

На правах рукописи



Хмелев Сергей Сергеевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КАВИТАЦИОННО-
АКУСТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ
ПРОЦЕССЫ В АППАРАТНЫХ СИСТЕМАХ С ЖИДКОЙ ФАЗОЙ
ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ ВЯЗКОСТИ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бийск – 2011

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

Научный руководитель	кандидат технических наук, доцент Барсуков Роман Владиславович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Овчаренко Александр Григорьевич
	кандидат технических наук, доцент Василишин Михаил Степанович
Ведущая организация	ОАО «ФНПЦ «Алтай»

Защита состоится «24» июня 2011 года в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.08 в Бийском технологическом институте (филиале) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Бийского технологического института (филиала) государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» по адресу: 659305, Алтайский край, г. Бийск, ул. Трофимова, 27.

Автореферат разослан «23» мая 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Светлов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Одним из новых подходов к решению различных технологических задач является использование ультразвуковых (УЗ) технологий.

Использование ультразвуковых колебаний высокой интенсивности позволяет ускорить традиционные и реализовать новые процессы химических технологий в жидких и жидкодисперсных средах.

Уникальная технологическая эффективность УЗ воздействия обеспечивается возникновением в жидких средах, при распространении колебаний, кавитационных парогазовых пузырей, накапливающих энергию при их расширении и взрывающихся при сжатии с созданием ударных волн и коммулятивных струй.

Ультразвуковая интенсификация процессов химических технологий в жидких средах реализуется при контактном введении колебаний непосредственно в жидкие среды и обеспечении условий для возникновения и поддержания режима кавитации характеризующимся индексом кавитации K .

На практике УЗ технологии (растворение, экстрагирование, диспергирование, эмульгирование) наиболее эффективно реализуются в воде, органических растворителях и средах на водной основе с малым содержанием твердых фракций. Эффективность реализации процессов в таких средах обусловлена малым затуханием колебаний и возможностью создания развитой кавитации при минимальных энергетических затратах.

В последние годы все большее значение приобретают технологические процессы (диспергирование, эмульгирование, растворение и равномерное распределение наночастиц в смолах и полимерах, экстрагирование в масляных средах и т.п.) в жидких средах, характеризующихся аномально высоким затуханием колебаний и высокой вязкостью (глицерин, масла, краски), а также в дисперсных системах (эмульсии, суспензии) и высокомолекулярных средах (смолы, полимеры, нефти и их производные).

Однако уникальные возможности ультразвуковых колебаний высокой интенсивности не нашли применения для интенсификации процессов химических технологий в жидких средах характеризующихся значительной вязкостью.

Основные причины этого обусловлены отсутствием теоретических и экспериментальных данных о возможностях создания режима развитой кавитации в разнообразных жидких средах характеризующихся значительной вязкостью, отсутствием ультразвуковых технологических аппаратов, способных создавать развитую кавитацию в таких средах, отсутствием технологических камер, позволяющих обеспечить увеличение объемов технологических сред, одновременно обрабатываемых в кавитационном режиме. Указанные причины ограничивают использование существующих типов УЗ аппаратов для промышленного использования.

В связи с этим задача повышения эффективности процессов химических технологий в жидких средах со значительной вязкостью за счет ультразвукового воздействия в кавитационном режиме является актуальной.

Цель исследования – создание ультразвуковых аппаратов, способных обеспечить повышение эффективности (производительности) УЗ обработки

жидких сред со значительной вязкостью за счет выявления и установления оптимальных режимов кавитационного воздействия в технологических камерах при реализации различных процессов химических технологий.

Задачи исследований:

- установление причин, ограничивающих эффективное применение УЗ технологий для интенсификации процессов химических технологий в жидких средах, характеризующихся значительной вязкостью;
- разработка математической модели процесса формирования кавитационных пузырьков с учетом влияния вязкости и выявление оптимальных режимов ультразвукового воздействия на различные по вязкости технологические среды на основе анализа разработанной модели;
- определение условий формирования максимальных по размерам зон кавитационного воздействия в технологических камерах при реализации процессов в жидких средах со значительной вязкостью;
- разработка и изготовление пьезоэлектрических колебательных систем повышенной мощности с увеличенной поверхностью излучения для обеспечения ввода УЗ колебаний с интенсивностью, достаточной для реализации кавитационного процесса;
- разработка специализированных УЗ технологических аппаратов и технологических камер для кавитационной обработки жидких сред в периодическом и проточном режимах;
- исследование функциональных возможностей созданных аппаратов для подтверждения эффективности реализации различных процессов химических технологий.

Объект и методы исследования. Объектом исследования являются процессы химических технологий протекающие под воздействием УЗ колебаний высокой интенсивности, реализуемые при помощи создаваемых аппаратов, содержащих в своем составе пьезоэлектрические колебательные системы повышенной мощности с увеличенной излучающей поверхностью и технологические камеры, обеспечивающие возникновение резонансных явлений для увеличения объемов обрабатываемых сред.

При выполнении работы применялись как теоретические, так и экспериментальные методы исследования, направленные на решение поставленных задач.

Научная новизна:

- определены интенсивности УЗ воздействия, обеспечивающие максимальную эффективность (максимальную производительность при минимальных энергозатратах) технологических процессов в жидких средах значительной вязкости на основе теоретических исследований и анализа модели, учитывающей влияние вязкости на кавитационный процесс;
- определены оптимальные условия формирования максимальных по размерам зон кавитационного воздействия в технологических камерах с наличием отражающей поверхности и установлена возможность увеличения объемов одновременно обрабатываемой среды не менее чем в 3 раза;
- предложены и разработаны пьезоэлектрические преобразователи повышенной мощности, излучатели с увеличенной поверхностью излучения и

технологические камеры специальной формы с отражающими поверхностями, обеспечившие возможность применения созданных ультразвуковых аппаратов для интенсификации процессов химических технологий в производственных условиях.

Практическая значимость:

- установлены оптимальные режимы кавитационного ультразвукового воздействия на различные по вязкости технологические среды и выработаны практические рекомендации по созданию и применению УЗ аппаратов для интенсификации процессов в жидких средах значительной вязкости;
- на основании теоретических и экспериментальных исследований предложены пути построения новых типов пьезопреобразователей повышенной мощности, излучателей с увеличенной поверхностью излучения, технологических камер различной формы и размеров, предназначенных для обеспечения резонансных режимов УЗ кавитационного воздействия на жидкие среды с значительной вязкостью;
- разработаны практические конструкции ультразвуковых технологических аппаратов с максимальной потребляемой мощностью до 7000 Вт и излучающей поверхностью до 350 см², способные обеспечить кавитационную обработку с интенсивностью более 20 Вт/см² технологических сред объемом до 10–30 л в проточном режиме.

Личный вклад автора:

- предложена и разработана теоретическая модель определения режимов оптимального ультразвукового воздействия на жидкие среды с значительной вязкостью;
- проведены экспериментальные исследования по ультразвуковому воздействию на жидкие среды с различной вязкостью и определены требования к энергетическим параметрам генераторов и ультразвуковых колебательных систем;
- предложены и разработаны конструкции ультразвуковых пьезоэлектрических колебательных систем повышенной мощности.

