

Оптимизация Режимов и Условий Ультразвукового Воздействия на Различные Технологические Среды Методом Математического Моделирования

[Владимир Н. Хмелёв](#), *Senior Member, IEEE*, [Роман Н. Голых](#), *Student Member, IEEE*,
[Андрей В. Шалунов](#)

ООО «Центр ультразвуковых технологий», Бийск, РФ
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, РФ

Аннотация – В статье предложен, основанный на использовании методов математического моделирования, новый подход к оптимизации режимов и условий ультразвукового воздействия для повышения эффективности технологических процессов. Для анализа процессов построена общая схема интенсификации процессов под воздействием ультразвуковых колебаний, учитывающая основные физические эффекты, определяющие протекание процессов в зависимости от агрегатного состояния и расположения активной обрабатываемой среды относительно пассивной среды, ограничивающей активную среду. Особенностью разработанной математической модели ультразвуковых технологических процессов является учёт ранее не исследованного влияния вязких эффектов в газовых и жидких активных средах, с учетом их влияния проведён расчёт оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия, которые обеспечат проектирование специализированного ультразвукового оборудования для промышленного применения с максимальной эффективностью.

Ключевые слова – ультразвук, моделирование, кавитация, вязкость, аэрозоль, коагуляция, распыление.

1. ВВЕДЕНИЕ

При всем многообразии существующих подходов, вопросы интенсификации процессов химической технологии наиболее эффективно решаются за счет использования новых видов энергии и высокоэффективного подведения энергии к взаимодействующим веществам. За последние десятилетия стало очевидным, что одним из перспективных направлений создания новых и интенсификации существующих процессов химических и смежных технологий является использование энергии ультразвуковых (УЗ) колебаний высокой интенсивности. Опыт их практического применения свидетельствует о положительном влиянии практически на все известные процессы химической технологии [1-3].

Однако, несмотря на достигнутые успехи, на сегодняшний день остается ряд технологических процессов, протекающих в жидких и газовых средах, интенсификация которых под действием ультразвуковых колебаний высокой интенсивности не получила широкого распространения. Эти

процессы составляют важную основу для повышения эффективности высокотехнологичных производств, а исследования ряда авторов [4-7] позволили установить множество положительных физических эффектов, возникающих при ультразвуковом воздействии на такие процессы, которых невозможно достичь другими способами. Наибольший практический интерес представляют физические явления коагуляции мелкодисперсных аэрозолей (с размерами частиц до 10 мкм), реализация которой увеличит эффективность систем газоочистки [4], улучшение физико-механических свойств вязких сред (снижение вязкости нефти до 10 раз, повышение прочностных характеристик эпоксидных композиций до 70% и т. д.) [5-6], получение аэрозольных капель с размерами 10..15 мкм и производительностью не менее 0,5 мл/с [7].

Наличие экспериментальных исследований, показывающих принципиальную возможность практической реализации процессов, обуславливает необходимость в выявлении оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия для различных по свойствам обрабатываемых сред.

Эмпирический подход к выявлению оптимальных режимов и условий воздействия в зависимости от свойств и характеристик обрабатываемых сред в широком диапазоне, основанный на результатах отдельных экспериментальных исследований, не даёт достоверных результатов, поскольку физические процессы, протекающие в ультразвуковых полях высокой интенсивности, отличаются сложностью и многообразием. Поэтому для выявления оптимальных режимов и условий ультразвукового воздействия необходимо изучить особенности возникновения и протекания физических явлений, составляющих исследуемый процесс.

Поскольку физические явления, возникающие и протекающие под действием УЗ колебаний высокой интенсивности быстротечны и происходят на микроуровне, их прямое экспериментальное изучение затруднено. Однако существуют научные подходы, основанные на использовании математических моделей, описывающих эти явления. Поэтому наиболее целесообразной является разработка новых теоретиче-

ских моделей для оптимизации параметров УЗ воздействия на исследуемые среды.

II. ОБЩИЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Несмотря на все многообразие процессов, интенсифицируемых или осуществляемых под действием УЗ колебаний, можно выделить общие подходы к реализации УЗ воздействия. Общая схема организации процесса ультразвукового воздействия на различные технологические среды представлена на рис. 1.

