

На правах рукописи

Барсуков Роман Владиславович

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СРЕДЫ И ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ АППАРАТОВ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Бийск – 2005

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
Хмелев Владимир Николаевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, с.н.с
Жаринов Юрий Борисович

кандидат технических наук
Блазнов Алексей Николаевич

Ведущая организация: Институт проблем химико-энергетических технологий
СО РАН
(г. Бийск, Алтайский край)

Защита состоится «___» _____ 2005 г. в ___ часов на заседании диссертационного совета К 212.004.03 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 библиотеке Бийского технологического института (филиала) государственного общеобразовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан «___» _____ 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного
совета

Светлов С.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Повышение эффективности существующих и реализация новых химических технологий – один из путей развития современной промышленности. Одним из наиболее перспективных и прогрессивных путей развития химических производств является применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности. Обусловлено это тем, что ультразвуковые колебания оказывает влияние практически на все известные процессы химических технологий. Это воздействие имеет различный характер:

- стимулирующий, в тех случаях, когда возникающая кавитация является движущей силой процесса (например, при реализации звукохимических реакций, акустическом диспергировании и удалении отложений с теплообменных поверхностей);

- интенсифицирующий, в тех случаях, когда возникающая кавитация лишь увеличивает скорость процесса (например, при акустическом растворении, эмульгировании, экстрагировании, дегазации);

- оптимизирующий, в тех случаях, когда ультразвуковые колебания в докавитационном режиме упорядочивают течение процесса (например, при стимуляции роста бактерий, кристаллизации, акустической грануляции и акустическом центрифугировании).

Эффективность ультразвукового воздействия при реализации большинства процессов химических технологий определяется степенью развитости кавитационного процесса и носит экстремальный характер (т.е. существуют оптимальные условия ультразвукового воздействия и они соответствуют режиму «развитой» кавитации)

Практически реализуемые в настоящее время с помощью ультразвуковых колебаний процессы химических технологий не характеризуются максимально возможной скоростью процесса или не обеспечивают выход максимально возможного конечного продукта, по сравнению с результатами, достигаемыми при экспериментальной отработке в лабораторных условиях.

Происходит это потому, что используемые для их реализации ультразвуковые технологические аппараты не обеспечивают автоматической оптимизации ультразвукового (УЗ) воздействия при изменении свойств технологических сред и не учитывают влияния изменений свойств этих сред и происходящих в них процессов на работу аппаратов.

Причина неоптимального ультразвукового воздействия на различные процессы химических технологий заключается в отсутствии в используемых аппаратах систем, обеспечивающих изменение режимов работы электронного генератора при возможных изменениях свойств и параметров обрабатываемых технологических сред.

В связи с этим, проблема повышения эффективности процессов химических технологий за счет создания УЗ технологических аппаратов, способных обеспечить оптимальное воздействие при возможных изменениях параметров обрабатываемых сред является актуальной.

Цель исследования - повышение эффективности процессов химической технологии, интенсифицируемых за счет применения УЗ колебаний высокой интенсивности, путем дальнейшего развития научных основ построения ультразвуковых технологических аппаратов, обеспечивающих в автоматическом режиме оптимальное воздействие на различные технологические среды при изменении их свойств.

Задачи исследований:

Обосновать возможность повышения эффективности использования ультразвуковой аппаратуры для интенсификации технологических процессов, протекающих в жидких средах за счет:

- введения нового критерия настройки электронных генераторов на резонансную частоту ультразвуковой колебательной системы;

- обеспечения возможности контроля импеданса излучению обрабатываемыми технологическими средами;

- введения критерия настройки ультразвукового аппарата на режим развитой кавитации, позволяющего поддерживать оптимальный режим УЗ воздействия при изменении свойств обрабатываемых технологических сред.

Разработать модель, описывающую свойства жидких технологических сред, подвергаемых ультразвуковому воздействию, позволяющую определять волновое сопротивление технологических сред в зависимости от величины звукового давления и свойств обрабатываемой среды.

Экспериментально исследовать влияние обрабатываемых сред на электрические параметры ультразвуковых колебательных систем (резонансную частоту, добротность, входное сопротивление, импеданс) и электронных генераторов для установления диапазонов необходимой перестройки параметров электронных генераторов при обработке различных технологических сред.

Предложить и разработать методику определения основных параметров УЗ технологических аппаратов, позволяющую осуществлять выбор, необходимой и достаточной для реализации в жидких технологических средах режима развитой кавитации, акустической и электрической мощности, а также определять диапазон изменения резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы при работе ультразвукового аппарата в различных режимах (докавитационный режим, режим зарождения кавитации, режим развитой кавитации).

Разработать ультразвуковые технологические аппараты для интенсификации различных технологических процессов на основе предложенных метода определения импеданса излучению обрабатываемыми средами, критерия оптимальной работы ультразвуковых аппаратов и способа определения режима развитой кавитации.

Объект и методы исследования. Объектом исследования являются процессы в жидких и жидкодисперсных средах, возникающие за счет воздействия на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности и ультразвуковые технологические аппараты, реализующие процессы химических технологий. При выполнении работы применялись как теоретические, так и экспериментальные методы исследования, направленные на решение поставленных задач. Исследования проводились путем построения теоретических моделей, допускающих аналитические и численные решения.

Научная новизна:

- предложен способ исследования технологических процессов в жидких средах, основанный на измерении акустических свойств технологических сред, путем регистрации электрических параметров (тока в механической ветви и напряжения) пьезоэлектрических колебательных систем;
- выявлены зависимости электрических параметров пьезоэлектрических колебательных систем (резонансная частота, добротность, входной электрический импеданс) от акустических свойств жидких технологических сред, подвергаемых ультразвуковому воздействию;
- предложен способ выделения сигнала обратной связи, исключаяющий влияние мешающих факторов при получении информации об изменениях акустических свойств технологических сред и позволивший разработать новые способы управления процессом ультразвуковой обработки;
- предложены и разработаны ультразвуковые аппараты, позволившие повысить эффективность технологических процессов, за счет оптимизации режимов их работы и ультразвукового воздействия.

