

На правах рукописи



Кузовников Юрий Михайлович

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ЭМУЛЬСИЙ  
И СУСПЕНЗИЙ В ПОЛЯХ ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ  
МОНОЧАСТОТНЫХ И ШИРОКОПОЛОСНЫХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ  
КОЛЕБАНИЙ**

Специальность 05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Бийск – 2012

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

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Научный руководитель  | доктор технических наук, профессор,<br>Хмелев Владимир Николаевич  |
| Официальные оппоненты | Овчаренко Александр Григорьевич<br>доктор технических наук, профессор<br>Бийский технологический институт<br>(филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ<br><br>Василишин Михаил Степанович<br>кандидат технических наук, доцент<br>Институт проблем химико-<br>энергетических технологий Сибирского<br>отделения Российской академии наук<br>(ИПХЭТ СО РАН) |
| Ведущая организация   | Открытое акционерное общество<br>«Федеральный научно-<br>производственный центр «Алтай»  |

Защита состоится «28» мая 2012 г. в 12 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.08 в Бийском технологическом институте (филиале) федерального государственного бюджетного 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) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Автореферат разослан «25» апреля 2012 г.

И.о. ученого секретаря  
диссертационного совета



Верещагин А.Л.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Современные условия развития химической и смежных отраслей промышленности диктуют необходимость постоянного увеличения мощностей и повышения эффективности технологических процессов. Одновременно с необходимостью роста промышленного производства, вследствие значительного ухудшения экологической обстановки, ужесточаются требования к борьбе с загрязнениями.

В химической, нефтехимической и горнодобывающей промышленности, при добыче нефти и газа, в пищевой промышленности и сельском хозяйстве реализуется большое число технологий, производящих вредные вещества, загрязняющие окружающую среду. Диапазон материалов и размеров загрязняющих частиц достаточно широк. И если крупные загрязнения удаляются легко, то вещества с микро- и наноразмерами выделить при использовании современных технологий практически невозможно.

Одним из высокоэффективных подходов к решению задач повышения эффективности процессов химических производств и уменьшения их экологического воздействия на окружающую среду является использование ультразвуковых (УЗ) колебаний различной интенсивности. УЗ колебания высокой интенсивности позволяют ускорять традиционные и реализовать новые процессы химических и смежных технологий, реализуемых в жидких средах. Их ускоряющее воздействие основано на возникновении в жидких средах нелинейных явлений, которые вызывают кавитационные процессы, радиационное давление, микро- и макропотоки, приводящие к разрывам механических и химических связей, увеличению поверхностей и скоростей взаимодействия, ускорению процессов массо- и теплопереноса. Известно, что взрывающиеся в жидких средах кавитационные пузырьки обеспечивают ускорение процессов экстрагирования, эмульгирования, диспергирования и аналогичных процессов в сотни и тысячи раз.

Изученными в меньшей степени являются процессы, протекающие при распространении в жидких средах низкоинтенсивных колебаний УЗ частотного спектра. В этом случае из-за возникающих и периодически меняющихся зон сжатия и разряжения порождаются силы, способствующие сближению, объединению и гравитационному осаждению твердых частиц, химических и биологических соединений, насыщающих раствор. К сожалению, практическая реализация таких процессов не нашла широкого применения в промышленности из-за сложности установления оптимальных условий и режимов воздействия, отсутствия специализированного оборудования, способного реализовать на практике такие режимы, исключая при этом разрушающее воздействие УЗ полей.

В связи с этим актуальной является задача создания специализированного оборудования, действие которого будет основано на реализации оптимальных условий и режимов, способных обеспечить повышение эффективности естественного разделения эмульсий и суспензий на составляющие компоненты за счет использования ультразвукового воздействия.

**Цель исследований** – интенсификация процесса разделения эмульсий и суспензий за счет реализации оптимальных режимов и условий УЗ воздействия, выявленных в результате анализа теоретических моделей и экспериментальных

исследований реальных процессов и создания УЗ оборудования, обеспечивающего ускорение естественного процесса укрупнения частиц дисперсной фазы в эмульсиях и суспензиях.

#### **Задачи исследований:**

- исследование причин, ограничивающих естественное разделение образующихся в различных условиях устойчивых эмульсий и суспензий, и выявление движущих факторов, способных обеспечить повышение эффективности и предсказуемости процесса коагуляции частиц дисперсной фазы;
- выявление закономерностей интенсификации процесса коагуляции различных по размеру частиц дисперсной фазы за счет воздействия механических колебаний ультразвуковой частоты на основе теоретических исследований механизмов ускорения естественного разделения;
- выработка требований к условиям и параметрам ультразвукового поля, используемого для интенсификации разделения эмульсий и суспензий, и к аппаратному оформлению, реализующему такое воздействие на основе теоретически выявленных и экспериментально подтвержденных закономерностей, которые обеспечивают интенсификацию разделения дисперсных систем с максимальной эффективностью;
- создание ультразвукового технологического оборудования для реализации оптимальных условий и режимов воздействия путем разработки специализированных излучателей (пьезоэлектрических колебательных систем различной формы, мощности, направленности излучения, частотного спектра излучения);
- практическая реализация ускорения коагуляции частиц дисперсной фазы в эмульсиях и суспензиях в различных условиях с применением разработанного специализированного ультразвукового оборудования для подтверждения эффективности и выявления методических особенностей его эксплуатации.

**Объект и методы исследования.** Объектом исследований являются процессы химической технологии, протекающие под структурирующим воздействием высокоинтенсивных моночастотных ультразвуковых полей и широкополосных полей кавитационного происхождения, реализуемые создаваемыми аппаратами, которые содержат в своем составе пьезоэлектрические колебательные системы различной мощности с грибовидным окончанием рабочего инструмента или инструментом с развитой поверхностью излучения и осуществляют непосредственное воздействие или через тонкостенный звукопроводящий объем, блокирующий деструктивную зону кавитации. При выполнении работы применялись как теоретические, так и экспериментальные методы исследования, направленные на решение поставленных задач.

