более высокой степени укрупнения при коагуляции) за счёт оптимизации режимов воздействия при неизменных суммарных энергозатратах на процесс.

8. Разработано аппаратурное оформление, реализующее выявленные оптимальные режимы и условия воздействия на системы со сплошной жидкой фазой. Разработанные аппараты включают технологические объёмы с внедряемыми кольцевыми пластинчатыми отражателями, обеспечивающими увеличенный объем зоны развитой кавитации до 1,5...3 раз и более равномерное распределение первичного звукового давления по сравнению с цилиндрическими объёмами без отражателей.

Исследования функциональных возможностей аппаратов показали следующее. Оптимальное УЗ воздействие обеспечивает улучшение характеристик получаемых материалов (за счёт большего прироста энергий связей) по сравнению с неоптимальным УЗ воздействием при равных суммарных потреблённых энергиях и объёмах конечного продукта, а именно:

- снижение вязкости смолы (время воздействия 5 мин) до 10 раз (при оптимальном УЗ воздействии) и до 6 раз (при неоптимальном УЗ воздействии);

 повышение прочности композитов на 44 % (при оптимальном воздействии) и на 30% (при неоптимальном воздействии) за счёт УЗ диспергирования замешанного наполнителя;

– сокращение времени осветления жидкостей до 10 раз за счёт УЗ коагуляции по сравнению с гравитационной фильтрацией. Энергия колебаний, обеспечиваемая импульсным ультразвуковым воздействием, способствует дополнительному уменьшению показателя NTU на 30% по сравнению с непрерывным воздействием.

Полученные практические результаты улучшения характеристик конечного продукта при равных энергозатратах при оптимизации ультразвукового воздействия обеспечиваются за счёт того, что созданная комплексная взаимосвязанная феноменологическая модель позволяет:

 определять фактическое отношение энергозатрат на изменение характеристик среды к суммарной введённой энергии ультразвуковых колебаний; прогнозировать оптимальные режимы и условия воздействия для новых, ранее неизвестных процессов или озвучиваемых сред.

Таким образом, доказано, что созданные научные основы на базе разработанной комплексной взаимосвязанной модели способны обеспечить повышение энергетической эффективности химико-технологических процессов в системах с жидкой фазой под действием ультразвуковых колебаний и, следовательно, достигнута цель диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Голых, Р.Н. Ультразвук. Воздействие на системы с несущей жидкой фазой: монография / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, С.Н. Цыганок. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2018. – 276 с.

2. Хмелёв, В.Н. Ультразвук. Газоочистка: монография / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2018. – 534 с.

3. Khmelev, V.N. Method for producing fine liquid-drop systems in ultrasound fields / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, R.S. Dorovskikh, V.A. Nesterov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering, 2019. – Vol. 53. – Iss. 3. – P. 419–431.

Хмелев, В.Н. Способ получения высокодисперсных жидкокапельных систем в ультразвуковых полях / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, Р.С. Доровских, В.А. Нестеров // Теоретические основы химической технологии, 2019. – Т. 53. – № 3. – С. 324–337.

4. Khmelev, V.N. Providing the Efficiency and Dispersion Characteristics of Aerosols in Ultrasonic Atomization / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, A.V. Shalunova // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – Springer, 2017. – Vol. 90, Iss. 4. – P. 831–844.

Хмелев, В.Н. Обеспечение производительности и дисперсных характеристик аэрозоля при ультразвуковом распылении / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров, Р.С. Доровских, А.В. Шалунова // Инженерно-физический журнал. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2017. – Т. 90, № 4. – С. 876–889.

5. Khmelev, V.N. Determination of the Modes and the Conditions of Ultrasonic Spraying Providing Specified Productivity and Dispersed Characteristics of the Aerosol / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh, A.V. Shalunova // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2017. – Vol. 10. – Iss. 5. – P. 1409–1419.

6. Khmelev, V.N. Generation of High-Dispersed Liquid-Drop Systems in the High-Intensity Ultrasonic Fields / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, R.N. Golykh // Romanian Journal of Acoustics and Vibration. – 2017. – Iss. 2. – P. 75–84.

7. Khmelev, S.S. Development and research of concentrator-sonotrode with increased radiating surface / S.S. Khmelev, V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov // Archives of Acoustics. – Warszawa (Poland): Institute of Fundamental Technological Research, 2015. – Vol. 40, Iss 1. – P. 129–135.

8. Golykh, R.N. Gaseous bubble oscillations in anisotropic non-Newtonian fluids under influence of high-frequency acoustic field / R.N. Golykh // Journal of Physics: Conference Series. – 2016. – Vol. 722. – Conf. 1. – 8 p.

9. Golykh, R.N. Evaluation of optimum modes and conditions of cavitation and acoustic absorption intensification for increasing efficiency of gas mixtures separation // Journal of Applied Fluid Mechanics. – 2017. – Vol. 10. – Iss. 5. – P. 1235–1246.