Практическая значимость:

- выявлены причины, снижающие эффективность ультразвуковых технологических процессов, обусловленные неточностью измерения амплитуды механических колебаний рабочего инструмента ультразвуковой колебательной системы, а так же неточностью настройки электронных ультразвуковых генераторов на механическую резонансную частоту колебательных систем;
- разработана методика инженерного расчета, позволившая определять основные параметры ультразвуковых технологических аппаратов, предназначенных для интенсификации процессов в жидких средах в режиме «развитой» кавитации;
- установлены оптимальные режимы ультразвукового воздействия на различные технологические среды и при изменении их свойств;
- на основании теоретических и экспериментальных исследований разработаны отдельные узлы ультразвуковых технологических аппаратов, обеспечившие оптимизацию УЗ воздействия при всех возможных изменениях свойств обрабатываемых сред;
- обеспечена реализация ультразвуковых технологических процессов в режиме развитой кавитации ($10-20 \text{ Вт/см}^2$) и подтверждена эффективность созданных технологических аппаратов.

Реализация работы. Результаты работы использованы при создании ультразвукового технологического оборудования для интенсификации различных химико-технологических процессов на предприятиях в Российской Федерации, странах СНГ и за рубежом.

Апробация работы. Материалы диссертации докладывались на Всероссийских научно-практических конференциях «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП)» (г. Бийск), Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials (Novosibirsk).

Положения, выносимые на защиту:

- развитие теоретической модели технологических процессов в жидких и жидкодисперсных средах, интенсифицируемых за счет воздействия на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности, показавшей необходимость перестройки электронных генераторов (его рабочей частоты, выходного напряжения, выходного сопротивления) в процессе ультразвукового воздействия.

- способ контроля свойств технологических процессов основанный на измерении электрических характеристик колебательных систем:

- результаты экспериментальных и теоретических исследований, позволившие выявить характер зависимостей электрических параметров пьезоэлектрической колебательной системы с грибовидными инструментами от степени развитости кавитации в различных технологических средах и установить оптимальные способы управления процессом ультразвукового воздействия;

- предложенные и разработанные схемные решения узлов выделения сигнала обратной связи, формирования управляющих сигналов, управления рабочей частотой, стабилизации амплитуды колебаний.

- обоснование эффективности созданных ультразвуковых технологических аппаратов, реализующих процессы химических технологий в жидких средах.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 4 патента.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и результатов, списка литературы из 115 наименований и содержит _____ страниц машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, состояние проблемы, сформулированы цель работы и задачи исследований, приведена краткая характеристика работы.

В первой главе рассматриваются различные процессы химических технологий, реализуемые с помощью ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, и проводится анализ эффективности ультразвуковых технологических процессов, протекающих в жидких и жидкодисперсных средах.

Проведенный анализ, реализуемых в химических производствах, ультразвуковых технологических процессов показал, что под влиянием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности в жидких средах развиваются вторичные явления, которые оказывают воздействие на физико-химические процессы. К основным эффектам, возникающим под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности, относят: акустические течения, пульсации газовых пузырьков, кавитацию, поверхностные эффекты, пандеромоторные силы, радиационное давление.

Многочисленные исследования, проведенные в нашей стране (Л.Д. Розенберг, Б.А. Агранат, М.А. Моргулис, В.А. Акуличев и др.) и за рубежом (К. S. Suslick, К. N. Sollner, Т. J. Mason), свидетельствуют о том, что основным интенсифицирующим фактором химико – технологических процессов являются кавитационные явления. Кавитация возникает при переходе от ультразвуковых колебаний малой амплитуды к колебаниям с большой амплитудой, при которых сплошность жидкости нарушается, и в ней формируются парогазовые кавитационные пузырьки. В режиме «развитой» кавитации наблюдается процесс периодического распространения гидродинамического

разрыва в виде фронта волны захлопывающихся пузырьков. Результаты исследований (K. S. Suslick) свидетельствуют о том, что кавитационные процессы влияют не только на механохимические процессы, но и способны обеспечить разрыв химических связей.

В этом же подразделе рассматриваются примеры интенсификации процессов массообмена, процессов диспергирования, эмульгирования, экстрагирования компонентов из растительного сырья.

Проведенный анализ процессов химических технологий показывает, что скорость протекания большинства из них ограничена, и только воздействие ультразвуковых колебаний обеспечивает их интенсификацию, причем эффективность процессов определяется степенью развитости кавитации и имеет экстремальный характер, т.е. существуют оптимальные режимы ультразвукового воздействия.

Анализ исследований, проведенных различными авторами при изучении технологических процессов, показывает, что оптимальность ультразвукового воздействия зависит не только от типа реализуемого процесса, но и от свойств сред, в которых реализуются процессы. Однако систематических исследований по оптимизации режимов ультразвукового воздействия не проводилось, поскольку большинством авторов решались задачи максимального ускорения определенных процессов. Для обеспечения ультразвукового воздействия при интенсификации различных процессов разработаны и применяются ультразвуковые технологические аппараты. Сравнительный анализ отечественных (Акустический институт РАН (г. Москва), МГТУ им. Н.Э. Баумана (г. Москва), НИИ ТВЧ (г. Санкт – Петербург), Северо – Западный центр ультразвуковых технологий, ООО «Александра плюс» (г.Вологда), ООО "Ультразвуковая техника - ИНЛАБ"(г. Санкт – Петербург), ООО «Сапфир» (г. Москва)) и зарубежных (Acusonigs, DUKANE (США), Ultrasonic engineering (GB), Berchold GmbH, Hielscher (Германия), Институт технической акустики (Беларусь)) ультразвуковых аппаратов позволил установить, что практически все используемые ультразвуковые аппараты выполняются универсальными, поскольку рекомендуются для использования как в существующей (не ультразвуковой) технологической аппаратуре, так и в специальной ультразвуковой химико-технологической аппаратуре. Универсальность аппаратов не позволяет учитывать особенностей конкретных технологических процессов и влияния свойств обрабатываемых сред на работу самих аппаратов.

