

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
Бийский технологический институт (филиал)
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Алтайский государственный технический университет
им. И.И. Ползунова»

На правах рукописи

Голых Роман Николаевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОГО
КАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ХИМИКО-
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В ГЕТЕРОГЕННЫХ
СИСТЕМАХ С НЕСУЩЕЙ ВЫСОКОВЯЗКОЙ
ИЛИ НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОЙ ФАЗОЙ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – д.т.н., доцент Шалунов А.В.

Бийск – 2014

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ С НЕСУЩЕЙ ЖИДКОЙ ФАЗОЙ	12
1.1 Физические эффекты, возникающие в гетерогенных системах с несущей жидкой фазой под действием УЗ колебаний и обеспечивающие интенсификацию технологических процессов	12
1.1.1 Режимы развития кавитации в гетерогенной среде с жидкой фазой.....	13
1.1.2 Физические эффекты, возникающие в жидкости при режиме развитой кавитации.....	16
1.2 Процессы химической технологии, интенсифицируемые в гетерогенных средах с жидкой фазой под действием УЗ колебаний	21
1.2.1 Диспергирование твёрдых тел в жидкости	21
1.2.2 Снижение вязкости смол и нефтепродуктов.....	24
1.2.3 Эмульгирование	25
1.2.4 Растворение.....	26
1.2.5 Гомогенизация высокомолекулярных соединений и получение низкомолекулярных веществ	27
1.2.6 Дегазация	29
1.2.7 Экстрагирование	31
1.3 Формирование кавитационной области в гетерогенных средах с различными реологическими свойствами	33
1.3.1 Режимы ультразвукового воздействия необходимые для создания кавитационной области в линейно-вязких средах.....	36
1.3.2 Создание кавитационной области в нелинейно-вязких средах.....	39
1.4 Существующее промышленное ультразвуковое оборудование для создания кавитации в гетерогенных средах с несущей жидкой фазой	43

1.4.1	Отечественное ультразвуковое оборудование для кавитационной обработки гетерогенных сред с несущей жидкой фазой	43
1.4.2	Зарубежное ультразвуковое оборудование для кавитационной обработки гетерогенных сред с несущей жидкой фазой	45
1.5	Перспективная конструкция излучателя ультразвукового аппарата для обработки высоковязких сред.....	48
2	ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ПО СВОЙСТВАМ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ С ЖИДКОЙ ФАЗОЙ.....	52
2.1	Основные этапы теоретического рассмотрения процесса формирования кавитационной области и принятые допущения	53
2.2	Анализ динамики одиночного кавитационного пузырька в нелинейно-вязкой среде	57
2.3	Анализ локального формирования и эволюции ансамбля кавитационных пузырьков для выявления их концентрации и объёмного содержания.....	73
2.4	Анализ распространения УЗ колебаний в кавитирующей среде с целью определения эффективных акустических свойств кавитационной области	85
3	ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЗОН В ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ С ВЫСОКОВЯЗКОЙ И НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОЙ ФАЗОЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЁМАХ.....	100
3.1	Определение размеров формируемой кавитационной области	101
3.2	Выявление условий, обеспечивающих формирование кавитационной области максимального объема при использовании рабочих инструментов поршневого типа	105
3.3	Выявление оптимальных условий формирования кавитационной области при использовании многозонных рабочих инструментов	121

4	ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗА СЧЁТ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ И СОЗДАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ АППАРАТОВ.....	135
4.1	Экспериментальный стенд для выявления оптимальных условий реализации процесса ультразвуковой кавитационной обработки.....	135
4.2	Определение зависимости объёма зоны развитой кавитации от режимов и условий воздействия.....	138
4.3	Определение зависимости удельной мощности кавитационного воздействия от условий распространения ультразвуковых колебаний.....	148
4.4	Практические конструкции ультразвуковых технологических аппаратов, реализующие выявленные оптимальные режимы и условия воздействия.....	154
4.4.1	Определение совокупной энергии кавитационной области, формируемой в разработанных технологическими объёмах.....	156
4.5	Исследование функциональных возможностей и эффективности применения разработанных ультразвуковых технологических аппаратов при реализации различных процессов химической технологии.....	158
4.5.1	Ультразвуковое диспергирование суспензии катализатора для крекинга нефти.....	158
4.5.2	Ультразвуковое диспергирование наноглин для производства полимерных композитов.....	162
4.5.3	Технология ультразвукового кавитационного преобразования углеводородного сырья.....	165
4.5.4	Ультразвуковое диспергирование волластонита.....	169
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	172
	СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	174

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных подходов к решению различных технологических задач современных химических производств является ультразвуковое (УЗ) кавитационное воздействие на гетерогенные системы с жидкой фазой. Высокая эффективность и перспективность УЗ воздействия доказана многочисленными исследованиями для широкого спектра технологических сред (вода, органические растворители, масла, нефти, наполненные полимерные наноструктурированные материалы, лакокрасочные композиции, смолы и т. д.), которые в ряде случаев могут содержать твёрдую или жидкую дисперсную фазу микронного (1...100 мкм) или субмикронного (0,01...1 мкм) размера (эмульсии, суспензии). Уникальность и эффективность УЗ воздействия обусловлена формированием кавитационных парогазовых пузырьков, накапливающих энергию при их расширении в один полупериод УЗ колебаний и образующих ударные волны и кумулятивные струи при сжатии в другой полупериод. Ударные волны вызывают изменение структуры и свойств технологических сред, позволяют увеличивать межфазную поверхность взаимодействия, реализовывать процессы растворения, экстрагирования, эмульгирования и т. д. К сожалению, на сегодняшний день, в промышленных масштабах успешно реализована только УЗ обработка маловязких сред (с вязкостью не более 30 мПа·с).

Очевидно, что ультразвуковая кавитационная обработка технологических сред (масла, нефти, полимеры и др.) большей вязкости (до 2 Па·с), и вязкость которых зависит от скорости сдвига (неньютоновских жидкостей), имеет для химической промышленности не меньшую значимость. Однако УЗ кавитационная обработка таких сред практически не применяется из-за:

– малого размера кавитационной зоны и её сосредоточенности вблизи излучающей поверхности;

- необходимости в высоких интенсивностях УЗ воздействия для формирования и поддержания кавитационного процесса;
- неоднородности распределения энергии кавитационного воздействия.

По этим причинам не обеспечивается достаточная для промышленного использования производительность процессов, основанных на кавитационной обработке высоковязких сред. Кроме того, даже интенсивности УЗ излучения, близкие к пределу теоретической прочности волноводов-излучателей, не позволяют создавать кавитацию. А разработанные на сегодняшний день многозонные рабочие инструменты с развитой поверхностью излучения не обеспечивают сосредоточения кавитационной зоны вблизи излучающей поверхности.

Таким образом, задача повышения эффективности химико-технологических процессов за счёт комплексной оптимизации режимов и условий распространения колебаний (геометрии технологического объёма) для реализации УЗ кавитационной обработки гетерогенных систем с высоковязкими и неньютоновскими жидкими фазами в промышленных масштабах, является актуальной.

Результаты диссертационной работы получены при проведении работ по Гранту РФФИ в рамках конкурса инициативных научных проектов, выполняемых молодыми учёными, № **14-08-31716** «Исследование процесса формирования и развития кавитационной области вблизи границы раздела фаз для выявления эффективных режимов воздействия на различные среды» (*руководитель*); государственному контракту № 14.В37.21.1173 «Исследование кавитационного процесса в неньютоновских жидкостях и создание аппаратов для обеспечения условий и режимов высокоинтенсивного ультразвукового воздействия на вязкие и дисперсные жидкие среды с целью получения новых материалов» (*исполнитель*); Гранту Президента для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук: МК-957.2014.8 «Разработка научно-технических основ повышения эффективности разрушения газодисперсных систем природного

и техногенного происхождения ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности» (*соисполнитель*).

Цель работы: повышение эффективности процессов химических технологий реализуемых в гетерогенных средах с высоковязкими и неньютоновскими жидкими фазами за счет теоретического и экспериментального выявления режимов и условий УЗ воздействия, обеспечивающих увеличение объёма формируемой кавитационной области.

Задачи исследований:

1. Выявить причины, ограничивающие эффективность процессов химических технологий в гетерогенных средах с высоковязкими и неньютоновскими жидкими фазами при их интенсификации УЗ колебаниями.

2. Разработать феноменологическую модель формирования кавитационной области в гетерогенной среде с неньютоновской жидкой фазой, основанную на комплексном рассмотрении кавитационной области с учётом эффектов и явлений, происходящих внутри самой области и позволяющую определять форму и размеры кавитационных зон в жидкой среде при различных режимах развития кавитации.

3. Установить значения интенсивности УЗ воздействия, обеспечивающие создание кавитационной области с увеличенной удельной мощностью ударных волн, образуемых при схлопывании кавитационных пузырьков.

4. Определить размеры и форму технологических объёмов, обеспечивающие увеличение объёма формируемой кавитационной области при ультразвуковой обработке гетерогенных сред с жидкой фазой.

5. Экспериментально исследовать условия и режимы формирования кавитационной области для подтверждения полученных теоретических результатов.

6. Предложить и разработать конструкции УЗ технологических аппаратов со специализированными технологическими объёмами,

обеспечивающими реализацию выявленных оптимальных условий и режимов воздействия.

Научная новизна:

1. Получены уравнения динамики кавитационного пузырька, учитывающие зависимость вязкости жидкости от скорости сдвига и позволяющие определять мгновенный радиус пузырька в зависимости от времени для псевдопластических, дилатантных и линейно-вязких жидкостей.

2. Впервые разработана феноменологическая модель, позволяющая описать процесс формирования в ультразвуковом поле кавитационной области с учётом эффектов и явлений, происходящих внутри самой области (коалесценция и дробление пузырьков, влияние степени развитости кавитации на акустические свойства пузырьковой среды и распространение УЗ колебаний в ней).

3. Впервые теоретически определены форма и распределение кавитационной области в обрабатываемом объёме, с учётом характера распространения УЗ колебаний в технологическом объёме обрабатываемой среды.

Теоретическая значимость:

1. Установлены пороговые значения интенсивностей УЗ колебаний, необходимые для возникновения кавитации в гетерогенных системой с несущей неньютоновской жидкой фазой.

2. Установлены режимы (интенсивности) и условия (геометрические параметры технологических объёмов) УЗ воздействия, обеспечивающие захлопывание кавитационного пузырька с максимальной энергией, запасаемой при его расширении.

3. Выявлены геометрические характеристики обрабатываемой области жидкости с отражающими границами, обеспечивающие формирование максимальной по объёму кавитационной зоны.

Практическая значимость:

1. Установлены требования к мощностным режимам работы

оборудования для УЗ кавитационного воздействия на различные гетерогенные системы с высоковязкими и неньютоновскими жидкими фазами.

2. Предложены и разработаны конструкции специализированных проточных технологических объёмов с кольцевыми пластинчатыми отражателями, которые повышают эффективность процессов за счёт 3-кратного увеличения объёма формируемой кавитационной области, при равномерном энергетическом воздействии УЗ колебаниями во всей области обработки.

3. Предложены и реализованы на практике конструкции проточных УЗ технологических аппаратов, обеспечивающих улучшение показателей качества конечного продукта для широкого спектра технологических процессов, по сравнению с существующим УЗ оборудованием.

Объект и методы исследования. Объектом исследования являются кавитационные явления, протекающие в гетерогенных системах с высоковязкими и неньютоновскими жидкими фазами при реализации под действием УЗ колебаний процессов химических технологий.

При выполнении работы применялись как теоретические, так и экспериментальные методы исследования. Теоретические методы базировались на построении математических моделей, допускающих 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.

На защиту выносятся:

1. Результаты теоретических исследований процесса формирования и эволюции кавитационной области в технологических объёмах, обеспечившие выбор режимов УЗ воздействия и геометрических размеров объёмов и позволившие обеспечить повышение эффективности обработки за счёт 1,5...3-кратного увеличения объёма формируемой кавитационной области.

2. Зависимости оптимальных режимов УЗ воздействия и геометрических параметров технологического объёма от величин, характеризующих зависимость вязкости гетерогенной среды с несущей неньютоновской жидкой фазой от скорости сдвига.

3. Результаты экспериментальных исследований, подтвердившие оптимальность теоретически выявленных режимов ультразвукового воздействия и геометрических параметров технологических объёмов и показавшие эффективность УЗ кавитационной обработки высоковязких жидких сред.

4. Предложенные конструктивные схемы технологических объёмов, обеспечивающих формирование максимальных по размерам кавитационных зон.

Личный вклад автора состоит в выявлении причин низкой эффективности УЗ кавитационной обработки гетерогенных систем с высоковязкими и неньютоновскими жидкими фазами; разработке математической модели возникновения и эволюции кавитационной области в вязкой неньютоновской жидкости, позволяющей выявлять оптимальные режимы и условия УЗ воздействия; проведении экспериментальных исследований условий и режимов формирования кавитационной области; разработке вариантов конструкций технологических объёмов, обеспечивающих увеличение размеров кавитационных зон для повышения эффективности обработки; подготовке публикаций по выполненной работе.

Обоснованность и достоверность полученных результатов подтверждается строгостью математических выкладок, использованных при построении теоретических моделей, соответствием теоретических расчетов результатам экспериментальных работ, а также успешной практической реализацией разработанных методик и подходов к повышению эффективности химико-технологических процессов под воздействием УЗ колебаний в гетерогенных системах с высоковязкими и неньютоновскими жидкими фазами.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались: на Всероссийской конференции с участием зарубежных ученых «Задачи со

свободными границами: теория, эксперимент и приложения» (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН) 2011 г.; на конференциях EDM (Novosibirsk, 2010–2013 гг.); Всероссийской научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях» (г. Бийск, 2010–2012 гг.); VI-ой Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием «Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности» (г. Бийск, 2014 г.).

Публикации. Материалы диссертации изложены в 20 печатных работах, в том числе 4 статьи в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных журналов и изданий, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и результатов, списка литературы из 117 наименований и содержит 188 страниц машинописного текста.

Работа является частью комплексных исследований, проводимых лабораторией акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» и направленных на развитие научных основ повышения эффективности процессов химических технологий в высоковязких и неньютоновских жидких средах при помощи ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Автор выражает глубокую благодарность коллективу лаборатории, а также научному руководителю Шалунову Андрею Викторовичу за полезные замечания и консультации, поддержку и помощь в работе.

1 АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ИНТЕНСИФИКАЦИИ ПРОЦЕССОВ В ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМАХ С НЕСУЩЕЙ ЖИДКОЙ ФАЗОЙ

На сегодняшний день не вызывает сомнений, что ультразвуковое (УЗ) кавитационное воздействие на гетерогенные системы с несущей жидкой фазой – это эффективный подход к решению различных технологических задач современных производств [1–3]. Уникальность УЗ воздействия обусловлена образованием кавитационных парогазовых пузырьков, накапливающих энергию при их расширении и порождающих при захлопывании большое количество различных физических эффектов, позволяющих изменять структуру и свойства веществ и материалов, увеличивать межфазную поверхность взаимодействия, ускорять процессы массо- и теплопереноса, и т.д. [4–8] и подробно рассмотренных далее.

1.1 Физические эффекты, возникающие в гетерогенных системах с несущей жидкой фазой под действием УЗ колебаний и обеспечивающие интенсификацию технологических процессов

Явление кавитации, возникающее под действием УЗ колебаний, является основным фактором, обеспечивающим интенсификацию технологических процессов. Оно заключается в образовании полостей в жидкости там, где происходит местное понижение давления. Для разрыва идеальной жидкости (несущей фазы) необходимо преодолеть силы межмолекулярного взаимодействия, составляющие $3 \cdot 10^9 \dots 3 \cdot 10^{10}$ Па [9]. В реальной жидкости, в зависимости от температуры, газосодержания, гидростатического давления и других факторов, образование полостей происходит в интервале давлений от десятых долей до нескольких сотен атмосфер. Экспериментально установлено, что порог кавитации –

минимальное значение акустического давления, необходимое для образования кавитационных полостей, всегда намного ниже теоретической прочности идеальной жидкости.

Уменьшение сопротивления жидкости разрыву объясняется наличием в ней неоднородностей – «зародышей» или ядер кавитации. Зародышами могут быть мельчайшие пузырьки газа, нерастворенного в жидкости, а также несмачиваемые твердые частицы [9]. Совокупность кавитационных пузырьков, занимающих определённую часть пространства, называется кавитационной областью [6]. При возникновении кавитации всегда сталкиваемся с воздействием целой кавитационной области, так как получить единичную полость практически невозможно.

1.1.1 Режимы развития кавитации в гетерогенной среде с жидкой фазой

Пузырьки, образующиеся в кавитационной области, по характеру их воздействия на интенсифицируемый технологический процесс можно разбить на три группы [8]:

1. Малые пульсирующие пузырьки. Такие пузырьки в течение фазы разрежения расширяются до малого радиуса. Скорость схлопывания таких пузырьков невелика и недостаточна для образования ударной волны.

2. Кавитационные пузырьки, пульсации которых сопровождаются возникновением в жидкости интенсивных ударных волн.

3. Крупные пульсирующие пузырьки, стабильно существующие в течение десятков и сотен периодов, видимые невооруженным глазом. Размеры их мало меняются от периода к периоду, а переменные давления, возникающие в жидкости при их пульсациях, крайне малы.

Преобладание того или иного типа пузырьков определяет режим развития кавитации.

Обобщая результаты исследований [5, 6, 8, 10], можно выделить четыре режима развития кавитации в зависимости от интенсивности ультразвукового излучения.

1. *Отсутствие кавитации при малых амплитудах звукового давления.*

Как известно, УЗ волна, проходя через жидкость, создает зоны сжатия и зоны разрежения, меняющиеся местами в каждый полупериод волны. За счёт этого кавитационные зародыши совершают линейные радиальные колебания с незначительными амплитудами (доли микрометра) [8].

2. *Зарождение кавитации.* При дальнейшем повышении амплитуды звукового давления (например, до 10^5 Па для воды или $3 \cdot 10^5 \dots 5 \cdot 10^5$ Па для масла) [8] величина амплитуды колебаний радиуса пузырьков становится сопоставимой с начальным радиусом, и тем самым, нарушается линейность колебаний. Данная нелинейность проявляется в том, что скорость уменьшения радиуса пузырька в стадии сжатия оказывается значительно выше, чем скорость расширения пузырька в стадии разрежения. Данный факт приводит к тому, что за счёт сил инерции минимальный радиус пузырька оказывается достаточно малым, чтобы давление газа внутри него превысило десятки атмосфер. Это локальное повышение давления сопровождается ударной волной с небольшой амплитудой давления в её фронте, и затухающей по закону $O(1/r^2)$ с расстоянием. Таким образом, возникает начальная стадия кавитации.

Так как на расстояниях порядка 5 мкм давление ударной волны не превышает $2 \cdot 10^5 \dots 3 \cdot 10^5$ Па, то такая ударная волна на протекание технологических процессов никакого влияния не оказывает, поскольку сопоставима со статическим давлением в жидкости [8].

3. *Стадия развитой кавитации.* Дальнейшее амплитуды звукового давления приводит к значительному увеличению амплитуды давления ударных волн при сжатии (схлопывании) кавитационных пузырьков. Начинается стадия развитой кавитации. Она характеризуется образованием быстрорастущих парогазовых пузырьков, которые в фазу сжатия мгновенно

сокращаются в объёме и схлопываются, т. е. наступает коллапс. При схлопывании внутри пузырька создаются большие давления до 10^9 Па, в пузырьке происходит разогрев парогазовой смеси до 8000...12000 К. Образующие ударные волны при схлопывании являются основным движущим фактором большинства технологических процессов. Колебания пузырька характеризуются высокой радиальной скоростью стенок, большей скорости звука (340 м/с) [8].

4. *Стадия вырожденной кавитации.* При повышении амплитуды звукового давления выше некоторого критического значения кавитационные пузырьки достигают критических размеров, при которых происходит их вырождение в долгоживущие [8]. Такие пузырьки в течение большого числа периодов совершают колебания около своих максимальных размеров (более 100–1000 мкм). Долгоживущие пузырьки практически не схлопываются и, следовательно, не оказывают никакого интенсифицирующего воздействия на протекание технологических процессов в жидких средах. Так как размеры пузырька изменяются незначительно, то и затраты энергии на совершение работы по изменению размеров пузырька оказываются так же невелики. Однако из-за малого волнового сопротивления области вырожденной кавитации, такие пузырьки обладают большим экранирующим действием по отношению к распространению УЗ колебаний и препятствуют дальнейшему распространению УЗ энергии вглубь среды.

Поэтому наибольший практический интерес представляет стадия развитой кавитации [8, 10], которая достигается в определённом диапазоне интенсивностей, различном для каждого типа несущей жидкой фазы обрабатываемой гетерогенной среды.

1.1.2 Физические эффекты, возникающие в жидкости при режиме развитой кавитации

В режиме развитой кавитации в обрабатываемой среде возникает ряд специфических физических эффектов (рисунок 1.1), представляющих практический интерес, к которым относятся ударные волны, микроструйки жидкости, позволяющие изменять структуру и свойства веществ и материалов, а также возникающие акустические течения, способные за счёт перемешивания обрабатываемой среды повысить однородность УЗ обработки [8]. Обобщенная классификация физических эффектов, возникающих в режиме развитой кавитации, и технологических процессов, реализуемых на их основе, приведена на рисунке 1.1.

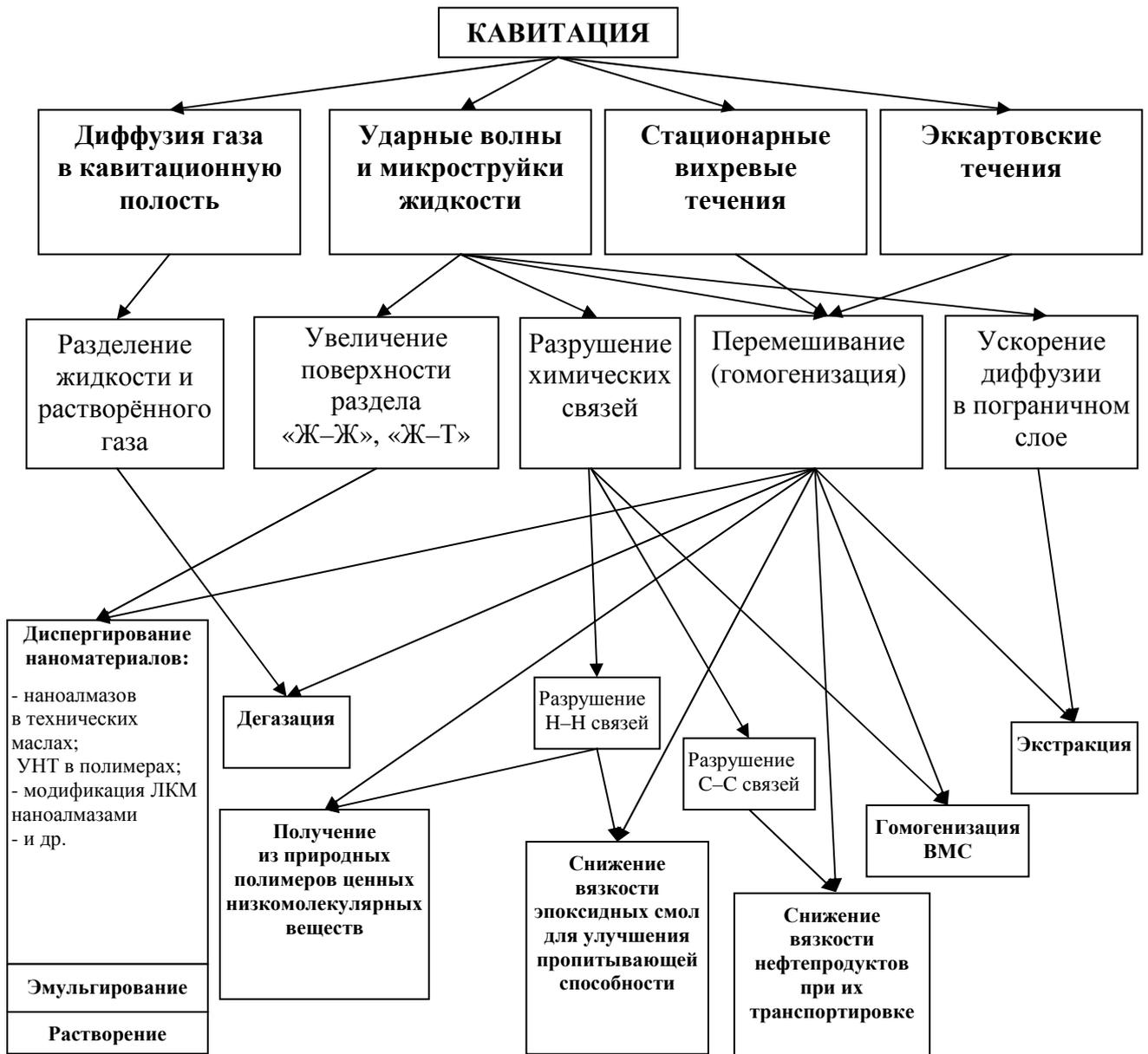


Рисунок 1.1 – Классификация физических эффектов, возникающих при кавитации и реализуемых на их основе технологических процессов (Использованные сокращения: «Ж–Ж» – «жидкость-жидкость», «Ж–Т» – «жидкость–твёрдое тело», ВМС – высокомолекулярные соединения, УНТ – углеродные нанотрубки, ЛКМ – лакокрасочные материалы)

Каждый из представленных эффектов вносит вклад в интенсификацию того или иного химико-технологического процесса, поэтому далее эти эффекты рассмотрены более подробно.

При расширении пузырька в стадии разрежения звуковых волн давление газа внутри пузырька понижается, поэтому происходит *диффузия*

растворённого в жидкости газа в кавитационную полость до достижения равновесия [6].

В стадии сжатия звуковых волн происходит схлопывание пузырька с образованием *ударных волн*, т. е. в точке схлопывания резко нарастает давление и генерируется импульс давления, распространяющийся в жидкости. Несмотря на быстрое снижение давления в ударной волне при ее удалении от места возникновения, на расстоянии начального радиуса пузырька она еще достаточно мощная и может вызывать разрушение большинства из известных материалов, химических связей, ускорение диффузионных процессов в пограничном слое и т. д.

В реальных условиях сферичность кавитационного пузырька нарушается при его подходе к границе раздела фаз жидкость–твердое тело (при условии, что плоскость твердой поверхности превышает размеры пузырька). В начальный момент пузырек слегка деформирован, вследствие чего при его захлопывании образуется микроструйка жидкости, которая называется *кумулятивной струёй*. Скорость движения микроструйки исчисляется десятками и сотнями метров в секунду. В частности, удар микроструек о твердую поверхность вызывает ее разрушение [6].

Потери энергии, связанные с образованием кавитации, как и любые другие потери, приводят к уменьшению количества движения и тем самым являются причиной возникновения течений *эскартовского* типа, которые характеризуются наличием стационарного безвихревого течения жидкости, направленного вдоль УЗ волны.

Неоднородность звукового поля и наличие препятствий на пути звуковой волны (отражающих границ) приводят к наличию течений другого типа – *стационарных вихревых акустических течений* [11].

Как показано в монографии Л.Д. Розенберга, при воздействии УЗ колебаниями на гетерогенную среду с несущей жидкой фазой, оба типа течений главным образом обусловлены потерями энергии на образование кавитации, при этом силы вязкого трения, возникающие в среде, оказывают

на акустические течения слабое влияние [6]. Это подтверждается численными оценками, согласно которым затраты энергии УЗ волны на расширение кавитационных пузырьков, более чем в 1000 раз превышают потери на вязкое трение [12].

Поэтому кавитация является основным влияющим фактором на возникающие стационарные вихревые и экартовские течения, в том числе и на их скорость.

Таким образом, все возникающие физические эффекты при кавитации прямо пропорциональны интенсивности схлопывания пузырьков, т. е. суммарной энергии ударных волн, создаваемой каждым пузырьком. В свою очередь энергия ударных волн, создаваемая отдельным пузырьком, однозначно связана с функциональной зависимостью радиуса кавитационного пузырька от времени. Эта зависимость определяется режимами ультразвукового воздействия (частота и амплитуда звукового давления) и физическими свойствами обрабатываемой среды, такими как плотность, поверхностное натяжение и реологические свойства (вязкость).

Ранее проведённые исследования показали, что плотность и поверхностное натяжение оказывают слабое влияние на необходимые для достижения развитой кавитации режимы воздействия, при которых интенсивность схлопывания пузырьков будет максимальной. Это обусловлено тем, что плотность большинства используемых на практике гетерогенных сред с несущей жидкой фазой находится в достаточно узком диапазоне от 800 до 1200 кг/м³ [13], а поверхностное натяжение жидкой фазы оказывает значительное влияние только на начальной стадии расширения пузырька [5, 6, 14] и на величину давления ударной волны при схлопывании. При этом в течение большей части периода расширения и схлопывания пузырька поверхностное натяжение влияние практически не оказывает из-за малости величины $\frac{2\sigma}{R}$ по сравнению с динамическим давлением жидкости

вблизи стенок пузырька $\frac{\rho \left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^2}{2}$. Однако следует учитывать, что изменение поверхностного натяжения от 22 до 72 Н/м может изменять абсолютную величину давления ударной волны до 30 % [5–6], тем самым не оказывая влияния на оптимальные режимы воздействия и акустические свойства, в частности, поглощение ультразвука в жидкости, которое определяется стадией расширения кавитационных пузырьков.

Силы вязких напряжений в таких средах значительно превышают силы поверхностного натяжения, особенно в стадии расширения пузырька, т. е. отношение сил вязких напряжений к силам поверхностного натяжения превышает:

$$\frac{\frac{\partial R}{\partial t}}{\frac{2\sigma}{R}} \sim \frac{4\eta \frac{\partial r}{R}}{\sigma T} = \frac{4f\eta R_{\max}}{\sigma} > 20, \quad (1.1)$$

где R – мгновенный радиус кавитационного пузырька, м, η – вязкость несущей жидкой фазы, Па·с, σ – поверхностное натяжение несущей жидкой фазы, Н/м, T – период акустических колебаний, с, f – частота акустических колебаний, Гц, R_{\max} – максимальный радиус пузырька, достигаемый в стадии его расширения, м.

В выражении (1.1) значение вязкости составляет 100 мПа·с (минимальное значение вязкости большинства используемых на практике жидкостей помимо водных сред) при поверхностном натяжении 0,032 мН/м, типичном для большинства жидкостей высокой вязкости [12, 15–17].

Поэтому среди физических свойств жидкости определяющее влияние на оптимальные режимы воздействия и условия распространения колебаний оказывают реологические свойства.

Рассмотренные физические эффекты, возникающие в жидких и жидко-дисперсных средах под воздействием УЗ колебаний, являются основным движущим фактором изменения структуры и свойств веществ и материалов, а

также увеличения межфазной поверхности взаимодействия. Это позволяет реализовывать под действием ультразвуковых колебаний большое количество технологических процессов, которые далее рассматриваются более подробно.

1.2 Процессы химической технологии, интенсифицируемые в гетерогенных средах с жидкой фазой под действием УЗ колебаний

Поскольку, как было отмечено в подразделе 1.1, реологические свойства оказывают определяющее влияние на оптимальные режимы и условия УЗ воздействия, приведённый далее обзор процессов химической технологии, представляющих наибольший интерес для современных высокотехнологичных производств (см. рисунок 1.1), проводится с выявлением диапазонов реологических свойств, которыми обладают обрабатываемые среды.

1.2.1 Диспергирование твёрдых тел в жидкости

Механизм диспергирования заключается в следующем: разрушение и диспергирование твердых тел при воздействии ультразвука определяется в основном процессом кавитации и акустическими микропотоками [8]. Наибольшее количество зародышей (ядер кавитации) расположено вблизи микротрещин и неровностей поверхностей, неизбежно существующих, так как диспергируемое вещество, как правило, первоначально находится в измельченном состоянии (до размеров не более 2 мм по условному диаметру частиц), подвергаясь предварительному механическому измельчению. Поэтому микроударное действие кавитации будет в наибольшей степени сосредоточено вблизи неровностей частиц.

Процесс диспергирования состоит из двух стадий. На первой стадии под действием интенсивных микропотоков, образующихся при пульсациях кавитационных пузырьков, поры, углубления и микротрещины на

поверхности частицы заполняются жидкостью. На второй стадии происходит раскалывание частиц под действием ударных волн, возникающих в жидкости при захлопывании кавитационных пузырьков.

Равномерное распределение полученных в результате диспергирования измельченных твёрдых частиц достигается за счёт их перемешивания с помощью вихревых акустических микропотоков.

Среди перспективных направлений [18–24] применения ультразвукового диспергирования следует отметить введение различного рода наномодификаторов в полимерах (смолах) [18–23], обладающих вязкостью 400–1500 мПа·с [24–25], при помощи УЗ колебаний, приводящее к повышению предела прочности изделий из ПКМ (полимерных композиционных материалов) при изгибе более чем на 20 %, и более чем на 30 % при сжатии [20]. Другим примером может служить УЗ диспергирование углеродных нанотрубок (УНТ).

Как показано в [22], УЗ воздействие на суспензию углеродных нанотрубок, механически замешанных в полимерном материале, приводит к повышению прочности конечного изделия на 72 %. Это вызвано наличием эффекта диспергирования УНТ под воздействием УЗ кавитации с исходных размеров 50–100 нм до 10–20 нм. Уменьшение размеров УНТ приводит к снижению механических напряжений в полимерной матрице, что обуславливает повышение прочности композиционного материала.

Кроме того, возникающая кавитация приводит к дополнительному перемешиванию УНТ в материале, что исключает возможность наличия «узких мест» с пониженной прочностью.

Ещё одним примером может являться ультразвуковое воздействие на лакокрасочные материалы (вязкостью от 1000 до 3000 мПа·с без добавления растворителей), которое позволяет диспергировать частицы серебра до нанометровых размеров. Это позволяет придать лакокрасочным материалам биоцидные свойства широкого спектра действия на патогенные микроорганизмы [23].

Кроме того, в работе [25] показано, что при введении в смазочные материалы на нефтяной основе смесей сажеподобной, графитоподобной, алмазоподобной и фуллереноподобной модификаций углерода (наночастицы размером 3–8 нм) наблюдается существенное (в 1,3–2 раза) повышение износостойкости смазываемых поверхностей. Промышленной реализации данной технологии препятствует тот факт, что исходный размер наночастиц углерода, получаемых путём обработки метано-воздушной смеси плазмой высоковольтного разряда при атмосферном давлении, составляет 100...200 нм, что к достижению желаемого эффекта не приводит. Однако согласно результатам экспериментальных исследований [25] УЗ кавитационное воздействие с амплитудой звукового давления $4,7 \cdot 10^5$ – $8,2 \cdot 10^5$ Па (при интенсивности 15–45 Вт/см²) позволяет измельчать УНТ до необходимых размеров 3...8 нм, поэтому является наиболее перспективным для разрушения частиц УНТ, введённых в смазочные материалы, вязкость которых значительно ниже по сравнению с лакокрасочными материалами и полимерами (не более 300 мПа·с).

Таким образом, использование УЗ колебаний является перспективным для интенсификации технологических процессов в неньютоновских жидких средах (с зависимостью вязкости от скорости сдвига), в то время как ранее УЗ воздействие главным образом использовалось для маловязких сред, например, растворов на водной основе.

Однако, в частности, в экспериментальных исследованиях по диспергированию УНТ в смазочных материалах [25] не удавалось одновременно обработать более 150 мл суспензии УНТ из-за ограниченности формируемой зоны развитой кавитации, в области которой реализуется диспергирование УНТ. Кроме того, 3-кратное повышение интенсивности УЗ воздействия с 15 до 45 Вт/см² не приводило к существенному увеличению кавитационной зоны в объёме. При амплитуде звукового давления свыше $8,2 \cdot 10^5$ Па (интенсивности воздействия свыше 45 Вт/см²) происходит образование зоны вырожденной кавитации в

смазочном материале, наличие которой снижает эффективность УЗ воздействия. Указанным фактом обусловлен выбранный диапазон интенсивностей, использованный в данных экспериментальных исследованиях.

Поэтому очевидно, что для промышленной реализации процесса УЗ диспергирования твёрдых тел в жидкости необходимы новые научные подходы к решению проблемы увеличения объёма формируемой кавитационной зоны в гетерогенной среде и создание новых ультразвуковых аппаратов со специализированными технологическими объёмами, обеспечивающими оптимальные условия и режимы воздействия.

1.2.2 Снижение вязкости смол и нефтепродуктов

В ряде случаев ультразвуковое воздействие может быть направлено на временное изменение физико-химических свойств жидких фаз, в частности снижения вязкости нефтепродуктов при их перекачивании по трубопроводы и т.п. Снижение вязкости может быть объяснено двумя действующими факторами:

1. Разрушение С–С связей. Ультразвуковая кавитация разрывает непрерывную цепочку С–С связей, разрушая связи между отдельными частями молекул, влияет на изменение структурной вязкости. Под действием кавитации большой интенсивности на протяжении длительного времени нарушаются С–С связи в молекулах парафина, вследствие чего происходят изменения физико-химического состава (уменьшение молекулярного веса, температуры кристаллизации) [26-28] и свойств нефтепродуктов (вязкости, плотности, температуры вспышки и др.) [28], содержание парафина в которых может составлять до 20 % [26].

2. Разрушение водородных связей. Многократно доказано, что ударные волны, создаваемые схлопывающимися кавитационными пузырьками, приводят к разрушению водородных связей макромолекул полимеров.

Разрушение водородных связей также приводит к значительному снижению вязкости полимеров [29–33] и улучшению их пропитывающей способности.

Ранее проведённые исследования показали, что воздействие на эпоксидную смолу ЕРО 1441–30 УЗ колебаниями с амплитудой звукового давления $12 \cdot 10^5$ Па (интенсивностью около 100 Вт/см^2) в течение 5 мин приводит к снижению ее вязкости на 48 % без использования низковязких растворителей, которые, как известно, приводят к снижению прочностных характеристик конечного материала. [33].

Вязкость смолы ЕРО 1441–30 не превышает $3000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, однако существует ряд эпоксидных смол [24], вязкость которых достигает $10000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$, пропитывающая способность которых затруднена в значительно большей степени, что требует специализированного ультразвукового оборудования, позволяющего обрабатывать среды с такими большими значениями вязкости.

1.2.3 Эмульгирование

Следующим процессом, не менее распространенным в промышленности, является ультразвуковое эмульгирование [8]. Эмульгированием называется явление перехода одной из взаимно нерастворимых жидкостей в дисперсное состояние в среде другой.

Ультразвуковое эмульгирование позволяет получать высокодисперсные, практически однородные и химически чистые эмульсии. Для протекания ультразвукового эмульгирования также необходима развитая кавитация [8], как и для ранее рассмотренных процессов.

Однако детальный механизм образования капель эмульсии под действием кавитации не известен. В соответствии с одной из гипотез о физическом механизме процесса эмульгирования кавитационная полость в одной из жидкостей вблизи раздела двух фаз в стадии захлопывания увлекает и отрывает капли от общей массы другой жидкости. Другая гипотеза

объясняет образование эмульсии распадом на капли кумулятивных струй, образовавшихся при несимметричном захлопывании кавитационных полостей.

Процессы ультразвукового эмульгирования (а часто и сопутствующие им по условиям технологии последующие процессы деэмульгирования) перспективно использовать при производстве мыла, при обезвоживании сырых нефтей (вязкостью до 500 мПа·с и очистке нефтяных емкостей и танкеров, в технологии производства пищевых продуктов (сливочного масла, маргарина), при получении битумных (асфальтовых) эмульсий, при переработке эмульсий натурального каучука, получения консистентных смазок, охлаждающих жидкостей для металлообработки, при производстве эмульсионных красок (вододисперсионных, водоэмульсионных и латексных), создание высокоэффективных водотопливных эмульсий и т. д. [26–28].

Большинство из перечисленных сред, обладают вязкостью, превышающей 500 мПа·с. Кроме того, пищевые продукты, лакокрасочные материалы, консистентные смазки и т. д. в явной степени обладают зависимостью вязкости от скорости сдвига.

Поэтому при обработке таких сред наблюдается ограниченность формируемой в окрестности излучателя кавитационной области расстоянием не более 5 см от излучающей поверхности. При этом многократное увеличение интенсивности УЗ воздействия не приводит к увеличению зоны развитой кавитации в объёме, а приводит к образованию зоны вырожденной кавитации, снижающей эффективность УЗ обработки, как и для ранее рассмотренных процессов диспергирования твёрдых тел в жидкости.

1.2.4 Растворение

Растворение твёрдых тел — это гетерогенное физико-химическое взаимодействие твёрдого тела и жидкости, сопровождающееся переходом твёр-

дой фазы в раствор [34, 35]. Растворами называются гомогенные (т. е. однородные) смеси двух или более веществ. [34–37]

Ультразвук применяют для ускорения растворения веществ [31, 38]. При этом наблюдается снижение доли осадка, идёт процесс растворения труднорастворимых веществ. Ультразвук позволяет не применять специальные растворители для получения схожего результата.

Использование ультразвуковой обработки позволяет до двух порядков, в 10–30 раз – медленно растворимых веществ, в 3–5 раз – малорастворимых веществ. Например, сахар в воде с ультразвуком растворяется в 10 раз быстрее, чем при отсутствии УЗ воздействия, камфора в подсолнечном масле – в 50 раз [40, 41].

Растворение с ультразвуком применяется в фармацевтике, пищевой промышленности, производстве удобрений [8, 38, 40]. Путем растворения могут быть получены различные водные, спиртовые, масляные растворы кристаллических веществ, растворы сухих и густых экстрактов, сиропов, пигментов и т. п., растворы ароматических, дезинфицирующих веществ, фотографические и другие растворы, т.е. перечисленные виды растворов характеризуются значительным различием по вязкости. В частности, вязкость водных и спиртовых растворов не превышает 5 мПа·с [8, 41], масляных, фотографических – от 50 до 200 мПа·с, в то время как буровые растворы на углеводородной основе, могут обладать вязкостью свыше 500 мПа·с [42–44]. Данный фактор обуславливает необходимость создания универсального ультразвукового оборудования, способного обеспечивать режимы воздействия в широком диапазоне, а также оптимальные условия распространения УЗ колебаний для достижения максимального объёма формируемой зоны развитой кавитации.

1.2.5 Гомогенизация высокомолекулярных соединений и получение низкомолекулярных веществ

Еще одним востребованным процессом химической технологии является гомогенизация высокомолекулярных соединений. Высокомолекулярные соединения представляют собой смеси полимергомологов с различной длиной цепи. В некоторых случаях они отличаются по своей структуре. Такие смеси называются полидисперсными по молекулярному весу, или макромолекулярно полидисперсными. Существует много методов для фракционирования макромолекулярных соединений. Часто применяются методы разделения ультрацентрифугированием, методы дробного растворения или дробного осаждения и другие. Однако, чаще всего для уменьшения дисперсии молекулярного веса полимера используются ультразвуковые волны [45–47].

Изучая влияние ультразвуковых волн на водные растворы поливинилового спирта, отличающиеся малой вязкостью по сравнению с ранее рассмотренными средами, Сато, Окияма и Учо [45] обнаружили, что по молекулярному весу озвучиваемый раствор становится более однородным согласно кривой распределения по молекулярному весу (рисунок 1.2).

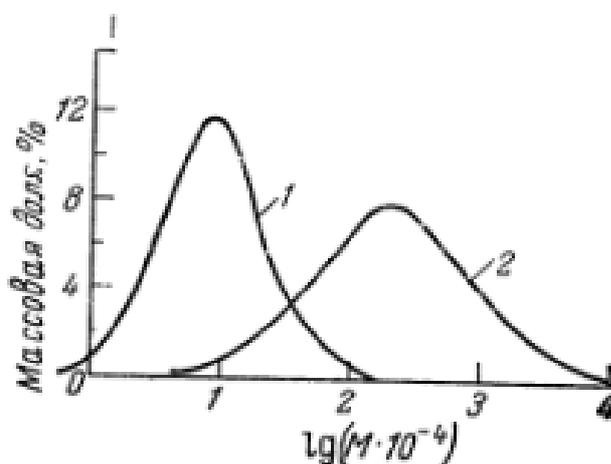


Рисунок 1.2 – Кривая распределения по молекулярному весу озвученного (1) и неозвученного (2) полимера

Как видно из рисунка 1.2, кривая распределения по молекулярному весу при УЗ воздействии становится уже и острее.

Из этого же рисунка следует, что средний молекулярный вес

полимеров под воздействием УЗ уменьшается примерно в 2,3–2,5 раза. Это свидетельствует о принципиальной возможности использования УЗ для получения из природных полимеров, которые могут обладать широким диапазоном вязкости (вплоть до 1000 мПа·с), ценные низкомолекулярные вещества, обладающих улучшенной смачиваемостью, текучестью из-за сниженной вязкости и т. д. (например, жидкий клей) [18].

1.2.6 Дегазация

Помимо разрушающего воздействия кавитационных ударных волн при схлопывании пузырька для ранее рассмотренных процессов, не меньшее промышленное значение имеет физический эффект диффузии растворённого газа в кавитационную полость при расширении пузырька [5].

Далее пары или группы мелких пузырьков коалесцируют в пузырьки больших размеров. Эта фаза обусловлена действием акустических потоков, радиационного давления, сил Бьеркнеса и Бернулли [5]. Выросшие пузырьки, обладая большей плавучестью, быстрее поднимаются к поверхности и покидают жидкость. Таким образом, происходит *дегазация жидкостей*.

Ультразвуковые колебания обеспечивают более быстрое и глубокое по сравнению с другими методами понижение концентрации растворенного в жидкости газа [5, 8, 26]. Ультразвуковая дегазация жидких сред применяется в металлургии (очистка сплавов от примесей с целью повышения прочности получаемых сплавом), нефтепереработке (удаление метановых фракций из нефти), для выделения газов из растворов трансформаторного масла, viscosity, соусов, напитков, мягкого пива, шоколада, растительного масла, крахмальных и желатиновых эмульсий, смазочных материалов (удаление растворённого в них кислорода), воды, а также в электрохимии при нанесении покрытий (для получения прочных, лишённых пор покрытий). Как правило, вязкость этих сред не превышает 200 мПа·с, что позволило обеспечить промышленное применение процессу УЗ дегазации.

Не менее значимыми являются процессы ультразвуковой дегазации значительно более высоковязких жидкостей и обладающих, кроме того, существенной зависимостью вязкости от скорости сдвига, в частности, смол. На рисунке 1.3 приведены фото процесса удаления пузырьков воздуха из эпоксидной смолы в различные моменты времени с начала УЗ воздействия [47].

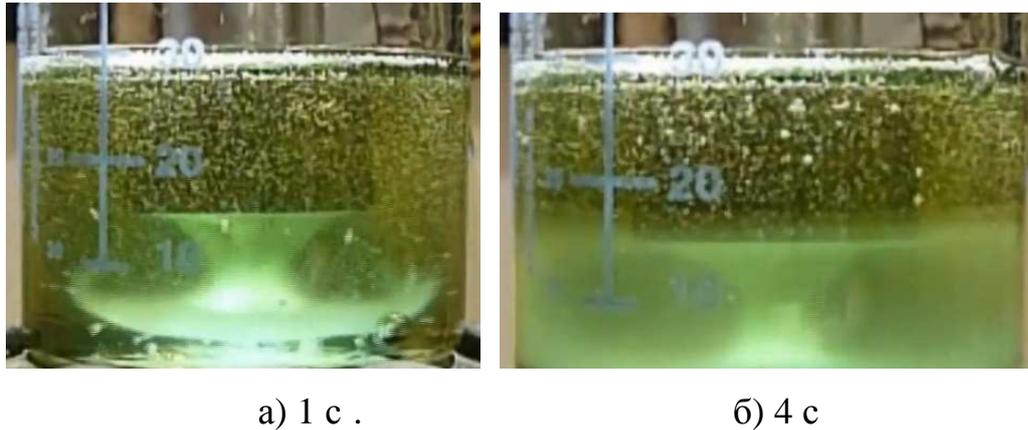


Рисунок 1.3 – Ультразвуковая дегазация эпоксидной смолы

Представленные фото свидетельствуют о возможности УЗ дегазации высоковязких неньютоновских сред наряду с маловязкими. С учётом рассмотренных ранее процессов, это обуславливает потребность современных производств в высокоэффективном ультразвуковом оборудовании, способном обрабатывать широкий класс жидких сред с производительностью, достаточной для промышленного использования.