10.Golykh, R.N. Model of ultrasonic cavitation depolymerization of oil for evaluation of optimum modes and conditions providing reducing viscosity at low temperatures / R.N. Golykh // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2018. – Vol. 193. – Conf. 1. – 7 p.

11.Khmelev, V.N. Theoretical study of ultrasonic pulsed influence for evaluation optimum modes for coagulation in liquid-dispersed systems / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, E.V. Ilchenko, V.A. Shakura, V.A. Nesterov, R.S. Dorovskikh // Romanian Journal of Acoustics and Vibration. – 2016. – Iss. 1. – P. 35–41.

12. Хмелёв, В.Н. Повышение производительности процессов в системах «газ-жидкость» методами высокоинтенсивных ультразвуковых воздействий / В.Н. Хмелёв, Г.А. Боброва, Р.Н. Голых // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология – 2017. – №4. – С. 95–101.

13. Хмелев, В.Н. Разработка и исследование новых принципов построения мелкодисперсных ультразвуковых распылителей вязких жидкостей / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Д.В. Генне, А.В. Шалунова, Р.Н. Голых // Известия Томского политехнического университета. – 2011. – Т. 319. – № 4. – С. 158–163.

14. Хмелёв, С.С. Разработка стенда для экспериментальных исследований кавитационноакустических явлений / С.С. Хмелёв, В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, Ю.М. Кузовников // Научнотехнический вестник Поволжья. – 2015. – № 3. – С. 231–234.

15. Хмелёв, В.Н. Исследование процесса взаимодействия кавитационных пузырьков с границей раздела «жидкость-газ» для выявления режимов, обеспечивающих максимальное увеличение поверхности контакта фаз / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров, А.В. Шалунова, Е.В. Ильченко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 362–364.

16. Хмелёв, В.Н. Использование конечно-элементного моделирования распространения акустических колебаний в кавитирующей среде для разработки конструкций ультразвуковых проточных реакторов / В.Н. Хмелёв, С.С. Хмелёв, Р.Н. Голых, Ю.М. Кузовников, Д.С. Абраменко, К.А. Карзакова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 6. – С. 359–361.

17. Хмелёв, В.Н. Исследование процесса образования агрегатов субмикронных частиц под действием ультразвуковых колебаний / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 6. – С. 482–484.

18. Хмелёв, В.Н. Выявление оптимальных режимов и условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких жидкостей / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, С.С.Хмелёв, К.А. Карзакова // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 2. – С. 249–251.

19. Голых, Р.Н. Выявление оптимальных условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Г.А. Боброва, В.А. Нестеров, Г.А. Титов // Ползуновский вестник. – 2017. – № 4. – С. 123–128.

20. Хмелев, В.Н. Теоретическое выявление режимов воздействия, обеспечивающих формирование высокодисперсного аэрозоля при двухстадийном ультразвуковом распылении / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, Р.С. Доровских, В.А. Нестеров // Ползуновский вестник. – 2017. – № 2. – С. 99–104.

21. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая кавитационная обработка вязких и дисперсных жидких сред / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, Р.Н. Голых, А.В. Шалунов // Ползуновский вестник. – 2014. – № 4-2. – С. 110–115.

22. Хмелёв В.Н. Реализация результатов лабораторных исследований в промышленных масштабах / В.Н. Хмелёв, С.Н. Цыганок, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров // Южно-Сибирский научный вестник. – 2019. – № 1. – С. 203–207.

23. Голых, Р.Н. Моделирование процесса формирования кавитационной области в вязких жидкостях для определения оптимального обрабатываемого технологического объема и режимов воздействия / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, Р.В. Барсуков, А.В. Шалунов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 4 (22). – С. 58–62.

24. Голых, Р.Н. Моделирование формирования кавитационной области для определения режимов воздействия, обеспечивающих максимально эффективное изменение свойств веществ и материалов / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Г.А. Боброва, В.А. Нестеров, Г.А. Титов, Р.С. Доровских // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 88–90.

25. Голых, Р.Н. Колебания газового пузырька в анизотропной высоковязкой жидкости под воздействием высокочастотных акустических полей / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Р.С. Доровских, В.А. Шакура, Е.В. Ильченко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2016. – № 5. – С. 15–17.

26. Хмелев, В.Н. Моделирование процессов коагуляции газодисперсных систем для определения оптимальных режимов акустического воздействия / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, Р.Н. Голых, К.В. Шалунова // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 2. – С. 48–52.