Анализ технических характеристик и функциональных возможностей, используемых на практике ультразвуковых аппаратов, предназначенных для интенсификации физико-химических процессов в жидких и жидкодисперсных средах, позволил выявить присущие им следующие основные недостатки:

- отсутствие или несовершенство систем автоматической подстройки частоты электронного генератора при изменениях резонансной частоты ультразвуковых колебательных систем (применение ручной подстройки частоты);

- отсутствие или несовершенство систем регулирования и стабилизации амплитуды механических колебаний излучающей поверхности колебательных систем (ручная регулировка амплитуды колебаний);

- низкий коэффициент полезного действия ультразвуковых технологических аппаратов (не более 60%);

- отсутствие систем контроля свойств обрабатываемых технологических сред;

- отсутствие систем установки и поддержания режима оптимального ультразвукового воздействия, т.е. режима «развитой» кавитации (ручная подстройка по косвенным признакам, типа кавитационного шума).

Необходимость повышения эффективности ультразвуковых процессов, сформулированные в первой части главы, требования к энергетическим параметрам ультразвукового воздействия, выявленные во второй части главы, недостатки используемых аппаратов, а также проведенный анализ возможных путей их устранения, позволили сформулировать основные требования к поиску путей повышения эффективности ультразвуковых технологий за счет проектирования ультразвуковых аппаратов, способных обеспечить оптимальные режимы ультразвукового воздействия и обеспечить максимальную интенсификацию процессов, протекающих в жидких и жидкодисперсных средах.

Вторая глава посвящена теоретическим исследованиям, конечным результатом которых является выработка требований к оптимальным условиям ввода ультразвуковых колебаний при

реализации различных технологических процессов (в различных средах) в режиме «развитой» кавитации.

Первый подраздел второй главы посвящен моделированию поведения жидкой среды, подвергаемой ультразвуковому воздействию. Свойства жидких сред (волновое сопротивление), существенно изменяются при насыщении их парогазовыми пузырьками, возникающими при ультразвуковом воздействии.

Волновое сопротивление жидкой среды, насыщенной парогазовыми пузырьками определяется следующим выражением:

$$\rho_K c_K = \rho_{ж} c_{ж} \left(\frac{(1 - \bar{K}) + \rho_{г} / \rho_{ж} \bar{K}}{(1 - \bar{K}) + \beta_{г} / \beta_{ж} \bar{K}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Из приведенного выражения следует, что волновое сопротивление кавитирующей среды определяется средним индексом кавитации \bar{K} . Индекс кавитации определяется как отношение объема всех парогазовых пузырьков ΔV к объему жидкости V , в которой они находятся:

$$K = \frac{\Delta V}{V} = \frac{4/3 \pi R_{MAX}^3 N}{V} \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что практическое использование формулы (1) затруднено в связи с тем, что количество кавитационных пузырьков N зависит от многих факторов и не является числом постоянным.

В связи с этим, для определения индекса кавитации, а также для установления зависимости волнового сопротивления кавитирующей среды от ее свойств и величины звукового давления, была предложена модель кавитирующей среды в виде одиночного парогазового газового пузырька с начальным радиусом R_0 , заключенного в объеме жидкости в виде сферы радиусом R_{MAX} .

В этом случае индекс кавитации K был определен следующим выражением:

$$K = \frac{\Delta V_{сф}}{V_{сф}} = \frac{\frac{4}{3} \pi (R^3 - R_0^3)}{\frac{4}{3} \pi (R_{MAX}^3 - R_0^3)} = \frac{R^3 - R_0^3}{R_{MAX}^3 - R_0^3}, \quad (3)$$

где R – текущий радиус парогазового пузырька, а радиус R_{MAX} должен соответствовать максимально возможному радиусу парогазового пузырька.

Таким образом, для определения индекса кавитации K , необходимо знать текущий радиус парогазового пузырька, максимально возможный и его начальный радиусы.

Парогазовый пузырек с максимальным радиусом называется резонансным. Он пульсирует с частотой ультразвукового поля, которая определяется следующим выражением:

$$f = \frac{1}{2\pi R_{MAX}} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho_{ж}} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_{MAX}} \right)} \quad (4)$$

Из выражения (4) было получено выражение для максимального радиуса парогазового пузырька:

$$R_{MAX} = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}}, \quad (5)$$

где $p = -\frac{P_0 3\gamma}{4\pi^2 \rho_{ж} f^2}$, $q = -\frac{3\gamma\sigma}{2\pi^2 \rho_{ж} f^2}$.

Текущий радиус, парогазового пузырька был получен из уравнения, описывающего поведение парогазового пузырька в ультразвуковом поле:

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

Из уравнения (6) было получено следующее выражение:

$$R = \sqrt[3]{-\frac{q}{2} + \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \sqrt[3]{-\frac{q}{2} - \sqrt{\frac{q^2}{4} + \frac{p^3}{27}}} + \frac{b}{3c}, \quad (7)$$

где $p = -\frac{4\sigma^2}{3(P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II})^2}$; $c = P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II}$;

$$q = \frac{2\sigma}{27(P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II})^3} - \frac{(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0})R_0^3}{P_0 - P_M \sin \omega t - P_{II}}; \quad b = 2\sigma.$$

В виду того, что $R_0 \ll R_{MAX}$, принимаем $R_0 = 0$. Таким образом, выполнив подстановки выражений (5), (7) в (3), была получена зависимость индекса кавитации от давления P_{II} насыщенных паров жидкости, гидростатического давления P_0 , давления P_M звуковой волны, частоты f ультразвуковых колебаний, коэффициента σ поверхностного натяжения, плотности $\rho_{ж}$ жидкости.

Выполнив подстановку (3) в (1) была получена зависимость волнового сопротивления кавитирующей среды от ее свойств и величины звукового давления, практическая ценность которой заключается в возможности расчета величины звукового давления, необходимой для достижения режима развитой кавитации.

Второй подраздел второй главы посвящен поиску нового подхода к контролю влияния изменяющихся характеристик обрабатываемых технологических сред на параметры ультразвуковых колебательных систем и электронных генераторов.

На основе системы электромеханических аналогий разработана физическая эквивалентная схема (рисунок 1), моделирующая работу ультразвуковой колебательной системы (УЗКС).