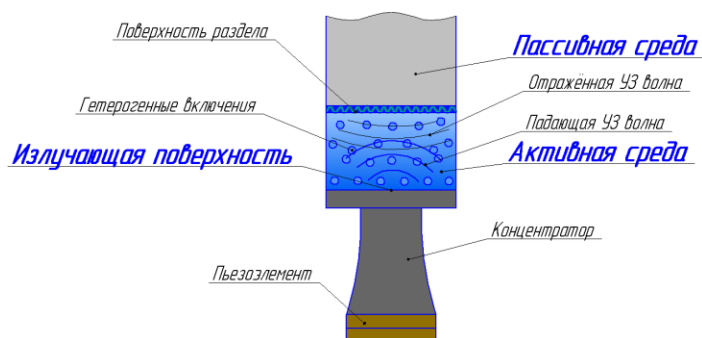


Рис. 1 – Схема организации процесса УЗ воздействия

Согласно представленной схеме, УЗ воздействие осуществляется следующим образом.

Излучатель осуществляет непосредственный ввод механических колебаний УЗ частоты в активную среду с целью изменения структуры и свойств материала активной среды за счёт различных физических эффектов, как правило, обусловленных наличием гетерогенных включений в обрабатываемой среде (кавитационных зародышей или дисперсных частиц твёрдой или жидкой фазы). Интенсивность УЗ воздействия определяется волновым сопротивлением обрабатываемой (активной) среды в сравнении с волновым сопротивлением твёрдого материала излучателя. Например, вводимые в жидкие среды, волновое сопротивление которых как правило в 3000..4000 раз больше воздуха, колебания характеризуются интенсивностью в пределах 2..10 Вт/см², которая достаточна для преодоления радиальных сжимающих сил капиллярного давления на гетерогенные парогазовые включения (кавитационные зародыши), т. е. для создания кавитации в жидкости. Кавитация сопровождается периодическими ударными волнами при схлопывании кавитационных пузырьков. Ударные волны приводят к разрушению водородных связей (процесс *деполимеризации*), *диспергированию твёрдых наночастиц в жидкости*, а также ускорению за счёт разрушения молекулярных связей химических реакций *синтеза различных полимеров и получения из природных полимеров ценных низкомолекулярных веществ* [1,5], интенсификации процессов *растворения и экстрагирования* [1]. Создаваемое звуковое давление в газовой среде, со держащей частицы мелкой дисперсной фазы, приводит к *коагуляции* этих частиц.

Активная среда, как правило, ограничена пассивной средой (твёрдое тело или газ, граничащий со свободной поверхностью жидкости). Наличие пассивной среды может

обуславливать ряд физических эффектов на границе «активная-пассивная среда», связанных с особенностями агрегатного состояния активной среды. В частности, под воздействием ударных волн при схлопывании кавитационных пузырьков в активной жидкой среде происходит возникновение капиллярных волн на поверхности жидкости, граничащей с пассивной газовой средой, которые увеличивают поверхность раздела фаз, тем самым ускоряя процесс *абсорбции газов жидкостями*. Образование капиллярных волн связано в значительной степени с влиянием сил поверхностного натяжения и обусловлено абсолютной податливостью границы раздела «жидкость-газ». В тонких слоях жидкости (до 2 мм) поверхностные физические эффекты проявляются наиболее интенсивно, поскольку ударная волна проходит малые расстояния, сохранив достаточно большую амплитуду давления (несколько десятков атмосфер) на границе раздела активная-пассивная среда. Из-за больших амплитуд давления ударной волны происходит значительное возрастание амплитуды капиллярных волн на поверхности тонкого слоя с превышением определённого порогового значения, которое приводит к распаду гребня волны на отдельные капли, вызывая тем самым *распыление жидкости* [1-3,7-10]. На границе раздела активной газовой и пассивной твёрдой среды, представляющей собой капиллярно-пористый материал, частичное проникновение акустической энергии в твёрдое тело приводит к ускорению диффузии влаги по направлению к поверхности материала, граничащей с активной газовой средой. Это происходит за счёт нелинейных физических эффектов при распространении высокоамплитудных колебаний в капиллярно-пористой среде (вихревые акустические потоки, звукокапиллярный эффект) и позволяет ускорять процесс *бесконтактной сушки* [1,8,10].