#### **Научная новизна:**

- впервые теоретически выявлены зависимости, позволяющие определять условия и области интенсивного сближения и укрупнения частиц дисперсной фазы в обрабатываемых эмульсиях и суспензиях при воздействии ультразвуковыми моночастотными полями высокой интенсивности и широкополосными полями кавитационного происхождения;

- установлены условия размещения ультразвуковых излучателей различного вида, мощности и спектра излучения в обрабатываемых эмульсиях и суспензиях, определены режимы механического волнового воздействия, обеспечивающие интенсификацию процесса сближения и агрегации частиц дисперсной фазы;
- предложены и разработаны новые конструктивные схемы ультразвуковых излучателей, обеспечившие возможность применения созданных ультразвуковых аппаратов для целей интенсификации разделения эмульсий и суспензий на составляющие компоненты.

#### **Практическая значимость:**

- установлены области и режимы создаваемого излучателями различной формы ультразвукового воздействия, позволяющие ускорять процессы сближения и укрупнения мелких частиц дисперсной фазы в эмульсии и суспензии;
- для интенсификации процесса естественного разделения эмульсий и суспензий на составляющие компоненты на основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований созданы ультразвуковые излучатели, которые обеспечивают максимальную эффективность излучения моночастотных ультразвуковых полей высокой интенсивности и широкополосных кавитационных полей, создаваемых в процессе кавитации в промежуточных средах между излучателем и обрабатываемой средой;
- разработаны практические конструкции ультразвуковых технологических аппаратов, способных обеспечить моно- и широкополосную структурирующую обработку эмульсий и суспензий объемом до 500 литров в закрытой емкости под давлением и до 120 литров в проточном режиме.

**Апробация работы.** Материалы диссертации докладывались на конференциях International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2008, EDM'2009, EDM'2010, EDM'2011 (Новосибирск, 2008-2011); на 7-й Всероссийской научно-технической конференции «Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях ИАМП-2011» (Бийск, 2011).

#### **Положения, выносимые на защиту.**

Область деструктивного кавитационного воздействия может быть ограничена или устранена, а полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований позволяют определить оптимальное расположение ультразвукового излучателя и обеспечить создание условий максимальной интенсивности разделения эмульсий и суспензий.

Установлена возможность и доказана эффективность интенсификации процесса разделения эмульсий и суспензий за счет использования совокупности моночастотных колебаний ультразвуковой частоты и широкополосных колебаний кавитационного происхождения.

Предложенные и разработанные новые виды излучателей для ультразвуковых технологических аппаратов обеспечивают повышение эффективности процессов естественного разделения мелкодисперсных эмульсий, суспензий.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 2 статьи в журналах, рецензируемых ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех разделов, выводов, списка литературы из 95 наименований и содержит 167 страниц машинописного текста.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснованы 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 процессов образования устойчивых эмульсий и суспензий, движущих факторов, способствующих этому, исследованию естественного разрушения таких систем, а также способов и методов интенсификации этого разрушения. В начале раздела рассматриваются диспергационный и конденсационный способы получения эмульсий и суспензий. Во второй части раздела подробно рассматривается проблема устойчивости эмульсий и суспензий на примере лиофильных и лиофобных коллоидов, указываются два основных признака устойчивости – устойчивость к седиментации и агрегации. Далее рассматриваются причины коагуляционного нарушения равновесия в дисперсной системе: влияние внешних воздействий и коагулирующее действие электролитов. В третьей части раздела описываются существующие химические аппараты для разделения эмульсий и суспензий посредством коагуляции и флокуляции – трубный флокулятор и емкостной реактор. Отмечается, что перспективным направлением в современной химической технологии является воздействие на жидкие среды механическими колебаниями ультразвуковой частоты. В четвертой части раздела рассматриваются акустические течения и силы, возникающие в акустическом поле при прохождении волны в неоднородной жидкой среде. Подробно рассматривается акустический флотационный эффект. Затем проводится обзор современных ультразвуковых аппаратов для обработки жидких сред. Выделяются свойства ультразвукового воздействия, потенциально применимые для ускорения процесса объединения мелких частиц дисперсной фазы в эмульсиях и суспензиях. Понимание проблемы и анализ возможных путей ее решения позволили в завершении первого раздела сформулировать цель работы и задачи исследований.

**Второй раздел** посвящен теоретическим исследованиям необходимых режимов ультразвукового воздействия для усиления агломерирующего действия ультразвуковых полей.

В первой части раздела в рамках теории ДЛФО рассматривается расклинивающее давление, состоящее из молекулярной  $\Pi_m(h)$ , ионно-электростатической  $\Pi_e(h)$  и структурной  $\Pi_s(h)$  составляющих. Потенциальная энергия  $U_e$  электростатического отталкивания вычисляется, как:

$$U_e = \frac{64RTc_\infty}{\kappa} \gamma^2 e^{-2\kappa x}, \quad (1)$$

где  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $\gamma = \frac{\exp(zF\varphi_0/2RT)-1}{\exp(zF\varphi_0/2RT)+1}$  – параметр, зависящий от потенциала частицы  $\varphi_0$ ;  $\kappa = \sqrt{\frac{2(zF)^2 c_\infty}{\varepsilon \varepsilon_0 RT}}$  –

обратная величина эффективной толщины диффузной части ДЭС;  $c_\infty$  – концентрация электролита в объеме раствора;  $x$  – расстояние между частицами.

Молекулярное притяжение между частицами выражается, как:

$$U_m = -\frac{\pi n^2 \beta}{12} \frac{1}{(2x)^2} = \frac{A}{48x^2}, \quad (2)$$

где  $A = \pi n^2 \beta$  – константа Грамакера;  $x$  – расстояние между частицами.