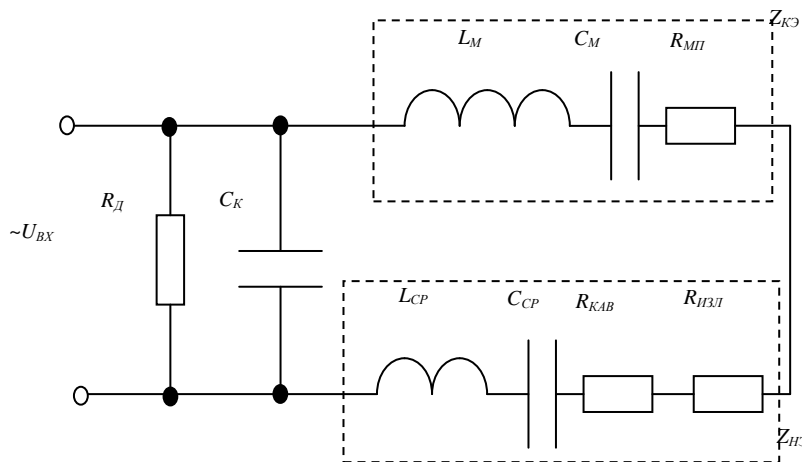


Рисунок 1 - Физическая эквивалентная схема ультразвуковой колебательной системы

Разработанная модель предназначена для установления взаимосвязи между акустическими параметрами обрабатываемых сред и электрическими параметрами колебательных систем. Она позволила разработать методику исследования ультразвуковых аппаратов, выявить пути повышения

эффективности, оптимизации их работы и повышения их коэффициента полезного действия. Модель представляет собой электрический колебательный контур с собственной резонансной частотой и электрической добротностью.

В представленной схеме индуктивность L_M - эквивалентна колеблющейся массе колебательной системы, емкость C_M - упругости материала системы, активное сопротивление $R_{МП}$ - сопротивлению механических потерь, $R_{КАВ}$ - сопротивлению потерь, определяющему энергетические затраты на развитие и поддержание кавитационного процесса в жидкой среде, $R_{ИЗЛ}$ - сопротивлению излучения, определяющему величину мощности УЗ колебаний, излучаемых в среду, индуктивность $L_{СР}$ - эквивалентна массе технологической среды, присоединенной к колебательной системе, емкость $C_{СР}$ - эквивалентна упругости среды, присоединенной к колебательной системе, C_K - электрической емкости, обусловленной геометрическими размерами пьезокерамических элементов преобразователя, R_D - сопротивлению, определяющему диэлектрические потери в материале пьезоэлементов. Элементы L_M , C_M , $R_{МП}$, $R_{КАВ}$, $R_{ИЗЛ}$, $L_{СР}$, $C_{СР}$ образуют, так называемую, механическую ветвь эквивалентной электрической схемы пьезоэлектрической колебательной системы.

Параметры $L_{СР}$ и $C_{СР}$ определяются физическими свойствами обрабатываемой среды.

Элементы $R_{КАВ}$ и $R_{ИЗЛ}$ определяют затраты акустической энергии на развитие (поддержание) кавитации и излучение энергии в обрабатываемую технологическую среду. Сумма элементов $R_{КАВ}$ и $R_{ИЗЛ}$, равная $R_{СР}$ ($R_{СР} = R_{КАВ} + R_{ИЗЛ}$), определяет полное сопротивление излучению. Электрический ток, протекающий через механическую ветвь колебательной системы, является аналогом колебательной скорости и прямо пропорционально зависит от амплитуды механических колебаний излучающей поверхности. Напряжение питания рассмотренного двухполюсника является аналогом механической силы, создающей ультразвуковые колебания.

Анализ физической эквивалентной схемы показал, что изменение акустических свойств обрабатываемых технологических сред, различия в режимах работы УЗ аппаратов (излучение УЗ колебаний в докавитационном режиме, на пороге зарождения кавитации, в режиме развитой кавитации) вызывает изменение отдельных элементов физической эквивалентной схемы, влияет на частотные (динамические) характеристики рассматриваемой модели. Так реактивные элементы $L_{СР}$ и $C_{СР}$, имеющие разные значения для различных сред, могут влиять на резонансную частоту колебательной системы.

Кроме того, при изменении режима УЗ воздействия реактивные элементы $L_{СР}$ и $C_{СР}$ для одной и той же среды могут изменяться. Это обусловлено тем, что с развитием кавитации меняются акустические свойства озвучиваемой среда (уменьшается реакция присоединенной к излучающей поверхности инертной жидкой фазы, в связи с насыщением жидкости газовыми пузырьками).

Так элемент $L_{СР}$, определяющий массу присоединенной к излучающей поверхности жидкости, зависит от эквивалентной плотности ρ_K кавитирующей жидкой среды, площади $S_{ИЗЛ}$ излучающей поверхности, толщины h присоединенного слоя обрабатываемой среды.

Активный элемент $R_{СР}$ определяет сопротивление излучению. Для различных технологических сред этот параметр имеет разные значения. В случае развития в обрабатываемой среде кавитационного процесса элемент $R_{СР}$ следует рассматривать как сумму двух элементов $R_{КАВ}$ и $R_{ИЗЛ}$. В случае, когда в среде кавитация не возникает $R_{КАВ} = 0$ и выполняется следующее равенство $R_{СР} = R_{ИЗЛ}$. В начальный момент возникновения кавитационных процессов часть энергии УЗ колебаний, вводимых в технологическую среду, начинает расходоваться на поддержание кавитации ($R_{КАВ} \neq 0$). При этом сопротивление излучению $R_{ИЗЛ}$ начинает уменьшаться в связи с изменяющимся волновым сопротивлением, насыщенной кавитационными пузырьками, жидкости. В случае развитой кавитации, когда насыщенная газовыми пузырьками жидкость имеет волновое сопротивление, близкое к волновому сопротивлению воздуха, а на поддержание кавитационного процесса расходуется максимальное количество акустической энергии, $R_{КАВ}$ достигает максимального значения, а сопротивление излучению $R_{ИЗЛ}$ стремится к минимальному значению, соответствующему волновому сопротивлению воздушной среды.

Анализ физической эквивалентной схемы ультразвуковой колебательной системы (рисунок 1) позволил установить возможность и обосновать необходимость контроля акустических свойств обрабатываемых технологических сред путем изменения электрических параметров ультразвуковых колебательных систем и электронных генераторов.