Таким образом, перечисленные физические эффекты, возникающие как в активной среде, так и на границе раздела активная-пассивная среда определяют течение технологических процессов под воздействием УЗ колебаний.

При этом на эффективность технологических процессов влияют не только режимы УЗ (частота и амплитуда УЗ колебаний) излучения в активную среду и соотношение волновых сопротивлений активной и пассивной среды, но и взаимное расположение активной и пассивной среды (например, толщина слоя жидкости при распылении), которое определяет условие распространения гидродинамических потоков (как акустических колебаний, так и, в частности, ударных волн, возникающих при схлопывании кавитационных пузырьков) в активной среде.

В зависимости от вида активной и пассивной сред основные процессы, реализуемые и интенсифицируемые при помощи УЗ колебаний, можно разделить на четыре основные подгруппы: процессы в средах «жидкость-твёрдое тело» (жидкая активная среда и твёрдая пассивная среда), «жидкость-газ», «газ-твёрдое тело», «твёрдое тело-твёрдое тело» (рис. 2).

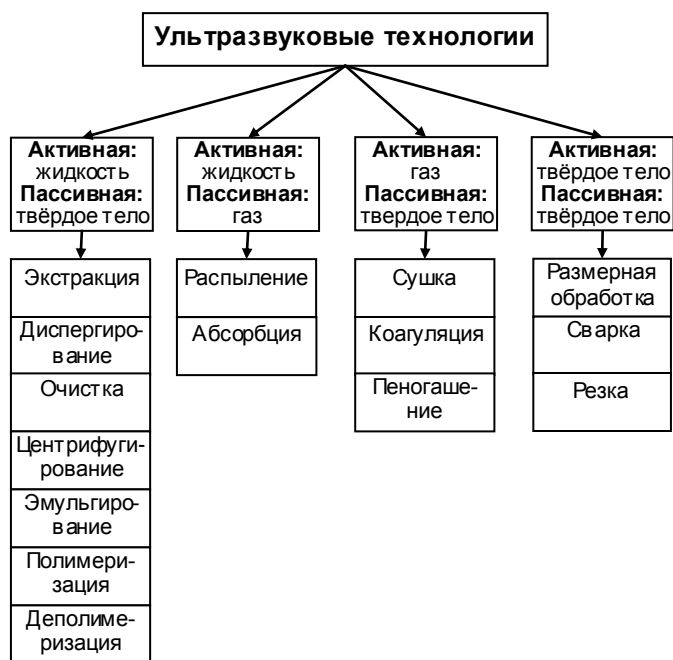


Рис. 2 – Классификация технологий, реализуемых при помощи УЗ колебаний, в зависимости от вида активной и пассивной среды

Физические эффекты, возникающие при ультразвуковом воздействии на активные твёрдые среды, ограниченных пассивными твёрдыми средами (размерная обработка хрупких материалов, сварка полимеров, резка) являются наиболее изученными рядом авторов (Холопов Ю.В., Волков С.С., Шестопал А.Н., Марков А.И., Розенберг Л.Д. и др.) [10-15]. Ввиду детальной изученности процессы в твёрдых материалах рассматриваться не будут.

Физические процессы в активных газовых и жидких средах являются изученными в гораздо меньшей степени. В настоящее время нет единого понимания физических механизмов протекания ультразвуковых технологических процессов и жидкостях и газах и научных основ, необходимых для выявления оптимальных режимов и условий воздействия, что обуславливает отсутствие широкого применения ультразвукового воздействия для реализации этих процессов в промышленных масштабах. Поэтому далее эти процессы рассматриваются подробно, и именно для этих процессов производится оптимизация *режимов воздействия* (частота, амплитуда излучающей поверхности или уровень звукового давления) и *условий воздействия* (относительные размеры активной и пассивной среды).

Активные жидкие или газовые среды, как правило, ограничены пассивной газовой или твёрдой средой в зависимости конкретного технологического процесса:

– «жидкость-твёрдое тело»: экстракция, диспергирование, очистка, центрифугирование, эмульгирование, полимеризация, деполимеризация;

– «жидкость-газ»: распыление, абсорбция;

– «газ-твёрдое тело»: сушка, коагуляция, пеногашение.