Реализация работы. Результаты работы использованы при создании ультразвукового технологического оборудования, применяемого для интенсификации различных химико-технологических процессов и нашли промышленное применение на предприятиях РФ, таких как ОАО «Газпромнефть-Омский НПЗ» (г. Омск), ОАО «Воркутауголь» (г. Воркута), ФГУП «Горно-химический комбинат» (г. Железногорск), ФГУП «Всероссийский электротехнический институт им. В.И. Ленина» (г. Москва), ЗАО "СибНИПИРП" (г. Нижневартовск), ООО «Тихоокеанские биотехнологии» (г. Владивосток), ООО «Партнер» (г. Москва), ООО «Русская изобретательная компания» (г. Екатеринбург).

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на конференциях International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007, EDM'2008, EDM'2009 (Novosibirsk); на III-ей Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Прикладные аспекты химической технологии полимерных материалов и наносистем (Полимер-2009)» (г. Бийск); на Всероссийской научно-практической

конференции лауреатов 1-го тура программы «У.М.Н.И.К.-2009» (г. Барнаул); на 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях ИАМП-2010» (г. Бийск).

Результаты исследований, представленные в диссертационной работе, были получены при выполнении НИОКР по Государственному контракту № 7353р/10217 от 28.12.2009 «Разработка технологий и оборудования для ультразвуковой обработки высоковязких жидких сред», проводимого в рамках программы «У.М.Н.И.К.».

Положения, выносимые на защиту:

Результаты теоретических исследований позволившие, определить оптимальные энергетические режимы ультразвукового воздействия жидкие среды со значительной вязкостью и условия формирования максимальных по размерам зон кавитационного воздействия в технологических камерах.

Результаты экспериментальных исследований по определению энергетических параметров генераторов и излучателей, условий формирования максимальных по размерам зон кавитационного воздействия для различных по вязкости жидких сред.

Выявленные и обоснованные способы повышения эффективности кавитационного воздействия на высоковязкие и дисперсные жидкие среды за счет применения новых конструкций пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем.

Обоснование эффективности созданных пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем с многоэлементами пьезопреобразователями, многополуволновыми рабочими излучающими инструментами с развитой поверхностью излучения и технологических камер, обеспечивающих резонансное усиление колебаний.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и результатов, списка литературы из 106 наименований и содержит 156 страниц машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, научная и практическая значимость, сформулированы цель работы и ее научная новизна, изложены основные, выносимые на защиту положения, приведена краткая характеристика работы.

Первый раздел посвящен анализу состояния процессов химических технологий, интенсифицируемых воздействием ультразвуковых колебаний в жидких средах, отличающихся высокой вязкостью, а также анализу современного состояния ультразвукового оборудования для реализации таких процессов.

Проведенный анализ различных технологических процессов показал, что при введении в обрабатываемые среды ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в жидких средах возникают вторичные явления, влияющие на ход физико-химических процессов. К основному явлению, оказывающему наибольший вклад в интенсификацию процессов, относится кавитация.

В разделе показывается, что значительный вклад в изучении кавитационного воздействия на жидкие среды в XX веке внесли такие ученые как Розенберг Л.Д., Агранат Б.А., Маргулис М.А., Эльпинер И.Е., Шутилов В.А., Новицкий Б.Г., Абрамов О.В. и др. В настоящее время решением различных технологических проблем, связанных с кавитационным воздействием на жидкие среды, в том числе и характеризующиеся высокой вязкостью и дисперсностью, занимаются в нашей стране: Холопов Ю.В., Промтов М.А., Квашнин С.Е., Педдер В.В., Ганиев М.М., Шебанов С.М., Нестеренко А.И., Шестаков С.Д., Новик А.А. и за рубежом: Suslick K.S., Hielscher T. (Германия), Дежкунов Н.В. (Беларусь), Войтович А.В. (Украина), Баласанян С.Б. (Армения), Huang Y.D. (Корея) и др.

В этом же подразделе рассматриваются примеры воздействия УЗ колебаний высокой интенсивности на высоковязкие жидкие среды. Показывается, что одним из самых распространенных применений ультразвука является воздействие на эпоксидные смолы. В настоящее время ультразвуковое воздействие с интенсивностью от 20 до 70 Вт/см² рассматривается как один из путей совершенствования технологии эпоксидных полимерных материалов, особенно на стадии совмещения составляющих композита и формирования его структуры.

Обработка неотвержденных эпоксидных композиций ультразвуковыми колебаниями в кавитационном режиме приводит к снижению вязкости как чистых олигомеров, так и в композициях с отвердителями. Кроме того, в ходе эксперимента для всех композиций отмечалось улучшение процессов перемешивания компонентов.

Среди известных технологических процессов особый интерес представляет использование УЗ колебаний высокой интенсивности (до 70 Вт/см²) для равномерного распределения и разрушения агрегатов наночастиц в связующем. В результате такого воздействия показана высокая устойчивость наноалмазов в эпоксидных смолах и отсутствие агрегирования в течение длительного времени. Наблюдается однородное распределение частиц в связующем на основе смол, без оседания и образования агломератов в течение долго времени и как итог – повышение прочности конечного изделия.

Одним из перспективных и востребованных применений ультразвука являются технологические процессы, направленные на получение и изменение свойств нефтепродуктов. УЗ колебания позволяют изменять свойства нефтепродуктов за счет разрушения связи между отдельными частями молекул. В молекулах парафина нарушаются С-С связи, вследствие чего происходят изменения физико-химического состава (уменьшение молекулярного веса, температуры кристаллизации) и свойств нефтепродуктов (вязкости, плотности, температуры вспышки и др.).

Проведенный в первом разделе анализ литературных источников показал, что указанные процессы химических технологий эффективно реализуются при обеспечении в жидкой среде режима развитой кавитации, который, как показывают результаты экспериментальных лабораторных исследований, достигается при интенсивности ультразвуковых колебаний выше 20 Вт/см².

Во второй части первого раздела проводится анализ современного состояния ультразвукового оборудования, используемого в лабораторных и

производственных условиях для интенсификации процессов химической технологии. Анализ конструктивных схем, комплектации и функциональных возможностей ультразвукового оборудования показал, что практически все используемые в настоящее время ультразвуковые аппараты, способные выполнять обработку жидких сред, аналогичны по своим конструктивным схемам и используются для кавитационной обработки жидких сред, характеризующихся малой вязкостью.

Попытки использования известных аппаратов для интенсификации процессов в жидких средах с высокой вязкостью и дисперсностью, не обеспечивают достижения положительных результатов из-за невозможности реализации существующим оборудованием кавитационного режима в объемах, достаточных для реализации процессов в промышленных масштабах.

Попытки увеличения интенсивности ультразвукового излучения за счет увеличения мощности генераторов при неизменных поверхностях излучения также не обеспечивают решения проблемы из-за отсутствия данных об оптимальных режимах воздействия для различных по вязкости и дисперсности сред. Использование различных технологических камер как периодического, так и непрерывного действия не обеспечивает эффективной и равномерной обработки высоковязких технологических сред, исключая ультразвук из перечня технологий, применяемых в промышленных условиях.