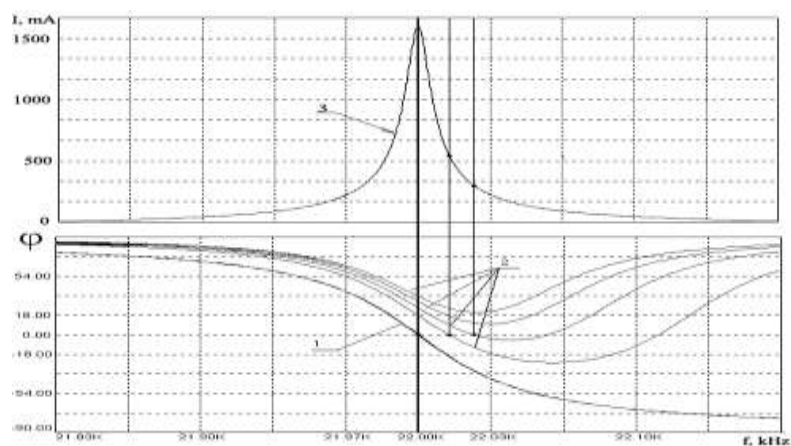
Одним из условий эксплуатации ультразвуковых аппаратов является настройка электронных

генераторов на резонансную частоту ультразвуковых колебательных систем. Существенное влияние на точность настройки электронного генератора на резонансную частоту колебательной системы оказывает собственная электрическая емкость пьезокерамических элементов. При ультразвуковом воздействии на жидкие среды происходит изменение их температуры из-за поглощения энергии УЗ колебаний и выделения тепла при протекании различных реакций. Это приводит к разогреву пьезокерамических элементов и изменению их электрической емкости. Повышение температуры колебательной системы происходит так же в результате механических потерь в материале колебательной системы и активных потерь в пьезоматериале.

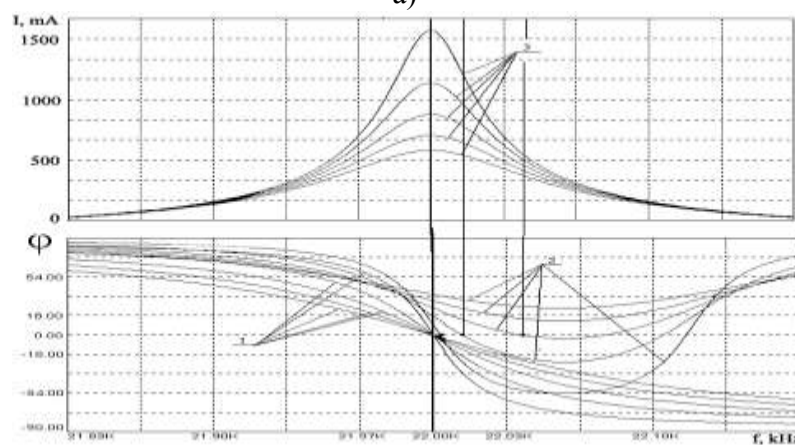
В связи с этим в третьей части второй главы представлены графические зависимости амплитудных и частотных характеристик тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора, а так же тока механической ветви колебательной системы, построенные для различных значений емкости пьезокерамических элементов.

На рисунке 2 представлены частотные характеристики электрических параметров колебательных систем.

На рисунке 2.а представлены амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) тока (кривая 3), протекающего через механическую ветвь физической эквивалентной схемы (рисунок 1), фазочастотные характеристики (ФЧХ) тока (кривая 1), протекающего через механическую ветвь и тока (кривые 2), потребляемого от генератора, в зависимости от емкости пьезокерамических элементов ультразвуковой колебательной системы. Из рисунка 2.а следует, что при различных значениях емкости пьезокерамических элементов возможна настройка электронного генератора на частоту отличную от резонансной (критерием настройки электронного генератора на резонансную частоту колебательной системы считается равенство нулю ФЧХ тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора).



а)



б)

а) частотные характеристики, полученные при различных значениях емкости пьезокерамических элементов;

б) частотные характеристики, полученные при различных значениях акустической нагрузки.

Рисунок 2 – Частотные характеристики электрических параметров колебательных систем

Стабилизация температуры и, следовательно, электрической емкости пьезокерамических элементов не обеспечивает стабильность настройки электронного генератора на резонансную частоту колебательной системы при работе систем автоматической подстройки частоты в случае изменения акустической нагрузки или мощности акустического излучения.

На рисунке 2.6 представлены АЧХ (кривые 3) и ФЧХ тока (кривые 1), протекающего через механическую ветвь и тока (кривые 2), потребляемого от электронного генератора при различных значениях акустической нагрузки.

Независимой от влияния электрической емкости пьезокерамических элементов, а так же возможных изменений величины акустической нагрузки остается только ФЧХ тока, протекающего через механическую ветвь физической эквивалентной схемы.

Только ее характеристики могут быть использованы для точной настройки частоты электронных генераторов на резонансную частоту ультразвуковых колебательных систем.

Большинство ультразвуковых технологических аппаратов оснащаются системами стабилизации амплитуды механических колебаний. В качестве параметра косвенной оценки амплитуды механических колебаний используется амплитуда тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора. Из анализа эквивалентной схемы следует, что более точную косвенную оценку амплитуды механических колебаний можно осуществлять, исключив из величины тока, потребляемого колебательной системой от генератора, величину тока, протекающего по емкости пьезокерамических элементов.

Таким образом, для более точной косвенной оценки амплитуды механических колебаний необходимо обеспечить измерение амплитуды тока, протекающего только через механическую ветвь эквивалентной схемы.

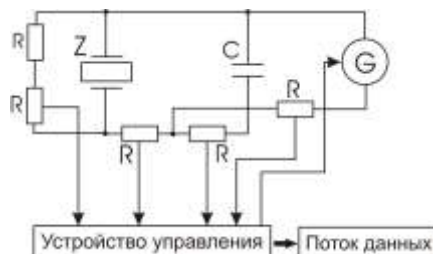
В результате анализа физической эквивалентной схемы пьезоэлектрической ультразвуковой колебательной системы, показана взаимосвязь электрических параметров ультразвуковой колебательной системы с ее механическими параметрами, а так же с параметрами, характеризующими свойства обрабатываемых технологических сред. Выявлены причины, снижающие эффективность преобразования электрической энергии в энергию упругих механических колебаний ультразвуковой частоты. Установлены новые критерии оптимальной работы электронных генераторов и критерии оптимального воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды при реализации различных технологических процессов.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию влияния акустических свойств технологических процессов и режимов излучения ультразвуковых колебаний в жидкие среды на электрические параметры ультразвуковых колебательных систем и электронных генераторов. Цель – выявление и определение оптимальных условий УЗ воздействия на различные технологические среды и определение оптимальных режимов работы УЗ аппаратов с различными рабочими инструментами.