Однако, согласно представленным фото (см. рисунок 1.3), для высоковязких и неньютоновских сред протяжённость зоны развитой кавитации, наблюдаемой визуально, не превышает диаметр излучателя (40 мм). Указанный факт ещё раз подтверждает необходимость в новых научных подходах к решению проблемы увеличения объёма формируемой кавитационной зоны для возможности создания высокоэффективного ультразвукового оборудования, способного обрабатывать широкий класс жидких сред в промышленных масштабах.

1.2.7 Экстрагирование

Одной из наиболее продолжительных стадий переработки природного сырья является процесс экстрагирования из него целевых компонентов. На большинстве промышленных предприятий экстрагирование осуществляется методами перколяции (одноступенчатое динамическое экстрагирование) длительностью до 28 часов и мацерации (настаивание) длительностью в несколько суток.

Практика показывает, что одним из наиболее перспективных способов интенсификации экстрагирования целевых компонентов из растительного сырья в условиях фармацевтических предприятий является применение ультразвука [48–57]. Установлено [51–53], что УЗ колебаниями с частотой 19–44 кГц из растений с сокращением времени процесса экстракции на 1–2 порядка (до 20 раз), можно извлекать флавоноиды, дубильные вещества, фенолгликозиды, связанные кумарины, антоцианы, фенолкарбоновые кислоты. При этом имеет место не только значительное ускорение процесса извлечения из растений полезных веществ, но и увеличение, по сравнению с другими методами экстрагирования, выхода основного продукта.

Процесс экстрагирования является одним из немногих, который, как правило, реализуется в маловязких средах, и необходимые амплитуды звукового давления интенсивности воздействия для его осуществления не превышают $2 \cdot 10^5$ Па (при интенсивности не более 3 Вт/см^2) [51].

Таким образом, в рассмотренных ранее технологических процессах, обрабатываемые гетерогенные среды с несущей жидкой фазой отличаются широким разбросом по реологическим свойствам, т.е. вязкость при нулевой скорости сдвига составляет от 1 до 10000 мПа·с, при этом она может как уменьшаться (смолы, нефтепродукты и т. д.), так и увеличиваться с ростом скорости сдвига, например, у суспензий твёрдых частиц (процесс диспергирования), некоторых лакокрасочных материалов и полимерных

пластизолей.

Чтобы выявить во сколько раз снижается вязкость при увеличении скорости сдвига за счёт расширения кавитационного пузырька, можно провести следующую оценку. Поле радиальной скорости движения среды вокруг пузырька определяется согласно следующему выражению:

$$v = \frac{\frac{\partial R}{\partial t} R^2}{r^2},$$

где R – мгновенный радиус кавитационного пузырька, м, r – расстояние от центра кавитационного пузырька, м, v – радиальная скорость движения жидкости, м/с;

тогда градиент скорости составляет:

$$\frac{\partial v}{\partial r} = -\frac{3 \frac{\partial R}{\partial t} R^2}{r^3}.$$

Таким образом, градиент скорости вблизи стенок пузырька составляет:

$$\left| \frac{\partial v}{\partial r}(R) \right| = \left| \frac{3 \frac{\partial R}{\partial t}}{R} \right| \sim \frac{6}{T} = 6f > 100000 \text{ с}^{-1}, \quad (1.2)$$

где f – частота УЗ колебаний, с^{-1} , T – период УЗ колебаний, с.

При таком градиенте скорости (1.2) вязкость среды вблизи стенок пузырька снижается до 100 крат и более, тем оказывая значительное влияние на изменение импульса жидкости вблизи пузырька, и, следовательно, на динамику кавитационной полости.

Кроме того, начальная вязкость (в отсутствии механических напряжений) обрабатываемой среды значительно зависит от содержания твёрдой фазы (рисунок 1.4) [58].

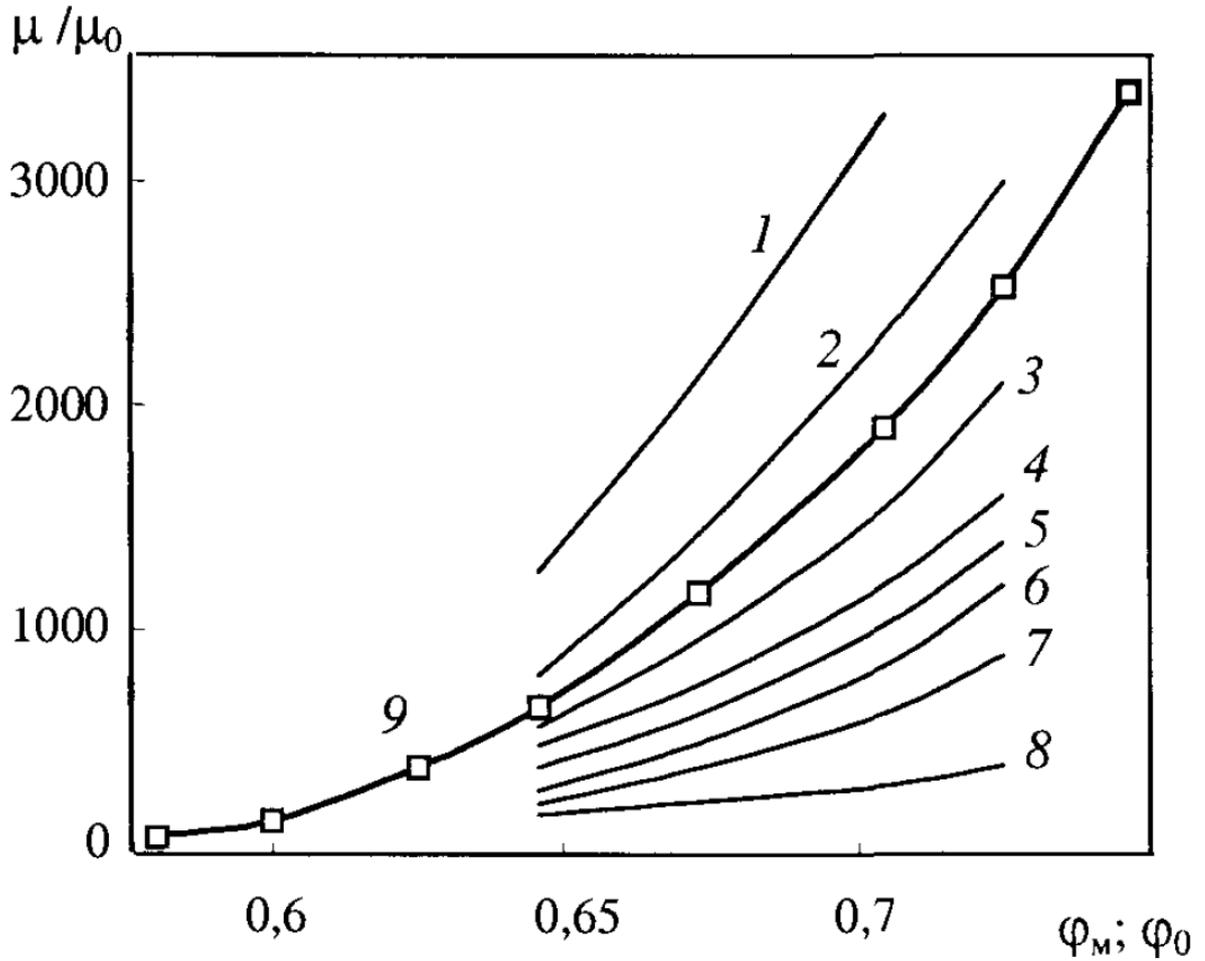


Рисунок 1.4 – Зависимость вязкости μ/μ_0 различных суспензий от массового содержания твердой фазы ϕ_m (1-8) и от объемного содержания твердой фазы ϕ_0 (9) (с учетом связанной дисперсионной среды)

Как следует из представленных зависимостей, наличие твёрдой фазы может изменять вязкость до 1000 крат и более. Поэтому вопрос влияния реологических свойств на формирование кавитационной области в жидких средах является ключевым для определения интенсивности воздействия, необходимой для создания кавитации, и оптимальных условий воздействия, обеспечивающих максимальный объём формируемой зоны развитой кавитации.

1.3 Формирование кавитационной области в гетерогенных средах с различными реологическими свойствами

По реологическим свойствам гетерогенные среды с несущей жидкой фазой, озвучиваемые в рассмотренных технологических процессах можно классифицировать следующим образом (рисунок 1.5) [59]:

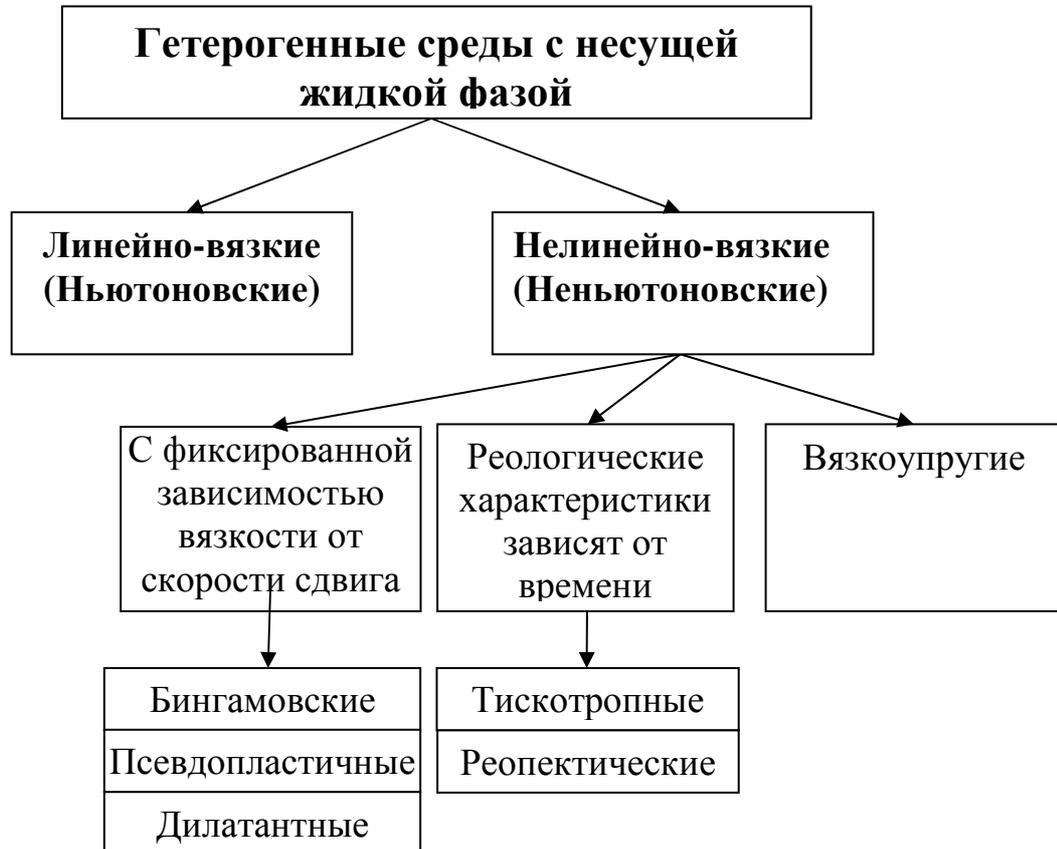


Рисунок 1.5 – Классификация гетерогенных сред с жидкой фазой высокой вязкости

Линейно вязкие среды характеризуются тем, что вязкость таких жидкостей от скорости сдвига практически не зависит в широком диапазоне. К таким средам относятся большинство жидких сред с небольшими значениями вязкости до 200 мПа·с (различные масла, органические растворители и т. д.), так и отдельные жидкости (содержащие кавитационные зародыши) с вязкостью, значительно превышающей 200 мПа·с (например, глицерин) [28].

В свою очередь, нелинейно-вязкие среды обладают большим количеством возможных вариантов зависимости вязкости от скорости сдвига.

Среди них следует выделить три группы:

1. Среды с фиксированной зависимостью напряжений от скорости деформации (скорости сдвига) [59–61].
2. Среды, у которых реологические характеристики определяются временем действия напряжения или предысторией жидкости [62].
3. Среды, обладающие одновременно свойствами твердого тела и жидкости, т.е. частично проявляющие упругое восстановление формы после ликвидации напряжения (вязкоупругие жидкости) [62].

Среды с фиксированной зависимостью вязкости от скорости сдвига являются наиболее распространёнными. У псевдопластических сред (смолы, полимеры) при медленных течениях вязкость велика, а затем убывает, а у дилатантных (суспензии твёрдых частиц) – вязкость растёт с увеличением скорости сдвига.

В частности, зависимости вязкости от скорости сдвига для эпоксидных смол с различными добавками, относящихся к псевдопластическим средам, приведены на рисунке 1.6 [60].

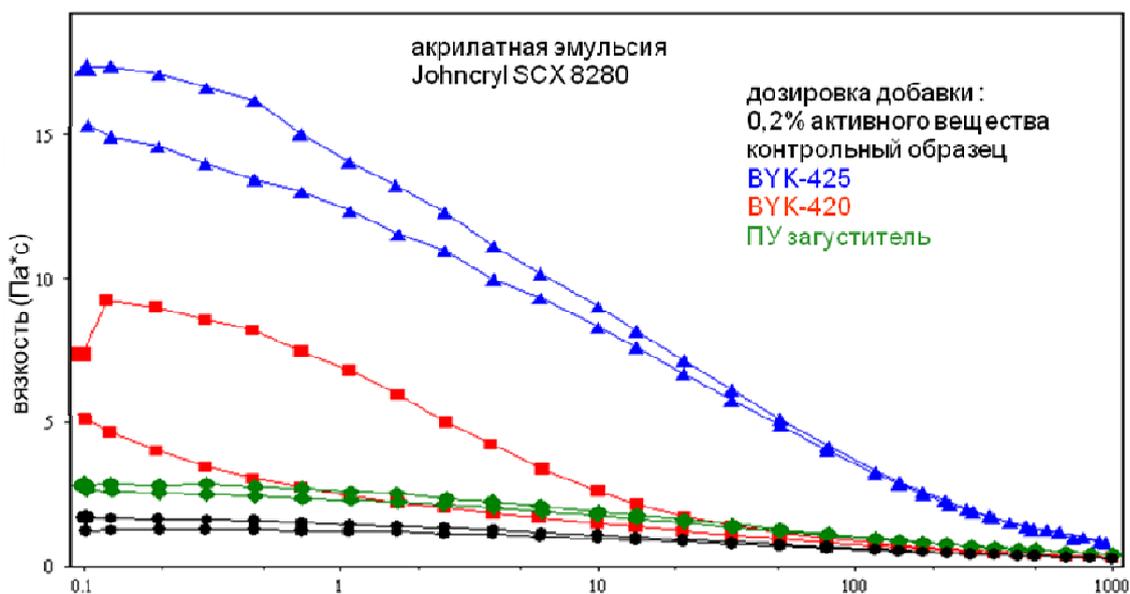


Рисунок 1.6 – Зависимость вязкости от скорости сдвига для эпоксидных смол с различными добавками

Для большинства дилатантных и псевдопластических сред зависимость механических напряжений от скорости сдвига хорошо аппроксимируется следующей функцией [61-62]:

$$\sigma = \alpha \gamma^n \quad (1.2)$$

где σ – напряжение сдвига, с^{-1} , α – коэффициент консистенции, $\text{Па} \cdot \text{с}^{n-1}$, γ – скорость сдвига, с^{-1} , n – безразмерный показатель нелинейности.

Для псевдопластических сред $n < 1$, а для дилатантных $n > 1$.

Величина α называется показателем консистенции, который, в частности, для полимеров характеризует величину прочности водородных связей, а n – показатель нелинейности, который для полимеров характеризует способность водородных связей образовывать новые связи.

Наряду с показателями консистенции и нелинейности все неньютоновские жидкости характеризуются начальной вязкостью, т.е. вязкостью при малых скоростях сдвига. Например, для эпоксидных смол с различными добавками (см. рисунок 1.6) начальная вязкость лежит в диапазоне 1000...17000 мПа·с.

Эти три показателя (консистенции, нелинейности и начальная вязкость) однозначно определяют оптимальные режимы ультразвукового воздействия, необходимые для создания кавитационной области в гетерогенных средах с несущей жидкой фазой.

1.3.1 Режимы ультразвукового воздействия необходимые для создания кавитационной области в линейно-вязких средах

В настоящее время процесс ультразвуковой кавитационной обработки жидкостей наиболее полно исследован для случая линейно-вязких сред [4–6, 8, 63–71]. Для них в ряде отечественных и зарубежных публикаций [4–6, 8, 63–71] представлены результаты исследований оптимальных режимов воздействия по частоте и интенсивности

ультразвуковых колебаний, в зависимости от вязкости обрабатываемой среды.

Частота УЗ колебаний характеризует время расширения кавитационного пузырька до начала схлопывания последнего, а также периодичность схлопывания пузырька.

А интенсивность УЗ колебаний характеризует величину создаваемого разрежения в гетерогенной среде с жидкой фазой, необходимого для возникновения кавитационной полости. Это обусловлено тем, что интенсивность связана с амплитудой звукового давления однозначной зависимостью:

$$I = \frac{p^2}{2\rho c}$$

где I – интенсивность УЗ колебаний, Вт/м², ρ – плотность кавитирующей среды, кг/м³, c – скорость звука в кавитирующей среде, м/с.

Таким образом, интенсивность УЗ воздействия однозначно определяет режим развития кавитации (см. подраздел 1.1). При этом интенсивность является наиболее удобной величиной, предназначенной для выбора мощностных режимов работы реального УЗ оборудования. Поэтому в дальнейшем, когда речь пойдёт о режимах УЗ воздействия, вместо амплитуды звукового давления будет употребляться понятие «интенсивность УЗ колебаний».

В работе [6] при определении **частоты колебаний** обеспечивающей формирование кавитационной области с максимальной энергетической эффективностью (режим развитой кавитации) было установлено, что повышение частоты f приводит к уменьшению максимального радиуса R_{MAX} кавитационной полости при постоянном значении интенсивности колебаний. Такой результат обусловлен тем, что с ростом f сокращается время, в течение которого величина звукового давления превышает внешние силы, удерживающие пузырёк в состоянии равновесия, когда он может

неограниченно расширяться за счёт содержащегося в нём газа.

Уменьшение R_{MAX} кавитационных полостей с ростом f способствует росту давления парогазовой смеси в пузырьке к началу захлопывания, что совокупную энергию кавитационных ударных волн.

Сводные данные о влиянии частоты УЗ воздействия на динамику кавитационной полости приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Влияние частоты колебаний на основные характеристики формируемых кавитационных пузырьков

Частота, кГц	Максимальный радиус пузырька, мкм	Минимальный радиус пузырька, мкм	Время расширения полости, мкс	Максимальное давление внутри пузырька при схлопывании, ГПа
20	582	9,65	36	29
40	292	4,95	18	29,6
100	117,6	2,08	7,3	22,3
500	24,9	0,82	1,47	21,4

С другой стороны при повышении частоты УЗ колебаний возникающие акустические потоки становятся мелкомастшабными [6], что приводит к возрастанию равномерности ультразвуковой кавитационной обработки гетерогенных сред с жидкой фазой. Кроме того, снижение максимальных размеров кавитационных пузырьков (таблица 1.1) с ростом частоты уменьшает эффект экранировки на границе излучатель-обрабатываемая среда, где кавитация развита в наибольшей степени, и способствует более равномерному распределению пузырьков в объёме среды.

Однако из этой же таблицы следует, что начиная с 40 кГц происходит значительное снижение максимального давления внутри пузырька при схлопывании. При этом растёт порог кавитации, что в целом, все-таки, приводит к снижению эффективности ультразвукового кавитационного воздействия.

Если использовать пониженные частоты воздействия (не более 15 кГц), то по мере снижения частоты инерциальные члены уравнения динамики кавитационного пузырька будут расти столь медленно, что он начнёт вырождаться в пульсирующий.

Поэтому, обобщая выше сказанное, оптимальным следует считать частотный диапазон 20...40 кГц для обработки жидкостей различной вязкости в технологических объёмах.

В свою очередь, согласно имеющимся публикациям [8, 67–69], необходимая **интенсивность УЗ воздействия** в значительной степени определяется вязкостью жидкости и для линейно-вязких жидкостей с вязкостью не более 100 мПа·с составляет не более 10 Вт/см². При переходе к более вязким жидкостям (свыше 200 мПа с) необходимые интенсивности увеличиваются вплоть до теоретического предела прочности материала ультразвуковых излучателей [72], что обуславливает необходимость оптимального распределения излученной УЗ энергии в технологическом объеме.

1.3.2 Создание кавитационной области в нелинейно-вязких средах

Для нелинейно-вязких сред существует крайне мало теоретических и экспериментальных исследований направленных на определение необходимых интенсивностей воздействия. Известно, что эффект увеличения вязкости, присущий дилатантным средам, способствует дополнительному увеличению требуемой интенсивности воздействия.

При этом для псевдопластических сред эффект снижения вязкости приводит к тому, что требуемые интенсивности воздействия уменьшаются, несмотря на то, что для первоначального возникновения кавитации они могут быть очень большими [49, 73]. Если такие же большие значения интенсивностей сохранять на протяжении всего периода обработки, то

Отсутствие кавитации за пределами выделенной области (не более 2 см, см. рисунок 1.7б) обусловлено высокими (более 25 Вт/см²) пороговыми интенсивностями УЗ колебаний необходимых для создания кавитации в высоковязких средах в сочетании с экранирующим действием кавитационных пузырьков. Поэтому при равной интенсивности УЗ колебаний и равном затухании УЗ энергии в кавитационной области (коэффициент поглощения УЗ в режиме развитой кавитации значительно превышает коэффициент поглощения, обусловленных потерями энергии на вязкое трение, т.е. фактически не зависит от вязкости) для маловязкой (вязкость 1 мПа·с, пороговая интенсивность возникновения кавитации 0,3 Вт/см²) и для высоковязкой среды (вязкость 500 мПа·с, пороговая интенсивность возникновения кавитации около 10...25 Вт/см²) размер кавитационной области будет отличаться примерно в 8...15 раз.

Некоторое, увеличение размера кавитационной области (см. рисунок 1.7) с течением времени объясняется снижением вязкости смолы при возникновении ненулевых сдвиговых напряжений.

В целом, для средах с вязкостью свыше 200 мПа·с с помощью рабочих инструментов поршневого типа одновременно не удаётся обработать более 150 мл при интенсивности воздействия 15...45 Вт/см², например, при получении наномодифицированных высоковязких масел [25].

Попытки устранения указанной проблемы, направленные на увеличение интенсивности ультразвукового излучения не дают требуемого результата, поскольку энергия кавитационного воздействия всё равно оказывается сосредоточенной вблизи излучающей поверхности. Как уже было сказано это объясняется экранирующим действием кавитационного, что вызывает уменьшение коэффициента прохождения акустической энергии через границу раздела двух сред:

$$K = \frac{2}{1 + \frac{\rho_2 c_2}{\rho_1 c_1}},$$

где ρ_1 – плотность жидкости в области кавитации, кг/м^3 , c_1 – скорость звука в области кавитации, м/с , ρ_2 – плотность жидкости за пределами зоны кавитации, кг/м^3 , c_2 – скорость звука за пределами зоны кавитации, м/с ,

При этом вблизи излучателя кавитационная область вырождается в совокупность долгоживущих пузырьков, не совершающую полезную работу (вырожденная кавитация). Таким образом, повышение интенсивности излучения для обработки высоковязких неньютоновских сред является истощающим и необходимо создавать излучатели с увеличенной поверхностью излучения и технологические объемы, обеспечивающие равномерное распределение акустических колебаний в обрабатываемой жидкости [28].

Таким образом, проведенный анализ позволил выработать общие требования к ультразвуковому технологическому оборудованию, предназначенному для кавитационной обработки неньютоновских сред в широком диапазоне их реологических свойств, а именно:

1. Обеспечение как можно большей предельно достижимой акустической мощности (не менее 40 Вт/см^2 [57, 73]).
2. Наличие развитой поверхности излучения (не менее 100 см^2 [28]).
3. Излучение в технологические объемы специализированных конструкций, позволяющих обеспечить равномерное распределение акустических колебаний в обрабатываемой жидкости за счет резонансных эффектов.
4. Варьирование интенсивности излучаемых УЗ колебаний в зависимости от изменения реологических свойств обрабатываемых жидкостей в процессе обработки.

Однако, как будет показано в приведенном ниже анализе существующего ультразвукового оборудования, предназначенного для создания кавитации в гетерогенных средах с жидкой фазой, оно не отвечает этим требованиям.

1.4 Существующее промышленное ультразвуковое оборудование для создания кавитации в гетерогенных средах с несущей жидкой фазой

В настоящее время в нашей стране и за рубежом производится большое количество разнообразного ультразвукового технологического оборудования, предназначенного для кавитационной обработки гетерогенных сред с несущей жидкой фазой [75–78]. Далее рассмотрены наиболее известные из них.

1.4.1 Отечественное ультразвуковое оборудование для кавитационной обработки гетерогенных сред с несущей жидкой фазой

В нашей стране широко известно ультразвуковое оборудование для воздействия на гетерогенные среды с жидкой фазой производства ООО «Ультразвуковая техника – Инлаб» (г. Санкт-Петербург) [75].

Наибольший интерес здесь представляют ультразвуковые установки серии ИЛ100–6/1 и ИЛ100–6/6. Внешний вид установок представлен на рисунке 1.8.

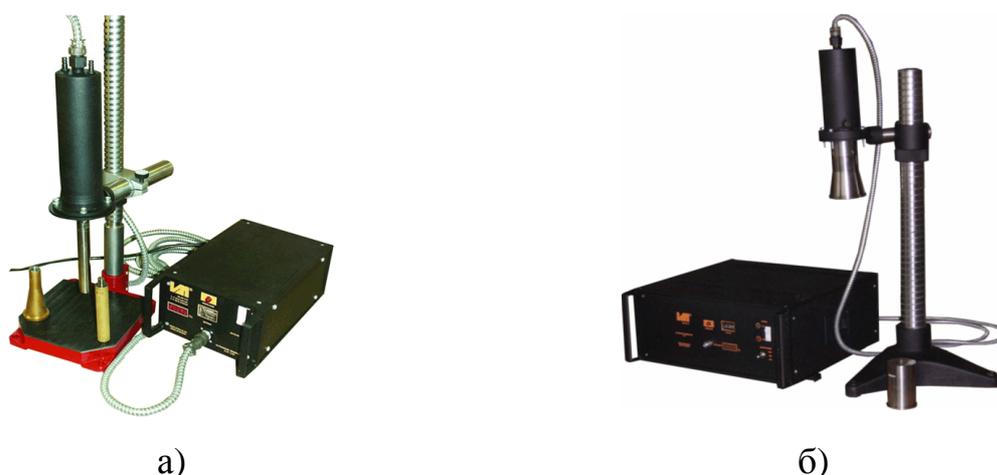


Рисунок 1.8 – Ультразвуковая установка серии ИЛ100–6/1 (а) и ИЛ100–6/6

Каждая из установок состоит из лабораторной стойки, ультразвукового генератора, высокоэффективного, высокочастотного магнитострикционного преобразователя и трех волноводов-излучателей (концентраторов) к преобразователю. Краткие технические характеристики установки приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Технические характеристики ультразвуковых установок ООО «Ультразвуковая техника – Инлаб»

	ИЛ100–6/1	ИЛ100–6/6
Потребляемая мощность генератора, кВт	0,63	1
Диаметр рабочего инструмента, мм	15	30
Рабочая частота, кГц	22	22

Среди производителей УЗ оборудования в нашей стране известен так же ФГУП Государственный завод «Пульсар» [76]. Производимое ими УЗ оборудование применяется в таких технологиях как, высокоамплитудная очистка, обработка воды или сточных вод, диспергирование, приготовление стойких эмульсий, деструкция полимеров и др.

Внешний вид такой установки, совместно с проточным реактором показан на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Ультразвуковая установка производства ФГУП Государственный завод «Пульсар»

Краткие технические характеристики установки приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технические характеристики ультразвуковых установок ФГУП Государственный завод «Пульсар»

Потребляемая мощность генератора, кВт	0,5
Амплитуда колебаний, мкм	Не менее 10
Площадь излучения, см ²	7

Поскольку потребляемая мощность данного генератора не превышает 0,5 кВт, а площадь излучения составляет 7 см², то с учётом общего КПД ультразвуковой установки, составляющего около 30...40 % ввиду использования магнитострикционного преобразователя [77], вводимая интенсивность воздействия достигает 20 Вт/см². Данная интенсивность является достаточной, в частности, для процесса деструкции полимеров, отличающихся высокой вязкостью. Т.к. размер формируемой кавитационной зоны в высоковязкой среде не превышает 3 см, то одновременно обрабатываемый объём не превышает 21 мл, что для промышленного использования явно не достаточно. Поэтому данный аппарат пригоден исключительно для лабораторных исследований.

1.4.2 Зарубежное ультразвуковое оборудование для кавитационной обработки гетерогенных сред с несущей жидкой фазой

За рубежом, в области создания промышленных ультразвуковых установок для обработки гетерогенных сред с жидкой фазой, в том числе и при создании биотоплива известна немецкая фирма «Hielscher» [78].

Среди ее продукции наибольшее распространение получили ультразвуковые аппараты серии UIP1000hd и UIP2000. Внешний вид таких аппаратов приведен на рисунке 1.10.

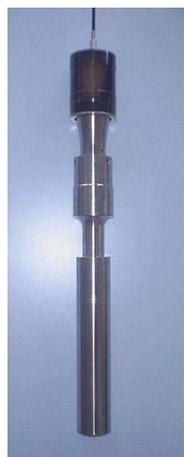


Рисунок 1.10 – Ультразвуковые аппараты серии UIP1000hd (а) и UIP2000 (б)

УЗКС таких аппаратов построены по многополуволновой схеме и имеют фланцевые соединения для присоединения к проточному объему. Материал УЗКС контактирующий с обрабатываемой средой – титановый сплав. Диаметр излучающей поверхности при потребляемой мощности в 1000 Вт не превышает 30 мм, а при большей мощности используется излучение с переходных участков боковых цилиндрических поверхностей.

Аппараты могут быть применены для эффективного проведения процессов эмульгирования, диспергирования, гомогенизации и проведения химических реакций в гетерогенных средах с жидкой фазой. Интенсивности излучения таких аппаратов не превышают 10 Вт/см^2 , и, как следствие, эти аппараты не позволяют обрабатывать среды с вязкостью свыше $100 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

Еще одни ультразвуковые аппараты, выпускаемые фирмой «Mastersonic» (Швейцария) [79], могут применяться как в лабораторных, так и в промышленных условиях. Их отличительной чертой является использование УЗКС с трубчатым излучающим инструментом большой площади, выполненного из титанового сплава. Внешний вид таких УЗКС показан на рисунке 1.11.



а)



б)

Рисунок 1.11 – УЗКС по технологии Sonopuch Mono (а) и Sonopuch (Push-Pull) (б)

Ультразвуковые аппараты на базе таких систем могут быть применены для создания эмульсий, дегазирования жидкостей, гомогенизации. Интенсивности излучения таких аппаратов менее 5 Вт/см^2 .

Анализ конструктивных схем, комплектации и функциональных возможностей ультразвукового оборудования показал, что практически все используемые в настоящее время ультразвуковые аппараты, способные выполнять обработку гетерогенных сред с жидкой фазой, аналогичны по своим конструктивным схемам, и имеют примерно одинаковые функциональные возможности при одинаковых мощностных параметрах и используются для кавитационной обработки сред, характеризующихся *малой вязкостью*.

Попытки использования известных аппаратов для интенсификации процессов в средах с высокими значениями вязкости (более $50 \text{ мПа}\cdot\text{с}$) и наличием её зависимости от скорости сдвига, как правило, не обеспечивают достижения положительных результатов из-за невозможности реализации кавитационного режима, в объемах, достаточных для реализации процессов в промышленных масштабах. Следовательно, возможность применения таких аппаратов для широкого класса гетерогенных сред с жидкой фазой

ограничена исключительно лабораторными исследованиями при тщательном соблюдении теплового режима работы ультразвуковых колебательных систем с использованием специальных систем охлаждения.

Таким образом, проведённый анализ существующего оборудования для ультразвуковой кавитационной обработки жидкостей позволил сделать следующие выводы.

— Все аппараты предназначены и успешно используются в промышленности для обработки водных сред.

— При обработке гетерогенных сред с жидкой фазой значительной вязкости данные аппараты пригодны исключительно для лабораторных исследований.

Предпринятые на сегодняшний день попытки устранения указанных недостатков описаны в следующем подразделе.

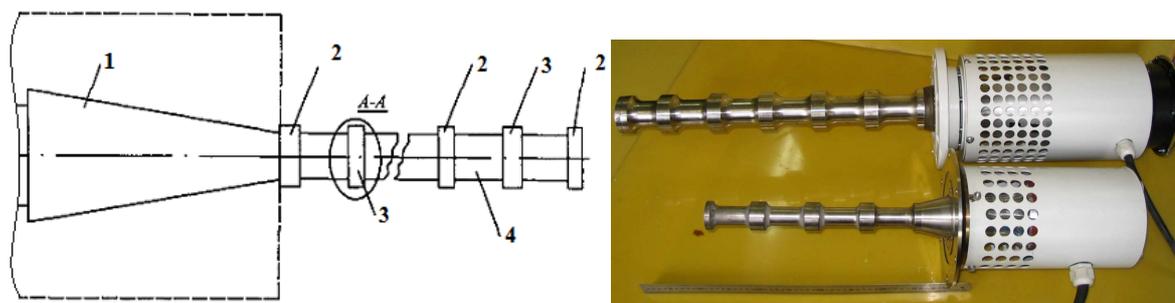
1.5 Перспективная конструкция излучателя ультразвукового аппарата для обработки высоковязких сред

Для перехода к промышленным масштабам УЗ обработки гетерогенных сред с высоковязкой и неньютоновской несущей жидкой фазой были проведены разработки новых типов рабочих инструментов с развитой поверхностью излучения [28, 80].

Из них значительный практический интерес представляют составные волноводы-излучатели, представляющие собой конструкцию из некоторого числа N ступеней, каждая из которых может быть стержнем постоянного или переменного сечения. Каскадные многоволновые (содержащие N полуволновых участков) волноводы находят применение в многочисленных ультразвуковых технологиях, так как создаваемая ими высокоинтенсивная кавитация охватывает более значительные объемы (в N раз больше), чем классические полуволновые излучатели. В работе [28] указано на то, что увеличение (развитие) поверхности излучения рабочего инструмента

является одним из наиболее эффективных способов увеличения отдаваемой в обрабатываемую среду мощности ультразвукового воздействия. Кроме того, такая излучающая система позволяет равномерно распределять ультразвуковые колебания в протяженных технологических объемах.

Наибольший практический интерес представляет устройство, которое представляет собой многоволновой составной волновод, снабжённый трансформаторами изгибных колебаний для повышения эффективности излучения в среду (рисунок 1.12). Излучение УЗ колебаний осуществляется с поверхности излучателя в зонах переходов между цилиндрическими участками различного диаметра.



а) со ступенчатыми переходами

б) с радиальными переходами

Рисунок 1.12 – Каскадные волноводы

На рисунке 1.12 приведены каскадные волноводы со ступенчатыми (а) и радиальными (б) переходами между участками разной толщины.

Тем не менее, эти аппараты обеспечивают лишь частичное решение проблемы ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских сред, и позволяют обрабатывать жидкости с вязкостью не более 100 мПа·с. Поэтому потенциально высокая эффективность ультразвуковой кавитационной обработки неньютоновских сред на сегодняшний день в полной мере не достигнута. Несовершенство последних разработанных аппаратов, позволяющих обрабатывать гетерогенные среды с жидкой фазой повышенной вязкости, обусловлено следующими причинами:

1. Широкий диапазон реологических свойств сред, УЗ обработка которых представляет наибольший практический интерес. Вязкость обрабатываемых сред может быть от очень малой (не более 1 мПа·с у воды) до очень высокой (более 10000 мПа·с для смол со специальными добавками). Кроме того, вязкость может как расти с увеличением скорости сдвиговых деформаций так и уменьшаться.

2. Необходимость использования интенсивностей воздействия, достигающих теоретического предела прочности волноводов-излучателей.

3. Существенная ограниченность активной обрабатываемой кавитационной зоны (распространение на расстояние, как правило, не более 5 см от излучающей поверхности) для большинства сред. Это приводит к тому, что даже при развитой поверхности излучения требуемую производительность обеспечить невозможно.

4. Отсутствие системных теоретических и экспериментальных исследований, позволяющие найти специальные резонансные условия распространения колебаний для увеличения формируемой кавитационной области в неньютоновской среде. Это объясняется отсутствием адекватного теоретического описания макроскопического процесса формирования кавитационной области в больших технологических объёмах с учётом зависимости вязкости жидкости от скорости сдвига.

5. Необходимость непрерывного дозирования УЗ энергии, поскольку текущая вязкость неньютоновских сред с течением времени обработки существенно изменяется. При этом на сегодняшний день нет системных исследований взаимного влияния ультразвуковой кавитации и реологических свойств обрабатываемых сред.

Устранение указанных проблем позволит создать принципиально новый класс оборудования, позволяющего решать значительно более широкий спектр задач современных высокотехнологичных производств.

Проведенный анализ показал, что при реализации ультразвуковой кавитационной обработки гетерогенных сред с неньютоновской жидкой

фазой на сегодняшний день отсутствует достаточное количество научных данных о режимах ультразвукового воздействия, необходимых для достижения развитой кавитации, и условиях распространения колебаний (размеров и формы технологической камеры), при которых обеспечивается максимальный размер кавитационной зоны. Это объясняется существованием множества факторов как со стороны обрабатываемой неньютоновской среды (зависимости реологических свойств от скорости сдвига), так и со стороны ультразвукового оборудования (интенсивность, площадь излучения и геометрические параметры технологической камеры), влияющих на эффективность процесса кавитационной обработки. Установление взаимосвязи между указанными параметрами и суммарным объёмом формируемой развитой кавитационной зоны позволит определить оптимальные режимы и условия УЗ воздействия на различные неньютоновские жидкие среды и создать специализированное оборудование, способное осуществлять данные процессы с максимальной эффективностью.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ И ВЫЯВЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ОБЛАСТИ В РАЗЛИЧНЫХ ПО СВОЙСТВАМ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ С ЖИДКОЙ ФАЗОЙ

Для установления режимов (по интенсивности вводимых УЗ колебаний) и условий (форма технологического объема, обеспечивающего усиление) ультразвукового воздействия, обеспечивающих создание в различных по свойствам обрабатываемых средах областей развитой кавитации наибольшего размера (объема) необходимо построение феноменологической модели, учитывающей все основные эффекты и явления, происходящие внутри самой области и позволяющей анализировать кавитационную область в целом.

Проблема усложняется тем, что в большинстве теоретических работ [4, 6, 7, 8, 14, 28, 66, 73], направленных на определение режимов воздействия обеспечивающих повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки гетерогенных сред с несущей жидкой фазой, рассматривалось исключительно поведение одиночного пузырька в жидкостях, вязкость которых не зависит от скорости деформации (скорости сдвига). Однако к высоковязким и неньютоновским средам уже полученные результаты непригодны ввиду отсутствия учёта важнейших факторов:

- 1) нелинейного характера зависимости сил вязких напряжений от градиента скорости движения жидкости, препятствующих расширению кавитационной полости;

- 2) изменения средней вязкости обрабатываемой среды с течением времени за счёт влияния процессов перемешивания и гистерезиса вязкости, приводящих к снижению пороговой интенсивности, необходимой для возникновения кавитации.

Кроме того, в реальных процессах ультразвуковой обработки гетерогенных сред с жидкой фазой эффективность кавитационного воздействия, определяемая суммарной мощностью ударных волн

кавитационных пузырьков, зависит не только от поведения одиночного пузырька, но и от концентрации пузырьков. Эта концентрация, благодаря взаимодействию кавитационных пузырьков, изменяется с течением времени и существенно зависит от интенсивности ультразвукового воздействия, что подтверждается результатами экспериментальных исследований, проведённых ещё в середине 20 века [6].

В свою очередь, колеблющиеся пузырьки вносят значительный вклад в изменение макроскопических свойств кавитирующей среды (плотность, вязкость, скорость звука, коэффициент поглощения, волновое сопротивление и т. д.), что обуславливает влияние кавитации на распределение интенсивности ультразвуковых колебаний в обрабатываемой жидкости, которое, в свою очередь, определяет совокупный объём формируемой зоны развитой кавитации.

Таким образом, комплексное исследование процесса формирования кавитационной области должно включать как изучение поведения отдельного пузырька, являющегося «строительным кирпичиком» области, так и поведения всего ансамбля пузырьков с учетом их взаимодействия, определяющего энергетические характеристики области как единого целого.

2.1 Основные этапы теоретического рассмотрения процесса формирования кавитационной области и принятые допущения

Для реализации предложенного комплексного подхода были определены три уровня детализации математической модели кавитационной области в высоковязких и неньютоновских средах, показанные на рисунке 2.1.

Верхний уровень. Анализ распространения кавитационной области.

$I(x, \Delta)$ – распределение интенсивностей ультразвуковых колебаний;
 $S(x, \Delta)$ – распределение кавитационных зон (нет кавитации; зарождение кавитации; развитая кавитация; вырожденная кавитация)
 $V(\Delta, L)$ – объём зоны развитой кавитации

Средний уровень.
 Выявление макроскопических характеристик кавитационной области.

$n(\Delta, R, l, t)$ – концентрация кавитационных пузырьков
 $\delta(\Delta, R, l, t)$ – объёмное содержание кавитационных пузырьков
 $K(\Delta, R, l, t)$ – коэффициент поглощения в кавитирующей жидкости
 $P(\Delta, R, l, t)$ – удельная мощность ударных волн

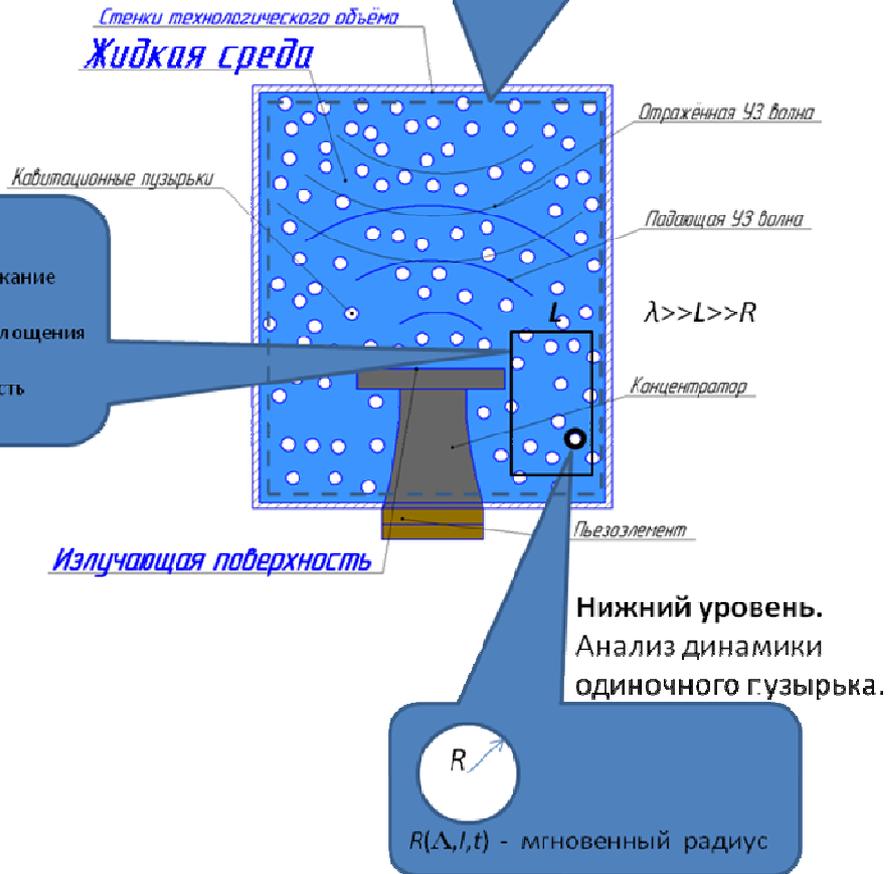


Рисунок 2.1 – Уровни детализации модели кавитационной области (I – интенсивность УЗ колебаний, t – время, Δ – реологические свойства жидкости, x – координата точки в технологическом объёме, L – геометрические параметры технологического объёма, L – характерный размер кавитационной области, рассматриваемый на среднем уровне модели)

Предложенная модель позволит выявить распределение зон и суммарного объёма области развитой кавитации с учётом изменения физических свойств (плотность, сжимаемость, волновое сопротивление, коэффициент поглощения и др.) обрабатываемой гетерогенной среды с жидкой фазой под действием кавитационных пузырьков.

Ниже приведено краткое описание уровней предлагаемой модели кавитационной области.

1. На нижнем уровне модели определяется функциональная зависимость радиуса отдельного кавитационного пузырька R от времени t , интенсивности УЗ колебаний I и реологических свойств жидкости Λ

$$R = f(t, I, \Lambda), \quad (2.1)$$

путем построения математического описания динамики одиночного кавитационного пузырька, которое учитывает зависимость вязкости жидкости от скорости сдвига. При этом в зависимости от их реологических свойств наиболее распространёнными являются 3 класса жидкостей: *линейно-вязкие*, *псевдопластические* и *дилатантные*. Поэтому весь дальнейший теоретический анализ процесса формирования кавитационной области проводится именно для этих трёх классов.

Выявленная функциональная зависимость для радиуса кавитационного пузырька (2.1) служит основой для среднего уровня детализации модели формирования кавитационной области.

Кроме того, на данном уровне рассмотрения модели определяется допустимый диапазон интенсивностей УЗ воздействия, в котором реализуется схлопывание пузырьков – необходимое условие УЗ интенсификации химико-технологических процессов в гетерогенных средах с жидкой фазой.

2. На среднем уровне модели анализируется уже совокупность кавитационных пузырьков в области с характерными размерами L , много меньшими длины УЗ волны λ , но много большими радиуса кавитационного пузырька R :

$$\lambda \gg L \gg R .$$

Это позволяет выявить зависимости концентрации (2.3) и объёмного содержания кавитационных пузырьков (2.2) (индекса кавитации) от интенсивности УЗ колебаний I , времени t и реологических свойств жидкости Λ .

$$\delta = \frac{4}{3} \pi R^3 n, \quad (2.2)$$

$$n = g(t, I, \Lambda); \quad (2.3)$$

где n – счётная концентрация кавитационных пузырьков, м^{-3} , δ – объёмное содержание пузырьков, R – мгновенный радиус пузырька, определяемый на нижнем уровне модели, м.

Счётная концентрация пузырьков определяется на основании анализа уравнения кинетики дробления и сближения пузырьков [81]. Дробление пузырьков возникает в стадии их схлопывания и приводит к образованию множества пузырьков, играющих роль новых кавитационных зародышей [82, 83]. А сближение пузырьков осуществляется за счёт гидродинамических сил, происходит в течение всего периода существования пузырьков и приводит к объединению пузырьков (коалесценции) [81-84].

Далее на основании счётной концентрации и объёмного содержания пузырьков определяется удельная мощность ударных волн (P_n) в единице объёма кавитационной области, волновое сопротивление жидкости ($\rho_n c_n$) и коэффициент поглощения (K_n):

$$K_n = f(t, I, \Lambda),$$

$$\rho_n c_n = g(t, I, \Lambda),$$

$$P_n = e(t, I, \Lambda).$$

Установленное максимальное значение суммарной мощности создаваемых ударных волн будет служить мерой эффективности кавитационного воздействия.

3. На верхнем уровне рассмотрения модели проводится масштабирование полученных результатов на весь обрабатываемый объем гетерогенной среды с жидкой фазой. Это позволит определить суммарный объем и форму кавитационной области, установить интенсивность УЗ воздействия и определить размеры и форму технологического объёма (для конкретной, заданной формы УЗ излучателя), обеспечивающие формирование кавитационной об-

ласти наибольших размеров, при обеспечении условия, что пузырьки, её составляющие, находятся в режиме развитой кавитации.

Далее представлены детальные описания каждого уровня модели.