Рассматривая условие, когда две частицы в равновесии на расстоянии  $x_{min}$  друг от друга находятся в минимуме общей энергии взаимодействия (устойчивые эмульсии, суспензии), находим это расстояние из условия  $\frac{dU_{общ}}{dx} = 0$  и смены знака производной с «-» на «+», также находим  $x_{max}$  – расстояние, соответствующее максимуму общей энергии взаимодействия:

$$\frac{dU_{общ}}{dx} = 64RTc_\infty \gamma^2 e^{-2kx} - \frac{A}{48\pi x^3} = 0, \quad (3)$$

$$64RTc_\infty \gamma^2 e^{-2kx} = \frac{A}{48\pi x^3}. \quad (4)$$

Работа сил акустического поля в бегущей волне по перемещению одной частицы на расстояние  $x_{min}$  к другой частице в выражении через интенсивность  $I = \frac{\rho_{ж} v_0^2}{2} c$  определяется, как:

$$A_{уз} = \frac{2}{9} \frac{\pi R^2 (kR)^4 I}{c} \left( a_1^2 + a_1 a_2 + \frac{3}{4} a_2^2 \right) x_{min}, \quad (5)$$

где  $R$  – радиус частицы;  $k$  – волновое число;  $I$  – интенсивность УЗ воздействия;  $a_1 = 1 - \frac{c^2 \rho_{ж}}{c_T^2 \rho_T}$ ;  $a_2 = 2 \frac{(\rho_T - \rho_{ж})}{2\rho_T + \rho_{ж}}$ ;  $c_T$  – скорость распространения УЗ в материале частиц;  $\rho_{ж}$  – плотность жидкой среды;  $\rho_T$  – плотность материала частиц.

При распространении ультразвуковых колебаний в реальной жидкой среде необходима оценка энергетических потерь.

В плоской волне при поглощении в среде интенсивность убывает:

$$I = I_0 e^{-2\frac{\beta}{c}x} = I_0 e^{-2\delta x}, \quad (6)$$

где  $\delta = \frac{1}{2c\xi} \frac{d\xi}{dt}$  – пространственный коэффициент поглощения;  $x$  – расстояние от излучателя.

Наряду с поглощением, в реальной жидкой среде также происходит рассеяние энергии волны на распределенных частицах:

$$I_{рас} = I_0 \frac{k^4 R^6}{9r^2} \left( 1 + \frac{3}{2} \cos \theta \right)^2, \quad (7)$$

где  $I_0$  – интенсивность УЗ поля вблизи излучателя;  $k$  – волновое число;  $R$  – радиус частиц;  $r$  – расстояние от излучателя.

Для задачи исследования изменения ультразвукового поля вдоль оси излучателя, формулу для интенсивности можно записать, как:

$$I_{\text{рас}} = I_0 \frac{25k^4 R^6}{36r^2}. \quad (8)$$

Кроме учета рассеивания энергии, необходимо также производить оценку потерь за счет кавитационных явлений.

Работа сил гидростатического и акустического давлений, совершаемая при расширении общего объема кавитационных пузырьков, вычисляется, как:

$$A_{\text{кав}} \cong P\Delta V, \quad (9)$$

где  $P$  – сумма гидростатического и акустического давлений;  $\Delta V$  – общий прирост объема парогазовых пузырей.

Давление здесь находится, как:

$$P = \rho_{\text{ж}}gh + \frac{2I}{c}, \quad (10)$$

где  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкой среды;  $g$  – гравитационная постоянная;  $h$  – глубина погружения излучателя;  $I$  – интенсивность УЗ воздействия;  $c$  – скорость распространения УЗ колебаний в жидкости.

Вычислить суммарный объем кавитационных пузырей можно, исходя из понимания того, что в условиях режима «развитой кавитации» показатель кавитации, как правило, равен 0,7.

Размер кавитационной области  $x_k$  в зависимости от интенсивности УЗ воздействия определяется следующим соотношением:

$$x_k = 2,5\rho_{\text{к}}c_{\text{к}}Kp_{\text{к}}^{\frac{5}{2}} \left( 1 - \left( \frac{I_{\text{опт}}}{I_0} \right)^{\frac{5}{4}} \right), \quad (11)$$

где  $I_{\text{опт}}$  – пороговая интенсивность, необходимая для реализации режима «развитой кавитации»,  $\rho_{\text{к}}c_{\text{к}}$  – волновое сопротивление кавитирующей жидкости,  $K$  – константа,  $p_{\text{к}}$  – давление ультразвуковой волны вызывающей кавитацию,  $I_0$  – интенсивность УЗ поля вблизи излучателя.

Объем области кавитации для круглого поршневого рабочего инструмента, найденный из выражений, полученных Френелем и Фраунгофером:

$$\begin{aligned}
V_{\text{кав}} = & \pi R_{\text{изл}}^4 / \Lambda + \frac{\pi}{3} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) \left( R_{\text{изл}}^2 + \right. \\
& + \left. \left( 0,61\Lambda \left( R_{\text{изл}} \left( 1 - \left( \frac{0,61\Lambda}{R_{\text{изл}}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) + R_{\text{изл}} \right)^2 + \right. \\
& \left. + 0,61\Lambda R_{\text{изл}} \left( R_{\text{изл}} \left( 1 - \left( \frac{0,61\Lambda}{R_{\text{изл}}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) + R_{\text{изл}} \right), \tag{12}
\end{aligned}$$

где  $R_{\text{изл}}$  – радиус излучателя;  $\Lambda$  – длина УЗ волны;  $x_k$  – размер кавитационной области.