27. Ультразвуковой проточный реактор для кавитационной обработки высоковязких жидкостей; пат. на полезную модель № 152620 Российская Федерация: МПК В01Ј 19/10 / Хмелёв В.Н., Голых Р.Н., Шалунов А.В., Хмелёв С.С., Доровских Р.С. (РФ); патентообладатель: ООО «ЦУТ АлтГТУ» (РФ) заявка: 2014146060/05 от 17.11.2014; опубл. 10.06.2015 – 2 с.: ил.

28. Khmelev, S.S. Evaluation of Optimum Modes and Conditions of Ultrasonic Cavitation Influence on High-Viscous and Non-Newtonian Liquid Mediums / S.S. Khmelev, V.N. Khmelev, R.N. Golykh // Romanian Journal of Acoustics and Vibration. – 2015. – Iss. 1. – P. 20–28.

29. Khmelev, V.N. Determination of optimum construction of the ultrasonic radiator for cavitationacoustic intensification of the absorption processes by mathematical and computer modeling methods / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, A.V. Shalunov, G.A. Bobrova, I.S. Kozhevnikov, S.S. Zorin // EDM'2017: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – P. 227–232.

30. Khmelev, V.N. Determination of requirements and development of experimental setup for studying of ultrasonic absorption / V.N. Khmelev, R.N. Golykh, V.A. Nesterov, D.V. Genne, M.V. Khmelev // EDM'2017: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2017. – P. 268–274.

31. Хмелёв, В.Н. Выявление оптимальных режимов и условий ультразвукового кавитационного воздействия, обеспечивающих максимальное увеличение межфазной поверхности эмульсий и суспензий / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, Р.С. Доровских, Е.В. Ильченко, В.А. Шакура // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы. – 2016. – С. 43–45.

32. Голых, Р.Н. Исследование формирования кавитационной области вблизи межфазной границы для выявления режимов, обеспечивающих максимальное увеличение поверхности контакта взаимодействующих веществ / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов // VIII Международная конференция, посвященная 115-летию со дня рождения академика М.А. Лаврентьева «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». – Новосибирск: Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, 2015. – С. 98.

33. Голых Р.Н., Хмелев В.Н., Шакура В.А., Ильченко Е.В. Моделирование ультразвукового кавитационного разрушения макромолекул полимерных материалов // Ультразвук: проблемы, разработки, перспективы Материалы Международной научной конференции. – Уфа: Институт проблем сверхпластичности металлов РАН. – 2017. – С. 30–33.

34. Голых, Р.Н. Выявление оптимальных условий и режимов акустического воздействия на вязкие и дисперсные среды / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, С.С. Хмелёв, Р.В. Барсуков, А.В. Шалунов // Тезисы докладов IV Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых «Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения». – Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2011. – С. 93.

35. Хмелёв, В.Н. Оптимизация режимов и условий ультразвукового кавитационного воздействия на различные жидкости / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, А.В. Шалунов, В.А. Нестеров // Сборник тезисов V-й Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых "Задачи со свободными границами: теория, эксперимент и приложения" – Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2014. – С. 96–97.

36. Голых Р.Н. Динамика газовой полости в анизотропной неньютоновской жидкости под воздействием высокочастотных акустических полей // Всероссийская конференция «Нелинейные волны: теория и новые приложения». – Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2016. – С. 41–42.

37. Голых Р.Н. Моделирование формирования структуры и свойств материальных сред в высокоинтенсивных ультразвуковых полях // Моделирование неравновесных систем – 2017: Материалы XX Всероссийского семинара. – Красноярск: ИВМ СО РАН, 2017. – С. 37–42.

38. Golykh, R.N. Modes and conditions of efficient ultrasonic influence on high-viscosity media in the technological volumes / R.N. Golykh, A.V. Shalunov, V.N. Khmelev, S.S. Khmelev // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2013: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2013. – P. 128–133.

39. Голых Р.Н. Моделирование воздействия кавитации на реологические свойства сред с несущей высокомолекулярной жидкой фазой // Всероссийская конференция с международным участием "Современные проблемы механики сплошных сред и физики взрыва", посвященная 60-летию Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН. – Новосибирск: ИГиЛ СО РАН, 2017. – С. 88–89.

40. Голых Р.Н. Модель колебаний газовой полости при кавитационной обработке анизотропных неньютоновских жидкостей // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, 2017. – С. 37–41.

41. Ультразвуковая интенсификация процессов в системах «газ-жидкость» / В.Н. Хмелёв, Г.А. Боброва, Р.Н. Голых, В.А. Нестеров, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов // Материалы Международного научно-технического форума «Первые международные косыгинские чтения – 2017». Форум. – М.: РИО РГУ им. А.Н. Косыгина, 2017. – С. 1900–1904.

Подписано в печать _____. 20__ г. Печать – ризография. Заказ 20__ -

Объем 2,5 п.л. Тираж 100 экз.

Отпечатано в ИИО БТИ АлтГТУ им. И.И. Ползунова

659305, г. Бийск, ул. имени Героя Советского Союза Трофимова, 27