2.2 Анализ динамики одиночного кавитационного пузырька в нелинейно-вязкой среде

На сегодняшний день наибольшего прогресса в исследовании динамики одиночного кавитационного пузырька в нелинейно-вязких средах достигли учёные Уэльского университета Е.А. Brujan и Р.Р. Williams (Великобритания) [85]. Результатом этих исследований стало дифференциальное уравнение (2.4) относительно радиуса пузырька как функции от времени.

$$R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \left(1 - \frac{\partial R}{C} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 \left(1 - \frac{\partial R}{3C} \right) = H \left(1 + \frac{\partial R}{C} \right) + \frac{\partial H}{\partial t} \frac{R}{C} \left(1 - \frac{\partial R}{C} \right) - \frac{1}{\rho_\infty} \left(1 + \frac{\partial R}{C} \right) \int_R^\infty \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r}(r) + \frac{3\tau_{rr}}{r}(r) \right) \partial r - \frac{1}{\rho_\infty} \frac{R}{C} \frac{d}{dt} \left[\int_R^\infty \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r}(r) + \frac{3\tau_{rr}}{r}(r) \right) \partial r \right], \quad (2.4)$$

где τ_{rr} – радиальная компонента тензора вязких напряжений жидкой фазы, Па, R – мгновенный радиус кавитационного пузырька, м, H – энтальпия жидкости, $\text{м}^2/\text{с}^2$, C – локальная скорость звука в жидкой фазе, м/с, ρ_∞ – равновесная плотность жидкой фазы, $\text{кг}/\text{м}^3$, r – расстояние от центра кавитационного пузырька, м.

Присутствующая в уравнении (2.4) энтальпия жидкости H определяется следующим образом:

$$H = \int_{p_\infty}^{p_w} \frac{\partial p}{\rho(p)}; \quad p_\infty = p_0 - \sqrt{2\rho c I} \sin(2\pi ft);$$

$$p_w = \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R}{R_0} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{\rho_\infty R} + \frac{1}{\rho_\infty} \frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r}(R);$$

где R_0 – радиус кавитационного зародыша, м, γ – показатель адиабаты в

газовой среде, σ – поверхностное натяжение жидкой фазы, Н/м, ρ – плотность кавитирующей среды, кг/м³, c – скорость звука в кавитирующей среде, м/с, I – интенсивность УЗ колебаний в окрестности кавитационного пузырька, Вт/м², p_0 – статическое давление в жидкости, Па.

Данное уравнение позволяет описать полный цикл расширения и схлопывания пузырька под воздействием УЗ колебаний в наиболее общем случае, одновременно учитывая несколько важнейших факторов:

- сжимаемость жидкости, окружающей кавитационный пузырёк;
- изменение скорости звука в ней при сверхзвуковом движении стенок пузырька в фазе схлопывания;
- произвольный характер зависимости сил вязких напряжений, возникающих в объёме жидкости, от скорости сдвига (нелинейность, вязкоупругость, вязкопластичность и т. д.).

Для получения требуемой функциональной зависимости радиуса кавитационного пузырька от времени в ходе выполнения диссертационной работы был предложен подход, основанный на независимом рассмотрении фаз расширения и схлопывания пузырька.

Согласно данному подходу отдельно для каждой фазы колебаний пузырька выделяются наиболее существенные факторы, влияющие на его поведение. Основываясь на указанном подходе, при рассмотрении динамики пузырька принимаются следующие допущения:

1. В фазе расширения:

Отсутствие влияния сжимаемости жидкости на динамику кавитационного пузырька в фазе расширения. Это допущение является справедливым ввиду малости чисел Маха. Согласно анализу литературных данных [4, 6, 7, 8, 10, 14, 28], максимальный радиус пузырька, находящегося в режиме периодического схлопывания (кавитационного пузырька), как правило, не превышает 150 мкм. При этом расширение пузырька происходит за время, равное не менее чем четверти периода УЗ колебаний.

Таким образом, средняя скорость роста пузырька в стадии расширения составляет:

$$v = \frac{4R_{\max}}{T} < 15 \frac{m}{c},$$

где v – средняя скорость роста пузырька, м/с, R_{\max} – максимальный радиус пузырька в стадии его расширения, м, T – период УЗ колебаний, с.

А число Маха при такой скорости составляет:

$$M = \frac{v}{c} < 0,01,$$

где c – скорость звука в сплошной жидкости, принятая равной 1500 м/с,

т.е. число Маха мало по сравнению с 1. Таким образом, указанное допущение является справедливым.

2. В фазе схлопывания:

Отсутствие влияния реологических свойств жидкости на динамику кавитационного пузырька в течение стадии схлопывания с максимального радиуса, достигнутого при расширении, до минимального. Это обусловлено тем, что в стадии схлопывания скорость движения стенок пузырька достигает скорости звука в сплошной жидкости (1500 м/с).

Поэтому число Рейнольдса составляет:

$$Re = \frac{vd\rho}{\mu} > \frac{v_{\min} d_a \rho}{\mu_{\max}} = \frac{1500 \frac{m}{c} \cdot 100 \cdot 10^{-6} m \cdot 1000 \frac{kg}{m^3}}{1 Pa \cdot c} = 150,$$

где v_{\min} – минимальная скорость движения стенок пузырька при схлопывании, м/с, d_a – средний диаметр кавитационного пузырька в стадии схлопывания, м, μ_{\max} – максимальная вязкость жидкости, обтекающей кавитационных пузырёк, Па·с.

Кроме того, для жидкости с вязкостью менее 0,4 Па·с, число Рейнольдса будет превышать 350.

В то время как в работе [85] отмечено, что реологические свойства среды оказывают заметное влияние на динамику кавитационного пузырька в

стадии схлопывания лишь при $Re < 10^2$.

Принятые допущения позволяют упростить дифференциальное уравнение (2.4) следующим образом в зависимости от фазы радиальных колебаний пузырька:

$$R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 = H - \frac{1}{\rho_\infty} \int_R^\infty \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r}(r) + \frac{3\tau_{rr}}{r}(r) \right) \partial r \quad (2.5)$$

– в фазе расширения пузырька ($R < R_{MAX}$);

$$R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \left(1 - \frac{\partial R}{C} \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 \left(1 - \frac{\partial R}{3C} \right) = H \left(1 + \frac{\partial R}{C} \right) + \frac{\partial H}{\partial t} \frac{R}{C} \left(1 - \frac{\partial R}{C} \right) \quad (2.6)$$

– в фазе схлопывания.

Полученные уравнения (2.5) и (2.6) допускают численные решения и позволяют найти в явном виде функциональную зависимость радиуса кавитационного пузырька от времени, что является конечной целью нижнего уровня рассмотрения модели формирования кавитационной области.

Уравнение (2.6) представляет собой классическое уравнение Кирквуда-Бете, которое является широко исследованным [6, 9, 85, 86, 87] и решается путём непосредственного численного интегрирования, например, методом Рунге-Кутты.

Однако для численного решения уравнения (2.5) остаётся неизвестным интеграл $\int_R^\infty \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{3\tau_{rr}}{r} \right) \partial r$, характеризующий суммарные силы вязких напряжений, действующих на объём окружающей кавитационный пузырёк жидкости.

Поскольку уравнение (2.5) предназначено для описания поведения пузырька в фазе расширения, при вычислении данного неизвестного интеграла сжимаемость жидкости допустимо не учитывать. Указанное допущение о несжимаемости позволяет интеграл $\int_R^\infty \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{3\tau_{rr}}{r} \right) \partial r$ вычислить

аналитически. Поэтому в рамках диссертационной работы были получены аналитические представления данного интеграла в виде конечных комбинаций элементарных функций для различных классов жидкостей, используемых на практике.

Далее описана последовательность действий, необходимых для получения аналитического представления интеграла $\int_R^{\infty} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{3\tau_{rr}}{r} \right) dr$.

Чтобы найти этот интеграл, сперва необходимо получить аналитическое выражение для радиальной компоненты тензора вязких напряжений в зависимости от r – расстояния от центра кавитационного пузырька. Исходя из определения радиальной компоненты тензора вязких напряжений, для последней справедливо следующее соотношение (2.7):

$$\tau_{rr} = \sum_{i,j=1}^3 \frac{x_i x_j}{r^2} T_{ij}(\mathbf{D}). \quad (2.7)$$

Присутствующая в выражении (2.7) зависимость $T_{ij}(\mathbf{D})$ является зависимостью вязких напряжений, возникающих в жидкой фазе, от скорости сдвига, т.е. данной зависимостью определяются реологические свойства неньютоновской жидкой фазы.

Эта зависимость $T_{ij}(\mathbf{D})$, как правило, для каждой жидкости определяется экспериментально в частных случаях её течения [62, 88, 89], например, при плоско-параллельном течении Куэтта [88].

Поскольку при течении Куэтта скорость жидкости имеет только одну компоненту (по оси x), обладающую ненулевым градиентом только по одной координате y , то получаемая экспериментальная зависимость имеет следующий вид:

$$\mathbf{T} = 2\varphi \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \mathbf{D}, \quad (2.8)$$

где $\frac{\partial u}{\partial y}$ – градиент скорости или скорость сдвига, с^{-1} , $\varphi \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)$ – эффективная

вязкость, зависящая от скорости сдвига $\frac{\partial u}{\partial y}$, $\text{Па}\cdot\text{с}$.

Известно [88] что для линейно-вязких жидкостей $\varphi = const$, и постоянное значение функции φ представляет собой ньютоновскую вязкость.

Для большинства нелинейно-вязких жидкостей, используемых на практике, согласно ряду экспериментальных исследований, данная функция представляет собой степенной закон Оствальда-де-Вела (для больших скоростей сдвига, имеющих место при ультразвуковой кавитации) [62, 88–89]:

$$\varphi(\gamma) = \frac{K\gamma^N}{2}; \quad (2.9)$$

где K – показатель консистенции жидкостей, Па·с ^{N} , N – показатель нелинейности.

Показатель нелинейности N определяет принадлежность жидкости тому или иному классу:

$N > 0$ – для дилатантных жидкостей;

$N = 0$ – для линейно-вязких жидкостей;

$N < 0$ – для псевдопластических жидкостей.

Однако, описание реологических свойств жидкостей с помощью функциональной зависимости (2.9) обладает рядом недостатков, проявляющихся при скоростях сдвига, близких к нулю:

– все дилатантные жидкости обладают практически нулевой вязкостью, что не соответствует действительности;

– вязкость всех псевдопластических жидкостей стремится к бесконечности.

Для устранения указанного недостатка, в диссертационной работе была проведена аппроксимация экспериментальных зависимостей [64] вязкости жидкости от скорости сдвига, позволившая уточнить аналитическое выражение (2.9):

$$\varphi(\gamma) = \mu_0 \left(1 + \left(\frac{K}{2\mu_0} \right)^{\text{sgn } N} \gamma^{|N|} \right)^{\text{sgn } N}, \quad (2.10)$$

где μ_0 – начальная вязкость, Па.

Различие значений функции $\varphi(\gamma)$, рассчитанных на основании известного выражения (2.9) и полученного (2.10), является наиболее существенным на начальной стадии расширения кавитационного пузырька ввиду малой скорости сдвига. Кроме того, полученная аппроксимация зависимости вязкости от скорости сдвига (2.10), в отличие от выражения (2.9), позволяет определить пороговую интенсивность воздействия, необходимую для возникновения кавитации (схлопывания пузырьков).

После проведенной аппроксимации зависимость сдвиговых напряжений от скорости деформации при течении Куэтта (2.8) примет следующий вид (2.11):

$$\mathbf{T} = 2\mu_0 \left(1 + \left(\frac{K}{2\mu_0} \right)^{\text{sgn } N} \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^{|N|} \right)^{\text{sgn } N} \mathbf{D}. \quad (2.11)$$

Далее полученную зависимость (2.11) для плоско-параллельного течения Куэтта необходимо обобщить на произвольный трёхмерный случай, поскольку жидкость, окружающая кавитационный пузырёк совершает радиальное движение в окрестности его центра. При этом известно, что для большинства неньютоновских жидкостей, используемых на практике, является справедливым обобщение Дж.Г. Олройда [89]. Дж.Г. Олройд предложил в соотношении $\mathbf{T} = 2\varphi \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right) \mathbf{D}$ градиент скорости $\frac{\partial u}{\partial y}$ заменить евклидовой нормой тензора скоростей деформации:

$$\sqrt{I_2} = \sqrt{\sum_{i,j=1}^3 \left(\frac{\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i}}{2} \right)^2}.$$

Таким образом, с использованием обобщения Олройда, было получено выражение для тензора вязких напряжений жидкой фазы, обтекающей кавитационный пузырёк:

$$\mathbf{T} = 2\mu_0 \left(1 + \left(\frac{K}{2\mu_0} \right)^{\text{sgn} N} \left(\sqrt{\left(R^2 \frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 \frac{6}{r^6}} \right)^{|N|} \right)^{\text{sgn} N} \mathbf{D}. \quad (2.12)$$

Далее с использованием выражения (2.12) и учётом определения радиальной компоненты тензора вязких напряжений (2.7) были получены аналитические представления интеграла $\int_R^{\infty} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{3\tau_{rr}}{r} \right) \partial r$ для различных классов жидкостей, являющихся несущей фазой в гетерогенных средах, используемых в реальных процессах химической технологии.

Для дилатантных жидкостей данный интеграл равен:

$$\int_R^{\infty} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{3\tau_{rr}}{r} \right) \partial r = \frac{2N}{N+1} K \frac{\partial R}{\partial t} 6^{\frac{N}{2}} \left| \dot{R} \right|^N \frac{1}{R^{N+1}}; \quad (2.13)$$

а для псевдопластических:

$$\begin{aligned} \int_R^{\infty} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{3\tau_{rr}}{r} \right) \partial r &\approx \\ &\approx \left(\frac{4 \frac{\partial R}{\partial t}}{R} \right) \frac{\mu_0}{1 + \frac{2\mu_0}{K} \left(\sqrt{\frac{6 \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2}{R^2}} \right)^{|N|}} - \frac{4\mu_0 R^2 \frac{\partial R}{\partial t}}{\left(\frac{2\mu_0}{K} \right)^{|N|} \left(\sqrt{6 \left(R^2 \frac{\partial R}{\partial t} \right)^2} \right)^{|N|+1}} I_{\left[\frac{|N|+1}{|N|} \right]} \left(\frac{R^{3|N|}}{\beta} \right); \end{aligned} \quad (2.14)$$

где вспомогательный интеграл $I_n(a)$ рекуррентно выражается через $I_{n-1}(a)$ следующим образом:

$$I_n(a) = \int_a^{\infty} \frac{\partial s}{s^n (s+1)} = \int_a^{\infty} \frac{(s+1-s)\partial s}{s^n (s+1)} = \int_a^{\infty} \left(\frac{1}{s^n} - \frac{1}{s^{n-1}(s+1)} \right) \partial s = \begin{cases} \frac{1}{(n-1)a^{n-1}} - I_{n-1}(a); n \geq 2 \\ \left| \frac{a+1}{a} \right|; n = 1 \end{cases}.$$

Для случая линейно-вязких жидкостей интеграл $\int_R^{\infty} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{3\tau_{rr}}{r} \right) \partial r$ равен нулю.

Полученные представления интеграла $\int_R^{\infty} \left(\frac{\partial \tau_{rr}}{\partial r} + \frac{3\tau_{rr}}{r} \right) \partial r$ в виде конечных комбинаций элементарных функций (2.13, 2.14) позволяют получить

дифференциальное уравнение относительно радиуса пузырька как функции от времени в стадии расширения для различных классов неньютоновских жидкостей.

В частности, для псевдопластических жидкостей искомое уравнение динамики одиночного пузырька в стадии расширения с учётом (2.5, 2.14) будет выглядеть следующим образом:

$$\rho \left(\frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \right) = p_{II} + \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - p_{\infty} + \frac{2N}{N+1} K \frac{\partial R}{\partial t} 6^{\frac{N}{2}} \left| \frac{\partial R}{\partial t} \right|^N \frac{1}{R^{N+1}}, \quad (2.15)$$

а для дилатантных

$$\rho \left(\frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \right) = -4\mu_0 \left(1 + \left(\frac{K}{2\mu_0} \right) \left(\sqrt{\frac{6 \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2}{R^2}} \right)^N \right) \frac{\partial R}{\partial t} + p_{II} + \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - p_{\infty} + \frac{2N}{N+1} K \frac{\partial R}{\partial t} 6^{\frac{N}{2}} \left| \frac{\partial R}{\partial t} \right|^N \frac{1}{R^{N+1}}. \quad (2.16)$$

Для линейно-вязких жидкостей в стадии расширения справедливо известное уравнение Нолтинга-Непайреса (2.17) [6], к которому сводятся уравнения (2.15) и (2.16) при $N = 0$:

$$\rho \left(\frac{3}{2} \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2 + R \frac{\partial^2 R}{\partial t^2} \right) = -4\mu \frac{\partial R}{\partial t} + p_{II} + \left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - p_{\infty}. \quad (2.17)$$

Зависимость радиуса пузырька от времени в стадии схлопывания описывается уравнением Кирквуда-Бете (2.6) для всех трёх классов жидкостей. Уравнение (2.6) является справедливым в силу принятого допущения об отсутствии влияния реологических свойств жидкости на динамику пузырька в стадии его схлопывания.

Полученные уравнения позволяют определить мгновенный радиус и объём кавитационного пузырька в зависимости от реологических свойств жидкости.

Анализ динамики одиночного пузырька позволяет определить пороговую интенсивность УЗ воздействия, необходимую для возникновения схлопывания кавитационных пузырьков, а также максимальную

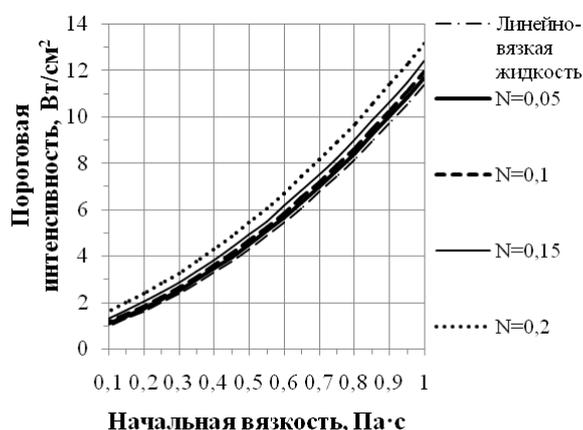
интенсивность, при которой пузырьки вырождаются в долгоживущие.

Критерием начала схлопывания кавитационных пузырьков служило превышение максимального радиуса пузырька $R_{MAX} = \max_{t \in [0; T]} R(t) > 5R_0$ (где R_0 – начальный радиус пузырька, м, T – период колебаний первичного ультразвукового воздействия, с).

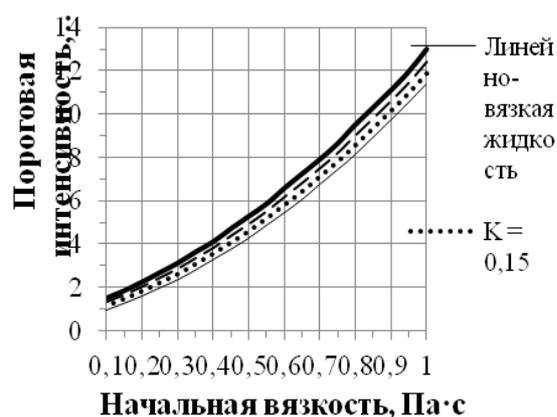
Это соотношение было выбрано из анализа уравнения (2.6), учитывающего сжимаемость жидкости и показавшего, что начиная с такого отношения максимального радиуса к начальному скорость уменьшения радиуса стенок пузырька при схлопывании достигает скорости звука в чистой жидкости. Это свидетельствует об образовании ударной волны.

В свою очередь, критерием вырождения пузырька в долгоживущий служило отсутствие схлопывания в течение времени $3T$ (T – период колебаний первичного УЗ воздействия) с момента первоначального расширения кавитационного зародыша.

На следующем рисунке 2.2 приведены зависимости пороговой интенсивности воздействия от начальной вязкости для дилатантных жидкостей. Диапазон выбранных начальных вязкостей составляет от 0,1 до 1 Па·с, поскольку вязкость большинства используемых на практике дилатантных жидкостей не превышает 1 Па·с (лакокрасочные материалы).



а) при различных показателях нелинейности (показатель консистенции $K = 0,3 \text{ Па}\cdot\text{с}^N$)

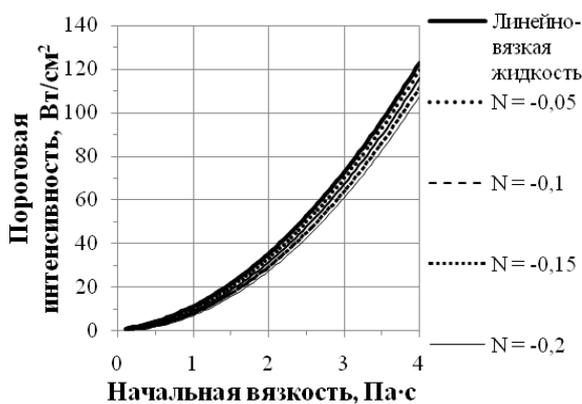


б) при различных показателях консистенции (показатель нелинейности $N = 0,15$)

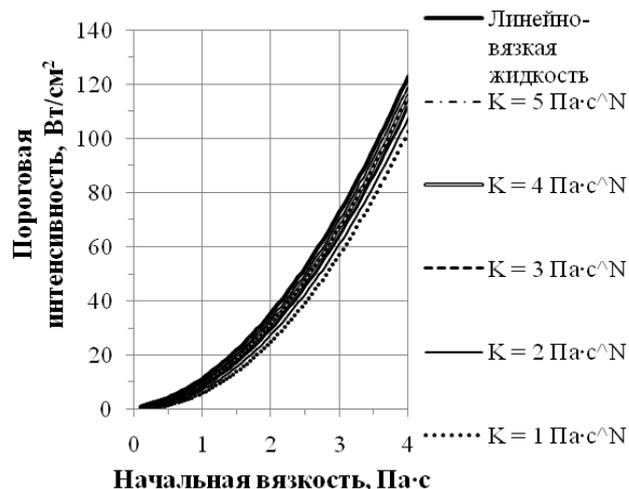
Рисунок 2.2 – Зависимость пороговой интенсивности воздействия от начальной вязкости жидкой фазы при различных параметрах, характеризующих зависимость вязкости от скорости сдвига (для гетерогенных сред с дилатантными жидкими фазами)

Как следует из представленных результатов, наличие зависимости вязкости от скорости сдвига на пороговую интенсивность значительного влияния не оказывает. Это объясняется тем, что в стадии зарождения кавитации градиент скорости, вызванный распространением ультразвуковых колебаний, является достаточно малым по сравнению со скоростью сдвига, вызванной схлопыванием в стадии развитой кавитации, которое при интенсивности, меньшей пороговой, отсутствует.

Далее были выявлены зависимости пороговой интенсивности от начальной вязкости для гетерогенных сред с псевдопластическими жидкими фазами. Начальная вязкость псевдопластических жидкостей находится в значительно более широком диапазоне по сравнению с дилатантными и не превышает $4 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (эпоксидные смолы), в то время как вязкость отдельных сред с жидкими фазами может достигать $150 \text{ Па}\cdot\text{с}$ (используются редко).



а) при различных показателях нелинейности (показатель консистенции $K = 2 \text{ Па}\cdot\text{с}^N$)



б) при различных показателях консистенции (показатель нелинейности $N = -0,1$)

Рисунок 2.3 – Зависимость пороговой интенсивности воздействия от начальной вязкости для гетерогенных сред с псевдопластическими жидкими фазами

Как следует из представленного рисунка 2.3, наличие зависимости вязкости от скорости сдвига для случая гетерогенных сред с псевдопластическими жидкими фазами также значительного влияния не оказывает, как и для дилатантных. Однако пороговые интенсивности воздействия могут превышать 100 Вт/см^2 (для вязкостей более $3,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$). Для создания таких интенсивностей необходимы излучатели, обеспечивающие амплитуду колебаний более 25 мкм (что соответствует размаху более 50 мкм), которая при площади излучения, превышающей 20 см^2 , приведёт к разрушению материала современных ультразвуковых излучателей для жидких сред ввиду ограниченности коэффициента усиления концентратора.

Поэтому для УЗ обработки сред с вязкостью жидкой фазы более $3,5 \text{ Па}\cdot\text{с}$, необходимо использовать меньшие интенсивности воздействия, например не превышающие 70 Вт/см^2 [90-94]. При этом в течение некоторого периода времени (1...10 мин) будет происходить снижение вязкости

жидкости в 2...3 раза за счёт градиента скорости, образуемого УЗ волнами в отсутствие кавитации. Это обеспечит снижение пороговой интенсивности, необходимой для возникновения кавитации, до значений которые могут быть обеспечены ультразвуковыми излучателями без их разрушения.

На следующем рисунке 2.4 приведены зависимости допустимых значений интенсивностей УЗ воздействия от вязкости жидкой фазы, при которых возникает кавитация, но пузырьки не вырождаются в долгоживущие, для с гетерогенных сред с линейно-вязкими жидкими фазами.

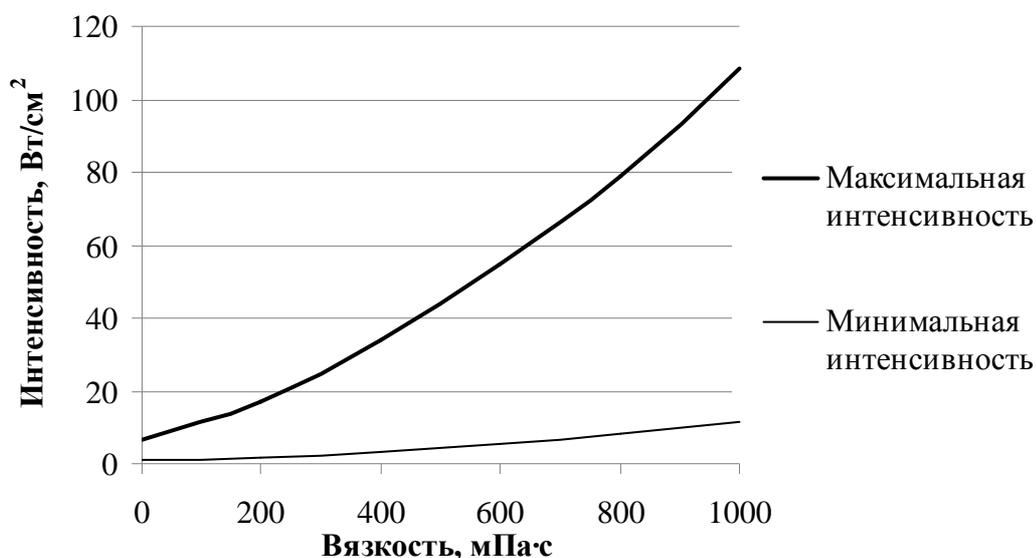


Рисунок 2.4 – Допустимый диапазон интенсивностей УЗ воздействия для обработки гетерогенных сред с линейно-вязкими жидкими фазами

На следующих рисунках 2.5–2.6 приведены аналогичные зависимости для гетерогенных сред с нелинейно-вязкими жидкими фазами. При построении таких зависимостей начальная вязкость жидкости не учитывалась, поскольку её значение на максимальную интенсивность в режиме развитой кавитации существенного влияния не оказывает. Данный факт можно проиллюстрировать следующими численными оценками. Согласно оценкам, проведённым в первом разделе (см. выражение (1.2)), скорость сдвига превышает $100\,000\text{ с}^{-1}$ даже в стадии расширения пузырька.

При такой скорости сдвига величина $\left(\frac{K}{2\mu_0}\right)^{\text{sgn } N} \left(\sqrt{\frac{6\left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^2}{R^2}}\right)^{|N|}$ составляет

$$\left(\frac{K}{2\mu_0}\right)^{\text{sgn } N} \left(\sqrt{\frac{6\left(\frac{\partial R}{\partial t}\right)^2}{R^2}}\right)^{|N|} \sim \frac{2 \cdot 2 \text{ Па} \cdot \text{с}}{1 \text{ Па} \cdot \text{с}^{-0,1}} (100000 \text{ с}^{-1})^{0,15} \approx 22 \gg 1,$$

что свидетельствует о том, что начальная вязкость для неньютоновских жидких фаз, не оказывает значительного влияния, поскольку она не превышает 2 Па·с для псевдопластических жидких фаз, и 0,1 Па·с для дилатантных.

Диапазон показателей консистенции и нелинейности выбран на основании аппроксимации результатов экспериментальных исследований зависимости вязкости от скорости или напряжения сдвига эпоксидианового олигомера марки ЭД-20 с добавлением трехфункционального олигоэфирциклокарбоната (ОЦК) на основе окиси пропилена [95] (псевдопластическая среда) и водной суспензии TiO_2 (дилатантная среда) [96].

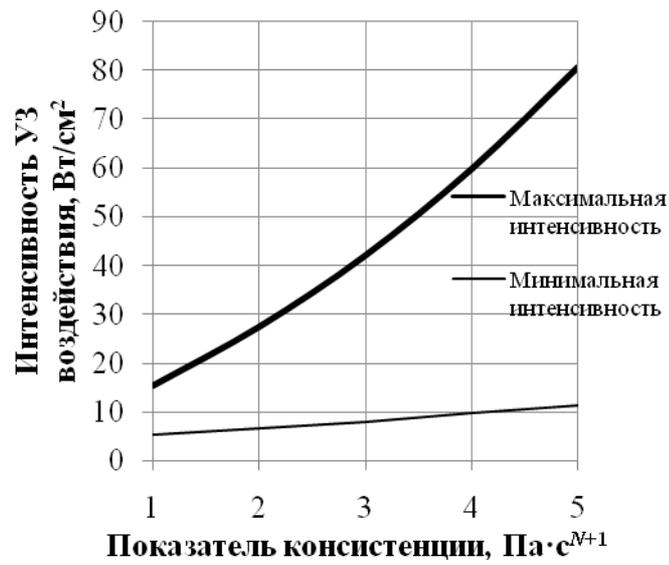
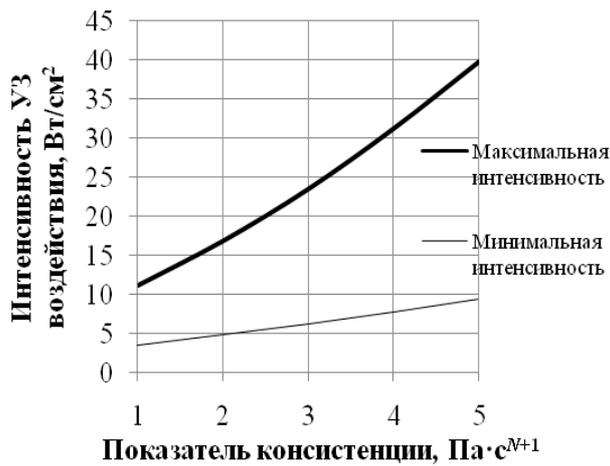
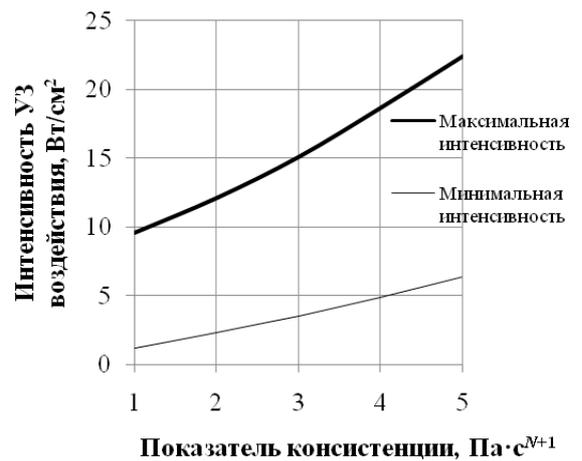
а) $N = -0,1$ б) $N = -0,15$ в) $N = -0,2$

Рисунок 2.5 – Зависимости граничных интенсивностей от показателя консистенции при различных показателях нелинейности для гетерогенных сред с псевдопластическими жидкими фазами

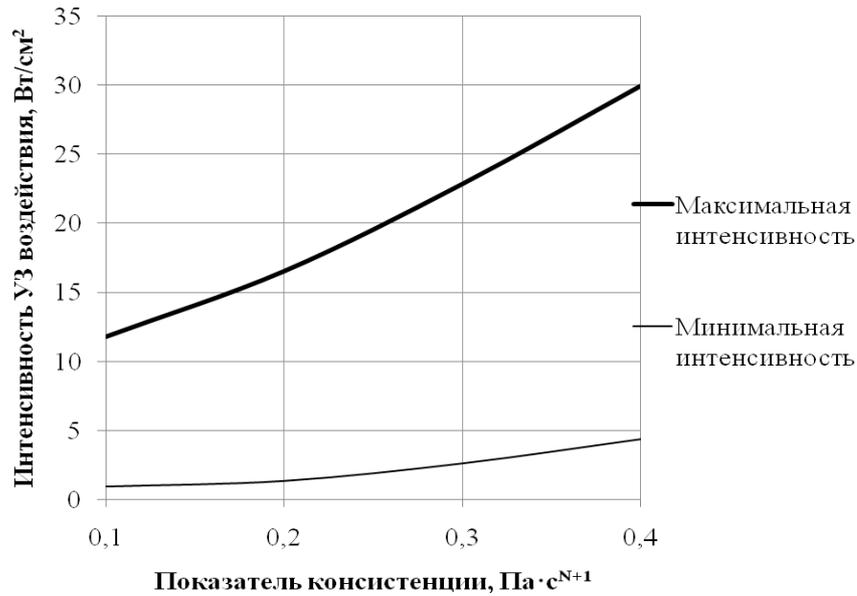
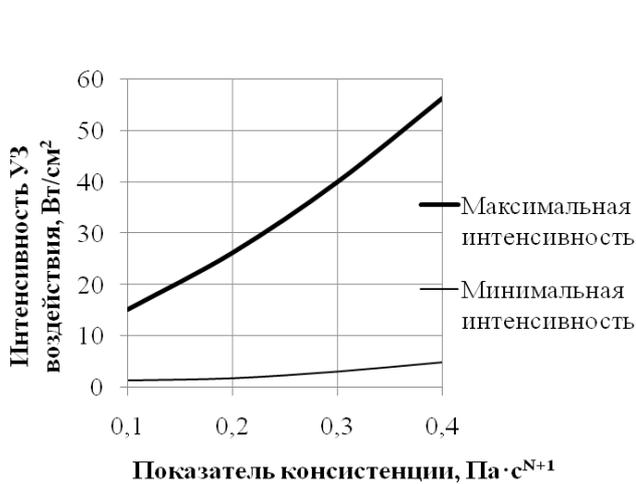
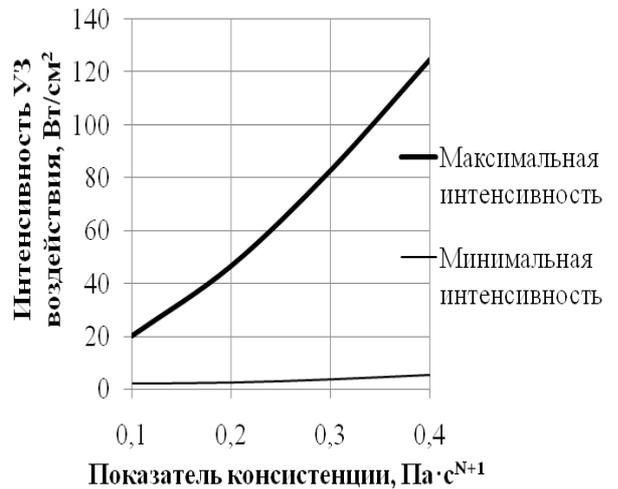
а) $N = 0,05$ б) $N = 0,1$ в) $N = 0,15$

Рисунок 2.6 – Зависимости граничных интенсивностей от показателя консистенции различных показателях нелинейности для дилатантных гетерогенных сред

Полученные зависимости (рисунки 2.5–2.6) позволяют установить диапазон интенсивностей, в котором необходимо ультразвуковое воздействие для кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских сред. Однако следует отметить, что при минимальной интенсивности кавитация только начинает зарождаться, а при максимальной – схлопывания

пузырьков практически не происходит.

Таким образом, теоретический анализ динамики одиночного пузырька является недостаточным для выявления оптимальных режимов и условий воздействия, поскольку при граничных интенсивностях мощность ударных волн, создаваемых совокупностью пузырьков, оказывается также близкой к нулю, и, следовательно, эффективность обработки будет ничтожной.

Очевидно, что в данном диапазоне существует более узкий диапазон оптимальных интенсивностей, при которых эффективность кавитации будет максимальна.

Чтобы выявить этот диапазон интенсивностей, необходимо исследование формирования ансамбля кавитационных пузырьков, поскольку энергия кавитационного воздействия определяется суммарной мощностью ударных волн, образуемых каждым отдельно взятым кавитационным пузырьком. Эта суммарная мощность зависит от концентрации пузырьков, определяемой на среднем уровне детализации модели.

2.3 Анализ локального формирования и эволюции ансамбля кавитационных пузырьков для выявления их концентрации и объёмного содержания

Исследование локального формирования и эволюции ансамбля пузырьков для определения их концентрации и объёмного содержания проводилось в малой области Ω , схематично изображённой на рисунке 2.7.

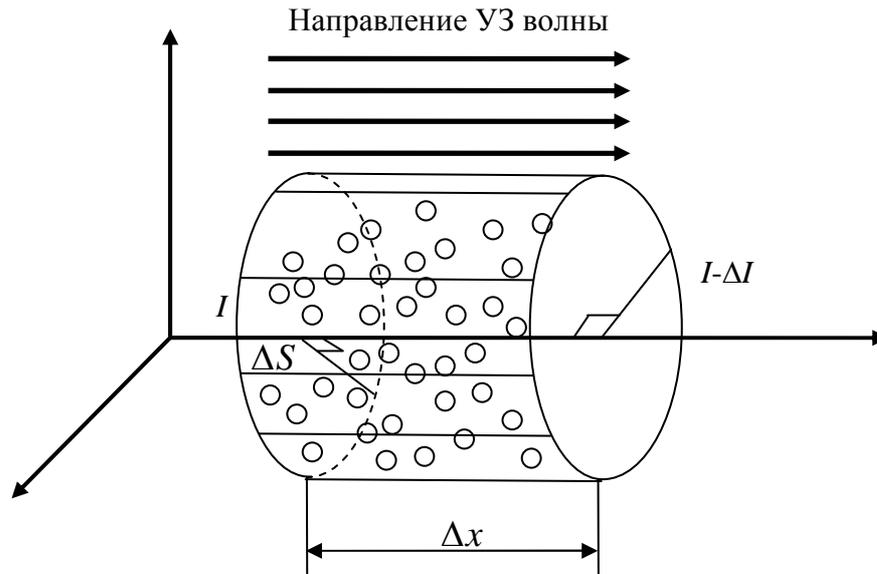


Рисунок 2.7 – Схематичное изображение локальной области жидкости с кавитационными пузырьками (I – интенсивность первичной УЗ волны, Вт/м², ΔI – малое изменение интенсивности, вызванное поглощением УЗ, Вт/м², N – количество пузырьков, ΔS – площадь сечения локальной области, м², Δx – длина локальной области, м)

При возникновении ультразвуковой кавитации в жидкой среде концентрация пузырьков $n = \frac{N}{\Delta S \Delta x}$ определяется процессами их дробления при схлопывании и коалесценции (объединения) при радиальных колебаниях, а также их начальной концентрацией. При процессах дробления одиночный пузырёк распадается на несколько пузырьков, которые играют роль новых зародышей (ядер) кавитации, и тем самым концентрация пузырьков с течением времени возрастает.

А процессы коалесценции происходят в результате сближения пузырьков, вызванного гидродинамическими силами Бьеркнеса [6], и приводят к стабилизации их концентрации по истечении достаточного большого промежутка времени (по сравнению с периодом УЗ колебаний).

Теоретическое рассмотрение процессов коалесценции и дробления пузырьков основывается на следующих допущениях:

1. *Мгновенное образование сферических агломератов пузырьков после столкновения более мелких пузырьков (теория «быстрой» коалесценции).* Данное допущение предполагает, что время постепенного приобретения образовавшимся крупным пузырьком сферической формы с момента начального контакта более мелких пузырьков существенно мало по сравнению с временем пробега пузырьков между столкновениями.

2. *Парные столкновения пузырьков.* Вероятность одновременно столкновения 3-х и более пузырьков пренебрежимо мала по сравнению с вероятностью соударения 2-х пузырьков.

3. *Пространственная однородность процессов коалесценции и дробления пузырьков.* Принятие данного допущения обусловлено тем, что на среднем уровне детализации модели рассматривается ансамбль кавитационных пузырьков в локальной области (рисунок 2.7), размеры которой малы по сравнению с длиной УЗ волны в жидкости. Поэтому в данной области распределение ультразвукового давления (интенсивности УЗ колебаний), приводящего к образованию кавитации, является практически однородным. Однако значение интенсивности УЗ колебаний в рассматриваемой области зависит от положения этой области относительно УЗ излучателя и определяется характером распространения УЗ колебаний в кавитирующей жидкости. Зависимость интенсивности УЗ колебаний от положения рассматриваемой области в объёме обрабатываемой жидкости будет определяться на основании верхнего уровня детализации модели.

4. *Количество кавитационных зародышей, образуемых при дроблении отдельного пузырька в конце стадии схлопывания, зависит исключительно от максимального радиуса пузырька, достигнутого в стадии расширения, и не зависит от реологических свойств жидкости.* Это объясняется, тем, что, как было показано в предыдущем подразделе 2.2, реологические свойства жидкостей оказывают слабое влияние на фазу схлопывания пузырька

Согласно принятым допущениям, для концентрации кавитационных пузырьков справедливо кинетическое уравнение (2.18), получаемое из

уравнения Смолуховского [97], для процессов коалесценции и дробления дисперсных частиц (капель жидкости, пузырьков газа или твёрдых частиц):

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{n(j-1)}{iT_0} - k_B n^2, \quad (2.18)$$

где n – счётная концентрация кавитационных пузырьков в зависимости от времени t , м^{-3} , i – среднее число пульсаций кавитационного пузырька до его расщепления, k_B – константа скорости коалесценции пузырьков, $\text{м}^3/\text{с}$, T_0 – период ультразвуковых колебаний, с, j – среднее число зародышей, образуемых при дроблении отдельного пузырька.

Путём решения уравнения (2.18) было получено следующее аналитическое выражение:

$$n = \frac{n_\infty n_0}{n_0 + (n_\infty - n_0)e^{-n_\infty k_B t}}; \quad (2.19)$$

где n_0 – начальная заранее неизвестная концентрация кавитационных пузырьков, м^{-3} , n_∞ – стационарная концентрация кавитационных пузырьков, м^{-3} , j – количество зародышей, образуемых при дроблении отдельного пузырька, T_0 – период первичного УЗ воздействия, с, i – целое число периодов УЗ колебаний, прошедших с момента начального расширения пузырька до момента схлопывания, k_B – постоянная коалесценции пузырьков, $\text{м}^3/\text{с}$.

Согласно выражению (2.19) концентрация пузырьков n через время, равное десяткам периодам колебаний достигает установившегося значения и становится равной величине n_∞ , которая определяется на основании выражения (2.20):

$$n_\infty = \frac{j-1}{ik_B T_0}. \quad (2.20)$$

Установившаяся концентрация n_∞ зависит от постоянных коалесценции (k_B) и дробления (j) пузырьков.

Постоянные дробления и коалесценции определяются на основании

функциональной зависимости радиуса кавитационного пузырька от времени $R(t)$, выявленной на нижнем уровне детализации модели.

Для определения постоянной коалесценции используется следующее выражение [82]:

$$k_B = \frac{S_{eff} \langle u \rangle}{2};$$

где S_{eff} – эффективное сечение столкновений пузырьков (оно определяется расстоянием между пузырьками, при котором коалесценция пузырьков происходит за время, много меньшее периода колебаний), m^2 ; $\langle u \rangle$ – средняя скорость сближения кавитационных пузырьков, м/с.

Для определения S_{eff} используется выражение, полученное в работе М.А. Маргулиса [82]:

$$S_{eff} = 25 \pi R_{MAX}^2,$$

где R_{MAX} – максимальный радиус кавитационного пузырька в стадии его расширения, м.

Для определения скорости сближения кавитационных пузырьков $\langle u \rangle$ используется модель взаимодействия пузырьков, представленная в работах [82, 84]. Модель основана на 2-м законе И.Ньютона для отдельного кавитационного пузырька с учётом сил Бьеркнеса, действующих со стороны соседних пузырьков и обусловленных радиальными колебаниями последних. Согласно данной модели положения центров каждого из кавитационных пузырьков, входящих в ансамбль, описываются следующим уравнением [82]:

$$\begin{aligned} \frac{4\pi R_{0i}^3}{3} \rho_G \frac{\partial^2 \mathbf{r}_i}{\partial t^2} = \frac{4\pi R_i^3}{3} \rho_L \frac{\partial \mathbf{v}_L}{\partial t}(\mathbf{r}_i, t) + \sum_{j=1, n, j \neq i} \frac{4\pi R_j^3}{3 |\mathbf{d}_{ij}|^3} \rho_L \frac{\partial \left(R_j^2 \frac{\partial R_j}{\partial t} \right)}{\partial t} \mathbf{d}_{ij} + \\ + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{4\pi R_i^3}{3} \rho_L \left(\mathbf{v}_L(\mathbf{r}_i, t) - \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial t} \right) \right) + 4\pi \eta R_i \left(\mathbf{v}_L(\mathbf{r}_i, t) - \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (2.21)$$

где i – порядковый номер пузырька в области жидкой фазы; R_i – мгновенный

радиус i -го пузырька, м; c – локальная скорость звука в жидкой фазе, м/с;
 P_{wi} – давление газа вблизи стенок i -го пузырька, Па;
 p – мгновенное значение давления жидкой фазы в отсутствие кавитационных
пузырьков, Па; ρ_L – плотность жидкой фазы, кг/м³; v_L – мгновенная
колебательная скорость жидкой фазы в отсутствие кавитационных
пузырьков, м/с; R_{0i} – радиус зародыша i -го пузырька, м; ρ_G – равновесная
плотность газа, находящегося внутри пузырька, кг/м³; t – время, с;
 η – вязкость жидкой фазы, Па·с; \mathbf{r}_i – вектор координат центра i -го пузырька,
м; $\mathbf{d}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$ – вектор линии центров пары i -го и j -го пузырьков, м.

Поскольку согласно допущению 2 вероятность столкновения трёх и более пузырьков пренебрежимо мала, то величина $\langle u \rangle$ определяется как скорость сближения 2-х отдельных пузырьков. Поэтому из системы уравнений (2.21) в рамках диссертационной работы было получено дифференциальное уравнение (2.22) для вектора линии центров двух отдельных пузырьков $\mathbf{d}_{12} = \mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1$:

$$\frac{4\pi R_0^3}{3} \rho_G \frac{\partial^2 \mathbf{d}_{12}}{\partial t^2} = -2 \frac{4\pi R^3}{3|\mathbf{d}_{12}|^3} \rho_L \frac{\partial \left(R^2 \frac{\partial R}{\partial t} \right)}{\partial t} \mathbf{d}_{12} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{4\pi R^3}{3} \rho_L \left(-\frac{\partial \mathbf{d}_{12}}{\partial t} \right) \right) + 4\pi \eta R \left(-\frac{\partial \mathbf{d}_{12}}{\partial t} \right); \quad (2.22)$$

Численное решение уравнения (2.22) позволило выявить зависимость вектора линии центров двух отдельных пузырьков от времени и вычислить среднюю скорость их сближения согласно следующему выражению:

$$\langle u \rangle = \frac{|\mathbf{d}_{12}(T) - \mathbf{d}_{12}(0)|}{T}.$$

Для определения постоянной дробления j используется допущение 4, согласно которому количество зародышей, образуемых при дроблении одиночного пузырька, зависит исключительно от его максимального радиуса, определяемого на основании уравнений (2.15-2.17), полученных в рамках нижнего уровня рассмотрения модели:

$$j = j(R_{MAX}) = j\left(\max_{t \in [0; T]} R(t)\right).$$

Принятое допущение 4 даёт возможность косвенно определять величину j на основании известных экспериментальных данных по зависимостям концентрации и объёмного содержания пузырьков от интенсивности воздействия (величины квадрата приложенного напряжения к фокусирующему концентратору) (рисунок 2.8) для водной среды [6].