Отсутствие необходимых теоретических и экспериментальных данных об оптимальных режимах энергетического воздействия на различные вязкие и высокодисперсные среды, а также отсутствие информации об оптимальных по форме и размерам технологических камер обуславливают необходимость проведения теоретических исследований процесса кавитационной обработки для создания на их основе новых технологических аппаратов, способных обеспечивать повышение эффективности химико-технологических процессов в промышленных масштабах.

Понимание проблемы и анализ возможных путей решения проблемы позволило в завершении первого раздела сформулировать цель работы и задачи исследований.

Второй раздел посвящен теоретическим исследованиям, конечным результатом которых является определение необходимой интенсивности воздействия (мощности аппаратов) для реализации режима развитой кавитации в аппаратных системах с жидкой фазой значительной вязкости и определение размеров формируемой в различных условиях и при различных интенсивностях УЗ воздействия кавитационной области в технологических камерах различной формы.

В первой части раздела показывается, что интенсивность УЗ воздействия, создаваемая существующими УЗ аппаратами, не позволяет достичь требуемого разряжения в жидкости, достаточного для преодоления радиальных сжимающих сил капиллярного давления и сил вязких напряжений на гетерогенные парогазовые включения (кавитационные зародыши) и дальнейшего их расширения с последующим схлопыванием образующихся пузырьков.

Для определения необходимой интенсивности УЗ воздействия для реализации режима развитой кавитации в вязких и дисперсных жидких средах в

первой части раздела приводится определение размеров кавитационного пузырька в линейно-вязкой жидкости в зависимости от вязкости этой жидкости. Показывается, что существующая методика определения параметров кавитирующей среды основывается на допущении о полном отсутствии вязкости жидкости. Такое допущение приводит к неправильному определению количества УЗ энергии, необходимой для возникновения и поддержания режима развитой кавитации при обработке жидких сред, обладающих высокой вязкостью.

Для устранения недостатков существующей методики построена модель процесса, основанная на использовании уравнения Кирквуда–Бете динамики стенки кавитационной полости, т. е. дифференциального уравнения относительно радиуса кавитационного пузырька как функции от времени. Данное уравнение имеет следующий вид:

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

где C – локальная скорость звука в жидкости, м/с; H – энтальпия жидкости; R – радиус газового пузырька, м.

Энтальпия жидкости определяется следующим выражением для случая слабоизменяющейся плотности жидкости:

$$H = \int_{p_\infty}^{\left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{\rho R} - \frac{4\eta \dot{R}}{\rho R}} \frac{\partial p}{\rho(p)} \approx \frac{\left(p_0 + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - \frac{2\sigma}{\rho R} - \frac{4\eta \dot{R}}{\rho R} - p_\infty}{\rho}, \quad (2)$$

где ρ – плотность рассматриваемой жидкости, кг/м³; σ – поверхностное натяжение рассматриваемой жидкости, Н/м; η – вязкость рассматриваемой жидкости, Па с; R_0 – радиус зародыша, м; γ – показатель адиабаты для воздуха; p_∞ – давление жидкости на больших расстояниях от центра кавитационной полости, Па; p_{c_0} – давление газа в зародыше, Па.

Если излучатель ультразвуковых колебаний расположен на некоторой постоянной глубине в жидкости, то

$$p_\infty = P_0 - p \sin(\omega t), \quad (3)$$

где P_0 – гидростатическое давление, Па; p – давление звуковой волны, Па; ω – угловая частота акустических колебаний, рад/с; t – время, сек.

Если кавитационный пузырёк пульсирует, изменяя свои размеры незначительно, что характерно для резонансного режима, то радиус кавитационного пузырька определяется следующим выражением:

$$R = R_{MAX} (1 + \alpha \sin(\omega t + \varphi)), \quad (4)$$

где R_{MAX} – радиус резонансного пузырька, м; α – относительная амплитуда колебаний пузырька, м; φ – фазовый сдвиг малых колебаний кавитационной полости относительно колебаний давления жидкости.

Для решения задачи проведен ряд преобразований уравнения (1) с прямой подстановкой выражений (2), (3) и (4).

Анализ полученного после подстановок уравнения с целью выявления зависимости амплитуды колебаний радиуса кавитационной полости от частоты затруднителен, поэтому использовано линейное приближение данного уравнения с исключением членов порядка малости, начиная со второго. Резонансная частота определяется из условия максимума α или минимума $\left| \frac{p}{\alpha} \right|^2$.

После преобразований получено выражение для резонансной частоты f пузырька радиусом R_{MAX} :

$$f = \frac{1}{2\pi R_{MAX}} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(3\gamma \left(\frac{2\sigma}{R_{MAX}} + p_0 \right) - \frac{2\sigma}{R_{MAX}} - \frac{8\eta^2}{\rho R_{MAX}^2} \right)}. \quad (5)$$

Таким образом, получено выражение для определения максимального размера парогазового пузырька. Для определения размера парогазового пузырька R при различных значениях звукового давления используют следующее выражение:

$$\left(P_0 - P_{\Pi} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 - \frac{2\sigma}{R} = P_0 - P_M \sin(\omega t) - P_{\Pi}, \quad (6)$$

где P_{Π} – давление насыщенных паров, Па.

Таким образом, зная R_0 , R , R_{MAX} , можно воспользоваться выражением для определения индекса кавитации K и, следовательно, определять волновое сопротивление кавитирующей среды для любого значения величины звукового давления с целью обеспечения максимальной эффективности процесса при минимальных энергозатратах.

Во второй части раздела приводится определение размеров кавитационного пузырька в нелинейно-вязкой жидкости. Подход к моделированию процесса основан на получении дифференциального уравнения относительно радиуса кавитационного пузырька в зависимости от значения звукового давления, исходя из уравнений гидродинамики для поля обтекания жидкости вокруг кавитационной полости.

Поле обтекания жидкости описывается системой уравнений неразрывности и сохранения импульса в дифференциальной форме:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^3 \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial v_i}{\partial t} + \sum_{j=1}^3 v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} \right) = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial P_{ij}}{\partial x_j} \end{cases} \quad (7)$$

где v – скорость движения жидкости, м/с; P – тензор напряжений жидкости.

С учетом зависимости вязкости жидкости от скорости сдвига необходимо найти новое значение тензора напряжений.

Тензор напряжений нелинейно-вязкой несжимаемой жидкости описывается следующим соотношением:

$$\begin{aligned} P &= -pI + \tau(D); \\ \tau(D) &= 2\eta(D_2)D, \end{aligned} \quad (8)$$

где D_2 – скорость сдвига, м/с; $\eta(D_2)$ – вязкость жидкости, Па с; I – единичный тензор 2-го ранга; D – тензор скоростей деформации.

С учетом уравнения неразрывности и радиальной симметрии кавитационной полости радиальная скорость движения жидкости представляется в виде:

$$v = \frac{\partial \varphi}{\partial r} = \frac{C}{r^2}, \quad (9)$$

где C – величина, не зависящая от координаты точки жидкости, а только от времени; r – расстояние от центра кавитационной полости, м; φ – потенциал скорости движения жидкости.