Экспериментальные исследования заключались в воздействии ультразвуковой энергией на жидкие среды и измерении электрических параметров колебательных систем и электронных генераторов в частотном диапазоне от 15 кГц до 25 кГц при использовании различных типов излучающих инструментов.

Первая часть третьей главы посвящена методике исследования влияний акустических свойств технологических сред на электрические параметры УЗ генераторов и ультразвуковых колебательных систем. Методика предусматривает измерение электрических параметров ультразвуковых колебательных систем, таких как электрический ток и напряжение, частота питающего напряжения, электрический импеданс. В процессе измерений определялись амплитудно-частотные характеристики тока и напряжения питания колебательной системы, электрическая добротность при излучении УЗ колебаний в различные среды при различных режимах работы.

Для практической реализации предложенной методики измерений, т.е. для исследования влияния акустических параметров обрабатываемых сред на электрические параметры ультразвуковых колебательных систем и генераторов, предложен и разработан специализированный измерительный стенд, схема которого представлена на рисунке 3.



R – резистивные датчики для снятия токов и напряжений; Z – импеданс УЗКС; C – дополнительная емкость; G – генератор качающейся УЗ частоты.

Рисунок 3 – Структурная схема измерения электрических параметров колебательных систем

Разработанный измерительный стенд состоит из устройства управления, осуществляющего:

- сбор текущих значений электрических параметров ультразвуковых колебательных систем и электронных генераторов;
- перестройку частоты электронного генератора в диапазоне от 15 кГц до 25 кГц для измерения частотных характеристик контролируемых электрических параметров колебательных систем;
- управление мощностью электронного генератора для получения зависимостей параметров ультразвуковых колебательных систем от параметров технологических сред в различных режимах (работа в докавитационном режиме, на пороге зарождения кавитации, в режиме развитой кавитации);
- формирование потока полученных данных для их последующей обработки, вычисления необходимых для анализа новых параметров и характеристик, анализа и визуализации на ЭВМ.

При проведении экспериментальных исследований в качестве источника ультразвуковых колебаний были использованы пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы со сменными грибовидными рабочими инструментами с разной площадью излучающей поверхности (диаметром 25мм, 30мм, 40мм и 50мм).

В качестве обрабатываемых технологических сред были использованы дистиллированная вода, ацетон, индустриальное масло, водная среда под статическим давлением 0,7 МПа, воздушная среда.

Первичные данные были получены в виде семейства амплитудно-частотных характеристик электрических параметров колебательных систем, полученных при обработке различных технологических сред, при использовании рабочих инструментов с различной площадью поверхности излучения, при широком диапазоне энергетического воздействия.

Вторая часть главы посвящена обработке и получению вторичных данных (зависимость резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы, тока ее механической ветви, электрической добротности, импеданса от напряжения на пьезокерамических элементах ультразвуковой колебательной системы), их обработке, визуализации и проведению сравнительного анализа. На рисунке 4 представлены зависимости амплитуды тока механической ветви УЗКС от напряжения на ее пьезокерамических элементах, полученные при обработке жидких сред с использованием рабочих инструментов с различной площадью излучения.



а) площадь излучения $S_{ИЗЛ} = 1,7 \text{ см}^2$; б) площадь излучения $S_{ИЗЛ} = 3,2 \text{ см}^2$;

Рисунок 4 - Зависимость амплитуды тока механической ветви при резонансе от напряжения питания колебательной системы

Подобные зависимости получены также для инструментов с площадью поверхности излучения $5,37 \text{ см}^2$, 11 см^2 , 18 см^2 .

На рисунке 5 представлены зависимости резонансной частоты колебательной системы, полученные при обработке технологических сред, от напряжения на ее пьезокерамических элементах.

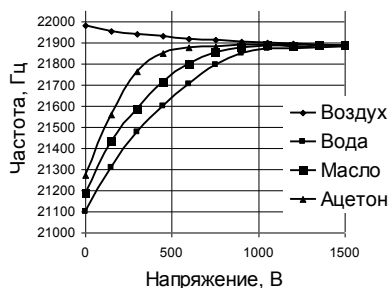


Рисунок 5 - Зависимость резонансной частоты от напряжения питания УЗКС с рабочим инструментом диаметром 25мм

Кривые иллюстрируют изменение резонансной частоты по мере развития кавитации в обрабатываемых средах. Подобные зависимости были так же получены для других рабочих инструментов, используемых при проведении экспериментов.

Обработка и анализ экспериментальных данных позволили установить следующее:

- при ультразвуковом воздействии на жидкие среды, по мере увеличения вводимой мощности УЗ колебаний (увеличении напряжения на пьезокерамических элементах ультразвуковой колебательной), происходит изменение резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы;

- скорость изменения резонансной частоты колебательной системы, при изменении напряжения на ее пьезокерамических элементах определяется свойствами технологических сред (рисунок 5);

- при ультразвуковой обработке различных технологических сред с использованием рабочих инструментов с развитой излучающей поверхностью, происходит существенное изменение входного электрического импеданса, резонансной частоты, электрической добротности ультразвуковой колебательной системы. С уменьшением площади излучающей поверхности уменьшается влияние свойств обрабатываемых технологических сред на параметры колебательных систем и электронных генераторов;

- электрический входной импеданс ультразвуковой колебательной системы индивидуален для каждой озвучиваемой среды. По мере развития кавитации в конкретной жидкой среде электрический импеданс остается неизменным (рисунок 4);

- добротность ультразвуковой колебательной системы изменяется по мере увеличения напряжения на ее пьезокерамических элементах.

В результате проведенных экспериментальных исследований влияния свойств обрабатываемых технологических сред на электрические параметры колебательных систем были определены диапазоны их возможного изменения, а анализ полученных результатов позволил сформулировать следующие выводы.