В зависимости от типа процесса, определяемого агрегатным состоянием активной и пассивной среды, существуют различные критерии оптимальности. Эти критерии делятся

на две основные группы:

– критерии, для которых требуется достижение их заданного значения, например, заданный диаметр капель при ультразвуковом распылении;

– критерии, для которых требуется достижение экстремального (максимального или минимального), например, максимальная производительность распыление, минимальное время коагуляции.

Критерии оптимальности в общем случае связаны с параметрами акустического воздействия, геометрическими размерами активной среды, свойствами и характеристиками активной и пассивной сред следующей функциональной зависимостью:

$$\mathbf{R} = \mathbf{F}(f, A, \mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{L}) \quad (1)$$

где \mathbf{R} – вектор критериев оптимальности, \mathbf{P}_1 – вектор свойств и характеристик активной среды, \mathbf{P}_2 – вектор свойств и характеристик пассивной среды, \mathbf{L} – вектор относительных геометрических размеров активной и пассивной среды, f – частота колебаний излучателя, A – амплитуда колебаний излучателя.

Задача оптимизации заключается в нахождении таких оптимизируемых параметров, к которым относятся частота и амплитуда звукового давления или рабочей поверхности инструменты, т. е. *режимы воздействия*, относительные геометрические размеры области активной и пассивной среды, т. е. *условий воздействия*, с целью получения требуемых значений критериев оптимальности (например, максимальный размер активной кавитационной области).

Основная сложность в решении задачи оптимизации режимов и условий воздействия заключается в выявлении функциональных зависимостей критериев оптимальности от оптимизируемых параметров. Эти зависимости определяются взаимным влиянием множества физических явлений, происходящих в обрабатываемых средах.

Поэтому оптимизация режимов и условий ультразвукового воздействия в зависимости от сочетания активной и пассивной сред предлагается проводить в следующей последовательности:

– выявление основных физических эффектов, определяющих протекание технологического процесса, как в активной среде, так и на границе раздела активной и пассивной сред;

– разработка математических моделей физических процессов и методик, позволяющих определить значения критериев оптимальности;

– численный расчёт оптимальных режимов (частота, амплитуда колебаний или звукового давления) и условий воздействия (относительных геометрических размеров активной и пассивной сред) с использованием разработанных моделей;

– выработка рекомендаций по разработке и проектированию специализированного ультразвукового оборудования.

Далее эти три вида процессов рассмотрены более подробно в зависимости от сочетания активной и пассивной сред.

III. ОПТИМИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АКТИВНЫЕ ЖИДКИЕ СРЕДЫ, ОГРАНИЧЕННЫЕ ПАССИВНОЙ ТВЁРДОЙ СРЕДОЙ

Ультразвуковое воздействие на активные жидкие среды обладает рядом особенностей.

Как было отмечено ранее, при высоких звуковых давлениях в активных жидких средах возникает и протекает специфический физический процесс – ультразвуковая кавитация.

Процесс образования кавитации состоит исследующих стадий в зависимости от создаваемого звукового давления или вводимой интенсивности воздействия [1]:

1. *Отсутствие кавитации при малых интенсивностях УЗ.*

2. *Зарождение кавитации.* При дальнейшем повышении интенсивности ультразвуковых колебаний появляется нарушение однородности жидкости. В фазу разряжения (пониженного давления) в наиболее слабых местах начинается выделение растворенных газов с образованием одного долгоживущего пузырька.

3. *Стадия развитой (стабильной) кавитации.* Дальнейшее повышение интенсивности колебаний приводит к нарушению линейности колебаний стенок пузырьков. Начинается стадия стабильной кавитации. Она характеризуется образованием быстрорастущих парогазовых пузырьков, которые в фазу сжатия мгновенно сокращаются в объеме и схлопываются. При схлопывании внутри пузырька создаются большие давления до 10000 атм, в пузырьке происходит разогрев парогазовой смеси до 8000...12000 К. Образующие ударные волны при схлопывании являются основным движущим фактором большинства технологических процессов.

4. *Стадия сверхразвитой кавитации.* В этом случае кавитационные пузырьки достигают критических размеров, при которых происходит их вырождение в резонансные. Такие пузырьки совершают колебания около своих максимальных размеров с частотой вынуждающих колебаний или при очень больших размерах (более 100–1000 мкм) на частотах субгармоник. Так как размеры пузырька изменяются незначительно, то и затраты энергии на совершение работы по изменению размеров пузырька оказываются так же невелики.