После проведения ряда преобразований получено следующее выражение для скорости сдвига в зависимости от расстояния от центра кавитационного пузырька:

$$D_2 = -\frac{6C^2}{r^6}. \quad (10)$$

С учетом найденной скорости сдвига уравнение сохранения импульса из системы (6) запишется в следующем виде:

$$\rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v^2}{2} \right) \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \eta(D_2)}{\partial r} \left(2r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{v}{r} \right) + \frac{2v}{r} \right). \quad (11)$$

Граничные условия с учётом сил поверхностного натяжения и вязкости для давления запишутся следующим образом:

$$p = -\frac{2\sigma}{R} + p_{e0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - 4\eta \left(-\frac{6C^2}{R^6} \right) \frac{\dot{R}}{R}. \quad (12)$$

А скорость движения жидкости вблизи стенки пузырька равна:

$$v|_{r=R} = \dot{R}. \quad (13)$$

С учетом граничных условий (11) и (12) и уравнения сохранения импульса (10) уравнение пульсаций кавитационного пузырька в нелинейно-вязкой жидкости запишется следующим образом:

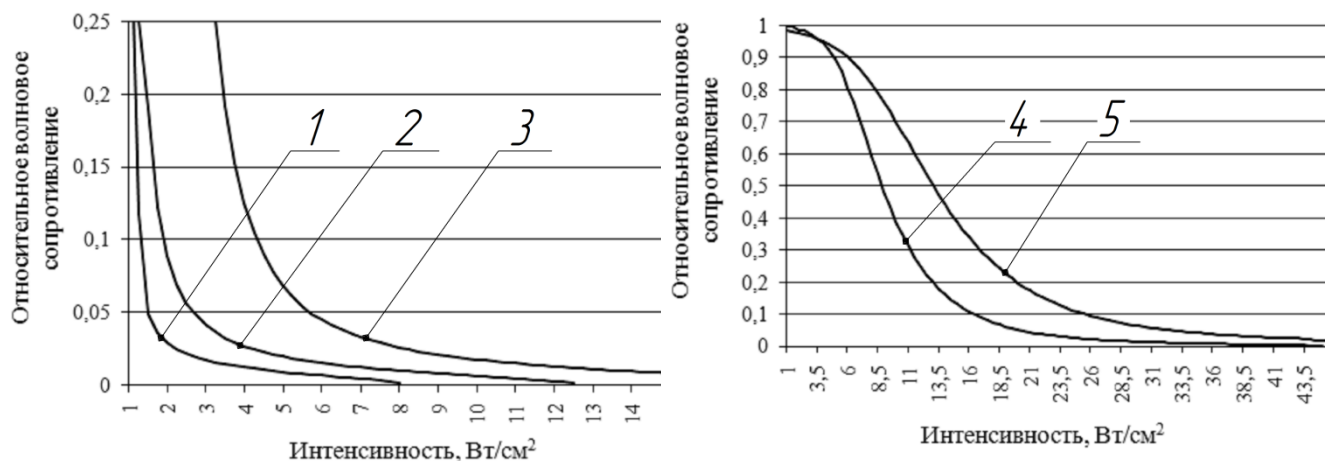
$$\rho \left(\frac{3\dot{R}^2}{2} + R\ddot{R} \right) = -\frac{2\sigma}{R} + p_{e0} \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + 4\eta \left(-\frac{6C^2}{R^6} \right) \frac{\dot{R}}{R} - \int_R^\infty \frac{144C^3}{r^{10}} \frac{\partial \eta \left(-\frac{6C^2}{r^6} \right)}{\partial \gamma} dr. \quad (14)$$

Из полученного уравнения (14) следует, что в случае отсутствия зависимости вязкости от скорости сдвига ($\frac{\partial \eta}{\partial \gamma} = 0$) уравнение сводится к уравнению пульсаций кавитационного пузырька – уравнению Нолтинга–Непейраса.

Следовательно, для нахождения резонансного радиуса пузырька в нелинейно-вязких жидкостях применима формула для линейно-вязких жидкостей, в которой за вязкость принимается вязкость при скорости сдвига, близкой к нулю. Таким образом, можно сделать вывод, что на резонансный

размер парогазового пузырька нелинейность вязкости жидкости существенного влияния не оказывает.

На рисунке 1 приведены теоретические зависимости относительного волнового сопротивления от интенсивности воздействия для различных используемых на практике жидкостей, построенные с использованием выражений (1) и (5).



1 – вода; 2 – машинное масло; 3 – оливковое масло; 4 – глицерин;
5 – эпоксидная смола ЭД-20.

Рисунок 1 – Зависимость относительного волнового сопротивления среды от интенсивности создаваемых колебаний для различных по вязкости жидкостей

Критерием оптимальности при построении теоретических кривых принимается равенство значения волнового сопротивления среды значению соответствующему индексу кавитации равному 0,7.

В таблице 1 приведены численные показатели оптимальной интенсивности для различных типов жидкости с указанием их основных параметров.

Таблица 1 – Параметры жидкостей и оптимальные интенсивности воздействия для каждой из них

Вид жидкости	Параметры жидкости			Оптимальная интенсивность, Вт/см ²
	скорость звука, м/с	плотность, кг/м ³	вязкость, 10 ⁻³ Па·с	
Вода	1483	1000	0,82	3,5
Масло моторное по SAE10W-40	1740	980	85	12,5
Масло оливковое	1381	950	120	17,8
Глицерин	1930	1264	400	22,7
Эпоксидная смола ЭД-20	1700	1170	520	27,6

Приведённые зависимости позволяют установить, что при прочих равных условиях увеличение вязкости влечёт за собой достижение меньшей степени развитости кавитации.

В третьей части раздела показывается, что использование ультразвуковых технологических аппаратов в промышленных условиях ограничено размерами кавитационной области – ее продольный размер не превышает по размерам диаметр излучателя. Это обусловлено высоким затуханием УЗ колебаний в

вязкой среде и потерями энергии на поддержание кавитации – т.е. за пределами кавитационной области уровня акустического давления недостаточно для достижения требуемого разряжения в жидкости.

Поэтому для того, чтобы установить необходимую амплитуду колебаний давления среды в максимально возможной части технологического объема, одним из очевидных решений проблемы является ограничение продольного размера обрабатываемого объема для создания стоячих волн, которые, как известно, приводят к увеличению амплитуды звукового давления.

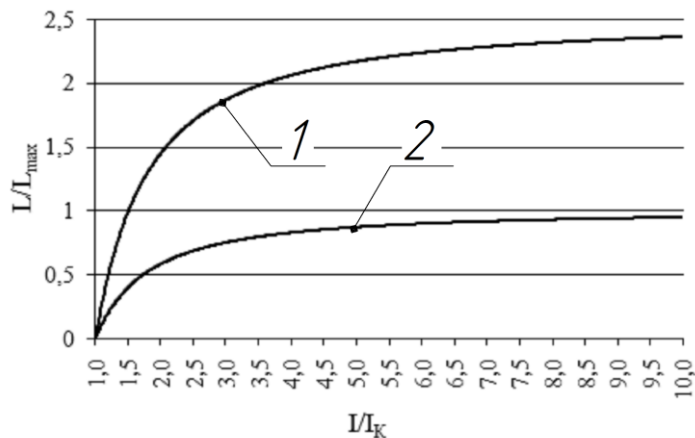
Переход к моделированию процесса основан на использовании закона сохранения энергии в интегральной форме для сплошной среды и исследовании зависимости радиуса кавитационного пузырька от времени и амплитуды давления на основании анализа уравнения Нолтинга–Непайраса. С учетом проведенного анализа получим удобное для исследования выражение:

$$Kp_m^{\frac{9}{2}} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p_m u_m \cos \varphi}{2} \right), \quad (14)$$

где p_m – амплитуда колебаний давления;

u_m – скорость среды, м/с.