Для повышения эффективности технологических процессов в жидких и жидкодисперсных средах необходимо непрерывно осуществлять перестройку электрических параметров ультразвуковых электронных генераторов (амплитуда и частота выходного напряжения) в соответствии с изменениями электрических параметров ультразвуковых колебательных систем (ток механической ветви, резонансная частота, электрическая добротность, входной электрический импеданс), обусловленными изменениями свойств обрабатываемых технологических сред.

Увеличение вводимой в технологические среды энергии УЗ колебаний, за счет увеличения излучающей поверхности рабочих инструментов грибовидной формы, усиливает взаимосвязь параметров обрабатываемых сред с электрическими параметрами ультразвуковых колебательных систем и расширяет диапазоны необходимой перестройки параметров электронных генераторов.

При реализации режима развитой кавитации в обрабатываемых средах уменьшается влияние реактивной эквивалентной массы присоединенного объема жидкой среды, что приводит к изменению резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы и обуславливает необходимость настройки частоты электронного генератора в соответствии с изменением резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы. Это изменение резонансной частоты

колебательной системы характеризует степень развития кавитации в обрабатываемой технологической среде и может быть использовано в качестве критерия реализации кавитационного режима для систем автоматической настройки на оптимальный режим УЗ воздействия при изменении свойств технологических сред.

Четвертая глава посвящена практической реализации ультразвуковых технологических аппаратов с учетом сформулированных требований к оптимальным режимам их работы и оптимального воздействия на жидкие и жидкодисперсные среды.

Первая часть главы посвящена разработке методики расчета основных параметров ультразвуковых технологических аппаратов, которая позволяет определить энергетические характеристики ультразвуковых генераторов, необходимые для реализации режима развитой кавитации с учетом, как свойств обрабатываемых сред, так и условий протекания процесса.

Кроме того, методика позволяет определять диапазон изменения резонансной частоты ультразвуковых колебательных систем при работе ультразвуковых аппаратов в различных режимах (докавитационный режим, режим зарождения кавитации, режим развитой кавитации), что является необходимым для проектирования систем автоматической подстройки частоты электронных ультразвуковых генераторов.

Вторая часть главы посвящена разработке отдельных узлов и элементов УЗ генераторов с учетом сформулированных новых требований, предъявляемых к ним и необходимости обеспечения оптимальных режимов ультразвукового воздействия при реализации УЗ технологических процессов в жидких и жидкодисперсных средах.

Для практической реализации УЗ аппаратов предложены и разработаны узлы систем автоматической подстройки частоты, систем контроля амплитуды механических колебаний ультразвуковых электронных генераторов.

Предложено и реализовано устройство выделения сигнала, АЧХ и ФЧХ которого соответствуют АЧХ и ФЧХ тока механической ветви. Принцип его действия основан на использовании свойств дифференциальной схемы, обеспечивающей вычитание из мгновенного значения полного тока, емкостного тока ультразвуковой колебательной системы. Этот узел позволяет выделять из тока, потребляемого колебательной системой от электронного генератора, электрический сигнал, параметры которого (частота, амплитуда, фаза) свободны от влияния изменяющегося реактивного тока, протекающего по пьезокерамическим элементам ультразвуковой колебательной системы, и соответствуют параметрам колебательной скорости ультразвуковой колебательной системы.

Предложен способ и разработана система регулировки мощности УЗ генераторов, обладающая следующими особенностями: - возможностью плавного включения электронного генератора от нуля до требуемой мощности в пределах всего диапазона; - возможностью оперативной, ручной регулировки мощности в процессе эксплуатации УЗ технологических аппаратов; - возможностью использования в системах автоматической регулировки и стабилизации мощности.

Третья часть главы посвящена созданию аппаратов и исследованию особенностей их применения. Разработанные принципиальные схемные решения, способы и алгоритмы управления работой ультразвуковых электронных генераторов были практически реализованы в ультразвуковых аппаратах, предназначенных для реализации технологических процессы в жидких средах. Большая часть разработанных узлов, элементов и способов управления работой УЗ аппаратов защищена патентами РФ.

Четвертая часть главы посвящена исследованию функциональных возможностей созданных ультразвуковых аппаратов.

Представлены экспериментальные данные, полученные в результате исследования работы электронных генераторов при обработке технологических сред с изменяющимися свойствами на примере процесса получения в ультразвуковом поле 25% - го водного раствора *NaCl*. Экспериментальные данные иллюстрируют кинетику процесса и подтверждают возможность использования зависимости электрических параметров ультразвуковых колебательных систем от свойств обрабатываемых сред для контроля протекания стадий процесса.

Кроме того, представлены экспериментальные результаты (рисунок б), полученные в результате исследования скорости диспергирования прессованных тестовых образцов (таблеток фурациллина) в водной среде, полученные при различных интенсивностях ультразвуковой волны, а

также при работе ультразвукового аппарата с системой автоматической настройки на режим развитой кавитации.



Рисунок 6 - Зависимости времени растворения тестовых образцов и резонансной частоты колебательной системы от интенсивности ультразвука

Полученные результаты подтвердили функциональность найденного критерия настройки ультразвуковых технологических аппаратов на режим развитой кавитации (прекращение роста резонансной частоты колебательной системы соответствует режиму развитой кавитации, что определяет максимальную скорость растворения тестовых образцов).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В результате проведения исследовательской работы получены следующие результаты:

- Обоснована возможность повышения эффективности использования ультразвуковой аппаратуры для интенсификации процессов химических технологий, протекающих в жидких средах за счет введения нового критерия настройки электронных генераторов на резонансную частоту ультразвуковой колебательной системы, обеспечения возможности контроля импеданса излучению обрабатываемыми технологическими средами, введения критерия настройки ультразвукового аппарата на режим развитой кавитации, позволяющего поддерживать оптимальный режим УЗ воздействия при изменении свойств обрабатываемых технологических сред.

- Разработана модель, описывающая свойства жидких технологических сред, подвергаемых ультразвуковому воздействию и позволяющая определять волновое сопротивление технологических сред в зависимости от величины звукового давления и свойств обрабатываемых сред.

- Экспериментально исследовано влияние обрабатываемых сред на электрические параметры ультразвуковых колебательных систем (резонансную частоту, добротность, входное сопротивление, импеданс) и электронных генераторов и установлены диапазоны необходимой перестройки параметров электронных генераторов при обработке различных технологических сред.