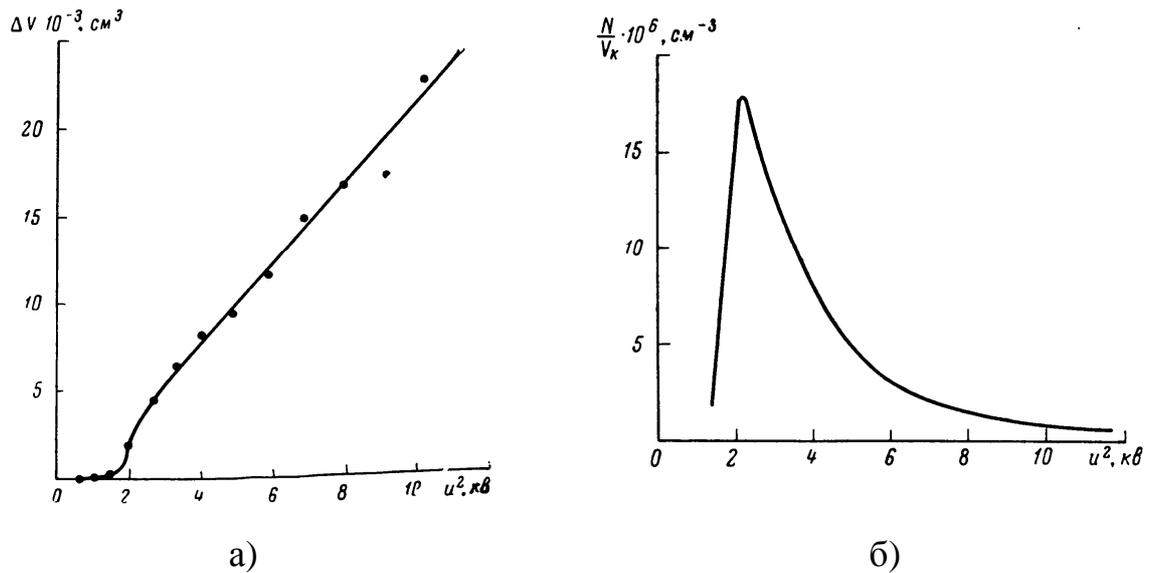


Рисунок 2.8 – Зависимости объёмного содержания (а) и концентрации (б) пузырьков на фокусирующем концентраторе от квадрата приложенного напряжения к фокусирующему концентратору

Искомая зависимость средне-объёмного значения j от максимального радиуса пузырька приведена на рисунке 2.9.

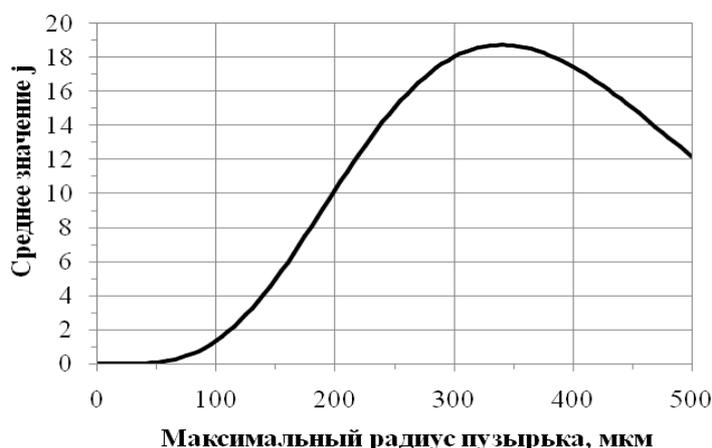


Рисунок 2.9 – Зависимость средне-объёмного числа зародышей, образующихся при дроблении отдельно взятого пузырька, от его радиуса

Таким образом, средний уровень детализации модели позволяет описать локальное формирование ансамбля кавитационных пузырьков в области, малой по сравнению с длиной УЗ волны, и определить стационарную концентрацию n_∞ и мгновенное объёмное содержание кавитационных пузырьков $\delta(t)$ согласно следующей системе соотношений, полученных в ходе выполнения диссертационной работы:

$$n_\infty = \frac{2(j-1)}{25\pi R_{MAX}^2 i |\mathbf{d}_{12}(T) - \mathbf{d}_{12}(0)|}; \quad (2.23)$$

$$j = j(R_{MAX}) - \text{определяется на основании зависимости,} \quad (2.24)$$

приведённой на рисунке 2.10;

$$\delta(t) = \frac{4}{3} \pi R^3(t) n_\infty; \quad (2.25)$$

$$R_{MAX} = \max_{t \in [0; T]} R(t); \quad (2.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{4\pi R_0^3}{3} \rho_G \frac{\partial^2 \mathbf{d}_{12}}{\partial t^2} = & -2 \frac{4\pi R^3}{3 |\mathbf{d}_{12}|^3} \rho_L \frac{\partial \left(R^2 \frac{\partial R}{\partial t} \right)}{\partial t} \mathbf{d}_{12} + \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{4\pi R^3}{3} \rho_L \left(-\frac{\partial \mathbf{d}_{12}}{\partial t} \right) \right) + \\ & + 4\pi \eta R \left(-\frac{\partial \mathbf{d}_{12}}{\partial t} \right) \end{aligned} \quad (2.27)$$

Далее на основании соотношений (2.23-2.27) с использованием функциональной зависимости радиуса отдельного кавитационного пузырька

от времени $R(t)$, выявленной на нижнем уровне модели, были рассчитаны зависимости концентрации n_∞ и среднего объемного содержания кавитационных пузырьков $\delta = \frac{4}{3}\pi\overline{R^3(t)}n_\infty$ от интенсивности воздействия для жидкостей с различными реологическими свойствами (рисунки 2.10-2.12).

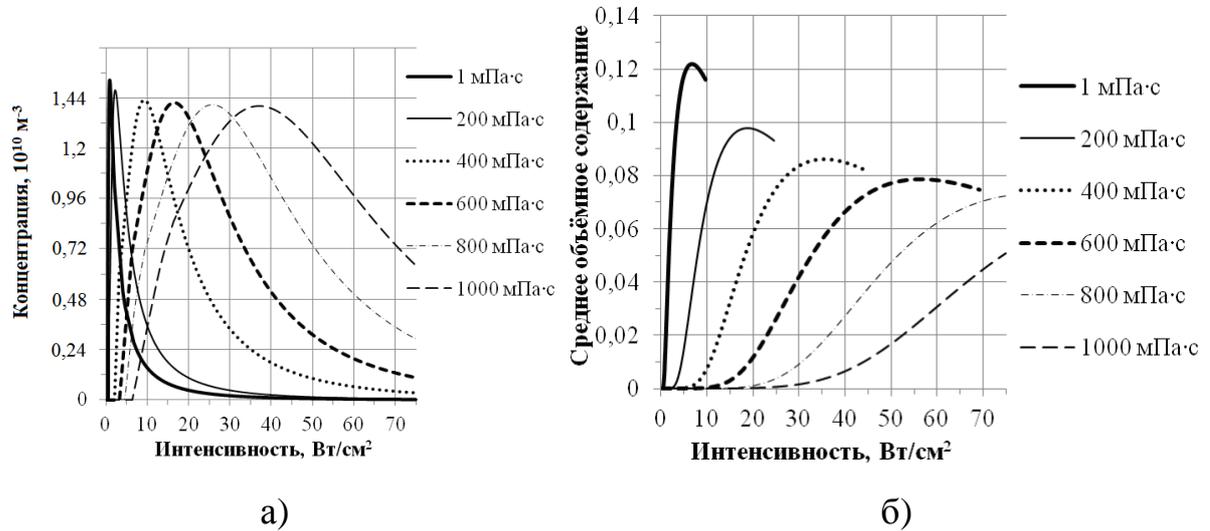
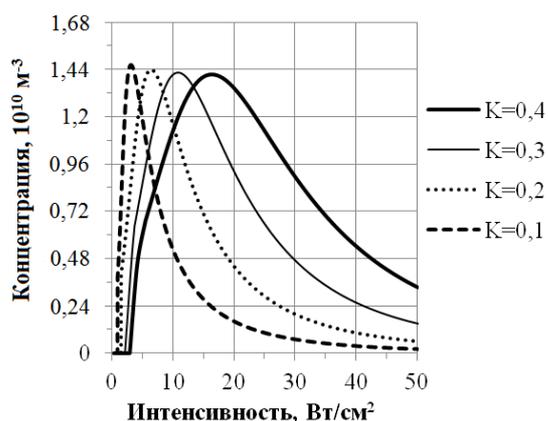
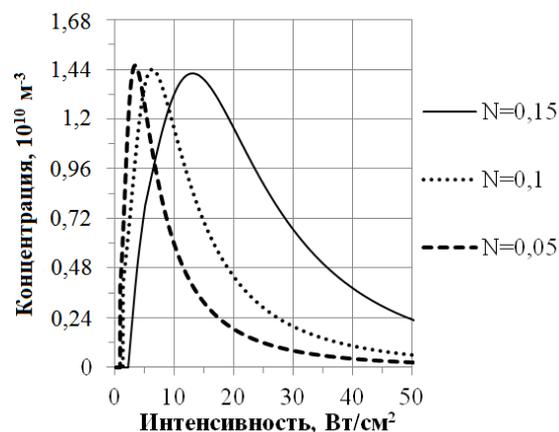


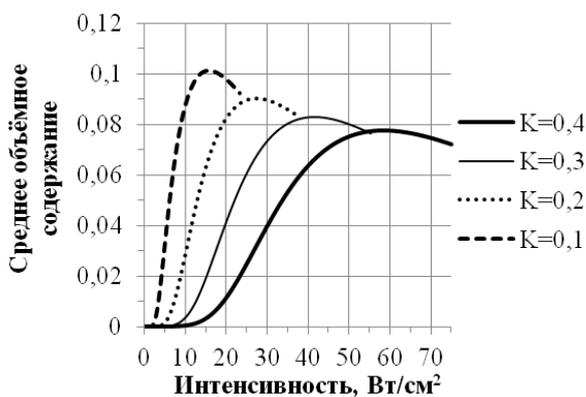
Рисунок 2.10 – Зависимости концентрации (а) и объёмного содержания (б) кавитационных пузырьков от вязкости для линейно-вязкой среды



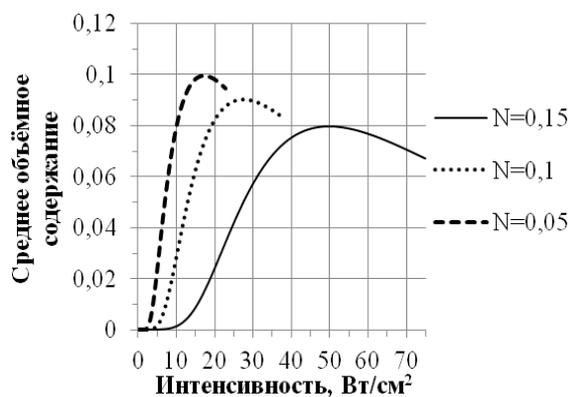
а) при различных показателях
консистенции K , $\text{Па} \cdot \text{с}^{N+1}$ (показатель
нелинейности $N = 0,1$)



б) при различных показателях
нелинейности N (показатель
консистенции $K = 0,2 \text{ Па} \cdot \text{с}^{N+1}$)

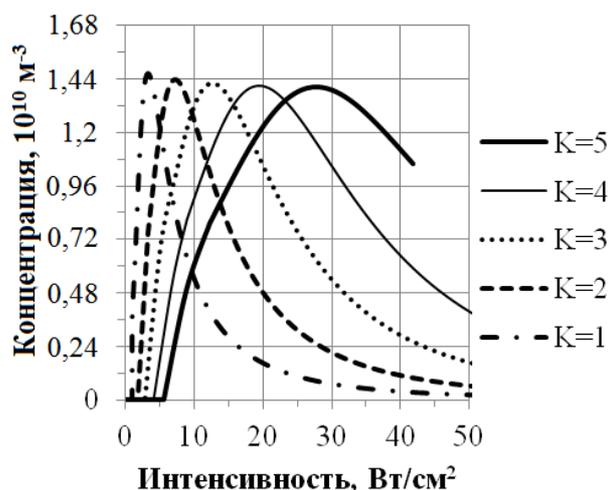


в) при различных показателях
консистенции K , $\text{Па} \cdot \text{с}^{N+1}$ (показатель
нелинейности $N = 0,1$)

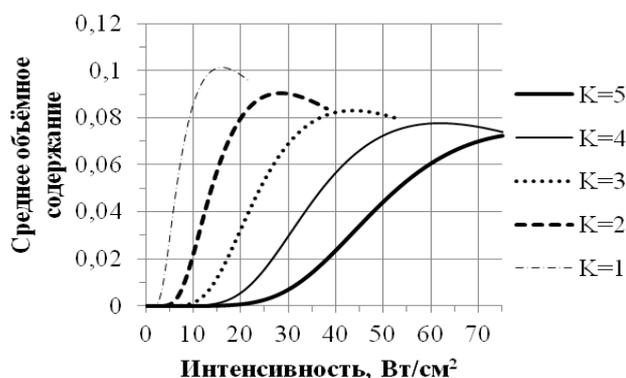


г) при различных показателях
нелинейности N (показатель
консистенции $K = 0,2 \text{ Па} \cdot \text{с}^{N+1}$)

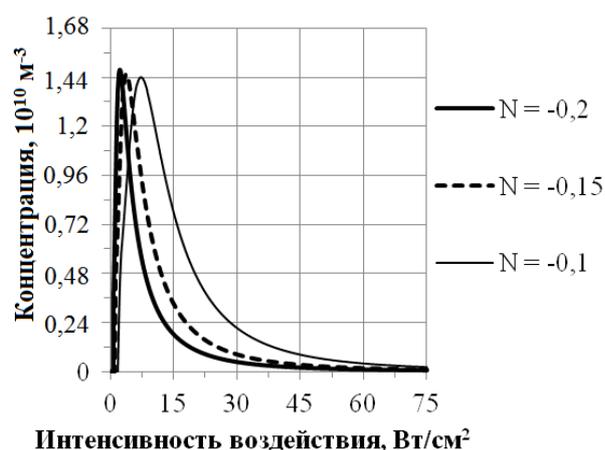
Рисунок 2.11 – Зависимости концентрации (а, б) и объёмного содержания (в, г) пузырьков от интенсивности воздействия для дилатантных сред



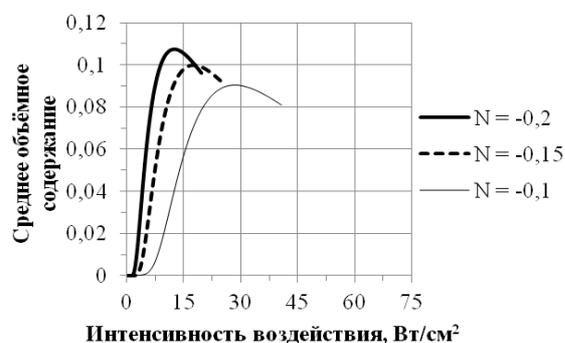
а) при различных показателях
консистенции K , $\text{Па}\cdot\text{с}^{N+1}$ (показатель
нелинейности $N = -0,1$)



в) при различных показателях
консистенции K , $\text{Па}\cdot\text{с}^{N+1}$, (показатель
нелинейности $N = -0,1$)



б) при различных показателях
нелинейности N (показатель
консистенции $K = 2 \text{ Па}\cdot\text{с}^{N+1}$)



г) при различных показателях
нелинейности N (показатель
консистенции $K = 2 \text{ Па}\cdot\text{с}^{N+1}$)

Рисунок 2.12 – Зависимости концентрации (а, б) и объёмного содержания (в, г) пузырьков от интенсивности воздействия для псевдопластических сред

Как следует из представленных зависимостей (рисунки 2.10а,б; 2.11а,б; 2.12а,б), концентрация пузырьков с ростом интенсивности воздействия в начале резко увеличивается, что обуславливается тем, что коэффициент коалесценции пузырьков является малым по сравнению с кратностью дробления пузырьков (величина j в выражении 2.23), из-за малого среднего

радиуса пузырьков. При дальнейшем увеличении интенсивности воздействия происходит возрастание средних радиусов пузырьков, а также скоростей их расширения и схлопывания. А поскольку сила Бьеркнеса, приводящая к сближению пузырьков, пропорциональна их радиусам и скоростям изменения радиусов, это приводит к тому, что процессы сближения и дальнейшей коалесценции пузырьков вносят больший по абсолютной величине вклад в изменение концентрации пузырьков, т.е. концентрация начинает уменьшаться. Кроме того, уменьшение концентрации объясняется тем, что при больших концентрациях расстояния между центрами пузырьков значительно меньше, это приводит к дополнительному возрастанию сил Бьеркнеса.

Смещение интенсивности, при которой достигается максимум концентрации, при различных реологических свойствах жидкой фазы объясняется тем, что величина концентрации главным образом зависит от максимального радиуса кавитационного пузырька, а вязкие напряжения в значительной степени препятствуют расширению последнего [98-99].

Также установлено, что максимальное значение концентрации слабо зависит от реологических свойств жидкой фазы. Это может быть объяснено тем, что процесс сближения центров пузырьков в наибольшей степени происходит в стадии их схлопывания (объединение или коалесценция происходит в стадии расширения), в течение которой скорости движения стенок пузырька оказываются близкими к скорости звука в жидкости. При таких скоростях вязкие напряжения, как было отмечено ранее, оказывают слабое влияние на протекание процесса схлопывания.

В свою очередь среднее объёмное содержания пузырьков, даже пройдя максимум концентрации, с ростом интенсивности продолжает монотонно возрастать из-за увеличения радиуса кавитационных пузырьков. Однако затем, после прохождения максимального значения 0,08...0,15, среднее объёмное содержание пузырьков начинает медленно спадать. Это объясняется тем, что при больших интенсивностях форма колебаний

пузырьков начинает приближаться к синусоидальной, количество «ударных» захлопываний уменьшается и соответственно снижается кратность дробления пузырька j .

Полученные результаты анализа одиночного пузырька и формирования ансамбля пузырьков, используются в дальнейшем для определения макроскопических характеристик кавитирующей жидкости (вязкость,, волновое сопротивление, коэффициент поглощения и т. д.), которые влияют на распространение ультразвуковых колебаний [98-99] и в конечном итоге позволят выявить интенсивности, требуемые для достижения максимального энергетического воздействия кавитации (развитой кавитации), и найти распределение кавитационных зон.

2.4 Анализ распространения УЗ колебаний в кавитирующей среде с целью определения эффективных акустических свойств кавитационной области

Для выявления распределения кавитационных зон необходимо в первую очередь определить эффективные акустические характеристики кавитирующей среды, среди которых наибольший интерес, в частности, представляет коэффициент поглощения, который влияет на распределение ультразвукового давления в гетерогенной среде с жидкой фазой и, как было отмечено ранее, определяет эффективность кавитационного воздействия.

Для определения акустических характеристик кавитирующей среды было использовано известное уравнение [100], описывающее распространение акустического поля в жидкости, содержащей кавитационные пузырьки, заполненные паром или газом:

$$\Delta p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\rho_0 \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2}; \quad (2.28)$$

где t – время, с, ρ_0 – равновесная плотность жидкой фазы, кг/м³, p – мгновенное значение давления жидкости, Па, c_0 – скорость звука в жидкой

фазе, м/с, δ – мгновенное объёмное содержание пузырьков, выявленное на основании среднего уровня детализации модели (см. выражение (2.25)).

Поскольку колебания кавитационных пузырьков носят нелинейный характер и сопровождаются высшими гармониками по сравнению с основной (частота колебаний ультразвукового преобразователя, погружённого в жидкую среду), звуковое давление и мгновенное объёмное содержание пузырьков удобно представить в виде рядов Фурье. Разложения в ряды Фурье представимы следующими выражениями (в комплексном виде):

$$\overline{p}(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \overline{p}_n(\mathbf{r}) e^{-in\omega t}; \quad (2.29)$$

$$\overline{\delta}(\mathbf{r}, t) = \sum_{n=1}^{\infty} \overline{\delta}_n(\mathbf{r}) e^{-in\omega t}; \quad (2.30)$$

где ω – круговая частота колебаний акустического излучателя в жидкой среде, c^{-1} , \mathbf{r} – радиус вектор точки жидкости, м.

После подстановки данных разложений в волновое уравнение (2.28) оно преобразуется уравнения для каждой из гармоник (2.31):

$$\Delta \overline{p}_n + \frac{n^2 \omega^2}{c_0^2} \overline{p}_n = n^2 \omega^2 \rho_0 \overline{\delta}_n; \quad (2.31)$$

При пренебрежении высшими гармониками, волновое уравнение для 1-й гармоники (колебания, создаваемые первичным УЗ воздействием) выглядит следующим образом:

$$\Delta \overline{p}_1 + \frac{\omega^2}{c_0^2} \left(1 - \frac{\rho_0 c_0^2 \overline{\delta}_1}{p_1} \right) \overline{p}_1 = 0; \quad (2.32)$$

Данное уравнение (2.32) сводится к уравнению Гельмгольца, т.е. представимо в следующем виде (2.33):

$$\Delta \overline{p}_1 + (K + iK_*)^2 \overline{p}_1 = 0; \quad (2.33)$$

где K – эффективное волновое число кавитирующей среды, m^{-1} ,

K_* – эффективный коэффициент поглощения в кавитирующей среде, м^{-1} .

При этом эффективный (эквивалентный) коэффициент поглощения в кавитирующей среде определяется на основании следующего выражения, полученного из уравнений (2.32, 2.33):

$$K_* = -\frac{\omega}{c_0} \text{Im} \frac{\rho_0 c_0^2 \bar{\delta}_1}{p_1}; \quad (2.34)$$

Таким образом, коэффициент поглощения (2.34) зависит от комплексной амплитуды звукового давления в кавитирующей среде и комплексной амплитуды объёмного содержания кавитационных пузырьков.

Поскольку наиболее удобной величиной для выбора энергетических характеристик УЗ оборудования является интенсивность УЗ колебаний, то соотношение (2.34) было преобразовано следующим образом (2.35), чтобы выразить коэффициент поглощения через интенсивность, однозначно связанную с комплексной амплитудой звукового давления,

$$K_* = -\frac{\omega}{c_0} \text{Im} \frac{\rho_0 c_0^2 \bar{\delta}_1}{\sqrt{2\rho c I} e^{i\varphi}}; \quad I = \frac{|p_1|^2}{2\rho c}; \quad \bar{p}_1 = |p_1| e^{i\varphi}; \quad (2.35)$$

где I – интенсивность УЗ колебаний, $\text{Вт}/\text{м}^2$, ρ – плотность кавитирующей среды, $\text{кг}/\text{м}^3$, φ – фазовый сдвиг ультразвукового давления \bar{p}_1 , рад.

Комплексная амплитуда объёмного содержания кавитационных пузырьков определяется на основании ранее полученных результатов анализа нижнего и среднего уровня детализации модели. Она вычисляется при помощи прямого преобразования Фурье:

$$\bar{\delta}_1 = \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \frac{4}{3} \pi R^3(t) n_\infty e^{-i\omega t} dt; \quad (2.36)$$

где $R(t)$ – функциональная зависимость радиуса кавитационного пузырька (м) от времени, выявленная на основании анализа нижнего уровня детализации модели, n_∞ – стационарная концентрация кавитационных пузырьков (м^{-3}), выявленная на основании анализа среднего уровня детализации модели (см.

выражение (2.23)).

Далее с использованием (2.35, 2.36) было получено окончательное выражение для коэффициента поглощения в зависимости от режимов УЗ воздействия и данных, ранее полученных на основании анализа нижнего и среднего уровня детализации модели:

$$K_* = -\frac{\omega}{c_0} \operatorname{Im} \frac{\rho_0 c_0^2 \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega}} \frac{4}{3} \pi R^3(t) n_\infty e^{-i\omega t} dt}{(\sqrt{2\rho c l}) e^{i\varphi}}. \quad (2.37)$$

Выражение (2.37) даёт возможность определить эффективный коэффициент поглощения кавитирующей среды, который главным образом обусловлен потерями энергии при схлопывании кавитационных пузырьков. Поэтому максимальное значение коэффициента поглощения при определённой интенсивности УЗ соответствует максимальной эффективности кавитационного воздействия.

Это утверждение справедливо, поскольку физический механизм поглощения ультразвука в кавитирующей жидкости заключается в том, что при падении звуковой волны на одиночный пузырёк последний, совершая вынужденные колебания, частично поглощает звуковую энергию за счёт потерь на вязкость и теплопроводность, и частично переизлучает (рассеивает) падающую на него волну. Если же в среде имеется много пузырьков, то каждый из них находится в поле как падающей, так и рассеянных волн от соседних пузырьков, которые создают поле многократного рассеяния.

В режиме развитой кавитации поле рассеяния имеет широкий спектр, однако на вынужденные колебания отдельного пузырька основное влияние оказывает первая гармоника поля рассеяния от других пузырьков, частота которой совпадает с частотой первичной ультразвуковой волны. При этом комплексная амплитуда первой гармоники поля, рассеиваемого пузырьками, определяется стадией расширения, время протекания которой сопоставимо с периодом первичной ультразвуковой волны, а импульс давления ударной

волны имеет длительность, много меньшую периода первичной УЗ волны, и, следовательно, обладает спектром в области высоких частот (до 20 МГц) [6, 101, 102]. Таким образом, коэффициент поглощения определяется зависимостью радиуса пузырьков от времени в стадии их расширения. С точки зрения закона сохранения энергии коэффициент поглощения – это затраты энергии на совершение работы по расширению пузырьков [101, 102].

Далее эта энергия мгновенно высвобождается в энергию ударной волны, которая переходит в нагрев жидкости, разрушение механических и химических связей, увеличение поверхности раздела и т.д., тем самым осуществляя интенсификацию технологических процессов.

Для выявления связи коэффициента поглощения с удельной мощностью ударных волн была рассмотрена локальная область обрабатываемой среды объёмом $\Delta S \Delta x$ (см. рисунок 2.7).

Из закона сохранения энергии следует, что удельная мощность ударных волн определяется согласно следующему выражению:

$$P_{уд} = \frac{\Delta S \Delta I}{\Delta x \Delta S} = \frac{\Delta S (I - I e^{-K \Delta x})}{\Delta x \Delta S} = \frac{(I - I e^{-K \Delta x})}{\Delta x} = K \frac{I (1 - e^{-K \Delta x})}{K \Delta x} \approx KI, \quad (2.38)$$

где I – интенсивность первичной УЗ волны, Вт/м², ΔI – изменение интенсивности УЗ в результате поглощения, Вт/м², K – коэффициент поглощения, м⁻¹.

Согласно представленному выражению (2.38), удельная энергия ударных волн, создаваемых в единицу времени, равна произведению коэффициента поглощения на интенсивность первичной УЗ волны. Таким образом, коэффициент поглощения фактически пропорционален КПД ультразвуковой кавитации, т.е. отношению полезной энергии, создаваемой в виде ударных волн и необходимой для реализации физико-химических процессов, к энергии вводимых УЗ колебаний.

Это служит обоснованием того факта, что значение коэффициента поглощения может служить мерой эффективности кавитационного

воздействия [83, 104].

На рисунке 2.13 приведены зависимости коэффициента поглощения в кавитирующих жидкостях от интенсивности воздействия для различных по реологическим свойствам гетерогенных сред с жидкой фазой.

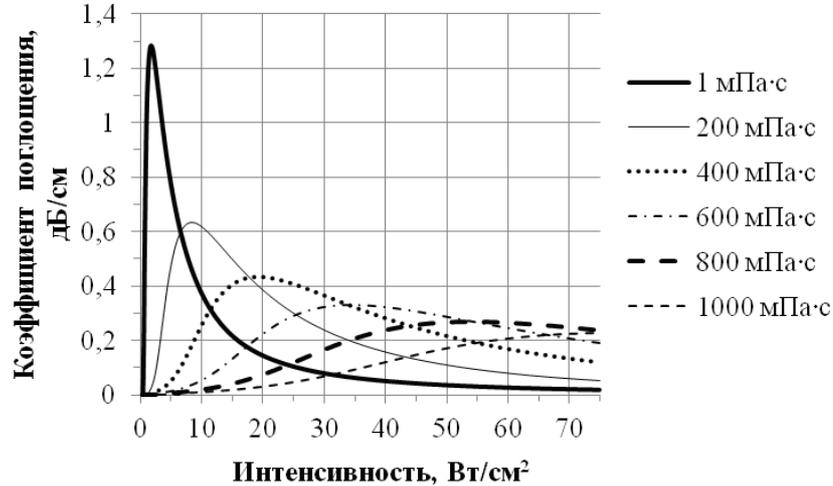
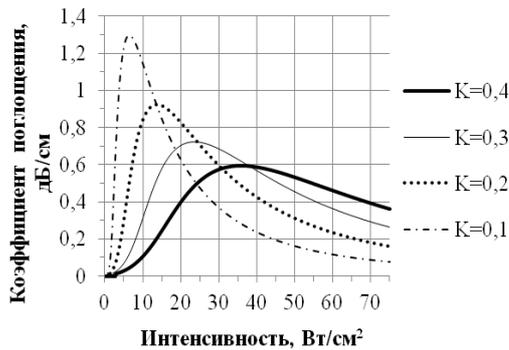
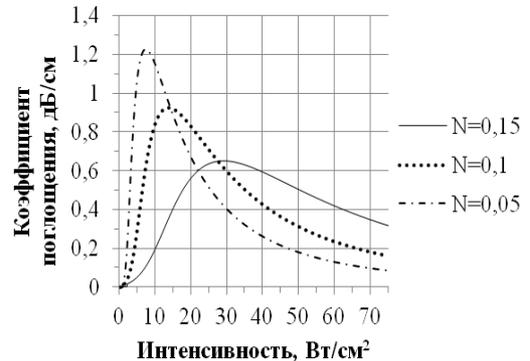


Рисунок 2.13 – Зависимости коэффициента поглощения в кавитирующих жидкостях от интенсивности воздействия для линейно-вязких сред

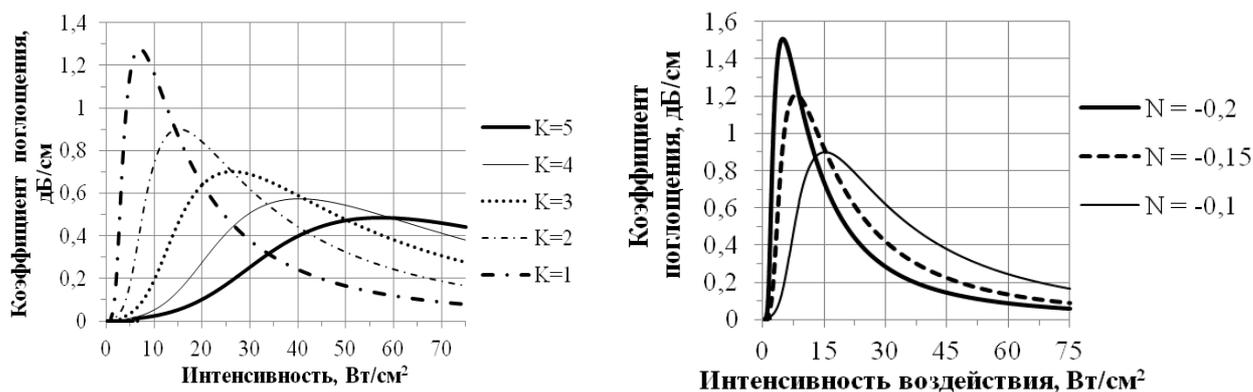


а) при различных показателях консистенции K , $\text{Па}\cdot\text{с}^{N+1}$ (показатель нелинейности $N = 0,1$)



б) при различных показателях нелинейности N (показатель консистенции $K = 0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}^{N+1}$)

Рисунок 2.14 – Зависимости коэффициента поглощения в кавитирующих жидкостях от интенсивности воздействия для дилатантных сред



а) при различных показателях
консистенции K , $\text{Па}\cdot\text{с}^{N+1}$ (показатель
нелинейности $N = -0,1$)

б) при различных показателях
нелинейности N (показатель
консистенции $K = 2 \text{ Па}\cdot\text{с}^{N+1}$)

Рисунок 2.15 – Зависимости коэффициента поглощения в кавитирующих жидкостях от интенсивности воздействия для псевдопластических сред

Полученные зависимости позволяют оценить распределение звукового давления и размеры зон развитой кавитации в технологических объёмах.

Так, согласно приведённым зависимостям, для жидкостей с вязкостью $400 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ при интенсивности вводимых УЗК $20 \text{ Вт}/\text{см}^2$ значение коэффициента поглощения составляет $0,43 \text{ дБ}/\text{см}$ вблизи поверхности. Численные оценки показывают, что уже на расстоянии 5 см от излучателя интенсивность будет значительно ниже и составит $14 \text{ Вт}/\text{см}^2$, что означает снижение эффективности кавитации более чем на 30% и подтверждает ограниченность кавитационной области.

Это подтверждает ограниченность формируемой кавитационной зоны в неньютоновских жидкостях, установленную на основании анализа известных научно-технических результатов в направлении диссертационного исследования, представленного в первом разделе.

Поскольку зависимость коэффициента поглощения от интенсивности воздействия имеет экстремальный характер и положение максимума изменяется в широких пределах, то возникает необходимость в определении оптимальной интенсивности УЗ воздействия, в зависимости от

реологических свойств обрабатываемых сред.

Первоначально были выявлены оптимальные интенсивности для линейно-вязких сред в зависимости от их вязкости (рисунок 2.16).

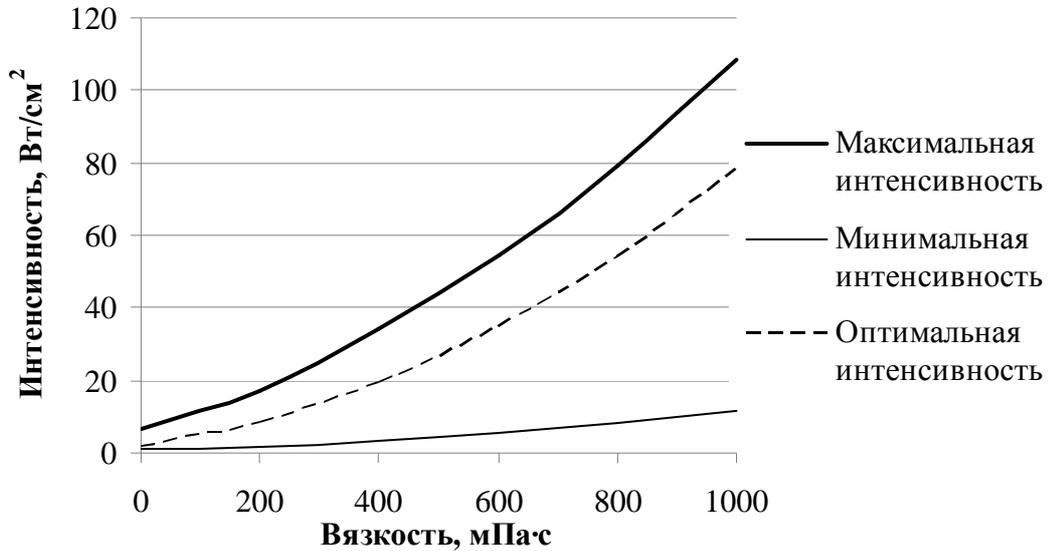


Рисунок 2.16 – Зависимости минимальной, максимальной и оптимальной интенсивностей воздействия для линейно-вязких сред от вязкости

Как следует из представленных зависимостей, оптимальная интенсивность лежит внутри интервала, определённого ранее при анализе динамики одиночного пузырька (рисунок 2.16). Это подтверждает правильность выбранного подхода. В представленных зависимостях наблюдается единая закономерность – интенсивность воздействия, при которой энергетическая эффективность кавитации максимальна, прямо пропорционально увеличивается с ростом вязкости.

Из данных зависимостей следует, что для линейно-вязких сред с вязкостью более 400 мПа·с необходимо осуществлять воздействие с интенсивностью более 25 Вт/см². Однако для гетерогенных сред с вязкостью жидкой фазы 1000 мПа·с требуются интенсивности воздействия свыше 70 Вт/см², при которых, как было отмечено ранее, происходит разрушение материала современных УЗ излучателей.

В случае нелинейно-вязких сред зависимость оптимальной интенсивности от параметров характеризующих их реологические свойства,

представляет собой некоторый диапазон. Это обусловлено изменением их реологических свойств в процессе обработки (рисунки 2.17, 2.18) за счёт релаксации вязкости [61, 105]. Релаксация вязкости заключается в том, что между моментом схлопывания пузырька и началом расширения в следующем периоде колебаний скорость сдвига очень мала, поскольку обусловлена первичной УЗ волной. Однако остаточные изменения вязкости в результате предыдущего цикла расширения и схлопывания сохраняются. В частности, для псевдопластических сред средняя вязкость при обработке снижается (рисунок 2.17).

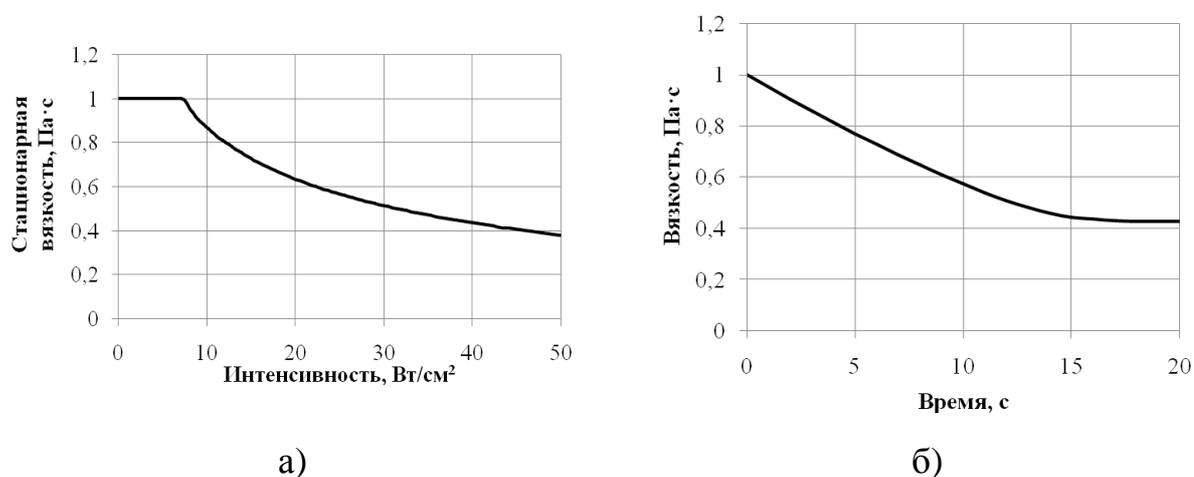
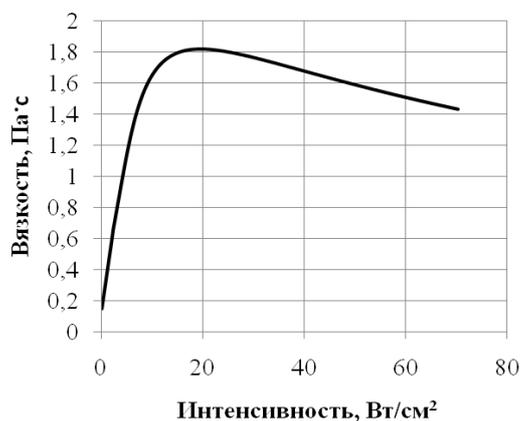


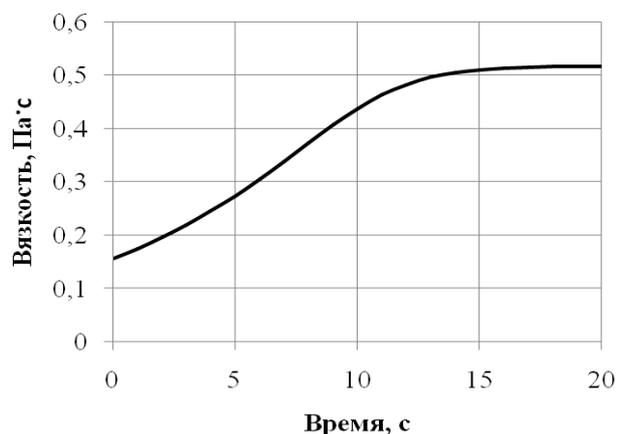
Рисунок 2.17 – Зависимость вязкости обрабатываемой жидкости от интенсивности УЗ воздействия (а) для установившегося режима и времени (б) при интенсивности 42 Вт/см^2 для псевдопластической среды (модельный показатель нелинейности $N = -0,1$, показатель консистенции $K = 2,0 \text{ Па}\cdot\text{с}^{N+1}$, начальная вязкость $\mu = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}$)

Как видно из рисунка 2.16, в результате уменьшения вязкости жидкости может произойти вырождение пузырьков в долгоживущие, поэтому интенсивность УЗ воздействия, необходимо, соответственно снижать через 15...20 с с момента начала воздействия.

А для дилатантных сред, вязкость с течением времени УЗ воздействия, наоборот увеличивается (рисунок 2.18).



а)



б)

Рисунок 2.18 – Зависимость вязкости обрабатываемой жидкости от интенсивности УЗ воздействия (а) и времени (б) для дилатантной жидкости (модельный показатель нелинейности $N = 0,1$, показатель консистенции $K = 0,2 \text{ Па}\cdot\text{с}^{N+1}$)

Для дилатантных сред зависимость вязкости от интенсивности носит экстремальный характер, поскольку при больших интенсивностях пузырьки совершают малые колебания в течение длительного периода времени, более чем 3-кратно превышающего период колебаний первичного ультразвукового поля.

При этом средняя вязкость дилатантных сред достигает стационарного значения через 15...20 с после начала УЗ воздействия, как и для псевдопластических.

На следующем рисунке 2.19 приведены установленные зависимости диапазона оптимальных интенсивностей от реологических свойств псевдопластических сред, а на рисунке 2.20 – для дилатантных.

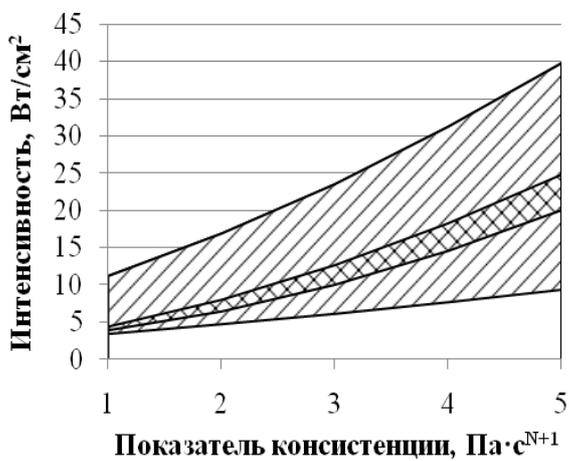
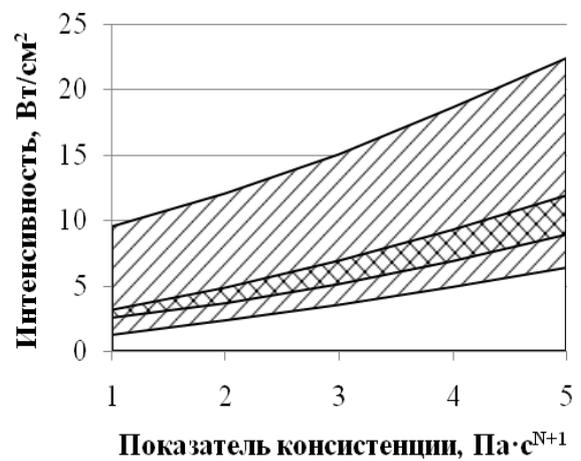
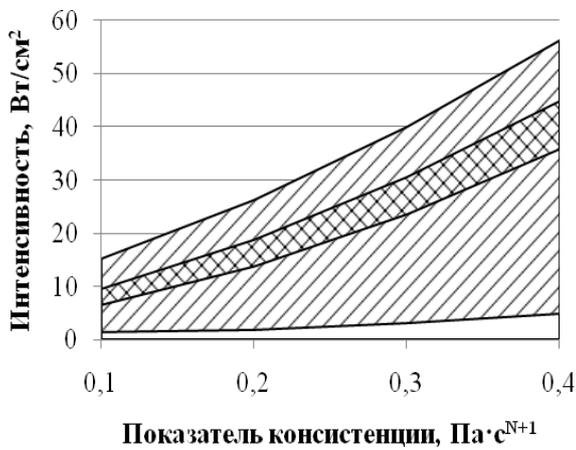
а) $N = -0,1$ б) $N = -0,15$ в) $N = -0,2$

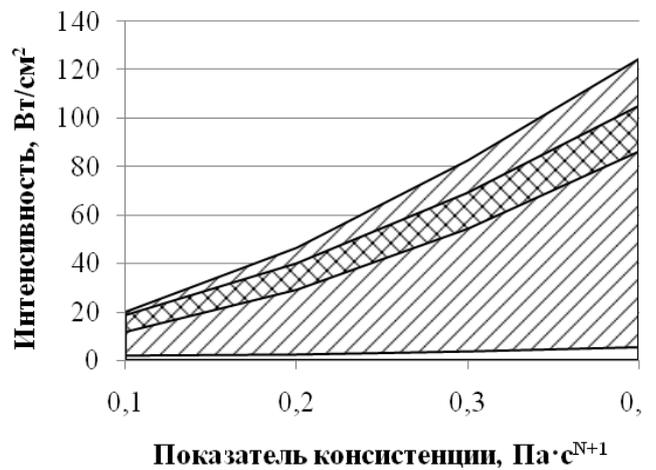
Рисунок 2.19 – Зависимости граничных интенсивностей от показателя консистенции при различных показателях нелинейности для псевдопластических сред (начальная вязкость 1 Па·с)



а) $N = 0,05$



а) $N = 0,1$



в) $N = 0,15$

Рисунок 2.20– Зависимости граничных интенсивностей от показателя консистенции при различных показателях нелинейности для дилатантных сред (начальная вязкость 100 мПа·с)

Согласно рисункам 2.19-2.20 интенсивности воздействия, при которых возникает развитая кавитация находятся в области с перекрёстной

штриховкой. Данной области соответствует диапазон интенсивностей, в котором оптимальная интенсивность изменяется с течением времени за счёт релаксации вязкости.

Согласно представленным зависимостям, границы данного диапазона не превышают 40 Вт/см^2 для большинства жидкостей, и только для дилатантных жидкостей с показателем нелинейности 0,15 и более может достигать 100 Вт/см^2 . При этом ширина диапазона изменения значения оптимальной интенсивности (за счет изменения вязкости жидкости в процессе обработки) достигает 20 Вт/см^2 .

Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о необходимости непрерывного контроля реологических свойств обрабатываемых жидкостей в процессе обработки и автоматического дозирования энергии ультразвукового воздействия.

В таблице 2.1 приведены значения оптимальных интенсивностей воздействия для различных сред, используемых на практике. Указанные в таблице значения получены с использованием зависимостей, приведенных на рисунках 2.16, 2.19, 2.20.

Таблица 2.1 – Значения оптимальных интенсивностей воздействия для гетерогенных сред с жидкой фазой, используемых на практике

Наименование жидкости	Начальная вязкость, Па·с	$K, \text{ Па} \cdot \text{с}^{N+1}$	N	Оптимальная интенсивность, Вт/см^2
Вода	0,00082	0	0	1,73
Оливковое масло	0,085	0	0	4,51
Моторное масло ПМС-400	0,4	0	0	19,25
Глицерин	0,6	0	0	34,4
Эпоксидная смола ЭД-5	3	5	-0,15	19,95...24,77
Трехфункциональный олигоэфирциклокарбонат на основе окиси пропилена	4	5	-0,2	11,92...23,4
Водоугольная суспензия (массовая концентрация 20%)	0,1	0,1	0,1	13,74...18,74

Представленные результаты могут быть в непосредственном виде

использованы для определения интенсивности УЗ колебаний, необходимой для обеспечения наибольшей совокупной мощности кавитационных ударных волн в объёме, т.е. для определения оптимальной интенсивности. Как было отмечено ранее, для неньютоновских сред, начальная вязкость на оптимальные режимы воздействия существенного влияния не оказывает. Поэтому если обрабатываемая среда линейно-вязкая, то необходимо знать вязкость этой среды, однако если среда дилатантная или псевдопластическая, то достаточно знать её показатели консистенции и нелинейности.

Таким образом, разработана феноменологическая модель возникновения и эволюции кавитационной области, рассматривающая кавитационную область как единое целое, но с учётом эффектов и явлений, происходящих внутри самой области. Среди учитываемых эффектов следует выделить: коалесценцию и дробление пузырьков при их взаимодействии между собой, влияние радиальных колебаний пузырька на изменение вязкости среды, которая зависит от скорости сдвига для неньютоновских сред.

В разработанной модели выделены три уровня детализации, начиная с нижнего уровня, рассматривающего динамику отдельного кавитационного пузырька, и заканчивая верхним, рассматривающего формирование целой кавитационной области в технологических объёмах с учётом влияния кавитации на распространение УЗ колебаний в жидкой среде. При этом средний уровень (между нижним и верхним) рассматривает формирование ансамбля кавитационных пузырьков в локальной области, размеры которой малы по сравнению с длиной УЗ волны, и позволяет выявить макроскопические характеристики кавитирующей среды (счётная концентрация и объёмное содержание пузырьков, коэффициент поглощения УЗ волн и т. д.).