Анализ полученного выражения в случае обеспечения УЗ излучения в режиме «бегущей плоской волны» и в режиме «стоячей волны» позволил получить зависимость оптимального обрабатываемого объема (рисунок 2) от интенсивности воздействия и, в частности, показал возможность увеличения продольных размеров кавитационной области примерно в 2,5 раза при реализации режима «стоячей волны».



1 – в режиме стоячей волны; 2 – в режиме бегущей волны.

Рисунок 2 – Зависимость относительного значения продольного размера оптимального обрабатываемого объема от интенсивности воздействия

При этом вблизи отражающей стенки (дна) технологической камеры, формируется локальный максимум, с амплитудой давления, не более чем на 15 % меньшей амплитуды давления вблизи излучающей поверхности. Это свидетельствует о возможности обеспечения равномерной кавитационной обработки жидкости во всем выбранном объеме с отражающей стенкой.

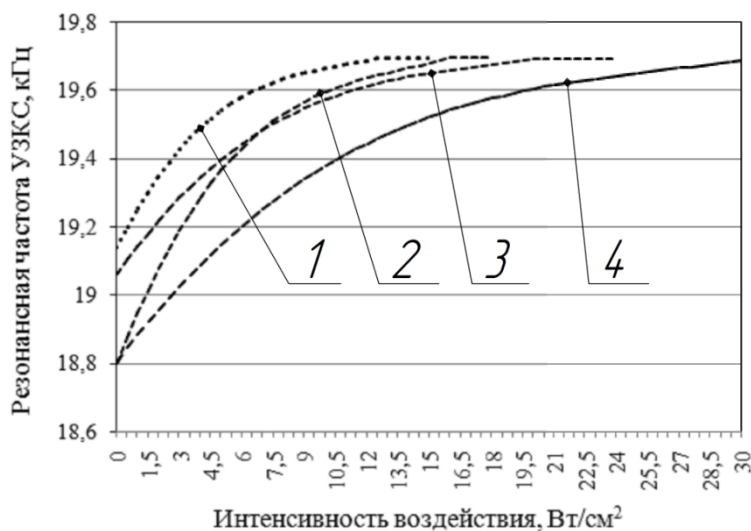
В заключении второго раздела показано, что в результате проведенных теоретических исследований были установлены необходимые интенсивности воздействия для реализации режима развитой кавитации в высоковязких и

дисперсных жидких средах и определены размеры формируемой в различных условиях и при различных интенсивностях УЗ воздействия кавитационной области в технологических камерах. Полученные результаты позволили выработать требования не только к мощностным параметрам электронных генераторов, но и определить требуемые параметры ультразвуковых колебательных систем (УЗКС).

Третий раздел содержит результаты экспериментальных исследований, направленных на подтверждение численных показателей оптимальной интенсивности УЗ воздействия на жидкие среды со значительной вязкостью.

Для подтверждения численных показателей оптимальной интенсивности для различных типов жидкости, полученных при помощи предложенной модели, были проведены эксперименты по ультразвуковой кавитационной обработке жидкостей со значительной вязкостью.

Из зависимостей, представленных на рисунке 3, следует, что первоначально, при отсутствии кавитации жидкая среда, окружающая рабочий инструмент, представляет для колебательной системы достаточно большую присоединенную массу и снижает резонансную частоту колебательной системы. По мере увеличения амплитуды колебаний (при увеличении подводимого напряжения к УЗКС) в жидкой среде возникает кавитация. Кавитационные пузырьки насыщают водную среду в непосредственной близости от рабочего инструмента, изменяя тем самым волновые свойства жидкой среды. При достижении резонансной частоты колебательной системы своего максимального значения, что практически соответствует резонансной частоте системы в воздушной среде, в жидкой среде устанавливается режим развитой кавитации, который характеризуется устойчивым кавитационным облаком в области излучателя. Дальнейшее увеличение подводимой к УЗКС мощности (напряжения питания) сначала приводит к расширению кавитационной области, а затем к вырождению кавитационных пузырьков в резонансные и, следовательно, снижению эффективности кавитации. Поэтому критерием установления оптимального ультразвукового воздействия является прекращение роста резонансной частоты УЗКС.



1 – машинное масло; 2 – подсолнечное масло; 3 – глицерин; 4 – эпоксидная смола
Рисунок 3 – Зависимость резонансной частоты УЗКС от напряжения на ее пьезоэлементах

Численные показатели оптимальной интенсивности УЗ воздействия представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментальных исследований ультразвуковой кавитационной обработки вязких жидкостей

Наименование жидкости	Потребляемая мощность аппарата от электрической сети, Вт	Акустическая мощность, Вт	КПД, %	Площадь излучения, см ²	Интенсивность воздействия, Вт/см ²
Вода	150	75	50	20	3,75
Масло моторное по SAE10W-40	500	250	50	20	12,7
Масло оливковое	630	296	47	20	17,6
Глицерин	800	360	45	20	22,5
Эпоксидная смола ЭД-20	1200	480	40	20	28

Описанные в третьем разделе экспериментальные исследования позволили говорить о сопоставимости результатов, полученных при помощи анализа предложенной математической модели и результатов экспериментальных исследований.

В четвертом разделе рассматривается разработка ультразвуковых колебательных систем и проточных технологических камер, вырабатываются требования к основным узлам и элементам, из которых будет состоять УЗКС. В первой части раздела приводится обоснование предельных мощностных характеристик известных УЗКС. В существующих конструкциях (как полуволновых, так и двухполуволновых) УЗКС применяется один преобразовательный элемент, состоящий из двух (или кратным двум) пьезоэлектрических колец, расположенных на акустической оси преобразователя. Поэтому такой тип конструкции УЗКС называется одноэлементным.

Показывается, что на применение таких УЗКС накладывают ограничения не только тепловая нагруженность пьезоэлектрических элементов, но и такой электрический параметр, как максимальная электрическая мощность, – т.е. та мощность, которую может преобразовать пьезоэлемент из электрической энергии в механическую.

Для устранения указанных мощностных ограничений пьезоэлектрических УЗКС возможно применение нескольких пьезоэлектрических преобразователей, объединенных на общем концентраторе. Такие типы конструкции называются многоэлементными электроакустическими преобразователями. Известные конструкции таких устройств не нашли применения из-за низкой эффективности.

Для повышения эффективности многоэлементных пьезопреобразователей во второй части раздела приводится разработка УЗКС с максимальной мощностью до 7000 Вт с рабочими инструментами с излучающей поверхностью до 350 см², способные обеспечить кавитационную обработку технологических сред с интенсивностью более 20 Вт/см². При этом разработка УЗКС проводится в несколько этапов.

На первом этапе разрабатывается многоэлементный преобразователь. При этом исходят из следующих условий:

- входной диаметр излучающей накладки должен удовлетворять условию возможности размещения на его плоскостях того количества пьезопакетов, которое необходимо для получения требуемой потребляемой мощности;

- выходной диаметр излучающей накладки, являющийся входным диаметром бустерного звена, должен удовлетворять условию: $d_2 < \frac{\lambda}{2}$.