- Предложена и разработана методика определения основных параметров УЗ технологических аппаратов, позволяющая осуществлять выбор, необходимой и достаточной для реализации в жидких средах режима развитой кавитации, акустической и электрической мощности, а также определять диапазон изменения резонансной частоты ультразвуковой колебательной системы при работе ультразвукового аппарата в различных режимах (докавитационный режим, режим зарождения кавитации, режим развитой кавитации).

- Разработана серия ультразвуковых технологических аппаратов для интенсификации различных технологических процессов на основе предложенного метода определения импеданса излучению обрабатываемыми средами, критерия оптимальной работы ультразвуковых аппаратов и способа определения режима развитой кавитации.

Исследованы особенности применения разработанных ультразвуковых технологических аппаратов различной мощности, обеспечивающих повышение эффективности ультразвукового воздействия на жидкие среды.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

c_K - скорость звука в кавитирующей среде, м/с; $c_ж$ - скорость звука в капельной жидкости, м/с; f - частота ультразвука; h - толщина, присоединенного к излучающей поверхности, слоя жидкости, м;

k, \bar{k} - индекс кавитации и средний индекс кавитации; L_{CP} - электрический эквивалент массы обрабатываемой среды, Н; N - количество кавитационных пузырьков; P_0 - гидростатическое давление, Па; P_M - давление звуковой волны, Па; P_{II} - давление насыщенных паров, Па; R - радиус пузырька, м; R_0 - радиус кавитационного зародыша, м; R_{MAX} - радиус резонансного пузырька, м; $S_{ИЗЛ}$ - площадь поверхности излучения, м²; t - время, сек; V - объем жидкости, м³; $V_{C\Phi}$ - объем жидкости заключенной в сфере, м³; ΔV - объем кавитационных пузырьков, м³; $\Delta V_{C\Phi}$ - объем единичного сферического пузырька, м³; Гц; β_r - сжимаемость парогазовой смеси; $\beta_{ж}$ - сжимаемость капельной жидкости; γ - показатель политропы; ρ_r - плотность парогазовой среды, кг/м³; $\rho_{ж}$ - плотность капельной жидкости, кг/м³; ρ_k - плотность кавитирующей среды, кг/м³; σ - коэффициент поверхностного натяжения жидкости; Н/м; ω - угловая частота, рад/с.

ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Пат. №2141386 РФ, МПК⁷ 6 В 06 В 3/00. Ультразвуковая колебательная система / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н.; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 97120873/28; заявл. 15.12.97; опубл. 20.11.99, Бюл. №20. – 3 с.: ил.
2. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Сливин А.Н., Цыганок С.Н. Развитие ультразвуковых технологий, разработка исследование многофункциональных и специализированных ультразвуковых аппаратов // Ползуновский альманах. – Барнаул: АлтГТУ. – 2000. – №3. – С.193–200.
3. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Shalunov A.V., Slivin A.N., Tchyganok S.N. The System of Checking and Operating Power of Ultrasonic Technological Apparatus // Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2001: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2001. – P.54–55.
4. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Slivin A.N., Tchyganok S.N. System of Phase-Locked-Loop Frequency Control of Ultrasonic Generators // Siberian Russian Student Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2001: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2001. – P.56–57.
5. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Князев А.Н., Шалунов А.В. Измерение параметров технологических сред, подвергаемых воздействию ультразвуковых колебаний высокой интенсивности // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник. – Бийск: АлтГТУ, 2001. – С.262–267.
6. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Сливин А.Н., Цыганок С.Н., Шалунов А.В. Способ повышения качества работы систем ФАПЧ электронных ультразвуковых технологических аппаратов // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленных и научных исследованиях: межвузовский сборник. – Бийск: АлтГТУ, 2002. – С.178–184.
7. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Chipurin E.V., Savin I.I., Slivin A.N., Tchyganok S.N. Development of Compact Multipurpose Ultrasonic Technological Device // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2003. – P.217–221.
8. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Levin S.V., Slivin A.N., Tchyganok S.N., Automation of Advanced Cavitation Mode Obtaining Process in Liquid Mediums // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2003: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2003. – P.222–226.
9. Пат. № 2224649 РФ, МПК⁷ В 29 В 15/10, С 08 J 7/18, В 05 С 3/12. Устройство ультразвуковой пропитки / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Сливин А.Н., Хмелев М.В., Цыганок С.Н.; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2003104729; заявл. 17.02.03; опубл. 27.02.04, Бюл. №6. – 1с.: ил.
10. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Lebedev A.N., Tchyganok S.N. System Automatic Measurement Acoustic Power of Ultrasonic Plants // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2004: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2004. – P.205 – 206.
11. Khmelev V.N., Barsukov R.V., Savin I.I., Tchyganok S.N. Problems of Electrical Matching of Electronic Ultrasound Frequency Generators and Electroacoustical Transducers for Ultrasound Technological Installations // Siberian Russian Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2004: Workshop Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2004. – P.211–215.
12. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Леонов Г.В., Цыганок С.Н. Развитие научных основ повышения эффективности ультразвуковых технологий, разработка и организация производства ультразвуковых аппаратов для удовлетворения потребностей производств, медицинских учреждений и сельского хозяйства // Альманах «Бийский вестник». – Барнаул: АлтГТУ. – 2004. – №4. – С.49–62.
13. Пат. № 2240073 Российская Федерация, МПК⁷ А 61 В 18/00 17/32. Способ управления процессом ультразвуковой липосакции / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Сливин А.Н., Цыганок С.Н., Шалунов А.В.; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2003107030; заявл. 13.03.03; опубл. 20.11.04, Бюл. №32. – 2с.: ил.

14. Пат. № 22243039 РФ, МПК⁷ В 08 В 3/12. Устройство ультразвуковой очистки автомобильных инжекторов / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Сливин А.Н., Хмелев М.В., Цыганок С.Н.; ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». – № 2003104703; заявл. 17.02.03; опубл. 27.12.04, Бюл. №36. – 3с.: ил.

Подписано в печать 5.09.2005 г. Печать – ризография. Заказ 2005 –

Объем 1,44 п.л. Тираж 100 экз.

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

659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27