Протекание ультразвуковых технологических процессов в активных жидких средах происходит главным образом в режиме развитой кавитации.

Поэтому для создания специализированного оборудования, пригодного для промышленного использования для реализации технологических процессов в активных жидких средах, ограниченных пассивной твердой средой (стенками технологического объема), необходимо обеспечить максимальные размеры активной зоны, характеризующейся развитой кавитацией. Основным критерием оптимальности технологических процессов в жидкостях является размер развитой кавитационной зоны.

Это может быть достигнуто путём оптимизации интенсивности воздействия, достаточной для достижения развитой кавитации, и определения оптимального размера технологического объема, необходимого для достижения режима стоячих волн, который обеспечит равномерное распределение активной кавитационной зоны по всему объёму.

На первом этапе необходимо выявить интенсивность воздействия, достаточную для достижения режима развитой кавитации.

Степень развитости кавитации в зависимости от создаваемого звукового давления, напрямую связанного с интенсив-

ностью воздействия, возможно оценить на основании анализа уравнения Кирквуда-Бете, описывающего радиальные колебания одиночного кавитационного пузырька (2):

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

где C – локальная скорость звука в жидкости, м/с; H – энтальпия жидкости, $\text{м}^2/\text{с}^2$; R – радиус газового пузырька, м.

Энтальпия жидкости определяется следующим выражением для случая слабоизменяющейся плотности жидкости (3):

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

где ρ – плотность рассматриваемой жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$;

σ – поверхностное натяжение рассматриваемой жидкости, Н/м;

η – вязкость рассматриваемой жидкости, Па с;

R_0 – радиус зародыша, м;

γ – показатель адиабаты для воздуха;

p_∞ – давление жидкости на больших расстояниях от центра кавитационной полости, т.е. звуковое давление.

p_{z0} – давление газа в зародыше, Па.

Степень развитости кавитации определяется максимальным радиусом кавитационного пузырька в стадии его наибольшего расширения R_{MAX} , определяемого на основании результата численного решения дифференциального уравнения (2), поскольку давление создаваемой ударной волны при схлопывании кавитационного пузырька связано с максимальным радиусом прямой зависимостью [10]:

$$P_m = \frac{\rho c^2}{\sqrt{2}} \sqrt{\theta \frac{c P_1 R_{\text{min}}}{B(n-1)} \cdot \frac{1}{h \ln(h/R_{\text{min}})}} \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости, c – скорость звука в жидкости, P_1 – давление жидкости, в стадии сжатия создаваемых акустических колебаний в жидкой среде, R_{min} – минимальный радиус кавитационного пузырька при схлопывании, h – расстояние от центра схлопывания кавитационного пузырька, B и n – параметры уравнения состояния Тэга [16].

При этом минимальный радиус кавитационного пузырька при схлопывании возможно определить на основании максимального радиуса R_{MAX} согласно следующему выражению:

$$\left(\frac{R_{\text{MAX}}}{R_{\text{min}}} \right)^{3(\gamma-1)} = \frac{P_1(\gamma-1)}{P_H}$$

где γ – показатель адиабаты для воздуха, P_H – давление насыщенных паров воды.

Критерием развитости кавитации является достижение индекса кавитации K не менее 0,7 [10]:

$$K = \frac{R_{\text{MAX}}^3}{R_{\text{рез}}^3},$$

где $R_{\text{рез}}$ – резонансный радиус кавитационного пузырька.

Представленная модель позволила определить необходимую интенсивность воздействия для достижения режима развитой кавитации в зависимости от физических свойств обрабатываемой жидкости. Полученные результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры жидкостей и интенсивности воздействия, соответствующие режиму «развитой» кавитации

Вид жидкости	Параметры жидкости				Оптимальн. интенсивность, Вт/см
	Скорость звука, м/с	Плотность, кг/м ³	Вязкость, 10 ⁻³ Па·с	Поверх. натяжение, 10 ⁻³ Н/м	
Вода	1483	1000	0,82	72,88	2...3
Этиловый спирт (96%)	1165	798	1,2	22,8	3...5
Трансформаторное масло	1445	900	30	40	4...6
Оливковое масло	1381	950	85	32	5...8
Глицерин	1930	1264	~600	59,4	15...18
Моторное масло ПМС-400	1740	980	400	33	19...23
Эпоксидная смола ЭД-5	1700	1170	320	30	10...13
Нефть	1390	970	400	30	26...31

Анализ представленных результатов (таблица 1) позволяет установить, что наиболее существенное влияние на оптимальные интенсивности воздействия оказывает вязкость жидкости. Наличие вязкости приводит к значительному снижению степени развитости кавитации.