Принципиальные виды пьезоэлектрических преобразователей с тремя, четырьмя и семью пакетами показаны на рисунке 4.

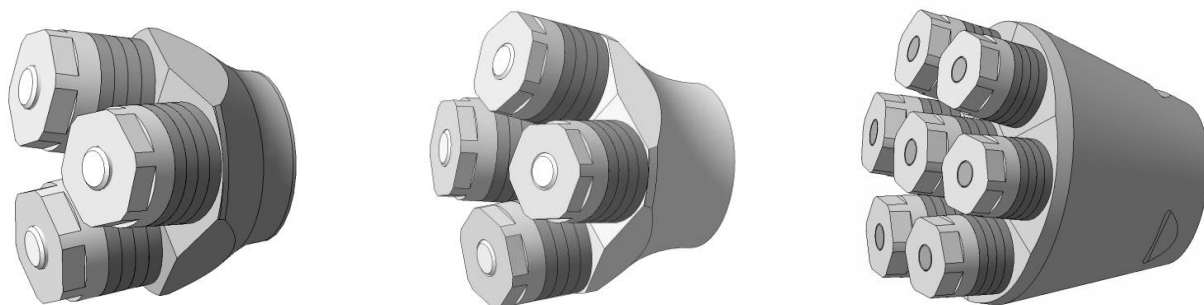
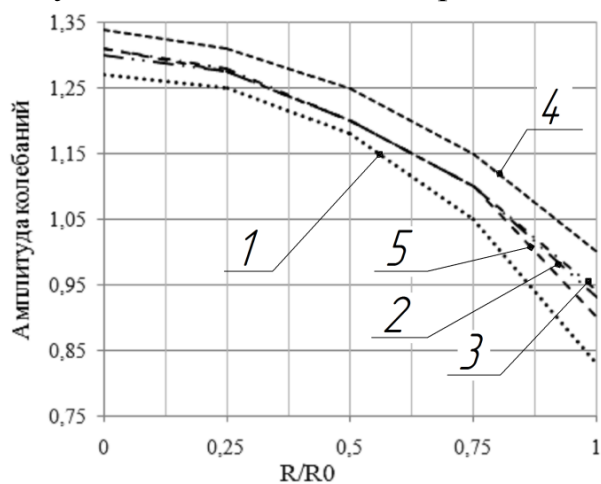


Рисунок 4 – Многоэлементные пьезоэлектрические преобразователи

Затем, задавшись входным и выходным диаметрами излучающей накладки, выбирают угол наклона плоскостей, на которых будут размещены пьезоэлектрические пакеты. Для этого были проведены исследования по влиянию угла наклона плоскости на характеристики преобразователя. Результаты исследования приведены на рисунках 5 и 6.



1 – 3 град; 2 – 5 град; 3 – 7 град;
4 – 9 град; 5 – 11 град.

Рисунок 5 – Распределение амплитуды колебаний по излучающей поверхности накладки

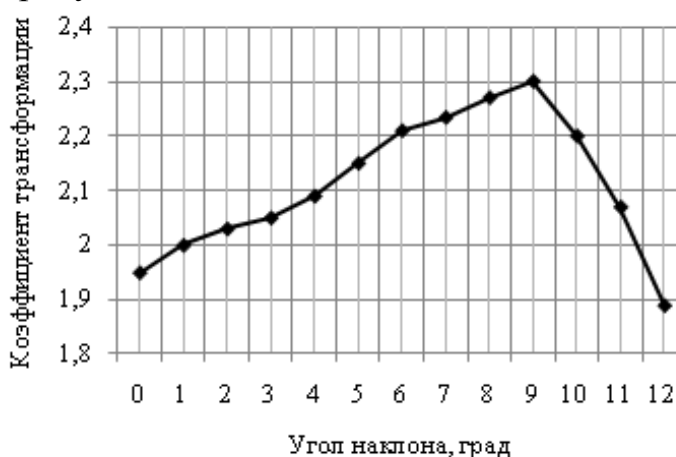


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента усиления преобразователя от угла наклона плоскости

Из рисунка 5 следует, что когда угол наклона плоскости составляет 9° , наблюдается самое равномерное распределение амплитуды колебаний по излучающей поверхности преобразователя, а также наблюдается максимальный коэффициент усиления преобразователя (рисунок 6). При этом уровень изгибных колебаний пьезопакетов не превышает значения, при котором возможно разрушение пьезоэлементов.

На втором этапе разрабатывается промежуточное (бустерное) звено УЗКС. Его применение необходимо для одновременной концентрации (усиления) акустической энергии (амплитуды колебаний) от торцевой излучающей поверхности пьезоэлектрического преобразователя к рабочему излучающему инструменту. Бустерное звено служит звеном крепления монтажного фланца в зоне его минимальных колебательных смещений.

В результате проведенных исследований показано, что бустерное звено для большей механической прочности должно быть выполнено с концентрирующей частью в виде конуса. Также для повышения амплитуды колебаний бустерное звено и пьезоэлектрический преобразователь должны быть выполнены единой деталью.

На третьем этапе разрабатывается рабочий излучающий инструмент, позволяющий вести в кавитационном режиме обработку большого объема одновременно обрабатываемой жидкой среды. Проектирование рабочих инструментов такого типа сводится к следующему. Создается первый элемент волновода с длиной, равной полдлины волны продольных колебаний в материале волновода. Пример такого волновода показан на рисунке 7а.

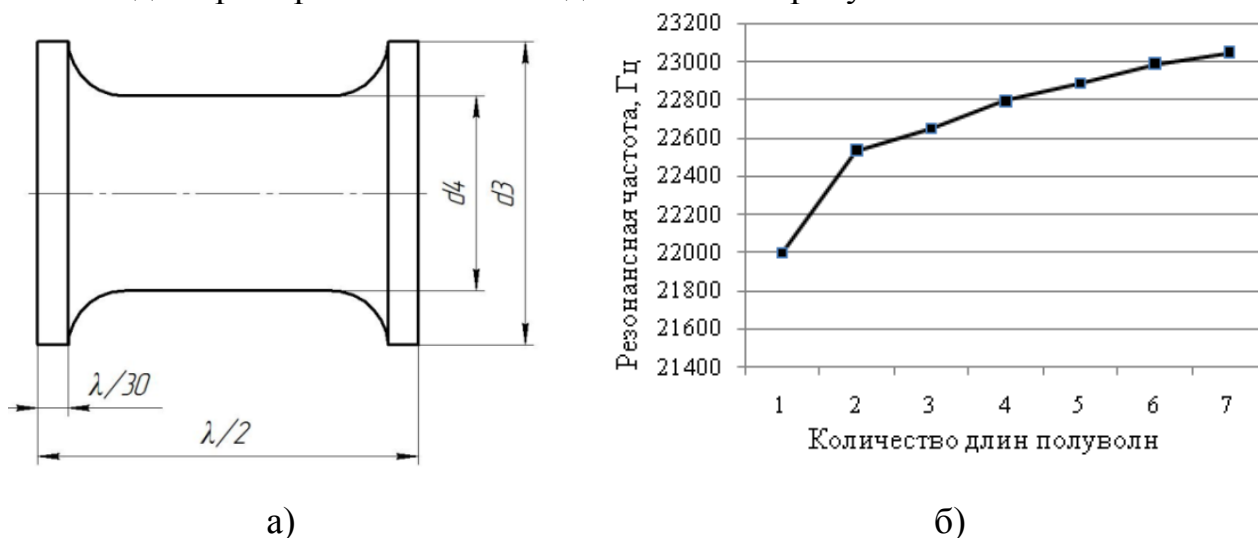


Рисунок 7 – Проектирование многополуволновых рабочих инструментов

Рабочий инструмент с развитой поверхностью излучения должен содержать в своем составе последовательно и соосно установленные волноводы в виде элементов цилиндрической формы различного диаметра. Излучение УЗ колебаний осуществляют с поверхности излучателя в зонах переходов между цилиндрическими участками различного диаметра.