Отсюда общий объем кавитационных пузырей вычисляется, как:

$$\begin{aligned}
\Delta V = 0,7V_{\text{кав}} = & 0,7\pi \left( R_{\text{изл}}^4 / \Lambda + \frac{1}{3} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) \left( R_{\text{изл}}^2 + \right. \right. \\
& + \left. \left. \left( 0,61\Lambda \left( R_{\text{изл}} \left( 1 - \left( \frac{0,61\Lambda}{R_{\text{изл}}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) + R_{\text{изл}} \right)^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + 0,61\Lambda R_{\text{изл}} \left( R_{\text{изл}} \left( 1 - \left( \frac{0,61\Lambda}{R_{\text{изл}}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) + R_{\text{изл}} \right) \right). \tag{13}
\end{aligned}$$

Учитывая полученные выражения для  $\Delta V$  и  $P$ , перепишем выражение (9):

$$\begin{aligned}
A_{\text{кав}} \cong & 0,7\pi \left( \rho_{\text{ж}} g h + \frac{2I}{c} \right) \left( R_{\text{изл}}^4 / \Lambda + \frac{1}{3} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) \left( R_{\text{изл}}^2 + \right. \right. \\
& + \left. \left. \left( 0,61\Lambda \left( R_{\text{изл}} \left( 1 - \left( \frac{0,61\Lambda}{R_{\text{изл}}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) + R_{\text{изл}} \right)^2 + \right. \right. \\
& \left. \left. + 0,61\Lambda R_{\text{изл}} \left( R_{\text{изл}} \left( 1 - \left( \frac{0,61\Lambda}{R_{\text{изл}}} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{-1} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) + R_{\text{изл}} \right) \right) \tag{14}
\end{aligned}$$

Общая интенсивность ослабленной ультразвуковой волны:

$$I_{\text{осл}} = I_0 \left(1 - \frac{25k^4 R^6}{36x^2}\right) e^{-2\delta x}, \quad (15)$$

где  $I_0$  – интенсивность УЗ поля вблизи излучателя;  $k$  – волновое число;  $R$  – радиус частицы;  $x$  – расстояние от излучателя;  $\delta$  – коэффициент поглощения.

Найдем размер области, расположенной за кавитационной областью, в которой энергия акустического поля интенсифицирует коагуляционные процессы.

На основе формул (1), (2), (5) и (14) запишем следующее равенство:

$$A_{\text{уз}} - A_{\text{кав}} = U_e - U_m. \quad (16)$$

Левая часть уравнения здесь соответствует энергетической составляющей акустического поля, а правая – энергии сил взаимодействия между дисперсными частицами в жидкой среде. Сделав подстановку  $I_{\text{осл}} = I_0 \left(1 - \frac{25k^4 R^6}{36x^2}\right) e^{-2\delta x}$ , получим:

$$\begin{aligned} & \frac{2\pi R^2 (kR)^4 I_0 \left(1 - \frac{25k^4 R^6}{36x^2}\right) e^{-2\delta x}}{9c} \left(a_1^2 + a_1 a_2 + \frac{3}{4} a_2^2\right) x_{\min} - \\ & -0,7\pi \left(\rho_{\text{ж}} g h + \frac{2I_0 \left(1 - \frac{25k^4 R^6}{36x^2}\right) e^{-2\delta x}}{c}\right) \left(R_{\text{изл}}^4 / \Lambda + \frac{1}{3} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) \times \right. \\ & \times \left. \left(R_{\text{изл}}^2 + 0,61\Lambda \left(R_{\text{изл}} \left(1 - \left(\frac{0,61\Lambda}{R_{\text{изл}}}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}\right)^{-1} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) + R_{\text{изл}}\right)^2 + \right. \\ & \left. + 0,61\Lambda R_{\text{изл}} \left(R_{\text{изл}} \left(1 - \left(\frac{0,61\Lambda}{R_{\text{изл}}}\right)^2\right)^{\frac{1}{2}}\right)^{-1} (x_k - R_{\text{изл}}^2 / \Lambda) + R_{\text{изл}}\right) \right) = \\ & = \frac{64R_{\text{г}} T c_{\infty}}{\kappa} \gamma^2 e^{-2\kappa x_{\max}} - \frac{A}{48x_{\max}^2} \end{aligned} \quad (17)$$

где  $R$  – радиус частиц;  $k$  – волновое число;  $I_0$  – интенсивность УЗ поля вблизи излучателя;  $\delta$  – коэффициент поглощения;  $c$  – скорость распространения УЗ в среде;  $a_1 = 1 - \frac{c^2 \rho_{\text{ж}}}{c_{\text{т}}^2 \rho_{\text{т}}}$ ;  $a_2 = 2 \frac{(\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{ж}})}{2\rho_{\text{т}} + \rho_{\text{ж}}}$ ;  $c_{\text{т}}$  – скорость распространения УЗ в материале частиц;  $\rho_{\text{ж}}$  – плотность жидкой среды;  $\rho_{\text{т}}$  – плотность материала частиц;  $R_{\text{изл}}$  – радиус излучателя;  $\Lambda$  – длина волны УЗ колебаний;  $h$  – глубина

погружения излучателя;  $x_{min}$  – расстояние между частицами, соответствующее потенциальной яме общей энергии взаимодействия;  $x_k$  – размер области кавитации;  $R_g$  – универсальная газовая постоянная;  $T$  – абсолютная температура;  $c_\infty$  – концентрация электролита в растворе;  $\kappa = \sqrt{\frac{2(zF)^2 c_\infty}{\varepsilon \varepsilon_0 RT}}$  – обратная величина эффективной толщины диффузной части ДЭС;  $\gamma = \frac{\exp(zF\varphi_0/2RT)-1}{\exp(zF\varphi_0/2RT)+1}$  – параметр, зависящий от потенциала частицы  $\varphi_0$ ;  $x_{max}$  – расстояние между частицами, соответствующее максимуму общей энергии взаимодействия;  $A$  – константа Гамакера.

Полученное уравнение решается графическим способом и дает информацию о размере области в обрабатываемой жидкой среде, в которой реализуются условия, пригодные для протекания процесса коагуляции.