Анализ нижнего и среднего уровня детализации разработанной модели позволил установить следующее:

- для наиболее распространённых на практике сред (с начальной

вязкостью не более 1 Па·с) пороговая интенсивность, требуемая для возникновения схлопывания пузырьков не превышает 10 Вт/см², однако для отдельных сред с вязкостью свыше 4 Па·с пороговая интенсивность может превышать 100 Вт/см²;

– для каждой гетерогенной среды с жидкой фазой существуют максимально допустимые интенсивности УЗ воздействия, при которых кавитационные пузырьки перестают схлопываться и начинают вырождаться в долгоживущие;

– существуют оптимальные интенсивности УЗ воздействия, при которых удельная мощность ударных волн (при схлопывании кавитационных пузырьков) максимальна; например, для гетерогенных сред с вязкостью жидкой фазы до 0,4 Па·с оптимальные интенсивности, составляют от 1,6 до 20 Вт/см², а для жидкостей с вязкостью свыше 0,4 Па·с – от 20 до 80 Вт/см². При этом для нелинейно-вязких сред оптимальные интенсивности воздействия изменяются в пределах некоторого диапазона шириной до 20 Вт/см² с течением времени обработки за счёт релаксации вязкости.

Полученные результаты используются в дальнейшем для анализа формирования кавитационных зон в технологических камерах и выявления оптимальных условий воздействия, представленного в следующем разделе диссертационной работы.

3 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ КАВИТАЦИОННЫХ ЗОН В ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕДАХ С ВЫСОКОВЯЗКОЙ И НЕНЬЮТОНОВСКОЙ ЖИДКОЙ ФАЗОЙ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ В РАЗЛИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЁМАХ

Полученные в предыдущем разделе результаты позволяют установить оптимальные режимы ультразвукового воздействия для формирования кавитационной области в различных по свойствам гетерогенных средах с жидкой фазой и определить требования по мощности УЗ технологического оборудования для воздействия на неньютоновские и высоковязкие среды.

Однако, выявление режимов ультразвукового воздействия, при которых возникает кавитация, не позволяет решить задачу промышленного применения УЗ аппаратов для обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред, поскольку формируемая при этом кавитационная область имеет малый объём и сосредоточена в непосредственной близости от излучателя [74, 106].

Поэтому необходим поиск условий УЗ воздействия на объём обрабатываемой среды, позволяющих формировать кавитационную область максимально возможного размера за счёт обеспечения резонансного режима распространения УЗ колебаний.

Поскольку полученные во втором разделе результаты позволяют проанализировать всего лишь локальное формирование кавитационных пузырьков в области с характерными размерами, много меньшими длины УЗ волны, необходимо масштабирование феноменологической модели формирования кавитационной области на весь объём обрабатываемой жидкости. Это позволит установить суммарный объём и форму кавитационной области и определить размеры и форму технологического объема (т.е. условия воздействия) для заданной формы УЗ излучателя,

обеспечивающие формирование кавитационной области наибольших размеров.

Выявление оптимальных условий воздействия осуществляется в рамках верхнего уровня детализации феноменологической модели формирования кавитационной области, подробно рассмотренного далее.

3.1 Определение размеров формируемой кавитационной области

Верхний уровень детализации модели формирования кавитационной области основывается на уравнении для интенсивности УЗ колебаний в кавитирующей среде, полученного на основании волнового уравнения для звукового давления, представленного в разделе 2 (2.32):

$$\Delta(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})}) + \frac{\omega^2}{c_0^2} \left(1 - \frac{\rho_0 c_0^2 \overline{\delta_1}(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})})}{\sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})}} \right) \sqrt{2\rho c I(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})} = 0, \quad (3.1)$$

где I – интенсивность УЗ колебаний (действительная величина), Вт/м³, φ – фазовый сдвиг колебаний звукового давления в среде, ω – круговая частота первичного УЗ поля, с⁻¹, c_0 – скорость звука в жидкой фазе, м/с, ρ_0 – равновесная плотность жидкой фазы, кг/м³, ρ – плотность кавитирующей жидкости, кг/м³, c – скорость звука в кавитирующей жидкой фазе, м/с, $\overline{\delta_1}(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{r})}e^{i\varphi(\mathbf{r})})$ – комплексная амплитуда первой гармоники объёмного содержания кавитационных пузырьков $\delta(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{r})}e^{i\varphi(\mathbf{r})}, t)$ как функции от времени t при заданной интенсивности УЗ колебаний $I(\mathbf{r})$, \mathbf{x} – радиус-вектор точки жидкой фазы, м.

Основное отличие уравнения (3.1) от известного уравнения Гельмгольца для сплошной среды заключается в том, что учитывается влияние кавитационных пузырьков на коэффициент поглощения УЗ волны и скорость звука в среде путём введения комплексной амплитуды $\overline{\delta_1}(\sqrt{2\rho c I(\mathbf{r})}e^{i\varphi(\mathbf{r})})$ изменения объёмного содержания кавитационных пузырьков относительно его среднего значения.

Для выявления распределения интенсивности УЗ колебаний и кавитационных зон данное волновое уравнение решается с учётом граничных условий на излучающей поверхности (3.2):

$$\left(\nabla\left(\sqrt{2\rho cI(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})}\right), \mathbf{n}\right) = -\rho_0\omega^2 A_n(\mathbf{x}), \quad (3.2)$$

где \mathbf{n} – вектор внешней нормали к области обрабатываемой среды, $A_n(\mathbf{x})$ – амплитуда нормальных колебаний излучающей поверхности вблизи точки в области жидкости с координатой \mathbf{x} , м.

и на отражающей поверхности (стенке технологического объёма) (3.3)

$$\left(\nabla\left(\sqrt{2\rho cI(\mathbf{x})}e^{i\varphi(\mathbf{x})}\right), \mathbf{n}\right) = 0. \quad (3.3)$$

Поскольку объёмное содержание пузырьков в определённой точке области напрямую связано с интенсивностью УЗ колебаний в жидкости, то найденное распределение интенсивностей позволяет однозначно установить распределение кавитационных зон, соответствующих следующим режимам:

1) в *режиме отсутствия кавитации* схлопывания пузырьков не происходит и интенсивность УЗ колебаний меньше определённого значения I_1 , где I_1 – минимальная интенсивность, при которой начинается схлопывание пузырьков, различная для каждой рассматриваемой гетерогенной среды с жидкой фазой;

2) в *режиме зарождающейся кавитации* интенсивность УЗ колебаний лежит в диапазоне $I_1 \leq I \leq I_2$, I_2 – пороговая интенсивность для рассматриваемой жидкости, при которой возникает режим развитой кавитации; в этом режиме схлопывание пузырьков происходит с малыми амплитудами давления ударной волны (не более $20 \cdot 10^5$ Па) при малом максимальном радиусе ($R_{MAX} < 80 \dots 120$ мкм);

3) в *режиме развитой кавитации* схлопывание пузырьков происходит с максимальными амплитудами давления ударных волн ($20 \cdot 10^5 \dots 80 \cdot 10^5$ Па); при этом физико-химические процессы в жидких средах, интенсифицируемые под воздействием УЗ колебаний, протекают наиболее эффективно [108–111]; в качестве критерия режима развитой кавитации в

диссертационной работе принято наличие разрушения алюминиевой фольги толщиной 9 мкм под воздействием кавитационных ударных волн [111]; для достижения режима развитой кавитации интенсивность УЗ колебаний I должна лежать в диапазоне $I_2 \leq I \leq I_3$, и максимальный радиус пузырька, достигаемый в стадии расширения при развитой кавитации, как правило, лежит в диапазоне 120...180 мкм;

4) в *режиме вырождающейся кавитации* мощность ударных волн, образуемых при схлопывании пузырьков, существенно снижена по сравнению с режимом развитой кавитации, и пузырьки, как правило, совершают радиальные колебания без схлопывания в течение 2-х периодов и более с момента начального расширения, для достижения режима вырождающейся кавитации интенсивность УЗ колебаний должна лежать в диапазоне $I_3 \leq I \leq I_4$.

5) в *режиме вырожденной кавитации* схлопывание пузырьков отсутствует, и они совершают малые радиальные колебания в окрестности достаточно большого радиуса (не менее 300 мкм) без схлопывания в течение нескольких периодов с момента начального расширения, этот режим реализуется при интенсивности I , превышающей I_4 .

Значения I_2 и I_3 , в диапазоне которых (от I_2 до I_3) происходит разрушение алюминиевой фольги и реализуется режим развитой кавитации, определяются с использованием результатов исследований, приведённых в работе [100].

Значения интенсивностей I_1 и I_4 , в диапазоне которых ($I_1 \leq I \leq I_4$) возникает схлопывание пузырьков, определяются на основании анализа среднего уровня детализации модели, описанного в разделе 2, из зависимостей, приведенных на рисунках 2.15, 2.18, 2.19.

Задача повышения эффективности ультразвуковой кавитационной обработки жидких сред сводится к максимизации суммарного объёма зон развитой кавитации, в котором $I_2 \leq I \leq I_3$, путём установления оптимальных геометрических параметров технологического объёма, т.е.

$$\int_{\Omega} \theta(I(\mathbf{x}) - I_2) \theta(I_3 - I(\mathbf{x})) \rightarrow \max, \quad (3.4)$$

где Ω – область обрабатываемой среды, θ – функция Хэвисайда, определяемая как (3.5)

$$\theta(x) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ 1, & x \geq 0 \end{cases}. \quad (3.5)$$

Первоначально анализ представленной модели проводится для случая использования рабочих инструментов поршневого типа (рисунок 3.1) [8, 98, 99] диаметром 40 мм.

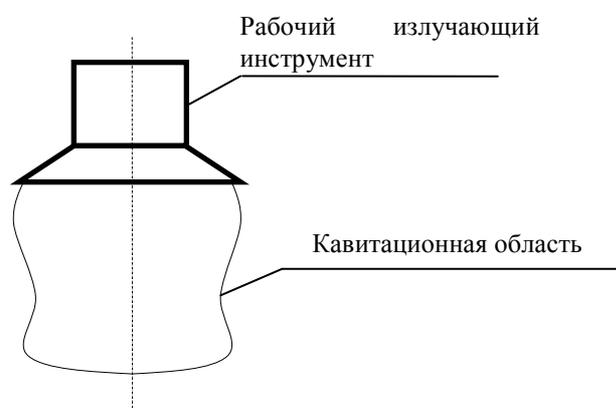


Рисунок 3.1 – Кавитационная область при воздействии с помощью поршневого УЗ рабочего инструмента

Моделирование распространения УЗ колебаний и формирования кавитационных зон осуществлялось в среде COMSOL MultiPhysics, в которую были встроены программные фрагменты на языке JavaScript для расчёта акустических свойств обрабатываемой среды в зависимости от интенсивности УЗ колебаний, с заданной геометрией рабочего инструмента (излучателя) ультразвуковой колебательной системы (УЗКС).

3.2 Выявление условий, обеспечивающих формирование кавитационной области максимального объема при использовании рабочих инструментов поршневого типа

При выявлении оптимальных условий формирования кавитационной области с использованием поршневого рабочего инструмента рассматриваются два случая:

- 1) объём обрабатываемой среды неограничен, и ультразвуковые колебания распространяются на бесконечное расстояние;
- 2) обрабатываемая среда ограничивается отражающей стенкой, которая приводит к отражению первичной УЗ волны и взаимному усилению падающей и отраженных волн [107].

Далее приведены распределения кавитационных зон в неограниченных технологических объёмах при излучении ультразвуковых колебаний с помощью поршневого рабочего инструмента в гетерогенные среды с жидкими фазами различных вязкостей:

- вода (вязкость 1 мПа·с) (рисунок 3.2);
- масло (вязкость 100 мПа·с) (рисунок 3.3);
- эпоксидная смола ЭД-2 (начальная вязкость 1000 мПа·с, показатель консистенции $K = 1 \text{ Па} \cdot \text{с}^{N+1}$, показатель нелинейности $N = -0,1$) (рисунок 3.5).

 – зона отсутствия кавитации
  – зона зарождающейся кавитации
  – зона развитой кавитации

 – зона вырождающейся кавитации
  – зона вырожденной кавитации

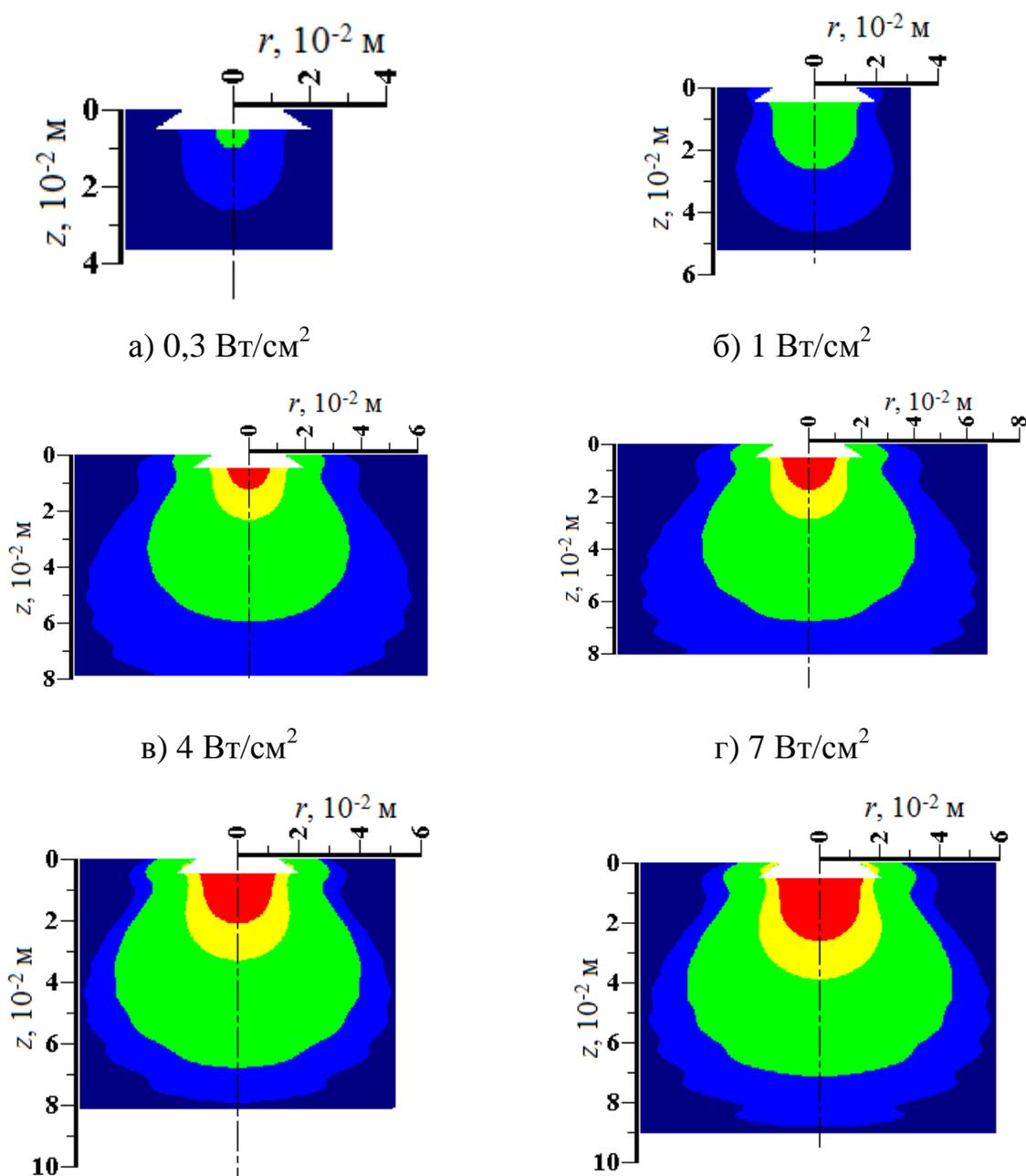


Рисунок 3.2 – Распределения кавитационных зон в гетерогенной среде с жидкой фазой вязкостью $1 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ (вода) для различных интенсивностей УЗ колебаний

(r – расстояние от акустической оси, z – протяжённость кавитационной зоны)

Как следует из представленного рисунка 3.2, с ростом интенсивности воздействия происходит увеличение протяжённости зоны развитой кавитации вдоль оси симметрии излучателя. При этом, начиная с интенсивности около 4 Вт/см^2 (рисунок 3.2в) происходит образование зоны вырожденной кавитации, которая пока ещё имеет малую протяжённость. Дальнейшее увеличение интенсивности приводит и к увеличению зоны вырожденной кавитации, однако увеличение зоны развитой кавитации прекращается. Это означает снижение КПД ультразвукового технологического оборудования при воздействии с интенсивностями, превышающими оптимальные, которые были установлены в разделе 2 работы.

Согласно представленному рисунку 3.2 даже для воды зона развитой кавитации ограничена протяжённостью не более 7 см. Это свидетельствует о том, что одновременно обрабатываемый объём воды не может превышать 0,15 л при использовании поршневого рабочего инструмента (при допущении отсутствия перемешивания обрабатываемой среды).

Указанный факт обусловлен тем, что ввиду образования зоны вырожденной кавитации волновое сопротивление жидкости вблизи излучателя значительно уменьшается, поэтому рост усреднённого звукового давления в жидкости замедляется при увеличении амплитуды колебаний рабочего инструмента.

Как показано на следующих рисунках 3.3-3.5 для жидкостей с более высокими значениями вязкости протяжённость кавитационной зоны уменьшается в 1,5-2 раза при увеличении интенсивностей воздействия (и, следовательно, потребляемой мощности УЗ технологического аппарата) в несколько раз.

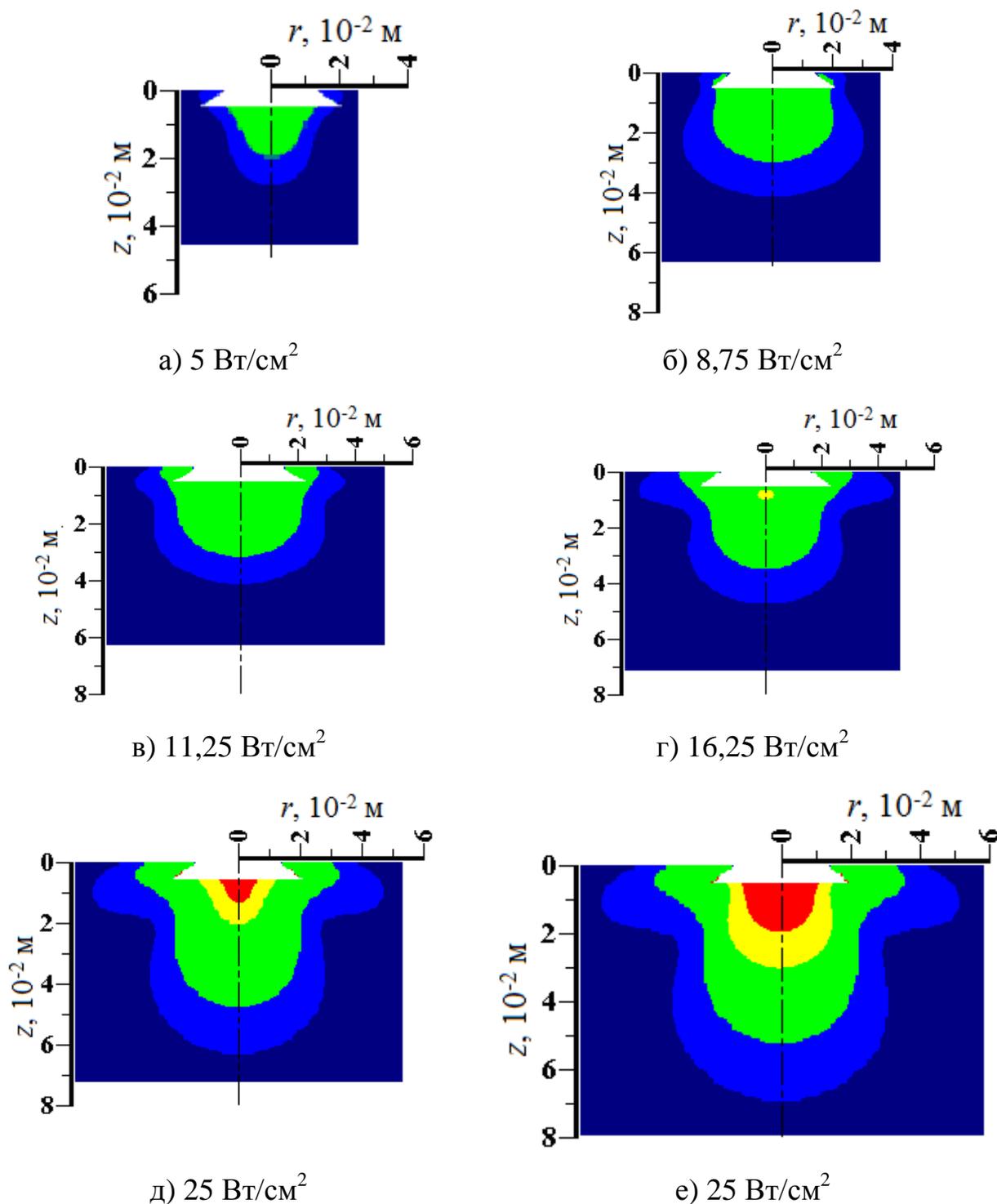


Рисунок 3.3 – Распределения кавитационных зон в жидкости с вязкостью $100 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ для различных интенсивностей УЗ колебаний (r – расстояние от акустической оси, z – протяжённость кавитационной зоны)

Согласно представленному рисунку 3.3 протяжённость зоны развитой кавитации для масла меньше, чем для воды (маловязкой жидкости). Из рисунков 3.3д,е следует, что даже многократном повышении интенсивности

УЗ воздействия до 40 Вт/см^2 по сравнению с оптимальной ($6,1 \text{ Вт/см}^2$), установленной во втором разделе, протяжённость зоны развитой кавитации в жидкости с вязкостью $100 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ не превышает $5,5 \text{ см}$. Более того, из рисунка 3.3е следует, что при интенсивности воздействия, начиная с 40 Вт/см^2 наблюдается уменьшение зоны развитой кавитации в объёме. Указанный фактор подтверждает исчерпанность подхода к увеличению объёма формируемой зоны развитой кавитации, заключающегося в повышении интенсивности первичного УЗ воздействия.

На рисунке 3.4 показана зависимость объёма кавитационных зон (развитой и вырожденной кавитации) от интенсивности первичного УЗ воздействия (излучатель диаметром 40 мм) для гетерогенной среды с жидкой фазой начальной вязкости $100 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

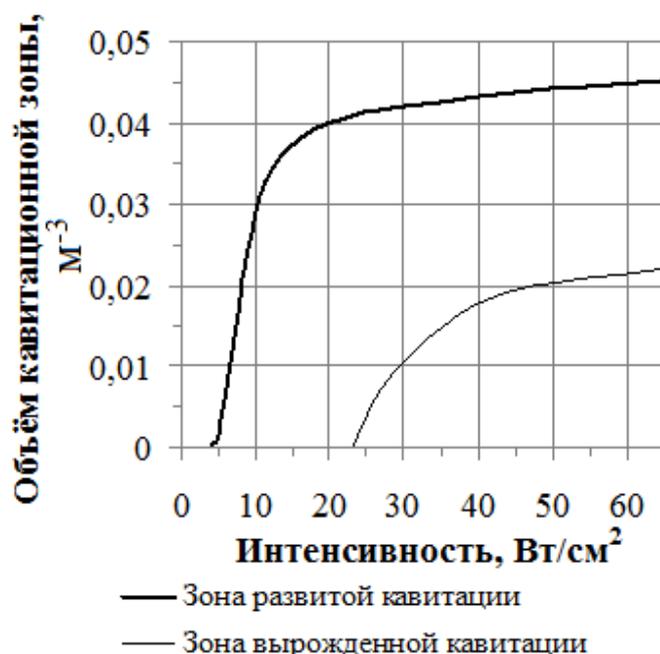


Рисунок 3.4 – Зависимость объёма кавитационной зоны от интенсивности воздействия (диаметр излучателя $0,04 \text{ м}$)

Полученные зависимости (рисунок 3.4) подтверждают ограниченность кавитационной зоны в окрестности излучателя и позволяют установить предельное значение объёма зоны развитой кавитации, которое для жидкости с вязкостью $100 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ не превышает 50 мл .

На рисунке 3.5 приведены распределения кавитационных зон для эпоксидной смолы ЭД-2, имеющей начальную вязкость $1000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$.

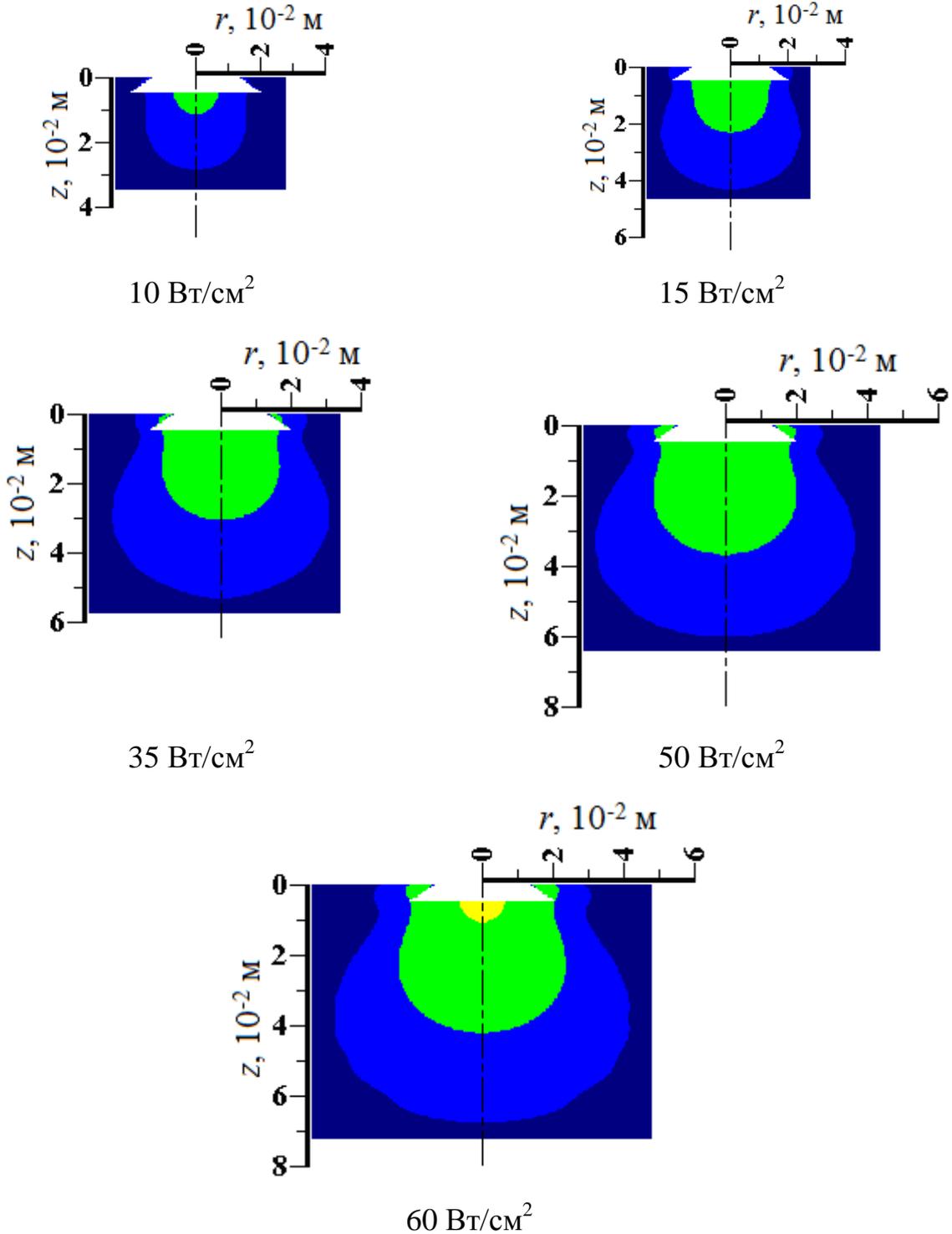


Рисунок 3.5 – Распределения кавитационных зон в гетерогенной среде с начальной вязкостью жидкой фазы $1000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ (показатель консистенции $K = 1 \text{ Па}\cdot\text{с}^{N+1}$, $N = -0,15$) для различных интенсивностей УЗ колебаний (r – расстояние от акустической оси, z – протяжённость кавитационной зоны)

Как следует из представленных рисунков, для достижения протяжённости зоны развитой кавитации 4 см в эпоксидной смоле требуются значительно более высокие интенсивности воздействия (до 60 Вт/см^2), чем для масла.

Распределения кавитационных зон, приведённые на рисунке 3.5 были получены для начального момента времени, когда вязкость эпоксидной смолы при нулевой скорости сдвига составляет $1000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$. Однако как было показано в предыдущем разделе, реологические свойства неньютоновских жидкостей изменяются с течением времени обработки. Это приводит к изменению размеров кавитационных зон, как показано на рисунке 3.6.

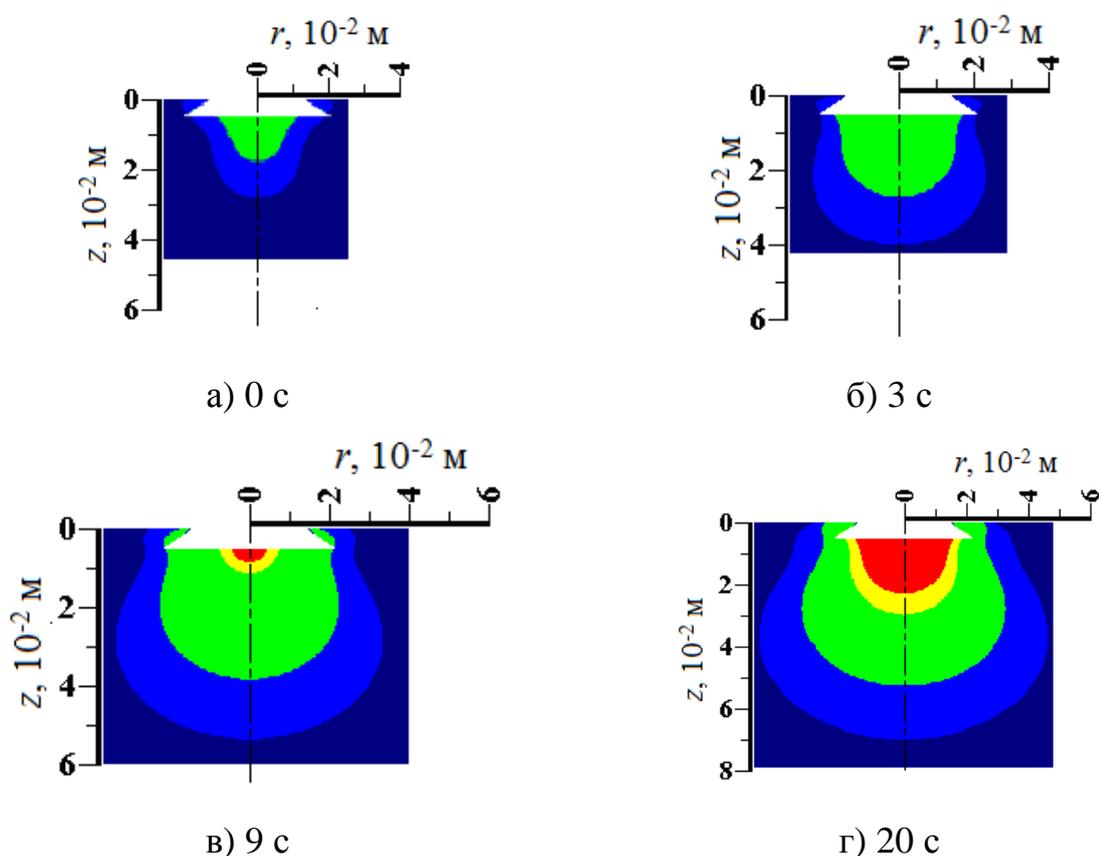


Рисунок 3.6 – Распределение кавитационных зон в псевдопластической среде (показатель консистенции $1 \text{ Па}\cdot\text{с}^{N+1}$, показатель нелинейности $N = -0,15$, начальная вязкость $1000 \text{ мПа}\cdot\text{с}$) в различные моменты времени при постоянной интенсивности воздействия 20 Вт/см^2 (r – расстояние от акустической оси, z – протяжённость кавитационной зоны)

Как следует из представленного рисунка, для псевдопластических жидкостей происходит постепенное увеличение размеров кавитационной зоны с течением времени, это обусловлено снижением вязкости жидкости за счёт релаксации. Поскольку, согласно рисунку 3.6 начиная с 20-й секунды размер зоны вырожденной кавитации становится сопоставимым с диаметром излучателя, а увеличение размера зоны развитой кавитации прекращается, необходимо уменьшать интенсивность воздействия во избежание снижения КПД УЗ технологического аппарата.

На рисунке 3.7 приведены распределения кавитационных зон для дилатантной среде в различные моменты времени.

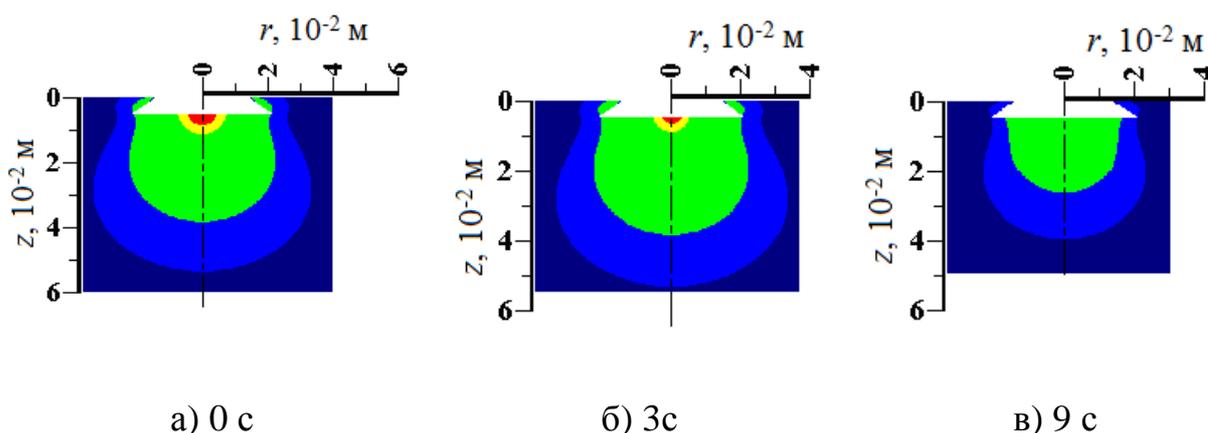
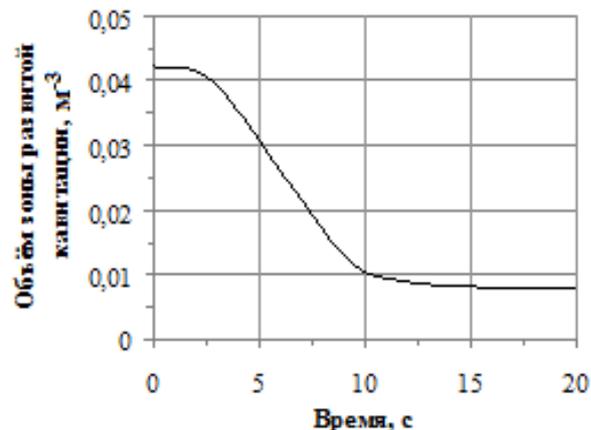
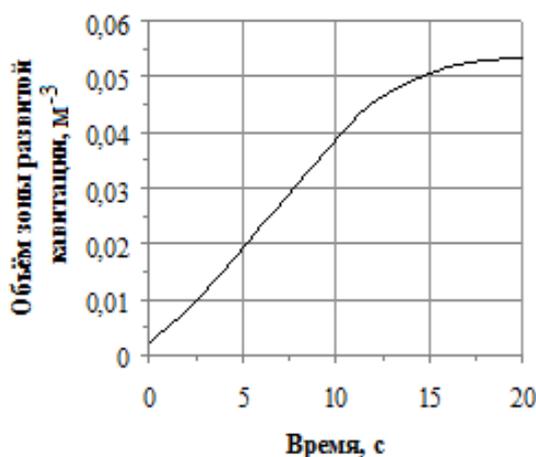


Рисунок 3.7 – Распределение кавитационных зон в дилатантной среде (показатель консистенции $0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}^{N+1}$, показатель нелинейности $N = 0,1$, начальная вязкость – $0,1 \text{ Па}\cdot\text{с}$) в различные моменты времени при постоянной интенсивности воздействия 10 Вт/см^2 (r – расстояние от акустической оси, z – протяжённость кавитационной зоны)

Согласно рисунку 3.7 для дилатантных жидкостей при начальном образовании зон вырожденной кавитации (рисунок 3.7а) происходит постепенное уменьшение их объёма (рисунок 3.7б), это обусловлено возрастанием вязкости среде с течением времени. Возрастание вязкости

приводит к тому, что со временем начинает уменьшаться и объём зон развитой кавитации (рисунок 3.7в), поэтому интенсивность воздействия в дальнейшем необходимо увеличивать, либо осуществлять перемешивание обрабатываемой среды.

На рисунке 3.8 приведены зависимости объёма зоны развитой кавитации от времени для псевдопластической (рисунок 3.8а) и дилатантной (рисунок 3.8б) среды, соответственно.



а) для псевдопластической среды (а)
(показатель консистенции $1 \text{ Па} \cdot \text{с}^{N+1}$,
показатель нелинейности $N = -0,1$,
начальная вязкость $1 \text{ Па} \cdot \text{с}$) при
постоянной интенсивности
воздействия 30 Вт/см^2

б) дилатантной среды (б)
(показатель консистенции
 $0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}^{N+1}$, показатель
нелинейности $N = 0,1$, начальная
вязкость – $0,1 \text{ Па} \cdot \text{с}$) при
постоянной интенсивности
воздействия 10 Вт/см^2

Рисунок 3.8 – Зависимости объёма зоны развитой кавитации от времени

Поскольку размеры кавитационной области ограничены, а увеличение интенсивности воздействия не приводит к их возрастанию (в ряде случаев наблюдается даже уменьшение размера кавитационной области, из-за появления зоны вырожденной кавитации), то необходимо создавать условия для оптимального распределения УЗ давления, например путем создания рабочих объёмов с отражающими поверхностями (рисунок 3.9).

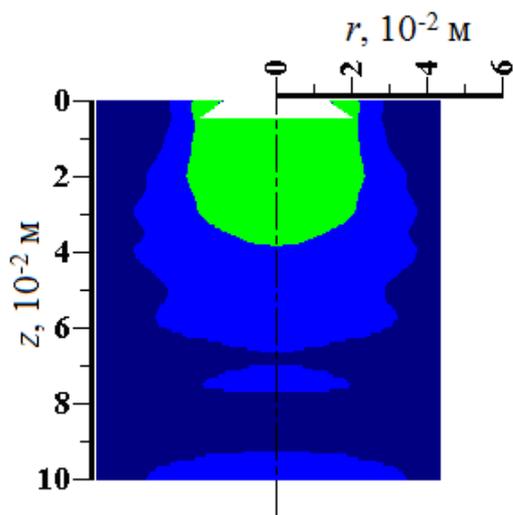
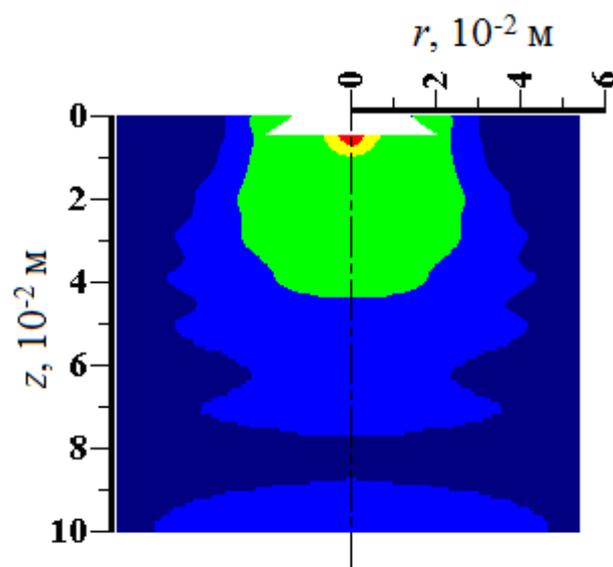
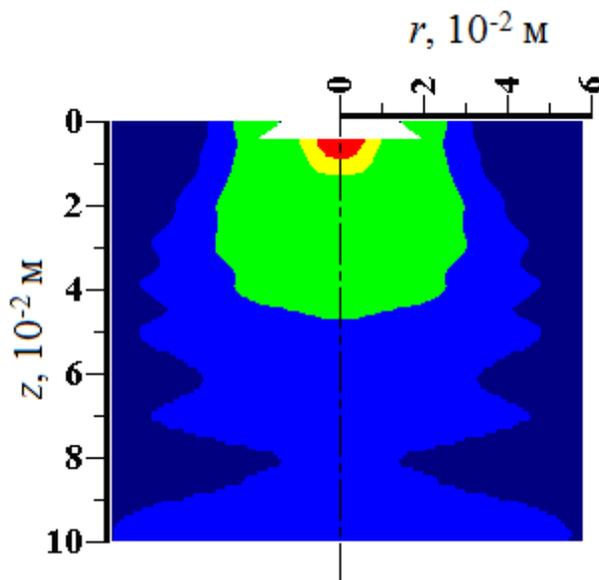
а) 5 Вт/см²б) 11,25 Вт/см²в) 16,25 Вт/см²

Рисунок 3.9 – Распределения кавитационных зон в ограниченном объёме при различных интенсивностях УЗ воздействия (линейно-вязкая среда с вязкостью 100 мПа·с)

(r – расстояние от акустической оси, z – протяжённость кавитационной зоны)

Как следует из представленного рисунка, кавитационная зона при наличии отражающей стенки увеличивается на расстояние, большее чем на

0,5 см, и значительно увеличивается по ширине (в 1,2...1,3 раза), что свидетельствует о возможности увеличения одновременно обрабатываемого технологического объёма в 1,3...1,4 раза.

Установлено, что уже при интенсивности 5 Вт/см^2 объём зоны развитой кавитации при наличии отражающей границы достигает 0,055 л, в то время как в неограниченном объёме размер зоны развитой кавитации ничтожно мал (не более 0,005 л).

На следующем рисунке 3.10 приведена зависимость объёма зоны развитой кавитации от расстояния между излучателем и отражающей поверхностью для интенсивности воздействия $11,25 \text{ Вт/см}^2$, начиная с которой увеличение объёма зоны развитой кавитации в неограниченном объёме обрабатываемой среды практически не происходит.

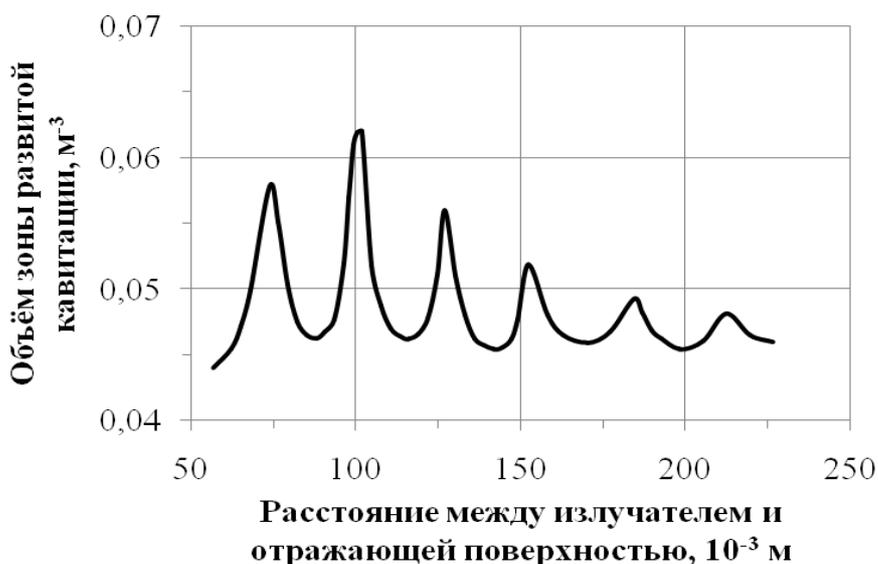


Рисунок 3.10 – Зависимость объёма зоны развитой кавитации от расстояния между излучателем и отражающей поверхностью

Представленная зависимость (рисунок 3.10) свидетельствует о наличии оптимального расстояния между излучателем и отражающей поверхностью, которое для жидкости с вязкостью $100 \text{ мПа}\cdot\text{с}$ составляет 100 мм.

На рисунках 3.11-3.12 приведены зависимости оптимального расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей, при

котором объём зоны развитой кавитации максимален, от показателей, характеризующих реологические свойства сред (при использовании оптимальной интенсивности).