Толщина выступов, расположенных в пучностях продольных колебаний, должна составлять $\lambda/30$. Для снижения концентрации напряжений на участках перехода между сечениями большего и меньшего диаметров их соединяют плавным радиальным переходом. Далее выбирают диаметральные размеры волновода. При этом исходят из условий, что $d_3 < \lambda/2$, а $\frac{d_3}{d_4} \leq 2$.

Для создания рабочего инструмента с большой поверхностью излучения проводят последовательную стыковку таких полуволновых волноводов. Однако при стыковке таких полуволновых волноводов в единый рабочий инструмент с длиной $2\lambda/2 - 7\lambda/2$ происходит увеличение рабочей частоты единой конструкции.

Зависимость резонансной частоты рабочего инструмента от количества длин полуволн представлена на рисунке 7б. Для того чтобы сохранить резонансную частоту рабочего инструмента в 22 кГц, необходимо понижать резонансную частоту начального полуволнового элемента. Зависимость резонансной частоты полуволнового элемента от необходимого числа полуволн будущего инструмента также представлена на рисунке 7. Представленная зависимость описывается выражением:

$$f = f_0 n^{-0,026}, \quad (15)$$

где f_0 – необходимая рабочая частота рабочего инструмента; n – количество полуволн ($n = 1, 2 \dots 7$).

Разработка всех составляющих узлов позволила приступить к разработке УЗКС как единой конструкции.

В третьей части раздела приводится разработка проточных реакторов, способных обеспечить равномерную УЗ обработку всего объема протекающей жидкости. Конструкция и принцип работы предлагаемого УЗ проточного реактора поясняются рисунком 8.

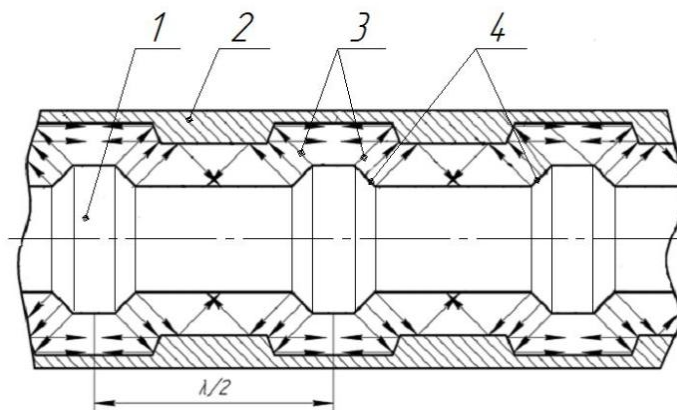


Рисунок 8 – Принцип работы ультразвукового проточного реактора

Проточный реактор, выполненный по предложенной схеме, работает следующим образом. Обрабатываемая жидкость поступает в полость между многополуволновым рабочим излучающим инструментом 1 и стенкой реактора 2. В процессе работы происходит формирование УЗ колебаний 3 за счет поршневых движений, совершаемых поверхностями плавных переходов 4. Направление распространения УЗ колебаний перпендикулярно к поверхностям плавных переходов. Таким образом, форма переходов определяет направление распространения УЗ колебаний, что позволяет изменять направление излучаемых колебаний в объеме реактора. Форма плавных переходов обеспечивает направление УЗ колебаний во внутренний объем проточной камеры и уменьшение сопротивления потоку. Радиальная и экспоненциальная форма плавных переходов может обеспечить, кроме распространения в заданном направлении, фокусировку ультразвуковых колебаний. Отражатели ультразвука, выполненные на внутренней стенке реактора, расположены таким образом, что обеспечивают отражение УЗ колебаний в направлении участков излучателя меньшего сечения, а также в объем камеры между отражателями ультразвука. Таким образом, обеспечивается равномерное распределение УЗ энергии во всем внутреннем объеме проточной камеры. Форма излучателя и внутренняя

поверхность проточной камеры обеспечивают создание последовательности камер, в каждой из которых создаются условия для резонансного усиления распространяющихся УЗ колебаний. Таким образом, во внутреннем объеме проточной камеры создается ультразвуковое поле с интенсивностью, необходимой и достаточной для образований и поддержания режима развитой кавитации.

Результаты разработки послужили основой для создания ультразвуковых технологических аппаратов серии «Булава», показанных на рисунке 9, мощностью 3000 Вт (рисунок 9а) и мощностью 7000 Вт (рисунок 9б).



а) б)
Рисунок 9 – Ультразвуковые аппараты серии «Булава»

Аппараты серии «Булава» содержат в своем составе многоэлементный пьезоэлектрический преобразователь, многополуволновой рабочий инструмент и проточный реактор с технологической камерой специальной формы.

В заключении первой части раздела сообщается, что были разработаны УЗКС с максимальной потребляемой мощностью в 3000 Вт, 4000 Вт и 7000 Вт, с рабочими инструментами с площадью излучения до 350 см².

Во второй части раздела приводится исследование функциональных возможностей и эффективности разработанных УЗ аппаратов.

Аппараты серии «Булава» успешно использовались для обезвреживания и разделения нефтешламных отложений. При этом в результате УЗ воздействия удалось отказаться от опасных химических реагентов, необходимых для разделения нефти, песка и воды. Содержание нефти в воде удалось снизить в 2–10 раз по сравнению с нормативными требованиями. Нормативно-технической документацией (регламент) предусмотрено использование технологии и аппаратов в промышленных масштабах.

С помощью высокомошных УЗ аппаратов с проточными реакторами внедрена технология ультразвукового диспергирования суспензии катализатора крекинга нефти. Использование микросферических цеолитсодержащих катализаторов крекинга позволяет на 7 % увеличить выход светлых нефтепродуктов по сравнению с лучшими зарубежными катализаторами. Внедрение УЗ аппарата, способного обеспечить высокоинтенсивное воздействие, позволило измельчать катализаторную суспензию, улучшило износоустойчивость, пористую структуру катализаторов, повысило их

долговечность, что в итоге положительно скажется на качестве продукции, а использование проточных реакторов позволило достичь мощности производства в 4,5 тыс. тонн в год. Технология и оборудование реализованы на Омском НПЗ.