Проведенные расчеты для устойчивых эмульсий и суспензий различных по составу дисперсионной среды и дисперсной фазы показали, что размер области в ультразвуковом поле, благоприятной для сближения и укрупнения частиц дисперсной фазы в зависимости от частоты и интенсивности ультразвукового воздействия, простирается от кавитационной области (3–10  $R_{изл}$ ) до расстояния 100–1000  $R_{изл}$ . Например, при радиусе инструмента излучателя  $20 \cdot 10^{-3}$  м и частоте воздействия, равной  $22 \cdot 10^3$  Гц, область интенсивного сближения частиц для различных исследованных сред при разной интенсивности воздействия может изменяться от  $35 \cdot 10^{-2}$  м до 18 м.

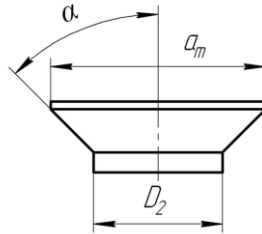
Для устранения деструктивного влияния области кавитации при том же объеме вводимой механической энергии необходимо от высокоинтенсивных моночастотных ультразвуковых колебаний перейти к широкополосным колебаниям малой интенсивности.

Анализ уравнения общей интенсивности ослабления поля ультразвуковой волны (15) показывает, что:

- чем крупнее частицы в обрабатываемой эмульсии или суспензии, тем более ослабляется при прохождении волна, поскольку интенсивность рассеивания пропорциональна квадрату объема частицы;
- акустическая волна меньшей частоты менее рассеивается на взвешенных в жидкой среде частицах, так как рассеиваемая интенсивность пропорциональна четвертой степени частоты колебаний.

**В третьем разделе** приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на подтверждение теоретически найденных условий и режимов ультразвукового воздействия, необходимых для интенсификации процесса естественного разделения эмульсий и суспензий. Исследованы современные конструкции ультразвуковых излучателей и выявлены возможности и условия их использования для создания в эмульсиях и суспензиях акустического поля, интенсифицирующего сближение и слияние частиц дисперсной фазы.

Для воздействия на эмульсии и суспензии предложен рабочий излучающий инструмент грибовидной формы (рисунок 1).



$\alpha$  – угол раскрытия излучателя;  $a_m$  – диаметр излучающей поверхности;  $D_2$  – диаметр основания рабочего инструмента

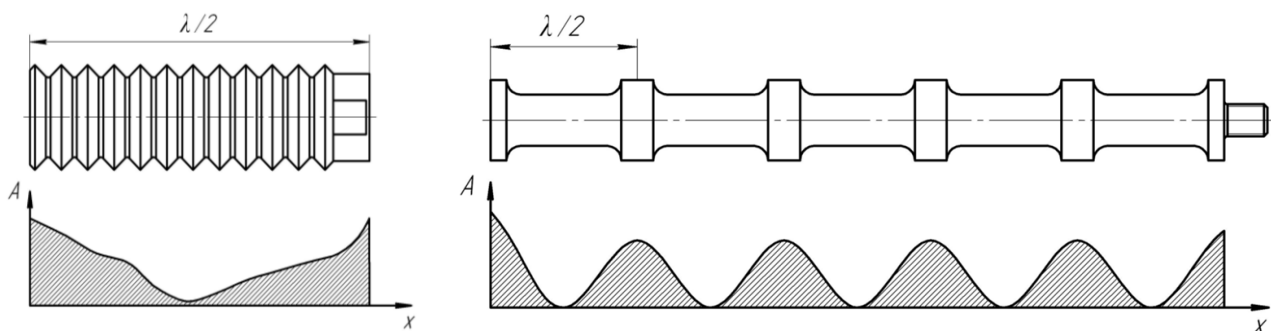
Рисунок 1 – Рабочий инструмент грибовидной формы

Диаметр его излучающей поверхности выбирается из условия:

$$1,5 \leq \frac{a_m}{D_2} \leq 1,8. \quad (18)$$

Экспериментально определено, что максимальная интенсивность излучения достигается при угле раскрытия конуса  $2\alpha$ , равном  $120^\circ$ .

Для ввода в жидкую среду бóльшей энергии и усиления коагуляционных процессов взамен грибовидного излучателя необходимо использовать излучатели ультразвука с развитой поверхностью излучения (рисунок 2).



$\lambda$  – длина УЗ волны распространяющейся в материале инструмента;  $A$  – амплитуда колебаний инструмента;  $x$  – линейный размер инструмента

Рисунок 2 – Рабочие инструменты с развитой поверхностью излучения и диаграммы распределения амплитуд колебаний

Далее в разделе приведены меры подавления деструктивного влияния ультразвуковых колебаний и интенсификации их коагулирующего действия:

- уменьшение интенсивности ультразвукового воздействия. При незначительной энергии распространяющихся в толще жидкой среды ультразвуковых колебаний, не происходит значимого расширения парогазовых пузырей. При этом вся вводимая энергия может быть потрачена на укрупнение частиц дисперсной фазы в обрабатываемой эмульсии или суспензии. Однако ввиду малой интенсивности колебаний происходит их затухание вблизи излучателя, а сближающее и укрупняющее действие на удаленном расстоянии будет минимальным или отсутствовать полностью;

- создание избыточного давления в обрабатываемой жидкой среде. В этом случае при существенной энергии ультразвукового поля не будет происходить активного образования и разрушения парогазовых пузырей вследствие

недостаточности силы давления вводимых ультразвуковых колебаний. Распространяющиеся в обрабатываемой жидкой среде механические колебания ультразвуковой частоты на значительном расстоянии от излучателя будут способствовать сближению и укрупнению мелких частиц дисперсной фазы;