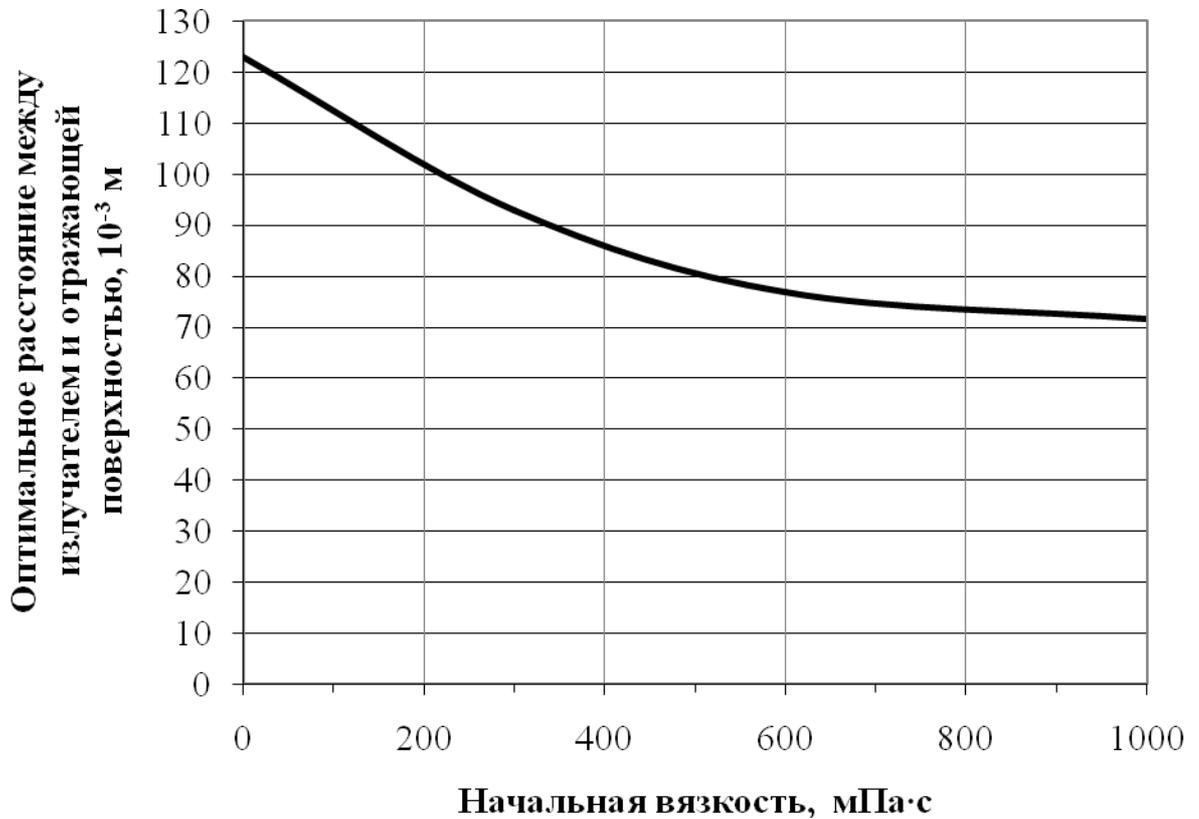
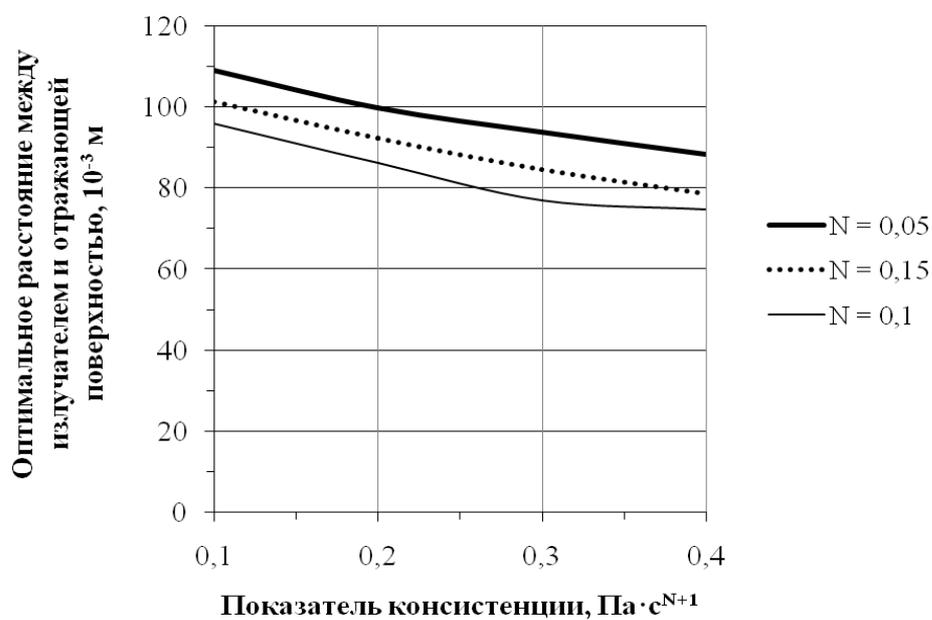
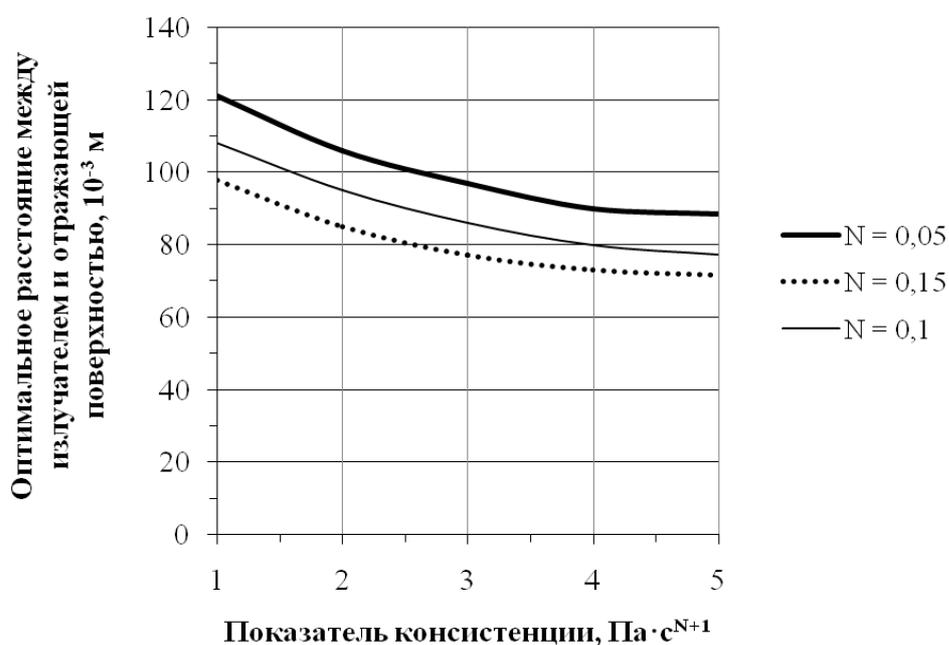


Рисунок 3.11 – Зависимость оптимального расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей в оптимальном объёме от вязкости для линейно-вязких сред



а) для дилатантных



б) для псевдопластических

Рисунок 3.12 – Зависимость оптимального расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей в оптимальном объеме от показателя консистенции при различных показателях нелинейности для нелинейно-вязких сред

На следующих рисунках 3.13-3.15 приведены зависимости объёма зоны развитой кавитации от показателей, характеризующих реологические свойства жидкости, как при отсутствии, так при наличии отражающей поверхности на оптимальном расстоянии от излучателя, различном для каждой конкретной среды (рисунки 3.11-3.12).

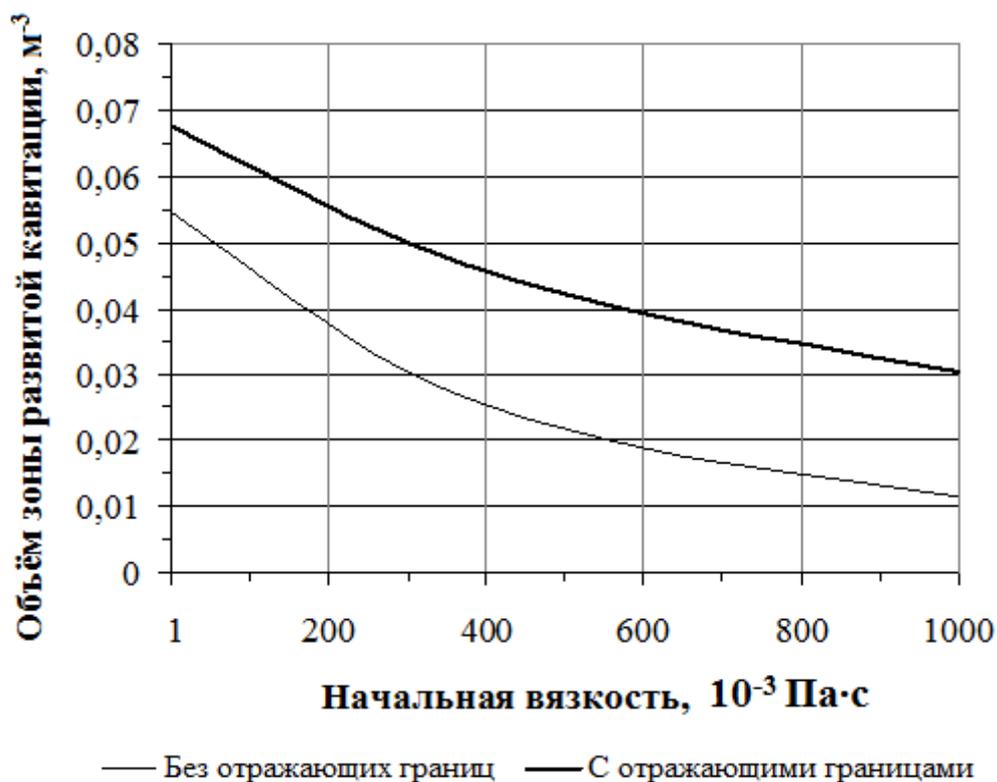


Рисунок 3.13 – Зависимости объёма зоны развитой кавитации от начальной вязкости для линейно-вязких сред при отсутствии отражающей поверхности и при её наличии

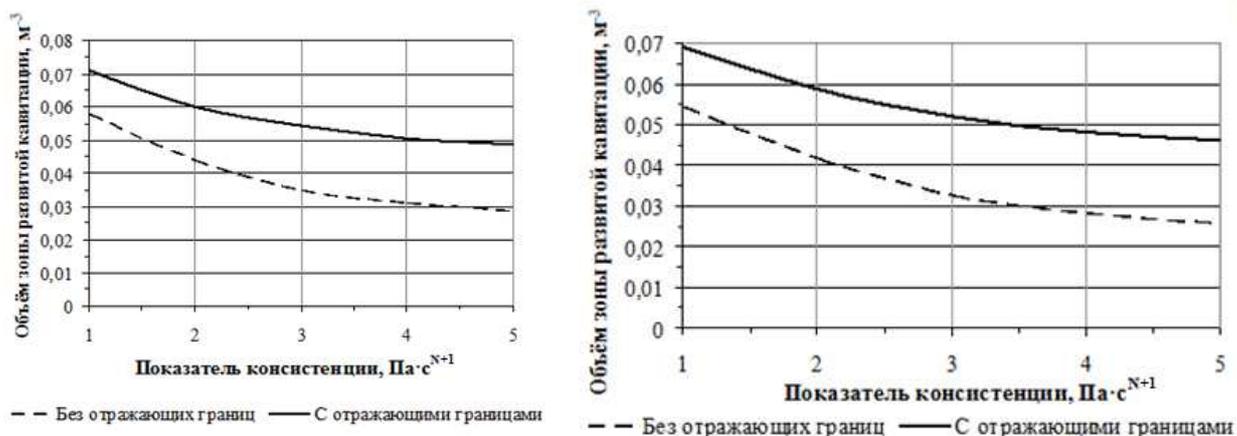
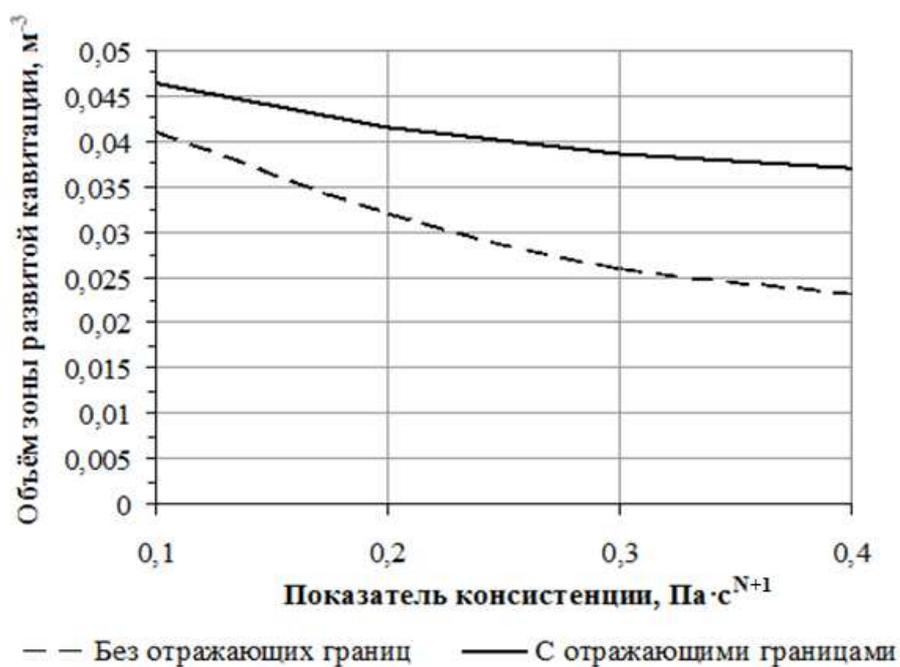
а) $N = 0,05$ б) $N = 0,1$ в) $N = 0,15$

Рисунок 3.14 – Зависимости объёма зоны развитой кавитации (при наличии и отсутствии отражающей границы) от показателя консистенции K для дилатантных сред при различных показателях нелинейности N

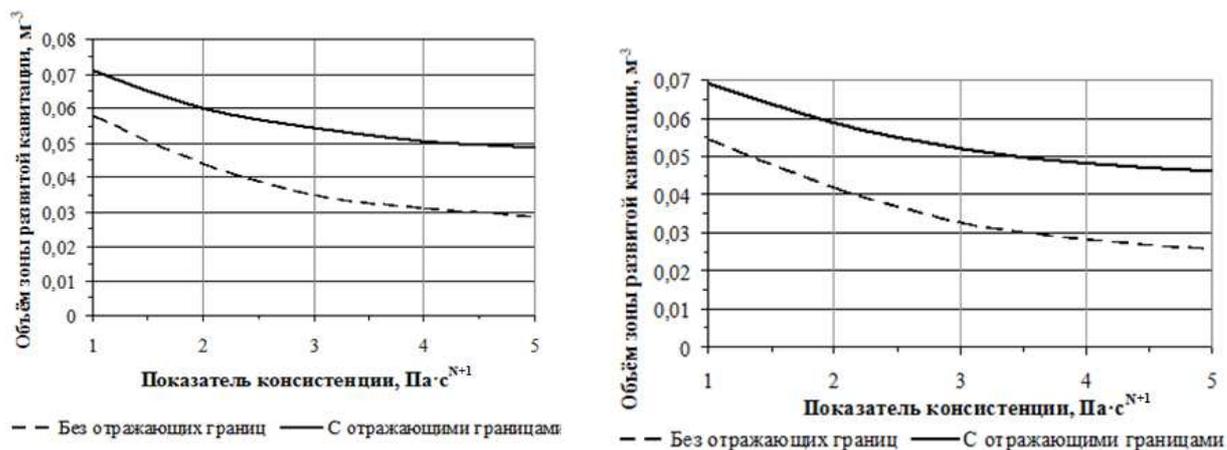
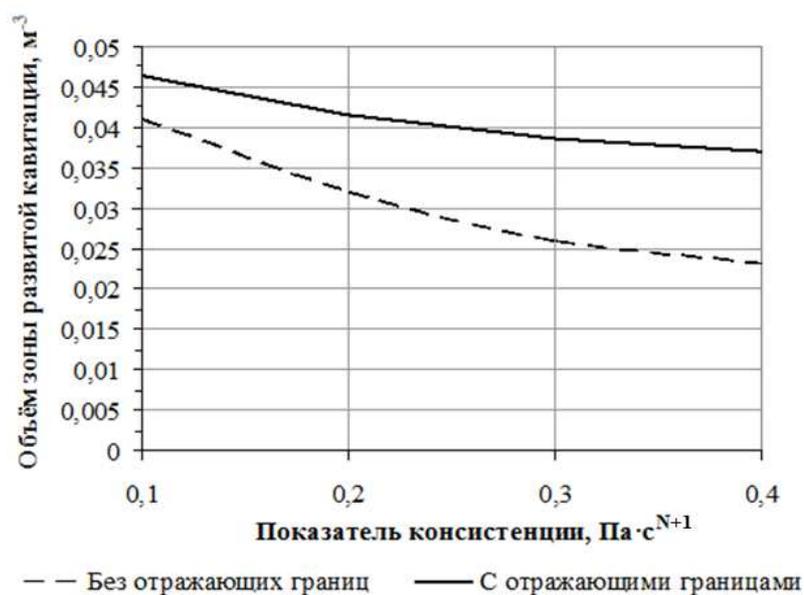
а) $N = -0,2$ б) $N = -0,15$ в) $N = -0,1$

Рисунок 3.15 – Зависимости объёма зоны развитой кавитации (при наличии и отсутствии отражающей границы) от показателя консистенции K для псевдопластических сред при различных показателях нелинейности N

Как следует из представленных зависимостей, с ростом показателей, характеризующих реологические свойства сред (начальная вязкость или показатель консистенции) объём зоны развитой кавитации при оптимальном расстоянии между излучателем и отражающей поверхностью увеличивается значительно (по сравнению со случаем отсутствия отражающих границ), чем для маловязких сред.

Это обуславливает необходимость оптимизации условий УЗ воздействия, главным образом, для высоковязких сред.

Однако весь полезный обрабатываемый объём (в котором присутствует развитая кавитация) заключен между излучателем (рабочим органом) и отражающей поверхностью. В частности, для поршневых излучателей [8], этот объём не превышает 0,08 л (рисунки 3.13-3.15). Такое значение объёма свидетельствует о недостаточной эффективности поршневых рабочих инструментов для промышленного использования.

Поэтому для увеличения суммарного объёма зоны развитой кавитации необходимы излучатели с развитой поверхностью излучения [35, 111, 112].

3.3 Выявление оптимальных условий формирования кавитационной области при использовании многозонных рабочих инструментов

Наиболее совершенной на сегодняшний день является конструкция многозонного излучателя, разработанная в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института [35], и обеспечивающая равномерное излучение УЗК (неравномерность не превышает 15%) на площади 250 см^2 (более чем в 15 раз большей площади излучения поршневого рабочего органа), со средней интенсивностью 25 Вт/см^2 . Эскиз используемого излучателя представлен на рисунке 3.16.

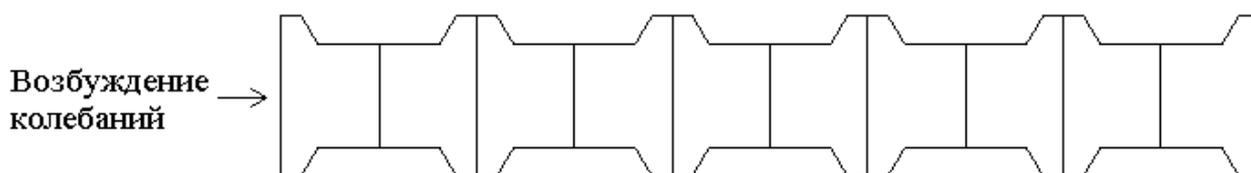


Рисунок 3.16 – Эскиз многозонного ультразвукового излучателя для гетерогенных сред с жидкой фазой

За основу для поиска оптимальных конструктивных схем технологических объемов взята конструкция технологической камеры проточного реактора, представляющей собой металлическую цилиндрическую полость постоянного диаметра. В технологической камере, как показано на рисунке 3.17, расположен многозонный рабочий инструмент ступенчато-переменного диаметра (70x45 мм) с увеличенной поверхностью излучения. Проток гетерогенной среды с жидкой фазой в данной технологической камере осуществляется вдоль излучателя.

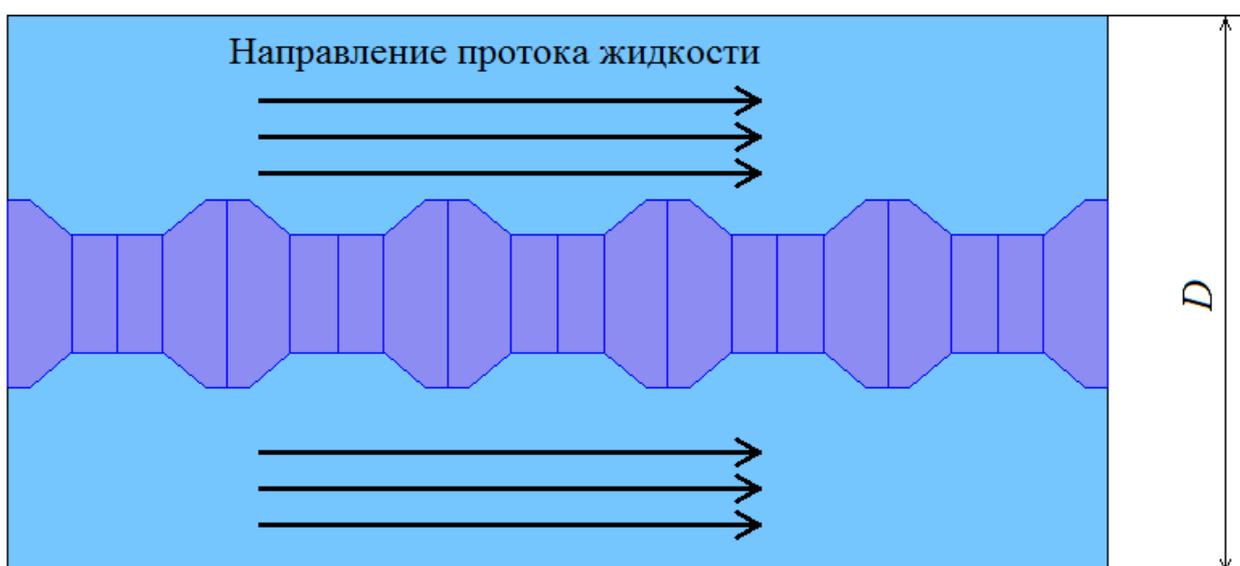


Рисунок 3.17 – Простой цилиндрический технологический объем с установленным излучателем (D – внешний диаметр технологического объема)

Весь дальнейший поиск конструктивных схем будет осуществляться с использованием конечно-элементного моделирования в среде COMSOL Multiphysics на примере жидкости, имеющей показатель консистенции $0,2 \text{ Па} \cdot \text{с}^{N+1}$ и показатель нелинейности $0,15$, при заданной геометрии ультразвукового излучателя (рисунок 3.16) и варьировании геометрических параметров технологической камеры, принятых в качестве независимых, с целью максимизации полезного объема кавитационной зоны.

Для простого цилиндра единственным независимым параметром является D – внешний диаметр цилиндрической камеры. Изменение данного параметра влияет на условия распространения ультразвуковых колебаний за счёт создания стоячих волн между поверхностью многозонного излучателя и стенками цилиндра, и, следовательно, обеспечит возможность увеличения общего объёма зон развитой кавитации.

Согласно ранее полученным зависимостям, представленным на рисунке 3.14, наибольший объём зон развитой кавитации достигается при расстоянии между излучателем и отражающей поверхностью, равном $L = 71$ мм для модельной среды. Поэтому внешний диаметр простого цилиндра должен быть равен $D = D_2 + 2 \cdot L = 212$ мм, где D_2 – наибольший диаметр рабочего инструмента ступенчато-переменной формы.

Распределение зон развитой кавитации в цилиндрическом объёме приведено на рисунке 3.18.

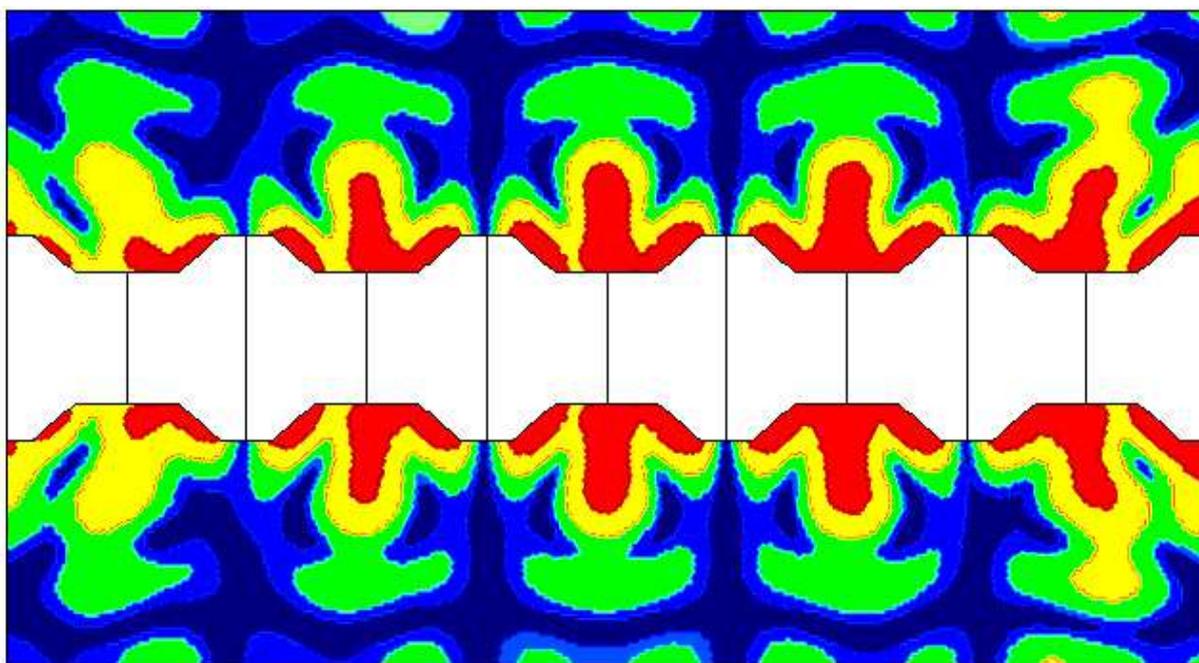


Рисунок 3.18 – Распределение кавитационных зон в технологической камере, имеющей форму простого цилиндра

При данном диаметре цилиндра достигается объём формируемых зон развитой кавитации 3,92 л, в то время как при использовании рабочих инструментов поршневого типа объём кавитационной зоны не превышает 0,08 л при неизменной интенсивности воздействия. Это говорит о целесообразности использования многозонных рабочих инструментов [3, 35] для УЗ кавитационной обработки гетерогенных сред с высоковязкой и неньютоновской жидкой фазой.

Поскольку полный объём цилиндра составляет 12,61 л, а доля полезного объёма не превышает 35%, это свидетельствует о крайне низкой степени однородности УЗ кавитационной обработки в простом цилиндре даже при использовании многозонного рабочего инструмента, обеспечивающего более чем 5-кратное [35] повышение КПД УЗ кавитационной обработки по сравнению с поршневым рабочим инструментом.

Поэтому, для увеличения совокупного объёма зоны развитой кавитации в патенте [112] предложено параллельно рабочему инструменту устанавливать отражающие выступы, имеющие форму трапеции, как показано на рисунке 3.19.

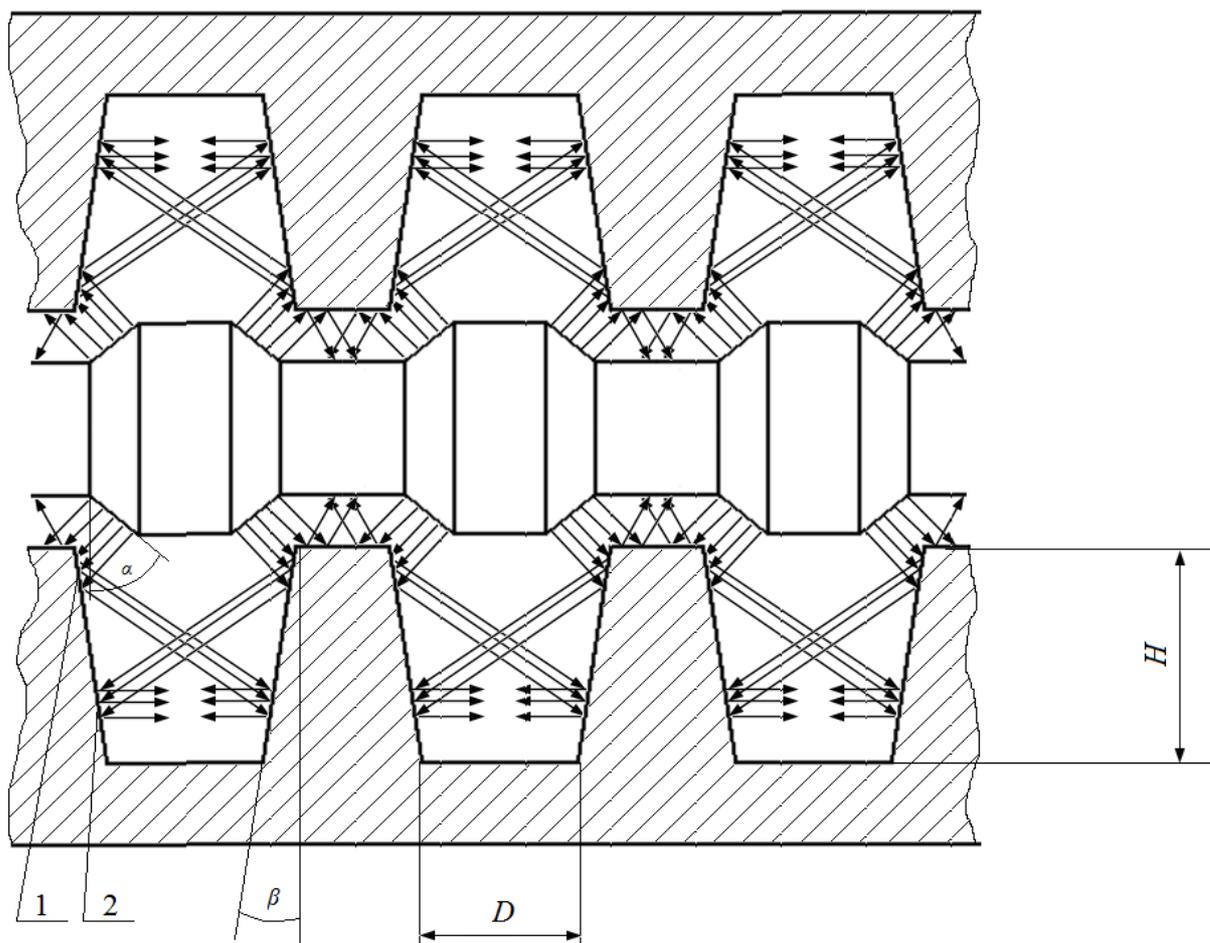


Рисунок 3.19 – Схема распространения УЗ колебаний в технологической камере с отражающими выступами

(H – высота отражающих выступов, d – расстояние между выступами)

Исходя из представленной схемы распространения колебаний для того, чтобы вторично отражённая УЗ волна 2 была направлена параллельно стенке технологического объёма с целью достижения резонансного усиления УЗ колебания, угол β должен быть равен $\alpha/4$, т.е. $12,5^\circ$, поскольку для данного излучателя угол α в зонах переходов многозонного рабочего инструмента равен 50° .

Поэтому необходимо оптимизировать 2 фактора, d , расстояние между выступами и H – высота выступа. Для оптимизации параметров d , H используется метод градиентного спуска, позволяющий найти точку максимума функции полезного объёма

$V(d, H) = \int_{\Omega(d, H)} \theta(P(d, H, \mathbf{x}) - P_2) \theta(P_3 - P(d, H, \mathbf{x})) \rightarrow \max$. Метод градиентного

спуска состоит из следующих шагов:

1. На первом этапе осуществляется выбор начальных значений параметров, d, H , (например $d = 50$ мм, $H = 50$ мм) критерия остановки $\varepsilon = 0,001$ л/мм, величины шага градиента $\gamma = 0,05$ мм²/л.

2. Далее производится вычисление распределения амплитуды звукового давления $P(\mathbf{x})$ для текущих значений параметров d, H .

3. Вычисляется значение функции объёма зоны развитой кавитации (мм³) $V(d, H) = \int_{\Omega(d, H)} \theta(P(d, H, \mathbf{x}) - P_2) \theta(P_3 - P(d, H, \mathbf{x})) \partial V$, где $P(d, H, \mathbf{x})$ – распределение

звукового давления, Па, при заданных параметрах d (мм), H (мм).

4. Вычисляются функции объёма зоны развитой кавитации в зависимости распределения звукового давления

$$V(d + \delta, H) = \int_{\Omega(d + \delta, H)} \theta(P(d + \delta, H, \mathbf{x}) - P_2) \theta(P_3 - P(d + \delta, H, \mathbf{x})) \partial V ;$$

$$V(d, H + \delta) = \int_{\Omega(d, H + \delta)} \theta(P(d, H + \delta, \mathbf{x}) - P_2) \theta(P_3 - P(d, H + \delta, \mathbf{x})) \partial V ;$$

где $\delta = 0,5$ мм.

5. Вычисляется модуль градиента функции V и сравнивается с требуемой точностью:

$$\Delta R = \frac{\sqrt{(V(d + \delta, H) - V(d, H))^2 + (V(d, H + \delta) - V(d, H))^2}}{\delta}.$$

Если $\Delta R < \varepsilon$ то расчет завершается.

6. Параметры d и H изменяются следующим образом:

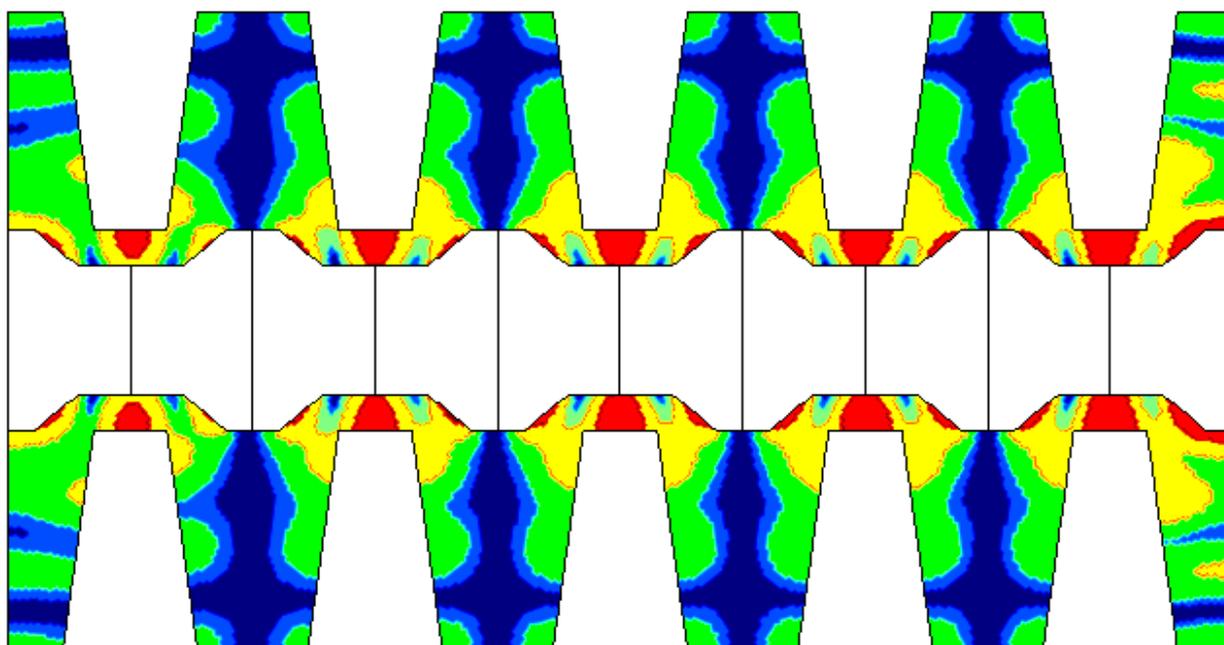
$$d = d - \gamma \frac{V(d + \delta, H) - V(d, H)}{\delta};$$

$$H = H - \gamma \frac{V(d, H + \delta) - V(d, H)}{\delta}.$$

7. Переход к шагу 2.

Абсолютный максимум объёма зон развитой кавитации достигается при $d = 36$ мм и $H = 70$ мм, т.е. когда отражающие выступы практически полностью перекрывают сечение потока жидкости.

Распределение кавитационных зон для данных значений d и H приведено на рисунке 3.20.



Рисунке 3.20– Распределения кавитационных зон технологической камере с отражающими выступами

На основании результатов результатам проведенных расчетов абсолютное значение объёма зон развитой кавитации в точке максимума ($d = 36$ мм, $H = 70$ мм) не превышает 3 л, что примерно на 25% меньше чем в простом цилиндре оптимального диаметра. В свою очередь доля полезного объёма не превышает 40%, что свидетельствует о крайне низкой эффективности данной конструкции. Таким образом, установка дополнительных отражателей существенного повышения эффективности не обеспечит, поскольку отражающие выступы трапецеидальной формы, предусмотренные в рассматриваемой конструкции, занимают до 30% полного объёма обрабатываемой жидкости.

Поэтому необходимо рассмотреть другие способы формирования отражающих поверхностей при совершенствовании конструкций проточных технологических камер для УЗ кавитационной обработки жидкостей.

Чтобы исключить уменьшение полного объема обрабатываемой жидкости рассмотрена возможность замены каждого трапецевидного отражателя (рисунок 3.19) парой тонких кольцевых пластинчатых отражателей (рисунок 3.21), располагаемых в плоскостях боковых поверхностей трапецевидных отражателей из предыдущей конструкции. Использование тонких пластинчатых отражателей (толщиной не более 3 мм) [102, 103] конусообразной формы практически не уменьшает полный объем обрабатываемой жидкости по сравнению с простым цилиндром (рисунок 3.17), что даёт предпосылки значительного увеличения абсолютного значения полезного объема, не достигнутого в предыдущей конструкции. Кроме того, использование тонких пластинчатых отражателей позволяет снизить металлоёмкость конструкции проточного реактора.

Конструкция технологической камеры, содержащей такие отражатели, приведена на рисунке 3.20.

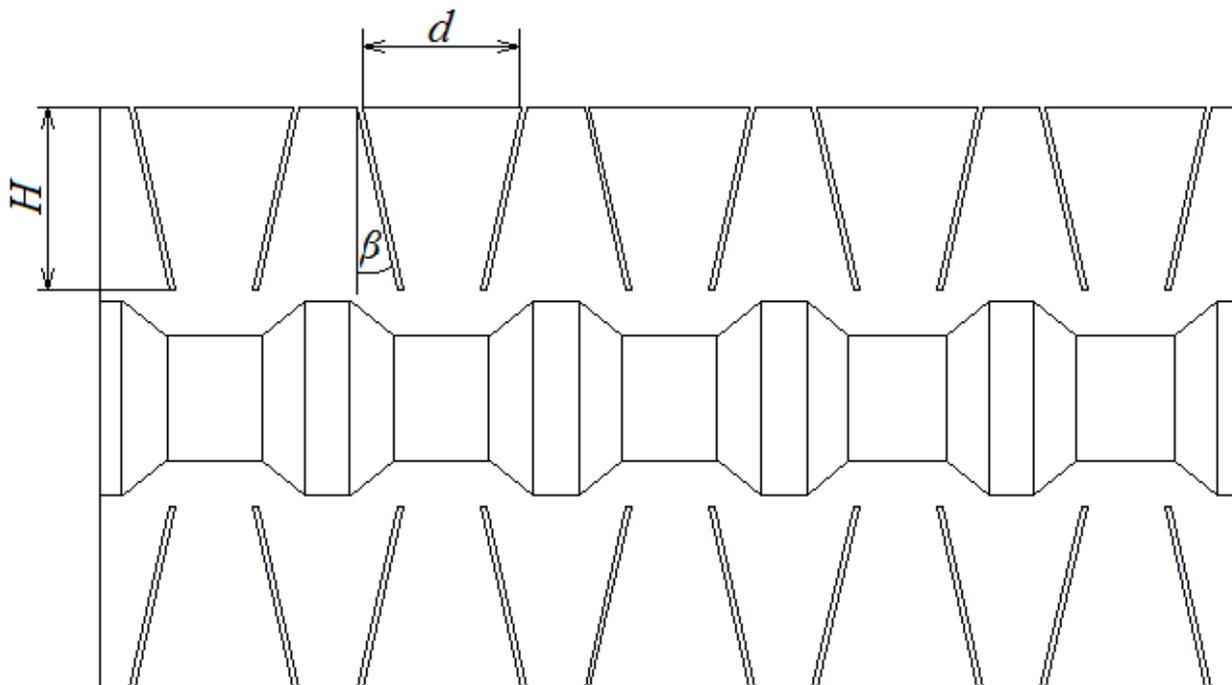


Рисунок 3.21 – Конструкция технологической камеры с конусообразными тонкими пластинами в качестве отражателей (продольный разрез)

Согласно представленной конструкции технологической камеры угол β конусообразных отражателей должен быть равен $\alpha/4$, по аналогии с технологической камерой с трапецеидальными отражателями, чтобы обеспечить максимальное усиление амплитуды звукового давления (α – угол наклона излучающих поверхностей в зонах переходов рабочего инструмента, см. рисунок 3.19). Поэтому необходимо оптимизировать 2 фактора расстояние между пластинами d и высоту пластин H .

По аналогии с конструкцией, основанной на трапецеидальных отражателях, оптимизация параметров d и H производится методом градиентного спуска.

Результаты оптимизации показали что наибольший объем зон развитой кавитации достигается при $d = 59$ мм, $H = 60$ мм, что незначительно отличается от параметров d и H (расстояние между выступами и высота выступов) для конструкции с трапецеидальными отражателями.

На следующем рисунке 3.22 приведены распределения кавитационных зон в оптимальном технологическом объеме с тонкими пластинчатыми отражателями конусообразной формы.

Как следует из представленного рисунка, тонкие пластинчатые отражатели приводят к значительному увеличению суммарного объема зон развитой кавитации и, следовательно, к значительно более равномерной обработке жидкости.

При вычисленных оптимальных геометрических параметрах d и H полезный объем составляет около 5,8 л, в то время как при отсутствии отражающих пластин он не превышал 4 л (в простом цилиндре), что свидетельствует о возможности повышения эффективности обработки до 46% в реакторах проточного типа.

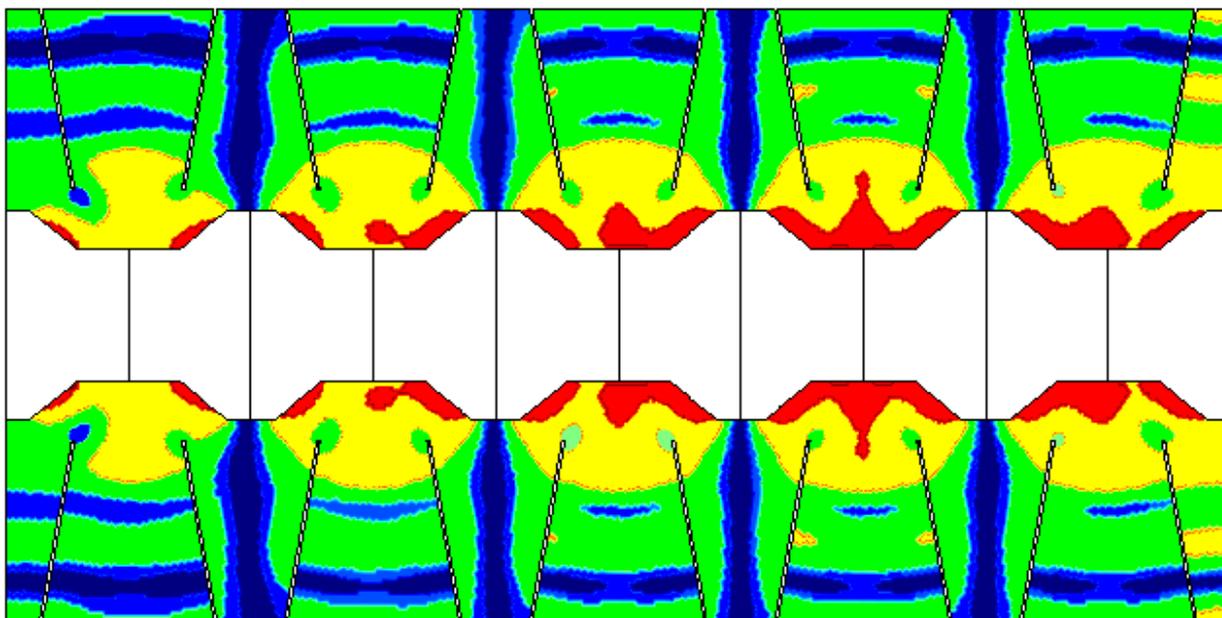


Рисунок 3.22 – Распределения кавитационных зон в технологической камере с тонкими пластинчатыми отражателями

Повышение эффективности УЗ кавитационной обработки жидких сред при увеличении полезного объёма обуславливается тем, что оптимизация геометрических параметров, характеризующих высоту отражающих пластин и расстояние между ними, позволит создать на 46% больше мощности ударных волн, которые являются движущим фактором технологических процессов в жидких средах под воздействием УЗ колебаний.

Это даёт возможность повысить КПД УЗ технологического оборудования, поскольку амплитуда колебаний излучающей поверхности остаётся неизменной.

Необходимо отметить, что по сравнению с простым цилиндром произвольного диаметра, отличающегося от оптимального, комплексная оптимизация диаметра цилиндра, размера и расположения пластин даёт возможность увеличить размер кавитационной зоны, и следовательно, мощность ударных волн не менее, чем в 2...3 раза.

Тем не менее, недостатком последней конструкции является увеличенное гидравлическое сопротивление (до 8 раз) по сравнению с простым цилиндрическим объёмом при протоке жидкости вдоль излучателя,

реализованном в реакторах проточного типа в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института [3].

Поэтому такая конструкция является пригодной для обработки жидкостей с вязкостью не более 200 мПа·с, которые обладают необходимой для данной конструкции текучестью. Поскольку в процессе обработки возможно снижение вязкости жидкости до 2-х крат и более, это обеспечит пропорциональное снижение гидравлического сопротивления проточного реактора при обработке гетерогенных сред с жидкой фазой вязкостью до 200 мПа·с.

Однако при обработке гетерогенных сред с высоковязкими жидкими фазами (с вязкостью свыше 200 мПа·с) возможно образование зон застоя среды (отсутствия протока) в промежутках между пластинами. Это приводит к недопустимым значениям дисперсии времени пребывания (более 50% от среднего времени пребывания) частиц среды в проточном аппарате.

С целью снижения гидравлического сопротивления на порядок и уменьшения дисперсии времени пребывания предложена модификация конструкции проточного реактора с отражающими пластинами, в которой реализуется проток жидкости перпендикулярно оси симметрии излучателя (рисунок 3.23). Такая конструкция является многокаскадной, т.е. состоящей из нескольких последовательно соединённых технологических объёмов с установленными УЗ излучателями.

Сечения входного и выходного канала в такой конструкции имеют прямоугольную форму с размерами 35x400 мм (рисунок 3.23). Поэтому, для достижения производительности 4500 тыс. тонн в год при использовании 8 аппаратов [35] с технологическими объёмами, работающими параллельно, требуемая скорость протока не превышает 1,2 мм/с. Поэтому гидравлическое сопротивление такой конструкции будет достаточно мало (не более 50 Па, за счет малой скорости протока вязкой среды) даже при обработке среды с вязкостью 1...5 Па·с. Это делает конструкцию применимой для промышленного использования. Среднее время пребывания жидкости в

отдельном каскаде конструкции составит 10 мин при доле полезного объёма (объёма зон развитой кавитации), составляющей 60%.

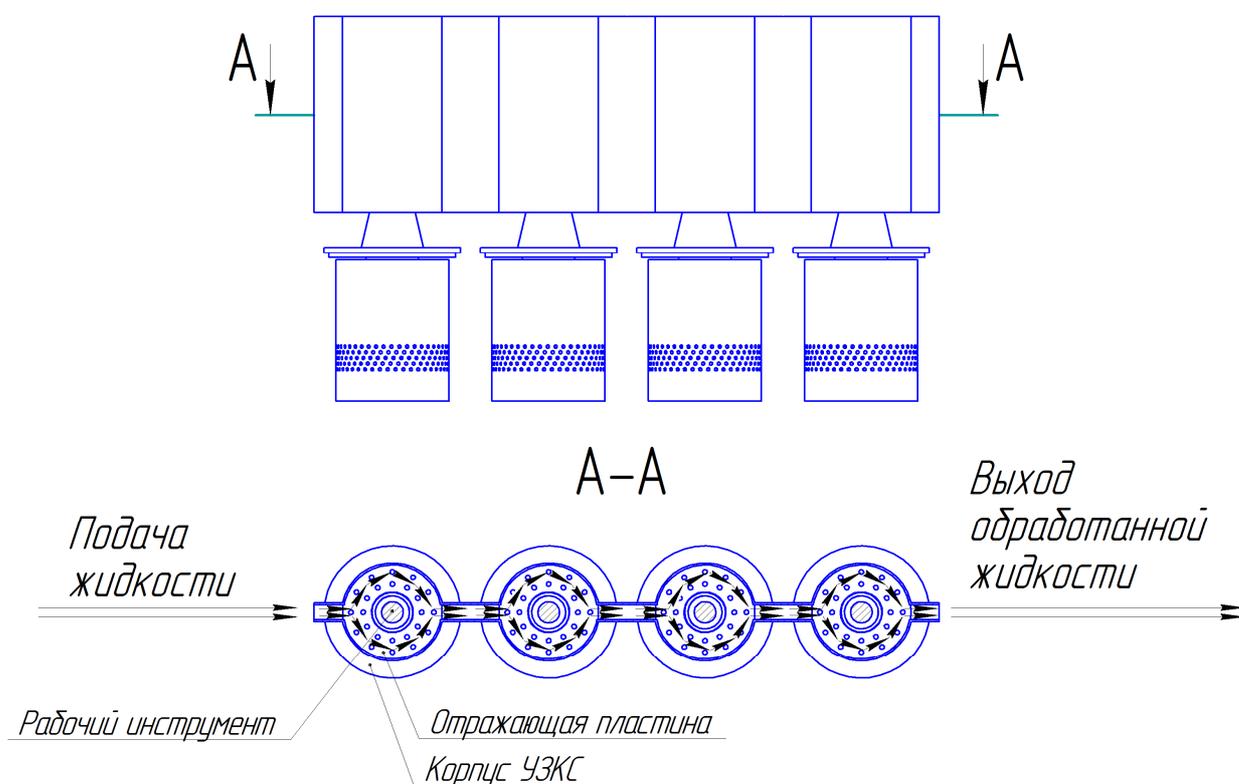


Рисунок 3.23 – Эскиз конструкции технологической камеры с протоком обрабатываемой среды, перпендикулярным оси симметрии рабочего инструмента

Как следует из проведённого ранее анализа, обеспечиваемого времени пребывания 10 мин (в отдельном каскаде) достаточно для реализации широкого спектра технологических процессов в высоковязких и неньютоновских средах под воздействием ультразвуковых колебаний, в частности, деполимеризации эпоксидных смол при снижении вязкости до 5 крат и более[2,35].

3D-модель многокаскадной конструкции проточного реактора приведена на рисунке 3.24.