При помощи разработанных УЗ аппаратов удалось повысить прочностные характеристики композиционных материалов путем их модификации углеродными нанотрубками (УНТ), диспергированными в образцах композита с помощью ультразвуковых колебаний. Для получения образцов нанокompозита окисленные нанотрубки в определённых пропорциях добавляли в эпоксидную смолу и механически перемешивали. Далее обрабатывали смесь ультразвуковым диспергатором в кавитационном режиме до образования гомогенной суспензии. После ультразвуковой обработки в отверждённых образцах наблюдались как индивидуальные УНТ (результат полного диспергирования), так и компактные скопления не полностью диспергированных УНТ. Повышение предела прочности в образцах, обработанных ультразвуком, составило от 65 до 72 % по сравнению с образцами, в которых УНТ перемешивались механической мешалкой.

Таким образом, проведенные практические исследования на примере реализации различных технологических процессов подтвердили эффективность разработанного оборудования.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Установлены причины, ограничивающие эффективное применение УЗ технологий для интенсификации химических технологий в жидких средах характеризующихся значительной вязкостью.

2. Разработана теоретическая модель, позволяющая определять оптимальную интенсивность ультразвукового воздействия для реализации процесса развитой кавитации в обрабатываемой среде.

3. Выявлены условия формирования максимальных по размерам зон кавитационного воздействия в технологических камерах, что позволило при установлении резонансных явлений увеличить объем единовременно обрабатываемой жидкости в 3 раза в сравнении с нерезонансными технологическими камерами.

4. Разработаны пьезоэлектрические колебательные системы с потребляемой мощностью 3000 Вт, 4000 Вт и 7000 Вт, рабочие инструменты с поверхностью излучения до 350 см², способные обеспечить ввод УЗ колебаний с интенсивностью, достаточной для реализации кавитационного процесса жидких средах со значительной вязкостью.

5. Разработаны специализированные УЗ аппараты и проточные реакторы, содержащие в своем составе технологические камеры особой формы, что позволило обеспечить резонансное усиление УЗ колебаний и равномерность обработки всего объема жидкости.

6. Исследованы функциональные возможности разработанного ультразвукового технологического оборудования; на примере реализации различных процессов химической технологии показана эффективность созданных ультразвуковых аппаратов.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Khmelev, V.N. Ultrasonic Hydroacoustic Complex for Increase Production Rate Oil Wells [Текст] / V.N. Khmelev, S.S. Khmelev, R.V. Barsukov, S.N. Tsyganok // International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2007. – P.327–329.
2. Khmelev, V.N. The Ultrasonic Flowing Reactor for Intensive Ultrasonic Processing of Liquids in Thin Layer [Текст] / S.S. Khmelev, D.S. Abramenko, S.V. Levin, Y.M. Kuzovnikov // Ninth International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2008. – P.219–222.
3. Khmelev, V.N. Development of multizone radiator and their application at flowing through viscous liquids [Текст] / S.S. Khmelev, S.N. Tsyganok, D.S. Abramenko, S.V. Levin. // Ninth International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2008. – P. 282–284.
4. Хмелев, В.Н. Ультразвуковой проточный реактор для интенсивной ультразвуковой обработки жидких сред в тонком слое [Текст] / В.Н. Хмелев, Д.С. Абраменко, С.В. Левин, С.С. Хмелев, Ю.М. Кузовников // Технологии и оборудование химической, биологической и пищевой промышленности: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2008. – С. 7–12.
5. 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. – Бийск: АлтГТУ, 2009. – С. 151–153.
6. Ультразвуковая колебательная система [Текст]: пат. 2323788 Российская Федерация: МПК⁷ В06В1/06, В06В3/00. / Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Левин С.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2006141335/28; заявл. 22.11.2006; опубл. 10.05.2008, Бюл. № 13. – 8 с.: ил.
7. Khmelev, V.N. 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.
8. Khmelev, V.N. Effectiveness Increase of Ultrasonic Cavitation Processing of Viscous Liquid Media [Текст] / V.N. Khmelev, S.S. Khmelev, D.S. Abramenko, S.N. Tsyganok // 10th International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2009: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2009. – P. 262–265.
9. Хмелев, С.С. Создание технологий и оборудования для ультразвуковой обработки высоковязких и дисперсных жидких сред [Текст] / С.С. Хмелев // Ползуновский альманах. – 2009. – № 2. – С. 41–42.

10. Хмелев, В.Н. Новые подходы к ультразвуковой кавитационной обработке жидких сред с высоким затуханием ультразвуковых колебаний [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, Ю.М. Кузовников // Инновационные технологии: производство, экономика, образование: материалы Всероссийской научно-практической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2009. – С. 452–457.

11. Способ перекачивания вязких жидкостей [Текст]: пат. 2346206 Российская Федерация: МПК⁷ F17D1/16. / Хмелев В.Н., Хмелев С.С., Шалунов А.В., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Хмелев М.В., Абраменко Д.С.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2007136704/06; заявл. 03.10.2007; опубл. 10.02.2009, Бюл. № 4. – 6 с.: ил.

12. Хмелев, В.Н. Разработка пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для интенсификации процессов [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, С.Н. Цыганок, А.Н. Лебедев, А.Н. Галахов // Известия Тульского государственного университета. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. – Вып. 1. – С. 148–147.

13. Хмелев, В.Н. Ультразвуковая кавитационная обработка вязких и жидких высокодисперсных сред [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Р.Н. Голых // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях ИАМП-2010: материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – С. 125–129.

14. Хмелев, В.Н. Создание ультразвуковых колебательных систем с увеличенной поверхностью излучения [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, С.В. Левин, С.Н. Цыганок // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях ИАМП-2010: материалы 7-й Всероссийской научно-технической конференции. – Бийск: АлтГТУ, 2010. – С. 147–151.

15. Хмелев, В.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. – 2010. – С. 321–325.

16. Ультразвуковой проточный реактор [Текст]: пат. 2403085 Российская Федерация: МПК⁷ B01J19/10. / Борисов Ю.А., Леонов Г.В., Хмелев В.Н., Абраменко Д.С., Хмелев С.С., Шалунов А.В.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2009115487/05; заявл. 23.04.2009; опубл. 10.11.2010, Бюл. № 31. – 9 с.: ил.

17. Хмелев, В.Н. Моделирование процесса формирования кавитационной области в вязкой жидкости для определения оптимального обрабатываемого технологического объема и режимов акустического воздействия [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, Р.В. Барсуков, Р.Н. Голых // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 4 (22). – С. 41–44.

18. Хмелев, С.С. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных сред [Текст] / С.С. Хмелев, В.Н. Хмелев, Р.Н. Голых, Р.В. Барсуков, А.В. Шалунов; ООО «Центр ультразвуковых технологий». – Бийск, 2011. – 102 с. - Библиогр.: 23 назв. – Рус. деп. в ВИНТИ № 86-B2011.

19. Хмелев, В.Н. Ультразвук для ЛКМ. Моделирование процесса формирования кавитационной области в вязкой жидкости для определения оптимального обрабатываемого технологического объема и режимов акустического воздействия [Текст] / В.Н. Хмелев, А.В. Шалунов, С.С. Хмелев, Р.В. Барсуков, Р.Н. Голых // Очистка. Окраска. – 2010. – № 4. – С. 52–54.

Подписано в печать 19.05.2011 г. Печать – ризография. Заказ № 2011-72

Объем 1,4 п.л. Тираж 100 экз.

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

659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27