- вытеснение частиц дисперсной фазы из зоны высокой кавитационной активности. Существует возможность существенного уменьшения вероятности (до ее исключения) попадания мелких частиц дисперсной фазы в деструктивную кавитационную область. Для этого необходимо организовать озвучивание жидкой среды в цилиндрической емкости с интенсивным круговым движением, образующимся вследствие подачи жидкости тангенциально с большой скоростью с осесимметрично расположенным ультразвуковым излучателем. В быстро движущейся по кругу жидкой среде частицы дисперсной фазы будут вытесняться от излучателя к стенкам емкости под действием центробежной силы (если их плотность больше плотности дисперсионной фазы) и тем самым выталкиваться из разрушающей кавитационной области. Метод может быть использован только для случая более плотной дисперсной фазы по отношению к дисперсионной среде и при высокой скорости потока;

- экранирование кавитационной области. Для изолирования области кавитации на пути распространения ультразвуковой волны необходимо поместить акустически прозрачное препятствие (звукопроводящий объем) в виде тонкостенного цилиндра, заполняемого обрабатываемой жидкой средой или средой с близким по значению волновым сопротивлением. Для обеспечения максимального преобразования энергии выбирают расстояние от днища звукопроводящего объема до торцевой поверхности рабочего инструмента  $x_{\text{кав}}$ , равное размеру кавитационной области в обрабатываемой среде.

Механические колебания стенки звукопроводящего объема при работе ультразвукового излучателя в жидкой среде будут образованы суммой колебаний основной рабочей частоты ультразвукового преобразователя и нерезонансных кавитационных колебаний. Это поле широкополосных колебаний (рисунок 3) проходит во внешний обрабатываемый объем.

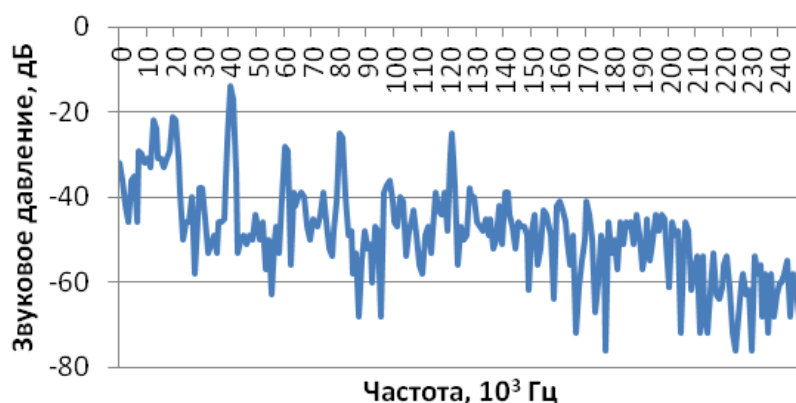


Рисунок 3 – Амплитудно-частотная характеристика колебаний поверхности звукопроводящего объема

Анализ предложенных мер усиления коагуляции частиц дисперсной фазы показал, что наиболее эффективным и универсальным является метод

экранирования кавитационной области звукопроводящим объемом, так как при этом максимально используется высокая энергетика моночастотного ультразвукового поля и широкополосного кавитационного воздействия. Также здесь не является критичной плотность дисперсной фазы по отношению к дисперсионной среде.

В целях апробирования эффективности применения широкополосного ультразвукового воздействия для ускорения процесса разделения компонентов в обрабатываемой эмульсии или суспензии было выбрано и оснащено звукопроводящим объемом существующее ультразвуковое оборудование.

Для исследования влияния композиции колебаний на коагуляцию мелкодисперсных примесей были осуществлены эксперименты по обработке водных суспензий бентонитового глинопорошка, содержащих в своем составе твердые частицы породы размером до  $5 \cdot 10^{-6}$  м. Обработка производилась с использованием модернизированного аппарата «Волна-М», оснащенного звукопроводящим объемом, в течение 5 минут, а затем осуществлялось 1-часовое отстаивание и изучение образцов под микроскопом (рисунок 4).

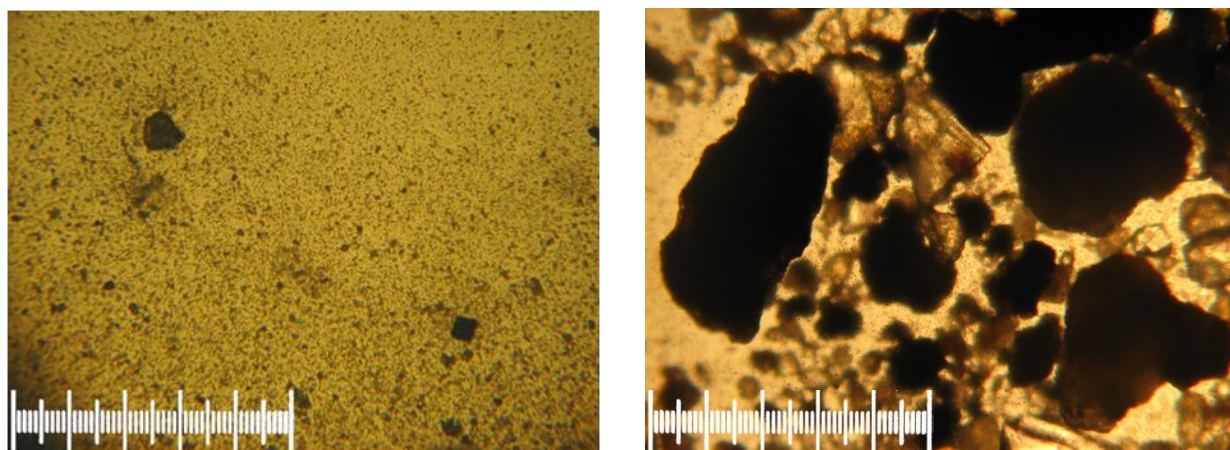


Рисунок 4 – Фотографии образцов водных суспензий бентонитового глинопорошка до обработки (слева) и после озвучивания (справа) (увеличено в 100 раз)

В результате экспериментов было достигнуто укрупнение растворенных частиц породы в среднем до  $50 \cdot 10^{-5}$  м.

Для исследования использования структурирующих широкополосных колебаний в процессе разделения эмульсий были выполнены эксперименты по озвучиванию образцов устойчивых эмульсий минерального моторного масла 15W40 по классификации SAE и воды с разным сочетанием компонентов.