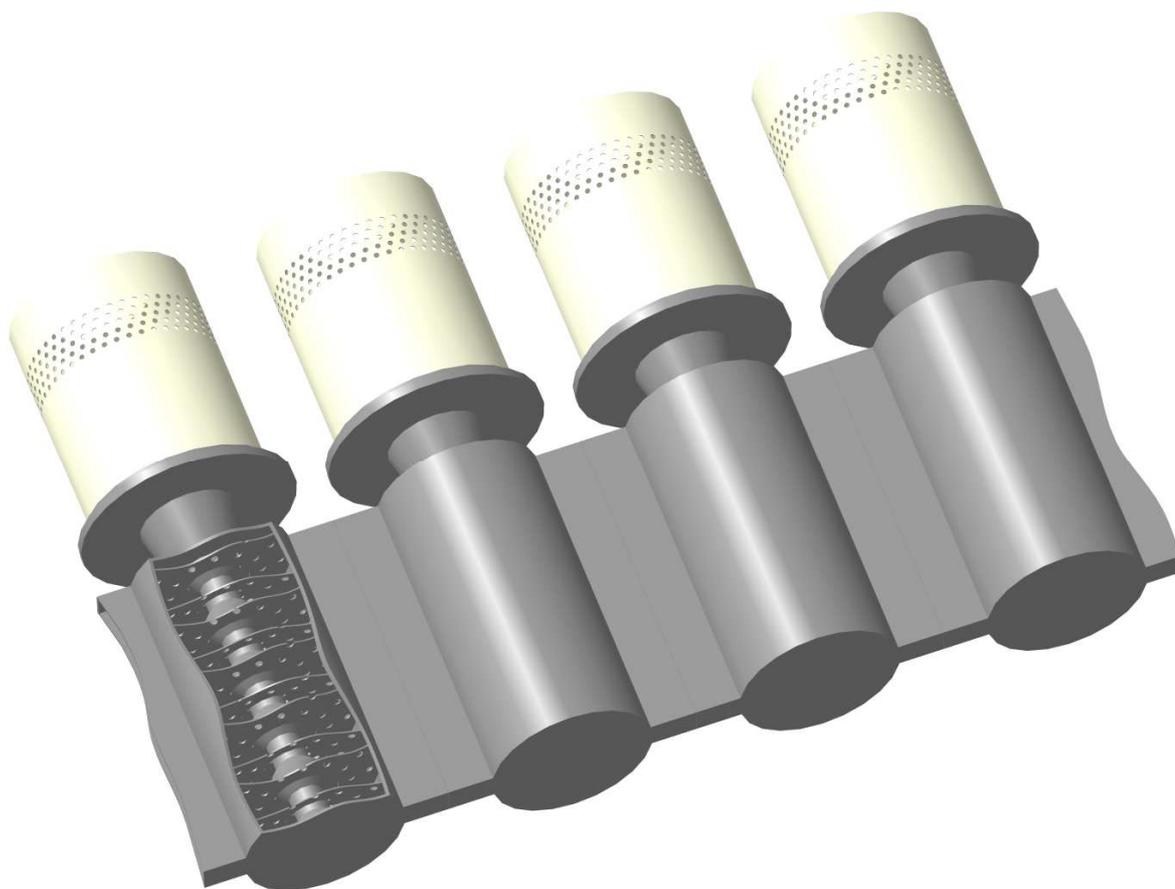


Рисунок 3.24 – 3D-модель многокаскадного проточного реактора

Таким образом, феноменологическая модель формирования кавитационной области позволила исследовать влияния условий распространения и отражения УЗ колебаний (размер и форма технологической камеры) на совокупный объём, занимаемый зоной наиболее эффективного кавитационного воздействия, который определяет производительность обработки.

Анализ верхнего уровня детализации феноменологической модели позволил:

– установить оптимальные расстояния между отражающей границей и излучателем, обеспечивающие увеличение объёма зоны развитой кавитации не менее чем на 50%; показано, что оптимальные расстояния находятся в диапазоне от 50 до 125 см, и уменьшаются при увеличении вязкости обраба-

тываемой среды;

– установить, что наиболее эффективной конструкцией технологической камеры является проточная технологическая камера с кольцевыми пластинчатыми отражателями, позволяющая увеличить объём зоны развитой кавитации до 3-х раз.

Дальнейшие исследования направлены на подтверждение полученных результатов результатами экспериментальных исследований.

4 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЗА СЧЁТ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ И УСЛОВИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КОЛЕБАНИЙ И СОЗДАНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ АППАРАТОВ

Для подтверждения результатов теоретических исследований и выявления оптимальных условий УЗ воздействия, обеспечивающих максимальную эффективность технологических процессов в гетерогенных средах с жидкой фазой, был проведён ряд экспериментов, заключавшихся в:

- подтверждении возможности увеличения объёма зоны развитой кавитации и удельной мощности кавитационного воздействия за счёт использования отражающей границы (стенки технологического объема);
- определении оптимального расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей, при котором удельная мощность кавитационного воздействия будет максимальной;
- подтверждении возможности повышения эффективности технологических процессов протекающих под воздействием ультразвуковых колебаний при использовании разработанных технологических камер с тонкими пластинчатыми отражателями.

Разработанный экспериментальный стенд и полученные результаты представлены далее.

4.1 Экспериментальный стенд для выявления оптимальных условий реализации процесса ультразвуковой кавитационной обработки

Подтверждение возможности увеличения объёма зоны развитой кавитации, за счет применения отражающих границ производилось путем определения размера области кавитационной эрозии металлической фольги,

погружённой в жидкость, находящуюся под воздействием УЗ колебаний. При этом металлическая фольга располагалась на акустической оси излучателя.

Для выявления удельной мощности кавитационного воздействия использовался калориметрический метод, заключающийся в косвенном определении количества теплоты, переданной жидкости в результате схлопывания пузырьков, на основании разности её температуры до и после УЗ воздействия.

Поэтому экспериментальный стенд включал в себя следующее оборудование:

- 1) ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна-М» мощностью 1000 ВА (рисунок 4.1) излучателем поршневого типа диаметром 40 мм;
- 2) термометр водный ТК–110 типа «Pentype», имеющий диапазон измерения температур от –10 до +110 °С;
- 3) алюминиевые экраны толщиной 9 мкм (алюминиевая фольга);
- 4) штатив с линейкой для установления и поддержания необходимого расстояния между излучающей поверхностью и отражающей стенкой (дном технологического объёма);
- 5) технологический объём, представляющий собой полый цилиндр, имеющий диаметр 200 мм и высоту 300 мм.
- 6) аналитические весы MW–II для выявления объёма обрабатываемой жидкости при известной её плотности.

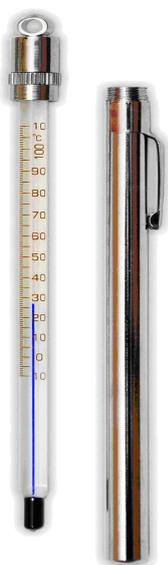
Фотографии оборудования для проведения экспериментальных исследований представлены на рисунке 4.1.



а) ультразвуковой технологический аппарат «Волна-М»



б) аналитические весы MW-II



в) водный термометр ТК-110 типа «Ренте»



г) экспериментальный стенд для выявления зависимости энергии ударных волн и объёма зон развитой кавитации от расстояния между излучателем и отражающей границей

Рисунок 4.1 – Оборудование для проведения экспериментальных исследований

Для выявления оптимальных условий воздействия проводились серии экспериментов при различных расстояниях между излучающей поверхностью и отражающей границей, представляющей собой дно

цилиндрического технологического объёма. Это расстояние для каждого эксперимента фиксируется с помощью штатива (рисунок 4.1д). Полученные результаты описаны в следующих подразделах.

4.2 Определение зависимости объёма зоны развитой кавитации от режимов и условий воздействия

В настоящее время известен ряд методов измерений макроскопических характеристик пузырьковой жидкой среды. Эти методы, как правило, направлены на выявление объёмного содержания пузырьков или совокупной энергии ударных волн, формируемых при схлопывании пузырьков.

Например, метод, основанный на *измерении диэлектрической проницаемости пузырьковой среды*, и дальнейшем определении объёмного содержания пузырьков на основании полученного значения проницаемости, применим только для жидкости, пузырьки которой находятся в состоянии равновесия. Данный метод непригоден для жидкости с кавитационными пузырьками, поскольку наличие нескомпенсированных поверхностных зарядов вблизи стенок пузырьков приводит к тому, что напряжённость электрического поля в окрестности отдельного пузырька может достигать 10^9 В/м [110]. При такой напряжённости поля, как правило, происходит диэлектрический пробой жидкости, и существенно изменяется эффективная диэлектрическая проницаемость кавитирующей среды. Это приводит к значительным ошибкам при определении объёмного содержания пузырьков.

Акустический метод определения объёмного содержания пузырьков, основанный на измерении коэффициента поглощения УЗ волны в среде на разных частотах, для кавитирующей жидкости также является непригодным [6]. Это вызвано тем, что ударные волны, образуемые при схлопывании пузырьков, и представляющие собой фактически дельта-функции, имеют широкий спектр, тем самым внося огромный вклад в погрешность результатов измерений.

Кроме того, для измерения макроскопических характеристик кавитирующей жидкости, являются непригодными и существующие *оптические методы* [71, 110]. Это обусловлено явлениями отражения и преломления лазерного луча вблизи стенок пузырьков при прохождении луча через всю область обрабатываемой жидкости. Поэтому существующие оптические методы не позволяют найти распределение объёмного содержания пузырьков или мощности кавитационных ударных волн в область обрабатываемой жидкости. В настоящее время оптические методы используются, как правило, для определения мгновенного радиуса одиночного пузырька, создаваемого в определённой точке жидкости. При этом в остальной области жидкость остаётся близкой к сплошной, чтобы исключить явления отражения и преломления.

Поэтому наиболее эффективным методом определения макроскопических характеристик кавитационной области является оценка эрозионной активности кавитационных пузырьков. Этот метод был предложен американским учёным Кнэппом ещё в сороковых годах прошлого столетия. Согласно данному методу оценка эрозионной активности производится при помощи тонкой оловянной или алюминиевой фольги [113, 114]. При взаимодействии пузырька с фольгой вследствие схлопывания последнего в фольге образуются отверстия или заметные углубления – воронки. Эта методика позволяет в достаточной степени объективно оценивать распределение зон, в которых кавитационные пузырьки схлопываются наиболее интенсивно (зон развитой кавитации), поскольку рядом исследователей показано, что ударные волны (образуемые при схлопывании пузырьков) являются основным фактором, обуславливающим разрушение фольги. При этом химическое действие при кавитации, а также образующиеся электрические разряды на процесс разрушения фольги оказывают слабое влияние. Кроме того, разрушение фольги происходит при превышении мощностью кавитационного ударных волн фиксированного порогового значения. Эта особенность пузырьков в

жидкости широко используется в различных научных и инженерно-технологических целях [113].

В проведённых экспериментальных исследованиях первоначально выявлялись распределения зон развитой кавитации для различных интенсивностей УЗ воздействия, когда отражающая граница (дно технологического объёма) находится на большом расстоянии от излучателя (не менее 200 мм) по сравнению с его диаметром. Выбор такого положения отражающей границы необходим для создания условий воздействия, соответствующих случаю неограниченного объёма, из-за дифракционного расхождения УЗ волн в жидкости.

Полученные распределения зон развитой кавитации с помощью экрана из алюминиевой фольги для случая неограниченного объёма при различных интенсивностях приведены на рисунке 4.2.

Во всех экспериментах экран из фольги был расположен в плоскости симметрии рабочего излучающего инструмента (обрабатываемая жидкость – масло, используемый УЗ излучатель – пьезоэлектрический поршневого типа диаметром 40 мм, время УЗ воздействия – 2 мин).

а) 3,75 Вт/см²б) 8,75 Вт/см²в) 10 Вт/см²г) 15 Вт/см²

Рисунок 4.2 – Распределения зон развитой кавитации при различных интенсивностях воздействия (обрабатываемая жидкость – масло, время УЗ воздействия – 2 мин)

Как видно из представленных фото (рисунок 4.2), с ростом интенсивности воздействия происходит увеличение продольных и поперечных размеров сечения зоны развитой кавитации в плоскости симметрии УЗ излучателя. Это свидетельствует об увеличении объёма зоны развитой кавитации с ростом интенсивности, что подтверждает результаты теоретических исследований.

Далее с помощью наложения каждого экрана алюминиевой фольги после УЗ воздействия на лист миллиметровой бумаги определялось численное значение доли объёма, занимаемого зоной развитой кавитации, от полного объёма обрабатываемой жидкости.

При определении доли объёма зоны развитой кавитации принималось допущение об осевой симметричности зоны, поскольку такой симметрией обладают рабочий инструмент и технологический объём, использованный в экспериментальных исследованиях.

При этом предполагалось, что ось симметрии зоны развитой кавитации совпадает с осью симметрии рабочего инструмента.

Доля объёма, занимаемого зоной развитой кавитацией, вычислялась согласно следующему выражению:

$$\omega = \frac{\frac{\pi}{2} \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \sum_{i=1}^H (r_{li}^2 + r_{ri}^2)}{V} \cdot 100\% ,$$

где H – безразмерное натуральное число, равное значению протяжённости зоны кавитационного разрушения в 10^{-3} м вдоль оси симметрии, округлённому до целых; r_{li} и r_{ri} – расстояния (м) от оси излучателя до ближайших точек, не подвергнутых кавитационному разрушению, слева и справа соответственно, V – полный объём обрабатываемой жидкости, м^3 , ω – доля объёма, занимаемого зоной развитой кавитации, %.

Расстояния r_{li} и r_{ri} определяются на прямых, перпендикулярных оси симметрии излучателя и расположенных в плоскости экрана алюминиевой фольги. Для каждого i расстояние от излучающей поверхности до прямой, на которой вычисляются r_{li} и r_{ri} , равно i мм.

Экспериментальная зависимость доли объёма зоны развитой кавитации от интенсивности воздействия приведена на рисунке 4.3 (обрабатываемая жидкость – масло, УЗ излучатель поршневого типа диаметром 40 мм).

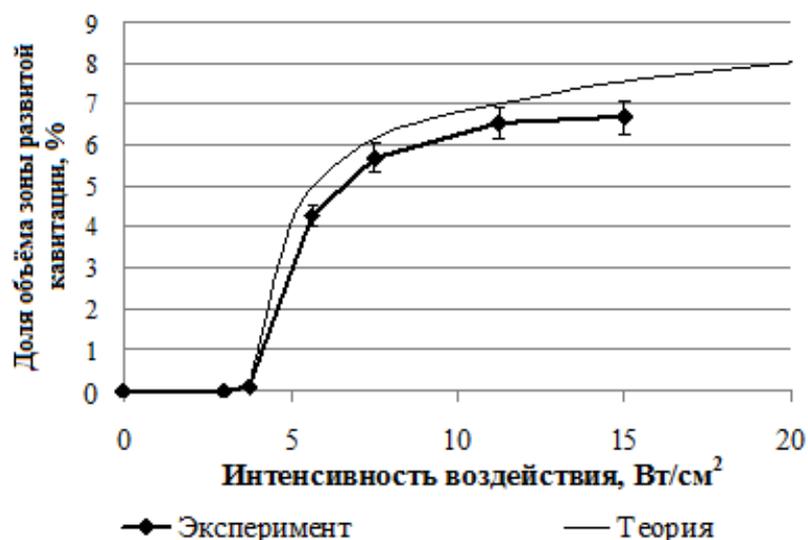


Рисунок 4.3 – Зависимость доли объема зоны развитой кавитации от интенсивности воздействия

Значения долей объемов развитой кавитации, полученные как в результате проведения экспериментов, так и путём моделирования при интенсивностях воздействия, использованных в экспериментальных исследованиях, приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Значения долей объема зон развитой кавитации, полученные теоретически и экспериментально в зависимости от интенсивности УЗ воздействия

Интенсивность воздействия, Вт/см ²	Экспериментальное значение доли объема зоны развитой кавитации, α_E , %	Теоретическое значение доли объема зоны развитой кавитации, α_T , %	Относительная погрешность $ \alpha_T - \alpha_E \cdot 100 / \alpha_E$, %
3,75	0,0984	0,115	16,86992
11,25	6,5352	7,002	7,1429
15	6,6864	7,56	13,0653
20	6,9632	8,02	15,22

Как следует из представленной таблицы 4.1, погрешность между результатами теоретических и экспериментальных исследований не превышает 20%.

Существование погрешности между результатами теоретических и экспериментальных исследований вызвано тем, что реальный коэффициент поглощения УЗ в жидкой среде превышает расчётное значение, что приводит к большим расчётным значениям объёмов зон развитой кавитации по сравнению с экспериментальными. Превышение реального коэффициента поглощения над его теоретическим значением может быть обусловлено тем, что действительное объёмное содержание пузырьков (до 0,14 и более согласно экспериментальным данным для воды, приведённым в монографии Л.Д.Розенберга [6]) оказывается больше расчётного, которое не превышает 0,12 (см. рисунки 2.10б; 2.11в, г; 2.12в, г).

Одной из причин такого расхождения является диффузия растворённого в жидкости газа в кавитационную полость, не учитываемая в разработанной модели.

Как и полученные в третьем разделе результаты теоретических исследований, данные экспериментов свидетельствуют об ограниченности объёма зоны развитой кавитации при отсутствии отражающих границ. Это подтверждает исчерпанность подхода к повышению эффективности кавитационной обработки высоковязких сред, основанного на увеличении интенсивности воздействия.

Поэтому дальнейшие экспериментальные исследования были направлены на подтверждение возможности увеличения доли объёма зоны развитой кавитации (и, следовательно, повышения однородности УЗ обработки) путём выбора оптимального расстояния от излучающей поверхности до отражающей границы.

Для этого были проведены исследования кавитационной эрозии экрана алюминиевой фольги при различном расстоянии между излучателем и отражающей границей.

Фотографии экранов фольги после кавитационной эрозии приведены на следующем рисунке 4.4 при различных расстояниях между излучателем и

отражающей поверхностью (интенсивность воздействия – 10 Вт/см^2 , обрабатываемая жидкость – масло):



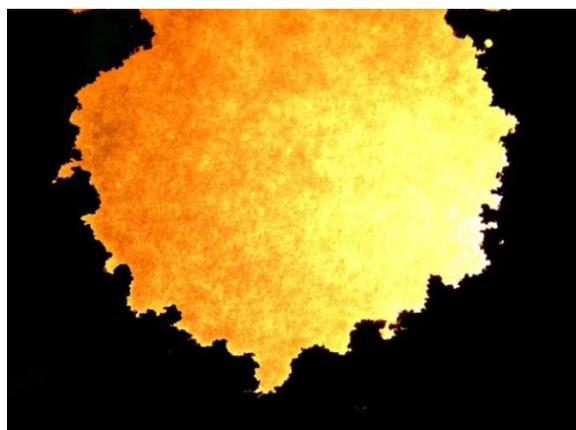
а) 60 мм



б) 70 мм



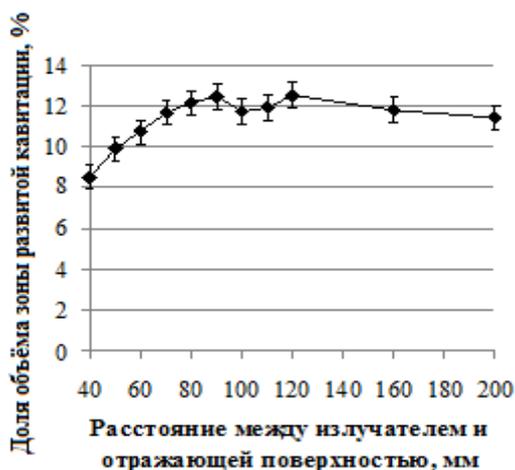
в) 90 мм



г) 130 мм

Рисунок 4.4 – Распределения зон развитой кавитации при различных расстояниях между излучателем и отражающей границей

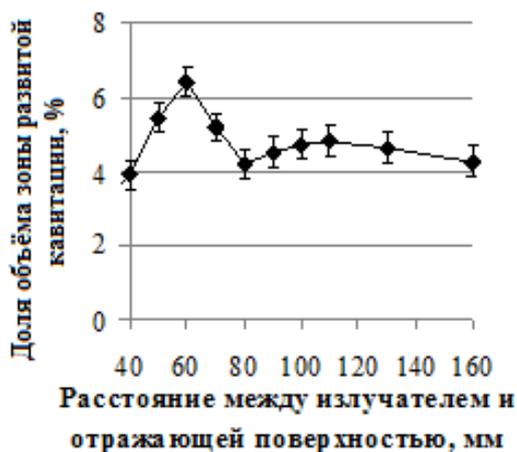
Зависимости долей объёмов зон развитой кавитации от расстояния между излучателем и отражающей границей для различных по реологическим свойствам жидкостей приведена на рисунке 4.5.



а) вода (интенсивность воздействия 3 Вт/см^2)



б) масло (интенсивность воздействия $7,5 \text{ Вт/см}^2$)



в) эпоксидная смола ЭД-5 (интенсивность воздействия 25 Вт/см^2)

Рисунок 4.5 – Зависимости доли объема зоны развитой кавитации от расстояния между излучателем и отражающей границей для различных жидкостей

Полученные результаты подтверждают возможность увеличения доли объема зоны развитой кавитации, и, следовательно, степени однородности УЗ обработки, до 1,5 крат (например, для эпоксидной смолы ЭД-5, обладающей начальной вязкостью не менее $0,8 \text{ Па}\cdot\text{с}$) путём оптимизации расстояния между излучателем и отражающей границей при неизменной интенсивности воздействия.

При этом наибольший эффект от оптимизации положения отражающей границы достигается в жидкостях значительной вязкости (не менее 100 мПа·с, т.е. в масле, эпоксидной смоле и т. д.), в то время как в воде доля объёма зоны развитой кавитации увеличивается за счёт оптимизации всего лишь в 1,08 раз. Это подтверждает теоретически установленную целесообразность оптимизации расстояния между излучателем и отражающей поверхностью при проектировании технологических объёмов, в первую очередь, для обработки высоковязких и неньютоновских жидкостей.

Кроме того, учитывая данные, приведенные в таблице 4.1, оптимизация расстояния между излучателем и отражающей границей позволяет использовать интенсивности УЗ воздействия (на границе излучатель–обрабатываемая среда) в 2 раза меньшие при одновременном увеличении доли объёма зоны развитой кавитации более чем в 1,3 раза. Например, при интенсивности воздействия 7,5 Вт/см² и расстоянии между излучателем и отражающей границей 90 мм доля объёма зоны развитой кавитации составляет 8% от полного объёма обрабатываемой жидкости, а при интенсивности воздействия 15 Вт/см² в случае отсутствия отражающей границы доля объёма зоны развитой кавитации не превышает 6% (см. таблицу 4.1).

Таким образом, полученные результаты показывают, что оптимизация условий распространения колебаний позволяет решить проблему ограниченности прочности волноводов-излучателей за счёт возможности использования меньших интенсивностей воздействия при одновременном повышении эффективности кавитационной обработки.

В то же время следует отметить, что поскольку доля объёма зоны развитой кавитации, создаваемая излучателями поршневого типа, не превышает 13% (даже при оптимальных условиях воздействия), то полученные экспериментальные результаты ещё раз подтверждают необходимость использования многозонных рабочих инструментов для УЗ кавитационной обработки гетерогенных систем с несущей высоковязкой и

неньютоновской жидкой фазой. Многозонные рабочие инструменты устанавливаются в технологический объём цилиндрической формы, через который осуществляется проток обрабатываемой гетерогенной среды с жидкой фазой. Как было показано в разделе 3, при использовании многозонных рабочих инструментов с разработанными технологическими объёмами, содержащими кольцевые отражатели, теоретическое значение доли объёма области развитой кавитации может достигать 46%. Такое значение свидетельствует о высокой степени однородности УЗ обработки и является приемлемым для реальных процессов химической технологии.

Однако экспериментальное подтверждение данных теоретических результатов с помощью прямого метода оценки эрозионной активности кавитационной области, позволяющего определить численное значение объёма зоны развитой кавитации, является невозможным. Это обуславливается невозможностью прямого погружения алюминиевой фольги в технологический объём проточного типа, содержащий многозонный излучатель. Следовательно, необходим косвенный метод оценки доли объёма, занимаемого зоной развитой кавитации, применимый к проточным технологическим камерам, например, с помощью определения удельной мощности кавитационного воздействия.

Поэтому на следующем этапе экспериментальных исследований проводилось выявление зависимости удельной мощности кавитационного воздействия от условий распространения колебаний для различных жидкостей.

4.3 Определение зависимости удельной мощности кавитационного воздействия от условий распространения ультразвуковых колебаний

Для оценки удельной мощности кавитационного воздействия был использован калориметрический метод, который позволяет определить тепло, полученное жидкостью при схлопывании кавитационных пузырьков.

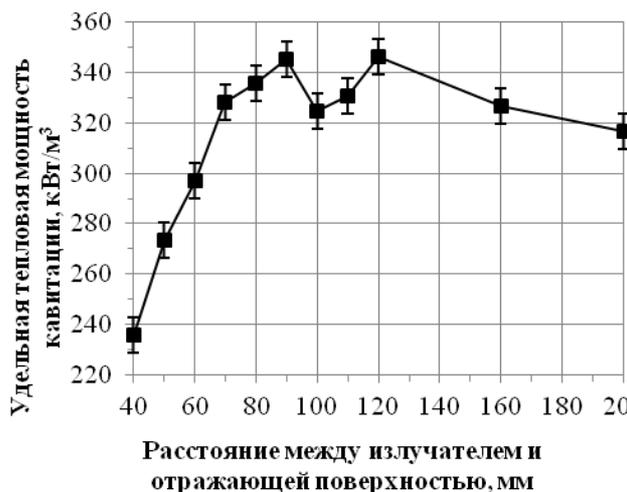
Он позволяет наиболее объективно оценить удельную мощность кавитационных ударных волн, которая, как было отмечено в разделе 2, является основным фактором, определяющим эффективность ультразвуковой кавитационной обработки. Максимум теплоты, переданной жидкости при постоянном времени экспозиции, соответствует максимуму удельной мощности кавитационного воздействия [35]. Поэтому в дальнейшем вместо «удельной мощности кавитационных ударных волн» будет употребляться термин «удельная тепловая мощность кавитации».

Удельная тепловая мощность кавитации определяется согласно следующему выражению:

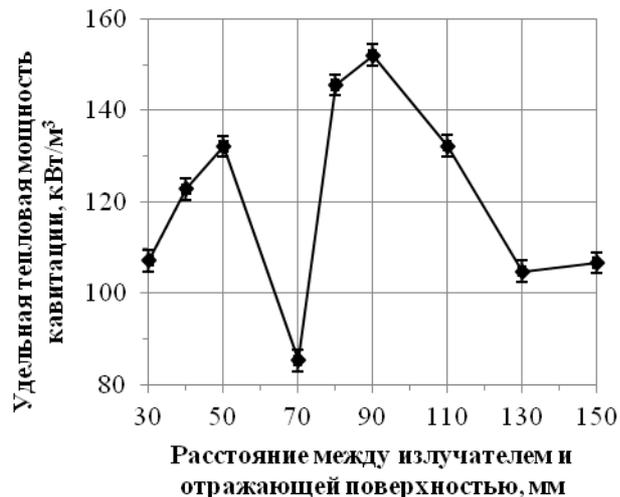
$$W = \frac{cm(t_2 - t_1)}{TV},$$

где W – удельная тепловая мощность кавитации, Вт/м³ m – масса обрабатываемой жидкости, кг, c – удельная теплоёмкость жидкости, Дж/(кг·К), t_1 – температура жидкости до УЗ воздействия, t_2 – температура жидкости после УЗ воздействия в течение заданного времени экспозиции (10 мин для данных экспериментальных исследований), V – полный объём обрабатываемой жидкости, м³, T – время экспозиции, с.

Зависимости удельной тепловой мощности кавитации от расстояния между излучателем и отражающей границей приведены на рисунке 4.6 для различных жидкостей.



а) вода (вязкость 1 мПа·с)



б) масло (вязкость 200 мПа·с)

в) эпоксидная смола ЭД-5 (начальная вязкость 520 мПа·с, показатель консистенции $K=3,9 \text{ Па}\cdot\text{с}^{N+1}$, показатель нелинейности $N=-0,15$)

Рисунок 4.6 – Зависимости удельной тепловой мощности кавитации от расстояния между излучателем и отражающей границей (время УЗ воздействия 10 мин)

Полученные значения удельной тепловой мощности кавитации и объёма зоны развитой кавитации для различных расстояний между излучающей поверхностью и отражающей границей и для различных жидкостей приведены в сводной таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Значения долей объёма зоны развитой кавитации и удельной тепловой мощности кавитации при УЗ кавитационном воздействии, при различных расстояниях между излучателем и отражающей границей

Расстояние между излучателем и отражающей границей, мм	Доля объёма зоны развитой кавитации, %	Удельная тепловая мощность кавитации, кВт/м ³
Вода		
40	8,518	235,6715
50	9,8754	273,227733
60	10,7322	296,933467
70	11,6664	327,998233
80	12,14	335,882333
90	12,4762	345,186
100	11,7296	324,5281
110	11,9062	330,7304
120	12,5152	346,262667
160	11,8068	326,706667
200	11,4454	317,11333
Масло		
40	6	122,81107
50	6,7148	132,12193
70	4,6658	85,325667
80	6,1444	145,5708
90	8,088	152,08113
110	6,7878	132,17343
130	6,2172	104,77333
150	6,38	106,84333
Эпоксидная смола ЭД-5		
30	3,191	60,046667
40	3,9108	73,536667
50	5,468	104,3633333
60	6,4424	121,13667
70	5,1886	105,14
80	4,207	79,106667
90	4,5246	85,076667
100	4,7232	88,81
110	4,8202	90,636667
130	4,652	87,47333
160	4,2764	80,41

Как следует из результатов, приведённых в таблице 4.3 и на рисунке 4.6, оптимизация положения отражающей границы позволяет наряду с объёмом зоны развитой кавитации увеличить удельную тепловую

мощность кавитации, а, следовательно, и удельную мощность кавитационных ударных волн, которые являются основным движущим фактором технологических процессов, до 52 %.

Сравнительный анализ значений, приведённых в таблице 4.3 для доли объёма зоны развитой кавитации и удельной тепловой мощности кавитации, переданной жидкости, позволяет установить, что абсциссы точек экстремума (локального максимума или минимума) удельной тепловой мощности кавитации полностью совпадают с положениями экстремумов долей объёма зон развитой кавитации.

Таким образом, имеется возможность косвенно оценивать эффективность УЗ воздействия и долю объёма, занимаемой зоной развитой кавитации, в технологической камере произвольной геометрии калориметрическим методом. При этом калориметрический метод является единственно применимым в случае отсутствия возможности непосредственного измерения объёма зоны развитой кавитации при помощи алюминиевой фольги (например, в реактор проточного типа с многозонным излучателем).

Полученные значения оптимальных расстояний между излучающей поверхностью и отражающей границей, при которых достигается максимальная доля объёма зоны развитой кавитации, для различных жидкостей приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Теоретические и экспериментальные значения оптимального расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей

Наименование жидкости	Теоретическое значение оптимального расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей, L_T , мм	Экспериментальное значение оптимального расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей, L_E , мм	Абсолютная погрешность $ L_T - L_E $, мм	Относительная погрешность $ L_T - L_E \cdot 100 / L_E$, %
Вода	123	120	3	2,5
Масло подсолнечное	102	90	12	13,3
Эпоксидная смола ЭД-5	71	60	11	18,3

Превышение теоретически полученного оптимального расстояния между излучателем и отражающей границей над экспериментальным обусловлено более высокими значениями действительного коэффициента поглощения в жидкой среде по сравнению с теоретическими. Как было отмечено ранее, это вызвано тем, что в разработанной модели диффузия растворённого в жидкости газа в кавитационную полость не учитывается.

Однако, как следует из представленной таблицы 4.4, относительная погрешность оптимального расстояния между излучающей поверхностью и отражающей границей не превышает 18%. При этом для маловязких жидкостей, например, для воды погрешность не превышает 3%.

Таким образом, разработанная феноменологическая модель формирования кавитационной области жидких средах может считаться адекватной.

Практическим применением полученных результатов теоретических исследований и разработанных конструктивных схем технологических объёмов явилось создание специализированных ультразвуковых технологических аппаратов, описанных в следующем подразделе.

4.4 Практические конструкции ультразвуковых технологических аппаратов, реализующие выявленные оптимальные режимы и условия воздействия

Представленные исследования и разработки позволили создать ультразвуковые проточные аппараты со специализированными технологическими объёмами для промышленной реализации кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред. Созданные аппараты представлены на рисунке 4.7.



Рисунок 4.7 – Ультразвуковые технологические аппараты серии «Булава» для кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред мощностью 3 (а) и 8 (б) кВт

Созданное ультразвуковое оборудование для воздействия на высоковязкие жидкие среды содержит в своем составе ультразвуковую колебательную систему, преобразующую электрическую энергию в энергию

высокоинтенсивных механических колебаний ультразвуковой частоты, электронный генератор, предназначенный для питания преобразователя, и технологический объём, предназначенный для проточной обработки жидкости в составе технологической линии.

Разработанный технологический объём, содержащий кольцевые отражатели, конструкция которого представлена в предыдущем разделе (см. рисунки 3.20, 3.22), приведен на рисунке 4.8.



Рисунок 4.8 – Технологический объём для кавитационной обработки жидкостей с внутренними кольцевыми отражателями

Как было отмечено ранее, технологический объём может быть в двух конструктивных исполнениях:

- с параллельной ультразвуковому излучателю подачей потока жидкости (см. рисунок 3.20);
- с перпендикулярной ультразвуковому излучателю подачей потока жидкости (см. рисунок 3.22).

Таким образом, созданные ультразвуковые технологические аппараты с технологическими объёмами являются законченными устройствами, готовыми для монтажа в технологические линии.

Далее представлены результаты экспериментальных исследований эффективности созданных аппаратов. Такие исследования проводились с целью сравнения эффективности данных аппаратов с ранее разработанными [35], в которых используются технологические объёмы в форме простого цилиндра неоптимального диаметра без внутренних отражателей.

4.4.1 Определение совокупной энергии кавитационной области, формируемой в разработанных технологическими объёмах

Экспериментальные исследования эффективности созданных УЗ аппаратов первоначально были направлены на определение удельной тепловой мощности кавитационной области, формируемой как в разработанных проточных технологических объёмах с кольцевыми отражателями, так и без них [35]. Эксперименты проводились с использованием калометрического метода, поскольку, как уже говорилось, непосредственное погружение алюминиевой фольги в реактор проточного типа, содержащий кольцевые отражатели, с целью определения доли объёма формируемой зоны развитой кавитации является невозможным. Полученные результаты представлены на рисунке 4.7.

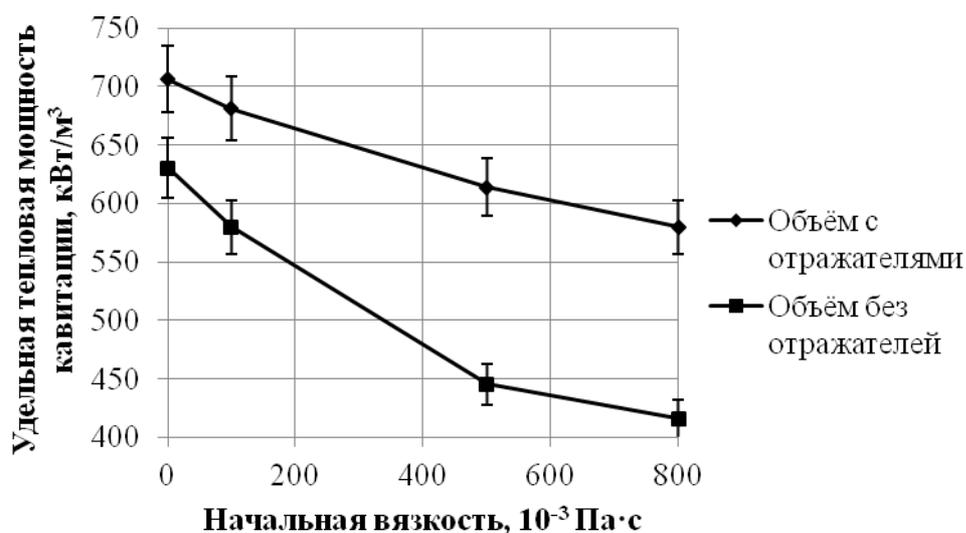


Рисунок 4.7 – Зависимости тепловой мощности кавитации в реакторах проточного типа, как с кольцевыми отражателями, так и без них (время УЗ воздействия – 3 мин)

Представленные зависимости подтверждают теоретически установленный факт, что использование кольцевых пластинчатых отражателей в технологических объёмах проточного типа даёт

дополнительное увеличение объема зоны развитой кавитации не менее, чем на 40% для высоковязких жидкостей (не менее 500 мПа·с).

На рисунке 4.8 приведена зависимость удельной электрической мощности, потребляемой УЗ технологическим аппаратом, от вязкости обрабатываемой жидкости.

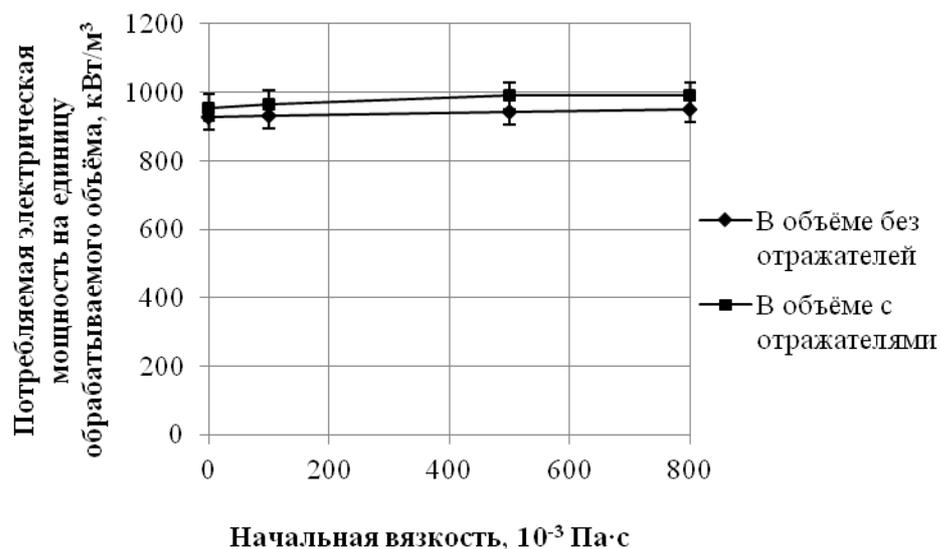


Рисунок 4.8 – Зависимость электрической потребляемой УЗ технологическим аппаратом на 1 м³ обрабатываемой жидкости

Исходя из зависимостей, представленных на рисунках 4.7, 4.8 получена зависимость КПД УЗ технологического аппарата от вязкости жидкости как в объеме без отражателей, так и с отражателями.

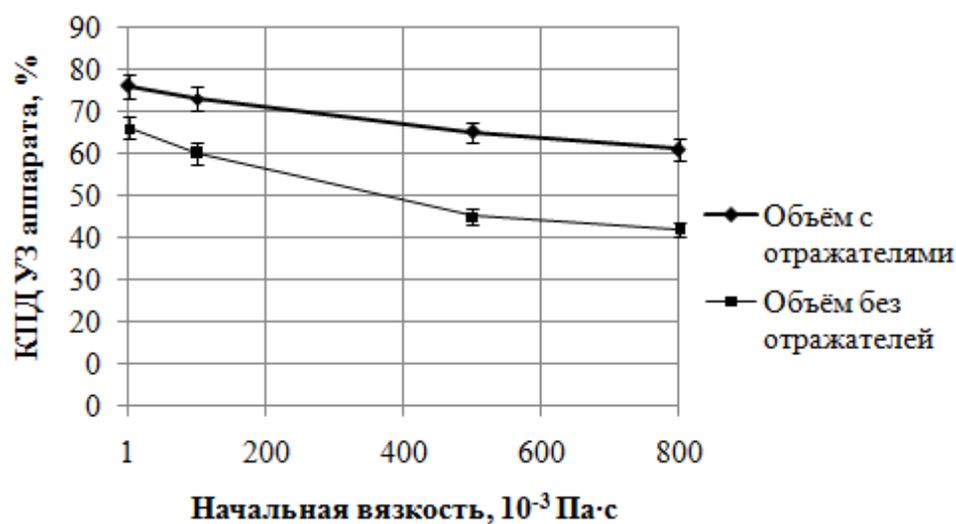


Рисунок 4.9 – Зависимость КПД УЗ технологического аппарата при использовании технологических объёмов как с отражателями, так и без них

Согласно представленной зависимости, использование разработанных технологических объёмов с кольцевыми отражателями позволяет существенно повысить КПД УЗ технологического оборудования. В частности, с 42 до 61% для жидкости с вязкостью 800 мПа·с.

Поэтому можно предположить, что разработанные конструкции проточных реакторов, использованные в созданных аппаратах, являются значительно более эффективными по сравнению с существующими при реализации процессов химической технологии.

Исследование функциональных возможностей и эффективности разработанных ультразвуковых технологических аппаратов на примере реализации различных процессов химической технологии представлено в следующем подразделе.

4.5 Исследование функциональных возможностей и эффективности применения разработанных ультразвуковых технологических аппаратов при реализации различных процессов химической технологии

4.5.1 Ультразвуковое диспергирование суспензии катализатора для крекинга нефти

Наиболее высокая эффективность процесса крекинга реализуется при одновременном воздействии на нефтяное сырьё высокой температуры и катализаторов.

Согласно ранее проведённым исследованиям, существенным образом эффективность (в частности, октановое число получаемого бензина) процесса крекинга определяет площадь поверхности катализатора, представляющего

собой микросферы (размером не более 150 мкм) цеолитного компонента, нанесённого на алюмосиликатную матрицу.

Ультразвуковое кавитационное диспергирование позволяет не менее чем 1,5-кратно уменьшить размер микросфер под воздействием микроскопических ударных волн, тем самым, увеличив площадь поверхности катализатора не менее чем в 2 раза [35].

Технология ультразвукового диспергирования катализаторной суспензии в настоящее время реализована на Омском НПЗ (рисунок 4.10).

Однако в ходе выполнения диссертационной работы установка УЗ диспергирования (рисунок 4.10) была дополнена разработанными технологическими объёмами с кольцевыми отражателями (см. рисунок 3.20).

В технологических объёмах с кольцевыми отражателями, предназначенных для УЗ диспергирования суспензии катализатора, поток жидкости направлен вдоль излучателя, поскольку вязкость суспензии катализатора не превышает 200 мПа·с.



Рисунок 4.10 – Фото промышленной установки для УЗ диспергирования суспензии катализатора крекинга нефти

Технические характеристики данной УЗ установки приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Технические характеристики установки для УЗ диспергирования суспензии катализатора крекинга нефти

Производительность, л/ч	1,54
Мощность, В·А	16 000
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	22 ±1,65
Питание от трехфазной сети переменного тока напряжением, В	380±38
Интенсивность излучения, Вт/см ² , не менее	15
Время непрерывной работы, ч, не менее	8
Количество ультразвуковых излучателей, шт.	2
Диаметр рабочего инструмента (макс./мин.), мм	70/50
Длина излучателя, мм, не менее	650

На данной установке была экспериментально определена удельная площадь поверхности катализатора, диспергированного в результате воздействия УЗ колебаний, при использовании различных технологических объёмов (как с кольцевыми отражателями, так и без них). Удельная площадь поверхности определялась на основании диаметров частиц катализатора, выявленных путём отбора проб:

$$S = \frac{3 \sum_{i=1}^N d_i^2}{2\rho \sum_{i=1}^N d_i^3},$$

где S – удельная площадь поверхности катализатора, м²/кг, N – количество частиц катализатора, присутствующих в отобранной пробе, d_i – диаметр i -й частицы катализатора, м, ρ – плотность цеолитного компонента, равная 2200 кг/м³.

Для определения диаметров частиц катализатора каждые 10 секунд УЗ воздействия производился отбор пробы катализаторной суспензии с

помощью предметного стекла, входящего в комплектацию оптического микроскопа «МИКМЕД».

Далее измерялись линейные размеры частиц волластонита на основании фотографий отобранной пробы суспензии. Эти фотографии были получены с помощью оптического микроскопа «МИКМЕД» при 400-кратном увеличении.

Полученные зависимости удельной площади поверхности катализатора от времени УЗ воздействия приведены на рисунки 4.11 при использовании как разработанного технологического объёма с отражателями, так и технологического объёма без отражателей.

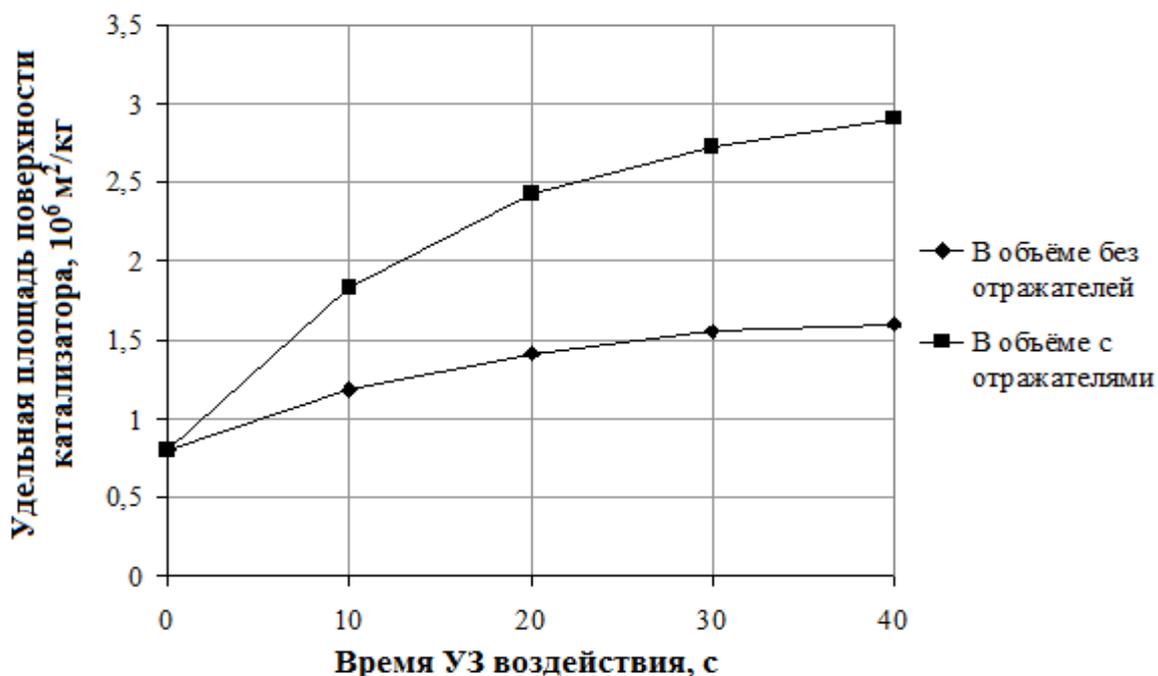


Рисунок 4.11 – Зависимость удельной площади поверхности катализатора от времени УЗ воздействия в технологических объёмах с отражателя

Согласно представленной на рисунке 4.11 зависимости использование разработанных ультразвуковых аппаратов с разработанными автором технологическими объёмами, содержащими кольцевые отражатели, позволило увеличить площадь поверхности катализатора до $2200 \text{ м}^2/\text{г}$, по сравнению с $1600 \text{ м}^2/\text{г}$, достигнутой при использовании ранее разработанных в Бийском технологическом институте технологических объёмов без

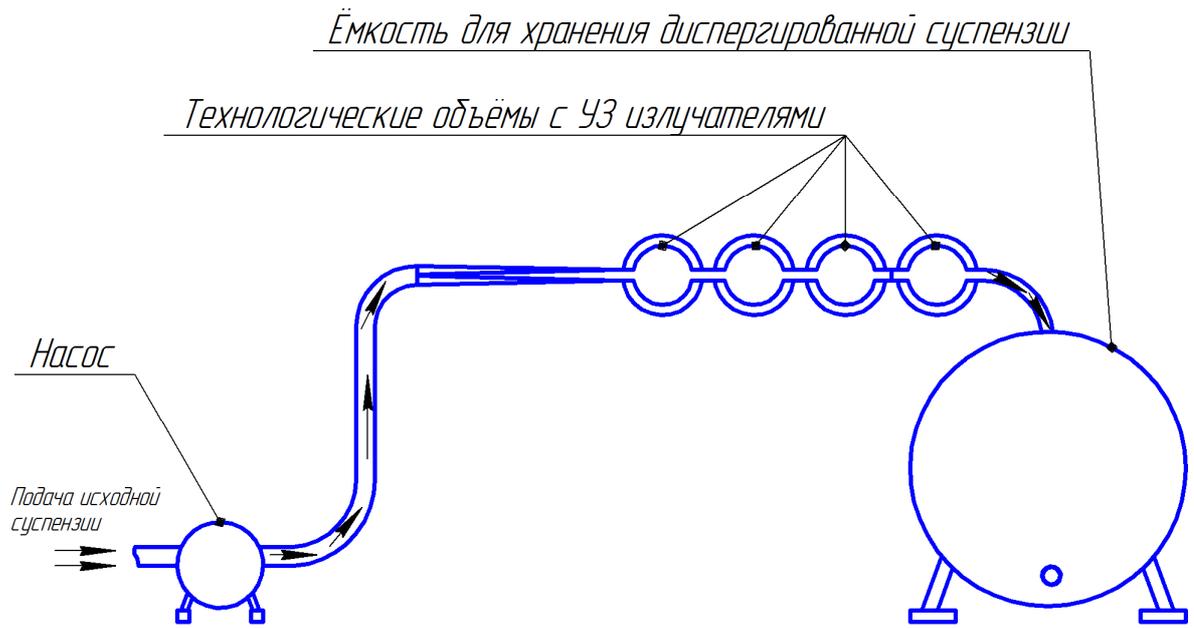
кольцевых отражателей. Указанные значения площади поверхности приведены для времени УЗ воздействия 40 с, соответствующем времени пребывания катализаторной суспензии в установке.