Для обработки был использован модернизированный аппарат «Волна-М». Озвучивание производилось в течение 1 часа для каждой эмульсии. По истечении этого времени интенсивность разделения эмульсий существенно замедлялась. Данные об объеме воды, выделенной из эмульсий в ходе экспериментов, приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Объем воды, выделенной из эмульсий в процессе обработки

| Тип эмульсии           | Объем выделенной воды, % |
|------------------------|--------------------------|
| 10 % масла – 90 % воды | 88,3                     |
| 20 % масла – 80 % воды | 75,8                     |
| 40 % масла – 60 % воды | 44,3                     |
| 50 % масла – 50 % воды | 29,3                     |
| 60 % масла – 40 % воды | 24                       |
| 80 % масла – 20 % воды | 16,5                     |

Для изучения характера влияния акустического воздействия на трехкомпонентную систему, состоящую из эмульсии и суспензии, был выбран облепиховый виноматериал, в состав которого входят мелкие частицы мякоти и капли облепихового масла. С целью осветления этой дисперсной системы обычно используется водная суспензия бентонитового глинопорошка, однако для получения приемлемой степени прозрачности требуется неоднократная обработка, фильтрация и использование центрифугирования.

Первоначально произвели пробную оклейку облепихового виноматериала суспензией бентонита в концентрации от  $1 \cdot 10^{-3}$  кг/дм<sup>3</sup> до  $7 \cdot 10^{-3}$  кг/дм<sup>3</sup>. Как и предполагалось, существенного осветления виноматериала достигнуто не было. Затем были проведены эксперименты по озвучиванию оклеиваемых суспензией бентонита образцов виноматериала с использованием ультразвукового аппарата «Нежность» в течение 5 минут. После 24 часового отстаивания были произведены замеры прозрачности образцов виноматериала с помощью турбидиметра. Результаты приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты экспериментов с облепиховым виноматериалом

| Дозировка бентонита, $10^{-3}$ кг/дм <sup>3</sup> | Без УЗ обработки  |                 | После УЗ обработки |                 |
|---|-------------------|-----------------|--------------------|-----------------|
|   | мутность, ед. NTU | объем осадка, % | мутность, ед. NTU  | объем осадка, % |
| 1,0   | 4236              | 4,9             | 4465               | 5,9             |
| 2,0   | 2975              | 13,4            | 95,4               | 30,6            |
| 3,0   | 1483              | 16,8            | 16,5               | 41,4            |
| 4,0   | 373,0             | 26,0            | 5,90               | 54,4            |
| 5,0   | 69,1              | 30,7            | 2,47               | 67,3            |
| 6,0   | 24,3              | 34,5            | 1,92               | 76,7            |
| 7,0   | 20,5              | 39,1            | 1,72               | 84,5            |

Таким образом, ультразвуковое воздействие интенсифицирует процесс сближения и агрегации оклеиваемых частиц виноматериала, что позволяет сократить дозу бентонита в 2,5 раза, и в результате сразу достигается требуемая степень прозрачности виноматериала. При этом его pH и титруемая кислотность не изменяются.

Кроме того, было произведено экспериментальное исследование влияния интенсивных ультразвуковых колебаний на процесс выделения дисперсной газовой фазы радона в образцах воды из источника. Для этого осуществляли обработку 2 литров насыщенной газом воды аппаратом «Волна-М». По истечении 300 секунд было достигнуто практически полное разделение дисперсной системы (таблица 3).

Таблица 3 – Результаты экспериментов по выделению радона из водного раствора

| Время воздействия, с | Радиоактивность газа, Бк/м <sup>3</sup> | Выделение газа, 10 <sup>-3</sup> л/л |
|----------------------|---|--------------------------------------|
| 1                    | 490                                     | 7,85                                 |
| 5                    | 630                                     | 10,10                                |
| 10                   | 820                                     | 13,14                                |
| 50                   | 1140                                    | 18,27                                |
| 300                  | 1185                                    | 18,99                                |

Проведенный эксперимент подтвердил эффективность использования интенсивных ультразвуковых колебаний в задачах дегазации жидких сред.

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

**Четвертый раздел** посвящен описанию ультразвуковых установок, разработанных для обработки больших объемов эмульсий и суспензий в производственных условиях, а также опытов, проведенных с их использованием, и анализу полученных экспериментальных данных. Для обработки больших объемов жидких сред в закрытой емкости в отсутствие протока была разработана ультразвуковая установка с использованием ультразвукового технологического аппарата «Волна» модель УЗТА-0,8/22 – ОМУ (рисунок 5).



Рисунок 5 - Установка для разделения больших объемов эмульсий и суспензий



Рисунок 6 – Аппарат для проточной УЗ обработки эмульсий и суспензий

Созданная установка состоит из цилиндрической емкости объемом 500 литров, расположенной горизонтально, ультразвукового излучателя, герметично закрепленного в торце емкости и направленного под углом 45° к боковой стенке, для наиболее эффективного использования энергии отраженной волны и стимулирования укрупнения и осаждения мелких частиц дисперсной фазы в дисперсионной среде. Для ослабления энергии кавитации и усиления коагуляционных процессов внутри емкости создается избыточное давление.

Опыты, проведенные с использованием разработанной установки по обработке отработанных буровых растворов, нефтешламов и сточных

подтоварных вод на месторождениях ОАО «Сургутнефтегаз», продемонстрировали высокую эффективность разделения компонентов без применения вспомогательных реактивов после 6 часов обработки и отстаивания в течение суток. При этом удалось на порядок снизить содержание частиц дисперсной фазы, довести свойства обрабатываемых жидких систем до регламентных требований системы поддержания пластового давления, снизить биологическую активность и сохранить исходный уровень токсичности. Для приближения технологии осветления облепихового виноматериала к производственным условиям была разработана ультразвуковая установка на базе ультразвукового технологического аппарата «Булава» модель УЗТА – 3/22 – О, закрепленного рабочим инструментом вверх в днище нержавеющей емкости объемом 150 литров, оснащенной двумя патрубками для прокачивания виноматериала с помощью центробежного электронасоса (рисунок 6). В ходе предварительных экспериментов было выбрано оптимальное время озвучивания, равное 20 минутам. Затем произвели финальное озвучивание виноматериала в присутствии водной суспензии бентонита и осуществили отстаивание. Отсутствие визуального изменения осветляемого виноматериала наступило спустя неделю, однако активное осаждение осадка прекратилось уже через 24 часа.

Таким образом, проведенные практические исследования на примере обработки различных технологических сред подтвердили эффективность разработанного оборудования.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ**

1. Исследованы процессы, препятствующие естественному разрушению устойчивых эмульсий и суспензий для их утилизации или получения полезного продукта, и выявлены основные механизмы, интенсификация которых обеспечит повышение эффективности и предсказуемости процесса объединения частиц дисперсной фазы.

2. Применительно к интенсификации процесса объединения различных по размеру частиц дисперсной фазы исследованы возможности механических колебаний ультразвуковой частоты, построена математическая модель, позволяющая устанавливать зоны стимулирования коагуляционных процессов в эмульсиях и суспензиях, подвергаемых высокоинтенсивному ультразвуковому воздействию.

3. Для обеспечения оптимальных условий и режимов разделения эмульсий и суспензий выработаны требования к режимам ультразвукового воздействия и параметрам УЗ аппаратов, способным устранить деструктивное влияние кавитации и усилить структурирующее воздействие за счет изолирования зоны кавитации и использования колебаний различной частоты в ходе процесса коагуляции.

4. Разработаны специализированные УЗ аппараты с интенсивностью колебаний до  $20 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup> на основе излучателей с грибовидным рабочим инструментом и инструментом с развитой поверхностью излучения, а также излучателей широкополосных колебаний, оснащенных звукопроводящим объемом, блокирующим деструктивную кавитационную область.

5. Практическое исследование функциональных возможностей созданных ультразвуковых аппаратов с излучателями мощностью до 8000 ВА при реализации процессов коагуляции частиц дисперсной фазы в эмульсиях и суспензиях подтвердило эффективность разделения устойчивых дисперсных систем объемом до 500 литров.

### **ОПУБЛИКОВАННЫЕ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. **Кузовников, Ю.М.** 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.

2. **Кузовников, Ю.М.** Лабораторный стенд для проточной кавитационной обработки жидких сред [Текст] / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, А.В. Шалунов, Ю.М. Кузовников, С.Н. Цыганок, С.С. Хмелёв // Технологии и оборудование химической, биологической и пищевой промышленности: материалы Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. – Бийск: БТИ АлтГТУ, 2008. – С. 163–170.

3. **Кузовников, Ю.М.** 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.

4. **Кузовников, Ю.М.** Исследование процесса ультразвуковой коагуляции частиц бурового раствора [Текст] / В.Н. Хмелев, Ю.М. Кузовников, С.Н. Цыганок, С.С. Хмелев // Электронный журнал «Исследовано в России». – 2010. – 041. – С. 487–496. – Режим доступа: <http://zhurnal.ape.relarn.ru/>, свободный. – Дата обращения 20.04.2012.

5. **Кузовников, Ю.М.** Исследование влияния ультразвукового воздействия на процесс разделения устойчивых эмульсий [Текст] / В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, Ю.М. Кузовников // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях: межвузовский сборник / Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: АлтГТУ, 2011. – Вып. 1. – С. 175–177.

6. **Кузовников, Ю.М.** Применение мощных ультразвуковых технологических аппаратов для интенсификации процессов в жидких средах [Текст] / В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, Ю.М. Кузовников // Экономика Алтайского края. – 2011. – № 3(19). – С. 50–56.

7. **Кузовников, Ю.М.** Исследование процесса разделения дисперсных жидких сред под воздействием ультразвуковых колебаний [Текст] / В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, Ю.М. Кузовников // Ресурсо- и энергосберегающие технологии в химической и нефтехимической промышленности: сб. тезисов докладов 3-й Международной конференции РХО им. Д.И. Менделеева. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2011. – С. 93–95.

8. **Кузовников, Ю.М.** Интенсификация массообменных процессов в некоторых дисперсных жидких средах под действием ультразвуковых колебаний

[Текст] / В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, Ю.М. Кузовников, Е.Д. Рожнов // Энергосберегающие процессы и аппараты в пищевых и химических производствах (ЭПАХПП-2011): материалы международной научно-технической интернет-конференции. – Воронеж: ВГТА, 2011. – С. 377–381.

9. **Кузовников, Ю.М.** Влияние ультразвука на процесс осветления облепихового виноматериала [Текст] / В.Н. Хмелев, Ю.М. Кузовников, Е.Д. Рожнов, В.П. Севодин // Виноделие и виноградарство. – 2011. – № 5. – С. 14–15.

10. **Кузовников, Ю.М.** Разрушение масляной эмульсии ультразвуковым воздействием [Текст] / В.Н. Хмелев, С.Н. Цыганок, Ю.М. Кузовников // Научно – технический вестник Поволжья. - 2011. – № 5. – С.194 -198.

11. Ультразвуковая колебательная система: заявка. № 2011133748 Российская Федерация: МПК<sup>7</sup> В06В1/06 / Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Левин С.В., Хмелев С.С., Кузовников Ю.М.; заявитель и патентообладатель: ООО «ЦУТ АлтГТУ». – 2011133748/28; заявл. 10.08.2011; опубл. 20.01.2012.

Подписано в печать 20.04.2012 г. Печать – ризография. Заказ № 2012-36

Объем 1,44 п.л. Тираж 100 экз.

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

659305, г. Бийск, ул. Трофимова, 27