При этом сохранилась ранее достигнутая производительность УЗ диспергирования 4500 тонн в год.

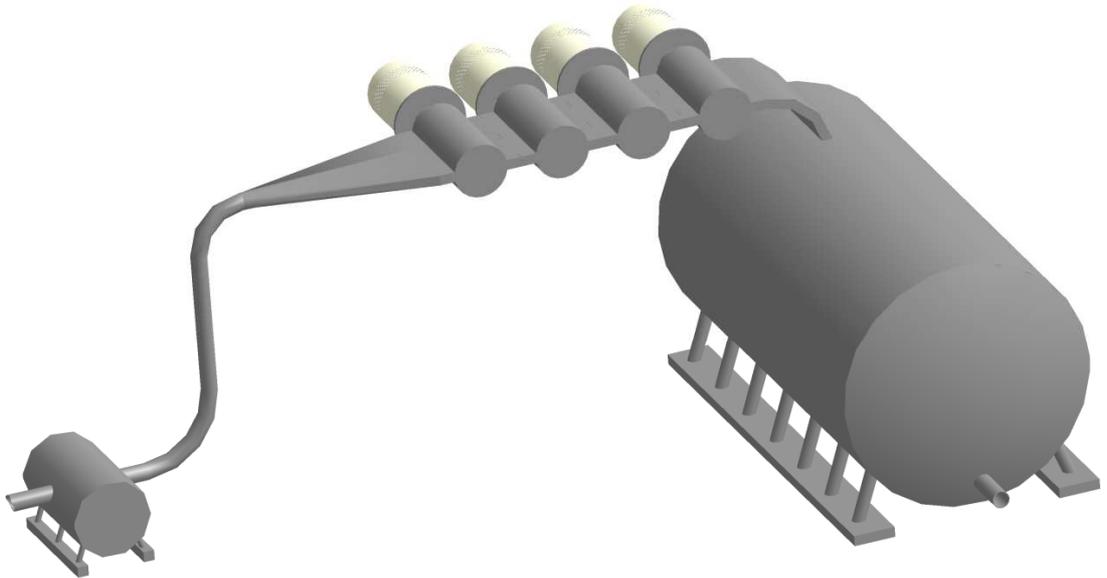
4.5.2 Ультразвуковое диспергирование наноглин для производства полимерных композитов

«Наноглина» (монтмориллонит) — это общепринятый термин для обозначения глинистого минерала с филлосиликатной или листовой структурой, толщина листов которой имеет порядок величины 1 нм, а линейные размеры поверхности составляют 50–150 нм [115]. Согласно ранее проведённым исследованиям [115] использование монтмориллонита придаёт значительное улучшение механических, тепловых и газобарьерных свойств при введении 2–5 % вес. монтмориллонита.

С целью дальнейшего (не менее чем 2-х кратного) улучшения физических свойств нанокompозита технология ультразвукового диспергирования наноглин в полимерах реализована в настоящее время на предприятии ООО «Гален» (Чебоксары) (рисунок 4.12).



а)



б)

Рисунок 4.12 – Эскиз (а) и 3D-модель (б) УЗ установки для диспергирования наноглин в полимерах

Технические характеристики данной УЗ установки приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Технические характеристики установки для УЗ диспергирования суспензии катализатора крекинга нефти

Производительность, л/ч	0,24
Мощность, В·А	32 000
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	22 ±1,65
Питание от трехфазной сети переменного тока напряжением, В	380±38
Интенсивность излучения, Вт/см ² , не менее	25
Время непрерывной работы, ч, не менее	8
Количество ультразвуковых излучателей, шт.	4
Диаметр рабочего инструмента (макс./мин.), мм	70/45
Длина излучателя, мм, не менее	400

Экспериментальные исследования, проведённые на данной установке (рисунок 4.12), показали, что УЗ диспергирование наноглин приводит к существенному повышению прочности получаемого нанокомпозита. Это обусловлено тем, что при УЗ кавитационном воздействии на исходную суспензию происходит распад наночастиц наполнителя (с исходным размером 50...150 нм) на более мелкие (10...20 нм). Указанные размеры наночастиц, получаемых в результате УЗ воздействия, были установлены с использованием сканирующего электронного микроскопа.

Как известно из литературных источников, уменьшение размеров частиц наполнителя приводит к снижению механических напряжений в полимерной матрице около этих частиц. Поэтому повышается пороговая нагрузка, при которой возникают крупные трещины в композиционном материале.

Это является основным влияющим фактором, обуславливающим повышение прочности нанокомпозита при УЗ кавитационном диспергировании монтмориллонита.

Использование созданных ультразвуковых аппаратов с технологическими объёмами оптимального диаметра с кольцевыми отражателями, в которых проток суспензии монтмориллонита реализован перпендикулярно УЗ

рабочему инструменту, позволило достичь повышения механической прочности нанокompозита в 2,8 раза по сравнению с отсутствием УЗ обработки.

В то время как проведённые экспериментальные исследования в лаборатории Бийского технологического института, показали всего лишь 1,9-кратное увеличение прочности при использовании ранее разработанных технологических объёмов без отражателей [35].

Более высокие показатели прочности конечного материала при использовании предложенных в ходе выполнения диссертационной работы конструкций технологических объёмов обусловлены большей однородностью формируемой кавитационной области (см. рисунок 3.21) и не менее чем 5-кратным уменьшением совокупного объёма зон отсутствия кавитации, в которых УЗ диспергирование не происходит. Таким образом, при использовании разработанных технологических объёмов с кольцевыми отражателями исключается возможность наличия «узких мест», т.е. областей обрабатываемого материала, в которых УЗ диспергирование не происходило, и прочность данных областей оставалась прежней, как до УЗ обработки.

4.5.3 Технология ультразвукового кавитационного преобразования углеводородного сырья

Разработанный УЗ аппарат с многозонным излучателем вошёл в состав лабораторной установки (рисунок 4.13), разработанной в Институте Нефти УАН, для кавитационной обработки углеводородного сырья: сырой нефти, дизтоплива, стабильного газового конденсата, мазута и других углеводородных смесей.

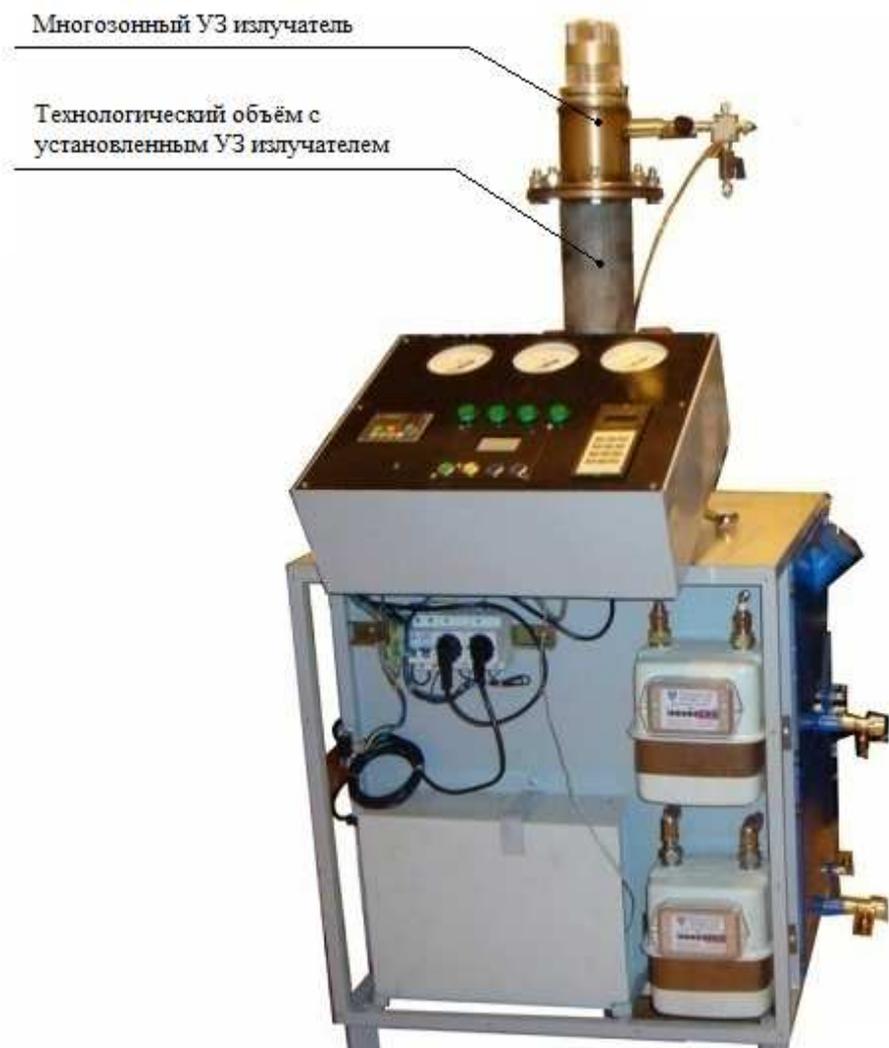


Рисунок 4.13 – Лабораторная установка для ультразвукового преобразования углеводородов

Технические характеристики данной установки приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Технические характеристики лабораторной установки для УЗ кавитационного преобразования углеводов

Производительность, л/ч	0,7
Мощность, В·А	8 000
Частота ультразвуковых колебаний, кГц	22 ±1,65
Питание от трехфазной сети переменного тока напряжением, В	380±38
Интенсивность излучения, Вт/см ² , не менее	10
Время непрерывной работы, ч, не менее	8
Количество ультразвуковых излучателей, шт.	1
Диаметр рабочего инструмента (макс./мин.), мм	70/45
Длина излучателя, мм, не менее	400

На этой установке были проведены экспериментальные исследования эффективности ультразвукового кавитационного преобразования углеводов.

Кавитационное преобразование углеводов осуществляется в точном технологическом объёме а кольцевыми отражателями, в который установлен УЗ многозонный излучатель.

В основном исследовались физико-химические характеристики продуктов, получаемых при кавитации при обязательном использовании газовых добавок (водород, пропан-бутан), использовании дополнительного нагрева сырья и жидких добавок. В качестве сырья в экспериментах были использованы три вида сырой нефти, три вида дизельного топлива и мазут.

Проведённые экспериментальные исследования показали, что технология ультразвукового каталитического крекинг-синтеза углеводородных соединений особенно эффективно работает на высоковязком сырье – тяжелой нефти, мазуте и крекинг-остатках. Вместо 30% обычного выхода дистиллятов из мазута марки М100 получено, по крайней мере, 87% при использовании разработанных в ходе выполнения диссертационной работы технологических объёмов, которые обеспечивают более высокую степень однородности формируемой кавитационной области. В то время как ранее проведённые эксперименты с использованием технологических объёмов без отражателей [35] показывают 75%-ный выход.

Обработка сырой маловязкой нефти обеспечивает глубину переработки на 70 % выше, чем обычная переработка. Максимальная глубина кавитационной переработки нефти на тяжелых сортах была получена в 89–90 % (ранее достигнутая глубина ультразвуковой кавитационной переработки составляет 78–79%).

Эффект увеличения скорости проведённых химических реакций крекинг-синтеза под воздействием ультразвуковой кавитации обусловлен тем, что энергия, выделяющаяся при схлопывании кавитационных пузырьков, приводит к разрыву химических связей между атомами больших молекул углеводородных соединений (диссоциации).

Например, при разрыве связи С–Н от углеводородной молекулы отрывается водород, при разрыве связи С–С углеводородная молекула разрывается на две неравные части. В результате протекания этих процессов в системе накапливаются «активированные» частицы: радикалы, ионы, ионно-радикальные образования [106]. Очевидно, что указанные факторы обуславливают увеличение скорости химической реакции крекинг-синтеза под воздействием УЗ колебаний.

Если учесть, что энергия диссоциации связи С–Н колеблется в зависимости от молекулярной массы и структуры молекулы в пределах 322...435 кДж/моль, а энергия диссоциации связи С–С – 250...348 кДж/моль [115], то оценки показывают, что требуемая для разрушения связей энергия УЗ кавитационного воздействия составляет $2 \cdot 10^7 \dots 3,2 \cdot 10^7$ Дж/м³ (при плотности нефтепродукта 900...1000 кг/м³, молярной массе углерода – 12 г/моль). Это означает, что при УЗ воздействии с помощью созданных аппаратов (интенсивность – 30 Вт/см², площадь излучения – 250 см²) достаточно 1...1,5 ч воздействия для полного разрушения химических связей в объёме 1 м³ нефтепродукта. Эти данные учитывались при проведении экспериментов на лабораторной установке (рисунок 4.13).

Кроме того, было экспериментально установлено, что УЗ кавитационное воздействие на мазут позволяет снизить вязкость на 20–30 %, увеличить

температуру вспышки на 5–10 %. После кавитационной обработки в мазуте образуется до 35 % дизельного топлива (температура отгонки 250...290 °С).

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования показывают высокую эффективность разработанных УЗ аппаратов при обработке продуктов нефтепереработки.

4.5.4 Ультразвуковое диспергирование волластонита

Волластонит – природный минерал – применяется в качестве наполнителя полимерных материалов, в стекольной, целлюлозно-бумажной и химической отраслях или в качестве заменителя применяемых наполнителей.

Применение волластонита значительно улучшает качественные характеристики и увеличивает срок эксплуатации материалов и изделий, а также дает значительный экономический эффект: снижение стоимости при повышении качества; сокращение энергозатрат; сокращение времени производства; замена дорогостоящих и канцерогенных наполнителей; сокращение брака в процессе производства.

Ультразвуковое диспергирование волластонита позволяет улучшить физико-механические свойства получаемых материалов. Для исследования эффективности ультразвукового диспергирования были проведены в лаборатории акустических процессов и аппаратов Бийского технологического института как в технологическом объеме без отражателей (неоптимальном объеме), так и в разработанном технологическом объеме с отражателями, который имеет резонансный диаметр (оптимальном объеме).

Кривые распределения частиц по размерам для волластонита Воксил М100, измельченного с помощью ультразвука, представлены на рисунке 4.14.

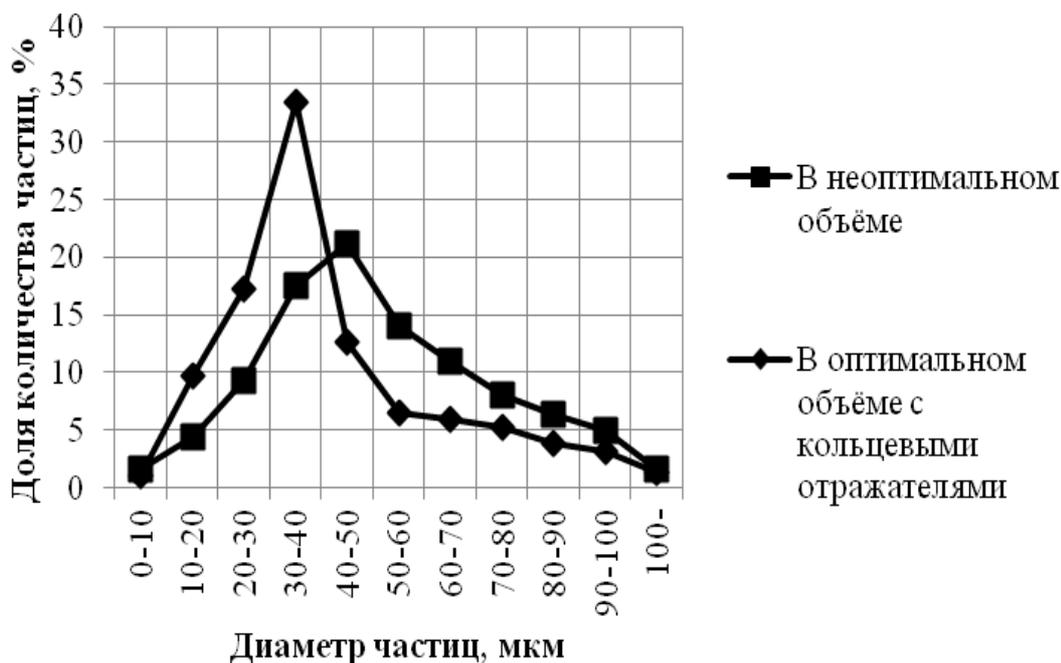


Рисунок 4.14 – Кривые распределения частиц волластонита по размерам Воксил М 100, измельченного в эпоксидной смоле при помощи ультразвука в неоптимальном (без отражателей) и оптимальном (с кольцевыми отражателями) объёме в течении 40 минут при интенсивности воздействия 20 Вт/см^2

Для определения диаметров частиц волластонита использовался метод отбора проб, основанный на непосредственном измерении линейных размеров частиц с использованием фотографий проб суспензии (по аналогии с частицами катализатора крекинга нефти, см. пункт 4.5.1). Фотографии проб были получены с помощью оптического микроскопа «МИКМЕД» при 400-кратном увеличении.

Как видно из рисунка 4.14, при диспергировании волластонита в оптимальном объёме наблюдается заметное уменьшение размера частиц волластонита (d_{10} уменьшается с 51 до 42 мкм). При этом содержание крупной фракции (более 50 мкм) уменьшается не менее, чем на 30%.

Это обусловлено тем, что наличие кольцевых отражателей обеспечивает увеличение суммарной энергии кавитационного воздействия,

приводящей к уменьшению размера фракции. При этом за счёт влияния акустических потоков и более однородного распределения звукового давления при использовании кольцевых отражателей наблюдается однородность дисперсного состава частиц волластонита по всей области проточного реактора, заполненной суспензией.

Необходимо отметить, что дисперсный состав волластонита после диспергирования в ранее разработанном неоптимальном объёме без отражателей близок к дисперсному составу до УЗ воздействия.

Указанный факт свидетельствует об эффективности конструкции проточного реактора с кольцевыми отражателями, разработанной в ходе выполнения диссертационной работы.

Таким образом, созданные ультразвуковые технологические аппараты со специализированными технологическими камерами, обеспечивающие увеличение объёма кавитационных зон за счёт использования кольцевых отражателей и выбора оптимального (резонансного) диаметра внутренней области камеры, позволят значительно повысить эффективность высокотехнологичных отраслей промышленности, использующих гетерогенные системы с высоковязкой и неньютоновской жидкой фазой в производственных процессах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения диссертационной работы проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования обеспечившие повышение процессов химических технологий, реализуемых в гетерогенных система высоковязких и неньютоновских за счет выявления оптимальных режимов (интенсивности) и условий (геометрия технологического объёма) ультразвукового воздействия, обеспечивающих формирование кавитационной области максимального объёма в гетерогенных системах с различными по реологическим свойствам жидкими фазами. В ходе проведения исследований были решены все поставленные задачи.

1. Установлено, что основной причиной недостаточной эффективности процессов химических технологий в высоковязких и неньютоновских жидких средах при их интенсификации УЗ колебаниями является ограниченность объёма формируемой кавитационной области.

2. Впервые разработана феноменологическая модель формирования кавитационной области в неньютоновской жидкости, основанная на комплексном рассмотрении кавитационной области как единого целого с учётом всех эффектов и явлений, происходящих внутри самой области, позволившая определить форму и размеры кавитационных зон в гетерогенной среде с жидкой фазой при различных режимах развития кавитации.

3. На основании анализа разработанной модели установлены оптимальные интенсивности УЗ колебаний, обеспечивающие наибольшую удельную мощность ударных волн, образующихся при захлопывании кавитационных пузырьков и определяющую эффективность технологических процессов. Выявлено, что для сред с линейно-вязкими жидкими фазами оптимальные интенсивности составляют от 1,6 до 80 Вт/см². При этом для нелинейно-вязких жидкостей оптимальные интенсивности воздействия в процессе обработки изменяются в пределах диапазона шириной до 20 Вт/см²

за счёт релаксации вязкости.

4. Впервые установлены оптимальные расстояния между границей технологического объёма и излучателем, обеспечивающие увеличение объёма зоны развитой кавитации более чем на 50 %. Показано, что оптимальные расстояния находятся в диапазоне от 60 до 125 см и уменьшаются при увеличении вязкости жидкой фазы.

5. Проведены экспериментальные условия, подтвердившие теоретически выявленные условия и режимы формирования кавитационной области. Экспериментально установлено, что использование разработанных на основании полученных результатов технологических объёмов, содержащих кольцевые отражатели, позволяет существенно повысить КПД УЗ технологического аппарата (до 20 % при обработке сред с жидкими фазами вязкостью до 800 мПа·с).

6. На основании полученных научных результатов разработаны специализированные УЗ технологические аппараты и новые конструкции проточных технологических камер с кольцевыми пластинчатыми отражателями, позволяющими увеличить объём зоны развитой кавитации до 3-х раз. Практическое применение созданных УЗ аппаратов с разработанными технологическими объёмами в различных процессах химической технологии позволило: уменьшить диаметр частиц волластонита, образующихся в результате УЗ диспергирования в полимерном наполнителе с 51 до 42 мкм; обеспечить увеличение площади поверхности катализатора крекинга нефти с 1600 до 2200 м²/г, до 3 раз повысить прочность нанокompозита, основанного на использовании монтмориллонита (наноглин) в качестве наполнителя и т. д.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хмелев, В.Н. Применение ультразвуковых колебаний для ускорения процессов при производстве полимерных материалов [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок, Д.С. Абраменко // Прикладные аспекты химической технологии полимерных материалов и наносистем (Полимер-2009): материалы III Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2009. – С. 151–153.
2. Магсумова, А.Ф. Влияние ультразвуковой обработки на технологические свойства эпоксидного олигомера [Текст] / А.Ф. Магсумова, Л.М. Амирова, М.М. Ганиев // Вестник КГТУ им. Туполева. – 2005. – №2.
3. Хмелёв, В.Н. Новые подходы к ультразвуковой кавитационной обработке жидких сред с высоким затуханием ультразвуковых колебаний [Текст] / В.Н. Хмелёв, С.С. Хмелёв, Ю.М. Кузовников // Инновационные технологии: производство, экономика, образование: материалы Всероссийской научно-практической конференции 24 сентября 2009 года / под. ред. Г.В. Леонова; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2009. – 618 с.
4. Новицкий, Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) [Текст] / Б.Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
5. Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 689 с.
6. Мощные ультразвуковые поля [Текст] / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968. – 268 с.
7. Маргулис, М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция [Текст] / М.А. Маргулис. – М.: Химия, 1986. – 300 с.
8. Хмелев, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в

промышленности, сельском и домашнем хозяйстве [Текст] / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов // Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 400 с.

9. Brennen, C.E. Cavitation and bubble dynamics [Текст] / C.E. Brennen. – New York: Oxford University Press, 1995. – 294.

10. Барсуков, Р.В. Исследование процесса ультразвукового воздействия на технологические среды и повышение эффективности технологических аппаратов: дис. канд. техн. наук [Текст] / Барсуков Роман Владиславович - Бийск: БТИ АлтГТУ, 2005. –135с.

11. Стрэтт, Дж.В. Теория звука [Текст] В 2 т. Т. 1 / Дж.в. Стрэтт (Лорд Релей); пер. с англ. изд. П.Н. Успенский, С.А Каменецкий / под редакцией С.М. Рыкова и К.Ф.Теодорчика – М. -Л.:ГИТТЛ, 1940. – 503 с.

12. Михайлов, И.Г. Поглощение ультразвуковых волн в жидкостях [Текст] / И.Г. Михайлов, С.Б. Гуревич // Успехи физических наук. Т. XXXV, вып. 1. – М.: Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 1948. – 35 с.

13. Физические величины. Справочник [Текст] / под редакцией Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1234 с.

14. Khmelev, V.N. The Cavitation Spraying of the Viscous Liquids [Текст] / V.N. Khmelev, A.V. Shalunov, E.S. Smerdina // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2006: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2006. – P.269-273.

15. Качество трансформаторного масла [Электронный ресурс] / ООО «ТИРИТ». Режим доступа: <http://www.tatcp.ru/upload/tirit/35.pdf>. Дата обращения: 15.10.2013.

16. Тарасов, В.В. Исследование физико-химических свойств некоторых модификаторов минеральных масел [Текст] / Слободина В.Ш., Грязев А.В., Лоханина С.Ю., Чуркин А.В. // Вестник Удмуртского университета. – Ижевск, УдГУ, 2007. – № 8. – С. 113-117.

17. Миллер, Р. Добавки для улучшения розлива материалов с высоким сухим остатком [Текст] / Р. Миллер, М. Аким, П. Патель // Лакокрасочные материалы и их применения. – 2003. – №11. – С. 35-40.

18. Гуняев, Г.М. Влияние ультразвуковой обработки на прочностные свойства композиционных полимерных материалов [Текст] / Г.М. Гуняев [и др.] // Пластические массы. – 2003. – №10. – с.15-16.

19. Пузырь, А.П. Перспективы использования детонационных нанодиазидов с повышенной коллоидной устойчивостью в технических областях [Текст] / А.П. Пузырь [и др.] // Нанотехника. – №8. – 2006. – с.96-106.

20. Низина, Т.А. Оптимизация свойств наномодифицированных эпоксидных композиционных материалов [Текст] / Т.А. Низина, П.А. Кисляков // Строительные материалы. – №9. – 2009. – с.78-80.

21. Полукаева, Л.Г. Модификация смеси эпоксидианового связующего и полиметилена-п-трифенилбората детонационными нанодиазидами и нанодиазидами [Текст] / Л.Г. Полукаева [и др.] // Ползуновский вестник. – №3. – 2008. – с.228-232.

22. Шебанов, С.М. Деформации при многократном сжатии в нелинейной области нанокompозита эпоксидная смола – многослойные углеродные нанотрубки [Текст] / С.М. Шебанов // Комозитный мир, июль-август, 2010.

23. Лакокрасочный материал с биоцидными свойствами [Текст]: пат. 2195473 РФ МПК С09D5/14; С09D5/02 / Кудрявцев Б.Б., Гурова Н.Б., Ревина А.А., Егорова Е.М., Седишев И.П. (РФ) патентообладатель: АОЗТ «Лакма-Имэкс» (РФ) заявка 2002105962/04 от 07.03.2002, опубл. 27.12.2002.

24. Каталог эпоксидных смол [Электронный ресурс] / Dow Europe GmbH. Режим доступа: http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_04d9/0901b803804d9c23.pdf?filepath=/296-01841.pdf&fromPage=GetDoc. Дата обращения: 15.10.2013.

25. Толочко, Н.К. Ультразвуковое диспергирование углеродных наноматериалов [Текст] / Н.К. Толочко и др. // Перспективные материалы, 2008. - №2. – С. 5-9.
26. Фролов, Ю.Г. Курс коллоидной химии. Поверхностные явления и дисперсные системы: учебник для вузов [Текст] / Ю.Г. Фролов. – М.: Химия, 1988. – 464 с.
27. Пивоварова, Н.А. О свойствах и строении нефтяных дисперсных систем [Текст] / Н.А. Пивоварова [и др.] // Вестник АГТУ. – 2008. – №6.
28. Хмелев, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности [Текст] / В.Н. Хмелев, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов; Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – 203 с.
29. Эльпинер, И.Е. Биофизика ультразвука [Текст] / И.Е. Эльпинер. – М.: Наука, 1973. – 384 с.
30. Заяс, Ю.Ф. Ультразвук и его применение в технологических процессах мясной промышленности [Текст] / Ю.Ф. Заяс. – М.: Пищевая промышленность, 1970.
31. Заяс, Ю.Ф. Интенсификация технологических процессов при помощи ультразвука [Текст] / Ю.Ф. Заяс // Пищевая промышленность. – 1960. - № 3(16). – С. 21–28.
32. Барамбойм, Н.К. Механохимия высокомолекулярных соединений [Текст] // Н.К. Барамбойм. – М.: Химия, 1978. – 384 с.
33. Huang, Y.D. Influence of ultrasonic treatment on the characteristics of epoxy resin and the interfacial property of its carbon fiber composites [Текст] / Y.D. Huang, L. Liu, J.H. Qiu, L. Shao // Composit. Sci. Techn. 2002. Vol.62. P.2153.
34. Промтов, М.А. Перспективы применения кавитационных технологий для интенсификации химико-технологических процессов [Текст] / М.А. Промтов // Вестник Тамбовского гос.тех. университета. – №4. – 2008. – с.861 – 869.

35. Хмелев, С.С. Повышение эффективности кавитационно-акустических воздействий на химико-технологические процессы в аппаратных системах с жидкой фазой значительной вязкости [Текст]: дис. канд. техн. наук.: 05.17.08: защищена 24.06.11: утв. 08.11.11 / Хмелев Сергей Сергеевич. – Бийск, 2011. – 125 с.
36. Аксельруд, Г. А. Растворение твердых веществ [Текст] / Г.А.Аксельруд, А.Д. Молчанов – М.: Химия, 1977. — 272 с.
37. Галургия: Теория и практика [Текст] / Под ред. И.Д. Соколова. – Л.: Химия, 1983. – 368 с.
38. Здановский, А.Б. Кинетика растворения природных солей в условиях вынужденной конвекции [Текст] / А.Б. Здановский. – Л.: Госхимиздат, 1956. – 220 с.
39. Каражанов, Н.А. Основы кинетики растворения солей [Текст] / Н.А. Каражанов. – Алма-Ата: Наука Каз. ССР, 1989. – 189 с.
40. Ускорение процессов в жидкостях [Электронный ресурс] / ООО «Александра-Плюс». Режим доступа: http://www.alexplus.ru/Ускорение_процессов_в_жидкостях.html. Дата обращения: 15.10.2013.
41. Грязнов, В.П. Практическое руководство по ректификации спирта [Текст] / В.П. Грязнов. – М.: Пищевая промышленность, 1968. – 193 с.
42. Жужиков, В.А. Фильтрация: Теория и практика разделения суспензий [Текст] / В.А. Жужиков. – М: Химия, 1980. – 400 с.
43. Мустафаев, А.М. Гидроциклоны и нефтедобывающей промышленности [Текст] / А.М. Мустафаев, Б.М. Гутман. – М: Недра, 1981. – 260 с.
44. Резниченко, И.Н. Приготовление, обработка и очистка буровых растворов [Текст] / И.Н. Резниченко. – М: Недра, 1982. – 230 с.
45. Эльпинер, И.Е. Ультразвук. Физико-химическое и биологическое действие [Текст] / И.Е. Эльпинер. – М.: Гос. изд-во физико-математической литературы. – 1963. – 420 с.

46. Schmidt, G. Die mechanische Natur des Abbaus von Makromolekullen mit Ultraschall [Текст] / G. Schmidt, P. Paret // Kolloid Z. – 124. - 150.
47. Ultrasonic Removal of Air Bubbles from Epoxy Resin [Электронный ресурс] / Industrial Sonomechanics. Режим доступа: http://shelf3d.com/Videos/23nsW2yAl_o#. Дата обращения: 29.10.2013.
48. Молчанов, Г.И. Ультразвук в фармации [Текст] / Г.И. Молчанов. – М.: Медицина, 1980.
49. Муравьев, И.А. Технология лекарств [Текст] / И.А. Муравьев. – М.: Медицина, 1971. – 752 с.
50. Литвинова, Т.П. Использование ультразвуковых колебаний для интенсификации процессов экстракции лекарственного животного сырья [Текст] / Т.П. Литвинова и др. // Современные аспекты исследований в области фармации: сборник статей. – Рига, 1977. – С. 96–97.
51. Прозоровский, А.С. Ультразвук и его применение в фармацевтической практике [Текст] / А.С. Прозоровский, Т.П. Литвинова. – М.: Наука, 1960.
52. Вайсман, Г.А. Применение ультразвука для получения настоек и экстрактов из растительного сырья [Текст] / Г.А. Вайсман, М.И. Гуревич, Е.С. Сквирская // Аптечное дело. – 1962. – № 6. – С. 17–21.
53. Романков, П.Г. Экстрагирование из твердых материалов [Текст] / П.Г. Романков, М.И. Курочкина. – Л.: Химия, 1983. – 410 с.
54. Брук, М.М. Получение лекарственных препаратов из животного и растительного сырья под действием ультразвука [Текст] / М.М. Брук // Ультразвук в физиологии и медицине: сборник статей, 1972. – Т. 1. – С. 115–116.
55. Пономарев, В.Д. Экстракция лекарственного сырья [Текст] / В.Д. Пономарев. – М.: Медицина, 1976. – 285 с.
56. Багдасаров, Х.С. Применения ультразвука для диспергирования [Текст] / Х.С. Багдасаров // Кристаллография. – 1958. – Т. 3. – С. 110–111.
57. Кортнев, А.В. Термодинамические и статистические методы исследования ультразвуковой кавитации [Текст]: дис. д-ра техн. наук : ГПС-528 :

защищена 25.03.1969 : утв. 3.02.1969 / Кортнев А.В. – Одесса, 1969. – 314 с.: ил – Библиогр.: с.100 – 109. – 04820016743.

58. Ходаков, Г. С. Реология суспензий. Теория фазового течения и ее экспериментальное обоснование [Текст] / Г. С. Ходаков // Российский химический журнал: Научно-теоретический журнал по химии и химической технологии. Журнал Российского общества им.Д.И.Менделеева. – Основан в 1869 г. Возобновлен в 1956 г. – 01.06.2003. – Т. 47, № 2. – С. 33-44.

59. Уилкинсон, У.Л. Неньютоновские жидкости [Текст] / У.Л. Уилкинсон. – М.: Мир, 1964. – 216 с.

60. Вессельс, В. Жидкие реологические добавки для лакокрасочной промышленности [Электронный ресурс] / В. Вессельс. Режим доступа: <http://www.chem.eurohim.ru/upload/5.%20Reology.ppt>. Дата обращения: 16.10.2013.

61. Рейнер, М. Реология, пер. с англ. [Текст] / М. Рейнер. – М.: Наука, 1965. – 224 с.

62. Мордасов, М.М. Пневматический контроль вязкости жидких веществ. Ч.1: Капиллярные методы измерения и устройства их реализации: учебное пособие [Текст] / М.М. Мордасов, Д.М. Мордасов : под ред. М.М. Мордасова. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2007. – 120 с.

63. Хмелев, В.Н. Исследование влияния кавитирующих сред на работу электронного генератора ультразвуковых аппаратов [Текст] / В.Н. Хмелев [и др.] // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник / под. ред. Г.В. Леонова. – Бийск, 2003. – С. 216–226.

64. Santos, H.M. The Power of Ultrasound [Текст] / H. M. Santos, C. Lodeiro, J.-L. Capelo-Maninez // Ultrasound in Chemistry: Analytical Applications. Edited by Jose-Luis Capelo-Martinez. – 2009. – P. 1-16.

65. Семенкин, С.А. Ультразвуковая очистка [Текст] / С.А. Семенкин // Сборник статей центрального института научно-технической информации

электротехнической промышленности и приборостроения. – М.: ЦИТИЭЛЕКТРОПРОМ, 1964. – С.230-233.

66.Флинн, Г. Физика акустической кавитации в жидкостях [Текст] / Г. Флинн // Физическая акустика / под ред. У. Мезона. – М.: Мир, 1967. – Т. 1.

67.Khmelev, V.N. Method of Control Acoustic Load [Текст] /V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, D.S. Abramenko, E.V. Ilchenko//International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2011: Conference Proceedings. –Novosibirsk: NSTU, 2011. -P.236-240.

68. Khmelev, V.N. Practical Investigations of the Method of Indirect Parameter Checkout of the Acoustic Load Parameters [Текст] / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, D.S. Abramenko, A.V. Shalunov, E.V. Ilchenko//International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2011. -P.241-244.

69. Хмелев, В.Н. Контроль параметров кавитирующих сред, подвергаемых ультразвуковому воздействию [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Е.В. Ильченко, Д.В.Генне, Д.С. Абраменко // Ползуновский вестник. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2012. – № 2-1. – С. 154-158.

70. Шестаков, С. Д. Многопузырьковая акустическая кавитация: математическая модель и физическое подобие [Текст] / С.Д. Шестаков // Электронный журнал "Техническая акустика". – 2010. – №14. – 16 с.

71. Margulis, M. A. Sonochemistry and Cavitation [Текст] / М.А. Margulis. – London: Gordon & Breach, 1995. – 543 p.

72.Шипша, В.Г. Титан и титановые сплавы [Электронный ресурс] / В.Г. Шипша. Режим доступа: http://www.naukaspb.ru/spravochniki/Demo%20Metall/3_17.htm. Дата обращения: 16.10.2013.

73. Time, R.W. Cavitation Bubble Regimes in Polymers and Viscous Fluids [Текст] / R.W. Time, A. H. Rabenjafimanantsoa // Annual transactions of the Nordic rheology society. – 2011. – Vol. 19. – 12 p.

74. Кавитация в эпоксидной смоле [Электронный ресурс] / ООО «Центр ультразвуковых технологий», Лаборатория акустических процессов и аппаратов Бийский технологический институт. Режим доступа: <http://ultrasonic.ru/video/kavitatsiya-v-epoksidnoi-smole>. Дата обращения: 16.10.2013.

75. Ультразвуковая техника – Инлаб [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.utinlab.ru/>.

76. Завод «Пульсар» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.gz-pulsar.ru.

77. Гершгал, Д.А. Ультразвуковая технологическая аппаратура [Текст] / Д.А. Гершгал, В.М. Фридман. – М.: Энергия. – 1987. – 318 с.

78. Hielscher - Ultrasound Technology [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.hielscher.com.

79. Ultrasonic technologies [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.mastersonics.com/.

80. Khmelev, S.S. Development and Application of Piezoelectric Transducer with the Enlarged Radiation Surface for Wastewater Treatment [Текст] / V.N. Khmelev, S.S. Khmelev, S.V. Levin, S.N. Tsyganok, M.V. Khmelev // 10th International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2009: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2009. - P.254-257.

81. Голых, Р.Н. Повышение эффективности ультразвукового воздействия на гетерогенные системы с несущей жидкой фазой высокой вязкости [Текст] / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, А.В. Шалунов, С.С.Хмелёв // Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник». – 2013. – №2. – С. 10-15. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2013/2/2_10-15.pdf.

82. Маргулис, М.А. Динамика ансамбля пузырьков в кавитирующей жидкости [Текст] / М.А. Маргулис, И.М. Маргулис // Журнал физической химии. – 2007. – Т. 81. – №12. – С. 2290-2295.

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

84. Голых, Р.Н. Выявление режимов ультразвукового воздействия, обеспечивающих формирование кавитационной области в высоковязких и неньютоновских жидкостях [Электронный ресурс] / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, С.С. Хмелёв // Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник». – 2014. – №1. – С. 22-27. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2014/1/5_22-27.pdf

85. Brujan, E.A. Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids [Текст] / E.A.Brujan, P.R. Williams // Rheology reviews. – The British Society of Rheology, 2005. – pp. 147-172.

86. Кедринский, В. К. Гидродинамика взрыва [Текст] / В. К. Кедринский. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. – 435 с.

87. Golykh, R.N. Optimization of these modes and conditions of ultrasonic influence on various technological mediums by mathematical modeling [Текст] / R.N. Golykh, V.N. Khmelev, A.V. Shalunov // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2012: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P.124-134.

88. Рудяк В.Я. Статистическая аэрогидромеханика гомогенных и гетерогенных сред [Текст] / В II т. Т. 1. Кинетическая теория.– Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2004. – 320 с.

89. Олройд, Дж.Г. Неньютоновское течение жидкостей и твёрдых тел [Текст] / Дж. Г. Олройд // Реология: Теория и приложения. – М.: 1962. – С. 757-793.

90. Голых, Р.Н. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных жидких сред [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, Р.Н. Голых, Р.В. Барсуков // Ползуновский

вестник №3/2010/ Алт.гос.техн. ун-т. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – с. 321-325.

91. Голых, Р.Н. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных сред / Голых Р.Н., Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Барсуков Р.В., Шалунов А.В.; ООО «Центр ультразвуковых технологий». - Бийск, 2011. – 102 с. - Библиогр.: 23 назв. - Рус. Деп. в ВИНТИ 25.02.2011 № 86-B2011.

92. Голых, Р.Н. Оптимизация методом математического моделирования режимов ультразвукового воздействия на различные технологические среды [Электронный ресурс] / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов // Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник». – 2012. – №2. – С. 20-24. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/4_20-24.pdf //

93. Golykh, R.N. Method for Calculation of Optimum Intensity of Cavitation Influence on Viscous and Fine-dispersed Liquid Media [Текст] / R.N. Golykh, V.N. Khmelev, S.S. Khmelev, R.V. Barsukov // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2011. – P.245-250.

94. Голых, Р.Н. Моделирование процесса формирования кавитационной области в вязких жидкостях для определения оптимального обрабатываемого технологического объема и режимов воздействия [Текст] / 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.

95. Скрипинец, А.В. Исследование реологических свойств олигомер-олигомерных систем на основе эпоксидной смолы и олигоэфирциклокарбоната [Текст] / А.В. Скрипинец, Ю.В. Попов, Н.В. Саенко, Р.А. Быков // III Международная научно-техническая интернет-конференция «Строительство, реконструкция и восстановление зданий городского хозяйства». – Харьковская национальная академия городского хозяйства, 2012. – 2 с.

96. Metzner, A.V. Flow behavior of concentrated (dilatant) suspensions [Текст] / A.V. Metzner, M. Whitlock // Transactions of the society in rheology, 1958. –P. 239-254.

97. Голых, Р.Н. Оптимизация методом математического моделирования режимов ультразвукового воздействия на различные технологические среды [Электронный ресурс] / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов // Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник». – 2012. – №2. – С. 20-24. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/4_20-24.pdf //

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

99. Ультразвуковой распылитель, пат. на полезную модель № 131307 Российская Федерация: МПК В05В17/06 / Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Генне Д.В., Шалунова А.В., Голых Р.Н. (РФ); патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ» (ООО «ЦУТ АлтГТУ») (РФ) заявка: 2011146974/05 от 18.11.2011; опубл. 10.05.2013 – 8 с.: ил.

100. Bretz, N. Numerical simulation of ultrasonic waves in cavitating fluids with special consideration of ultrasonic cleaning [Текст] / N. Bretz, J. Strobel, M. Kaltenbacher, R.Lerch // IEEE Ultrasonics Symposium, 2005. – pp. 703-706.

101. Golykh, R.N. Process Modeling of Cavitation Zone in Process Vessels with High-viscous and Fine-dispersed Liquid Media [Текст] / R.N. Golykh, V.N. Khmelev, S.S. Khmelev // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2011. – P.251-256.

102. Голых, Р.Н. Моделирование процесса формирования кавитационной области в высоковязких и высокодисперсных жидких средах [Электронный ресурс] / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, С.С. Хмелёв //

Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник». – 2012. – №1. – С. 22-26. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/1/Section1/4_22-26.pdf.

103. Golykh, R.N. Modes and conditions of efficient ultrasonic influence on high-viscosity media in technological volumes / R.N. Golykh, V.N. Khmelev, S.S. Khmelev, A.V. Shalunov // 14th International Conference of Young Specialists on Micro|Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2013: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2013. – P.128-133.

104. Голых, Р.Н. Выявление оптимальных условий ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред [Электронный ресурс] / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, С.С. Хмелёв, А.В. Шалунов // Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник». – 2014. – №2. – С. 138-142. – Режим доступа: [http://s-sibsb.ru/images/articles/2014/2\(6\)/S-SibSB_Issue_6.pdf](http://s-sibsb.ru/images/articles/2014/2(6)/S-SibSB_Issue_6.pdf).

105. Derksen, J. Simulations of thixotropic liquids [Текст] / J. Derksen // Seventh International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 2009. – P. 1-9.

106. Хмелёв, В.Н. Повышение эффективности ультразвукового воздействия при производстве высоконаполненных композиционных материалов / В.Н. Хмелёв, С.С. Хмелёв, К.А. Карзакова, Р.Н. Голых // Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник». – 2012. – №2. – С. 189-192. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/47_189-192.pdf

107. Голых, Р.Н. Ультразвуковая кавитационная обработка вязких и жидких высокодисперсных сред [Текст] / Голых Р.Н., Хмелёв С.С., Хмелёв В.Н. // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП-2010): материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – С.125-129.

108. Голых, Р.Н. Ультразвук для ЛКМ. Моделирование процесса формирования кавитационной области в вязких жидкостях для определения оптимального обрабатываемого технологического объема и режимов

акустического воздействия [Текст] / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, С.С. Хмелёв, Р.В. Барсуков, А.В.Шалунов // Экспертный журнал «Очистка. Окраска». – 2011. – №3(46). – С.52-54.

109. Голых, Р.Н. Выявление оптимальных условий и режимов акустического воздействия на вязкие и дисперсные среды / В.Н. Хмелёв, Р.Н. Голых, 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: Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, 2011. - С.93.

110. Голых, Р.Н. Оптимизация методом математического моделирования режимов ультразвукового воздействия на различные технологические среды [Электронный ресурс] / Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов // Электронный журнал «Южно-Сибирский научный вестник». – 2012. – №2. – С. 20-24. – Режим доступа: http://s-sibsb.ru/images/articles/2012/2/4_20-24.pdf

111. Brenner, T. Application of high-power ultrasound in fibre suspensions to increase the strength of paper [Электронный ресурс] / Т. Brenner, Н. Grossman // 40th International Annual Symposium DITP. Режим доступа: <http://www.cepi.org/system/files/public/epw-presentations/2013/Brenner.pdf>. Дата обращения: 28.02.2014.

112. Хмелёв, В.Н. Совершенствование конструкции резонансного концентрирующего звена с увеличенной поверхностью излучения / Хмелёв В.Н., Хмелёв С.С., Барсуков Р.В., Голых Р.Н., Карзакова К.А. // Электронный журнал «Техническая акустика». – 2012. – 7. – 12 с. – Режим доступа: <http://ejta.org/ru/khmelev11>.

113. Ультразвуковой проточный реактор [Текст]: пат. 2403085 РФ МПК В01J19/10 / Борисов Ю.А., Леонов Г.В., Хмелев В.Н., Абраменко Д.С., Хмелев С.С., Шалунов А.В. (РФ) патентообладатель: ГОУ ВПО «АлтГТУ им. И.И. Ползунова» (РФ) заявка 2009115487/05 от 23.04.2009, опубл. 10.11.2010.

114. Кнэпп, Р. Кавитация [Текст] / Р. Кнэпп, Дж. Дейли, Ф. Хэммит – М.: Мир, 1974. – 688 с.

115. Березовский, Ю.М. Экспериментальная оценка закономерностей эрозионной активности кавитации в воде [Текст] / Ю.М. Березовский, В.Ю. Шпаков, В.Н. Андреев // Электронное научное издание «Технологии 21 века в лёгкой промышленности», №6, ч.1. – 2012. – 10 с.

116. Промтов, М.А. Импульсные технологии переработки нефти и нефтепродуктов [Текст] / М.А. Промтов – Тамбов: ТГТУ. – 4 с.

117. Наноглины и их развивающиеся рынки [Электронный ресурс] // ПластЭксперт: всё о пластике и полимерах. Режим доступа: <http://www.e-plastic.ru/specialistam/composite/nanogliny-i-ikh-razvivayushiesya-rynki>. Дата обращения: 15.03.2014.