На следующем этапе необходимо оптимизировать продольный размер технологического объёма (положение границы активной и пассивной среды).

Если жидкая среда обладает малой вязкостью (до 5 сПз), то активная зона развитой кавитации практически полностью занимает технологический объём больших размеров (до 0,2 м³) ввиду малости требуемой интенсивности воздействия (2...3 Вт/см²) и небольших значений энергии, затрачиваемой на преодоление радиальных сжимающих сил капиллярного давления на гетерогенные парогазовые включения (кавитационные зародыши), поскольку силы вязких напряжений практически отсутствуют. Это позволяет успешно реализовать в промышленных масштабах технологические процессы в водных средах и органических растворителях со значениями вязкости не более 3 сПз.

Ввиду высокого поглощения ультразвука в кавитирующих вязких средах форма и положение границы раздела активной и пассивной среды (размеры и форма технологического объёма) существенно влияет на равномерность распределения кавитационного облака. При этом в больших технологических объёмах размеры кавитационной области являются очень малыми (не более 25 мм), и ультразвуковые колебания, распространяясь от излучающей поверхности до границы раздела активной и пассивной среды практически поглощаются полностью за счёт значительных потерь энергии на образование кавитации.

А как уже было отмечено, малые размеры кавитационной области и низкие интенсивности воздействия, обеспечиваемые существующим ультразвуковым оборудованием, не позволяют реализовывать технологические процессы в высоковязких средах в промышленных масштабах в отличие от маловязких жидкостей. Увеличение размера кавитационной

области можно достичь за счёт достижения режима стоячих волн (отражение достаточного количества акустической энергии от границы раздела активной и пассивной среды) при уменьшении размера технологического объёма.

Для этого производится анализ уравнения для закона сохранения энергии в интегральной форме, учитывающего затраты энергии на образование кавитации (5):

$$\iiint_{V_0} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{c^2 \rho_{ж}}{2\rho_0} + \frac{3}{2} \rho_0 b R^3 \dot{R}^2 - \frac{2\rho_0 b}{c} R^3 \dot{R} - b \rho_{ж} \frac{p_0}{\rho_0} (R^3 - R_0^3) + \frac{\rho_0 u^2}{2} \right) dV = \quad (5)$$

$$= - \iiint_{V_0} \left(\overline{p_m u} - b p_0 (R^3 - R_0^3) \dot{u} + \frac{3}{2} \rho_0 u b R^3 \dot{R}^2 - \frac{2\rho_0 u b}{c} R^3 \dot{R}^3 \right)$$

Полученные результаты оптимизации приведены в таблицах 1,2.

Таблица 2. Результаты комплексной оптимизации размера технологического объёма и интенсивности воздействия.

Жидкость	Размер кавитационной области в больших объёмах, см	Оптимальный размер технологического объёма	Оптимальн. интенсивность
Вода	15	34	9 Вт/см ²
Масло	8	23	17 Вт/см ²
Эпоксидная смола	3	8	37 Вт/см ²

Теоретические полученные значения необходимых интенсивностей воздействия для обработки высоковязких жидкостей позволяют объяснить невозможность использования существующего ультразвукового технологического оборудования и установить требования к техническим характеристикам создаваемого оборудования, способного обеспечить оптимальное протекание процесса кавитационной обработки вязких жидкостей:

- оборудование кавитационной обработки жидких сред должно обеспечивать интенсивность воздействия на рабочей частоте 22 кГц не менее 10 Вт/см²

- для сред с вязкостью свыше 300 сПз интенсивность должна быть увеличена до 25 Вт/см²;

- необходимо обрабатывать среды в специализированных резонансных технологических объёмах размерами не более 35 см для обеспечения максимальных размеров активной развитой кавитационной зоны.

III. ОПТИМИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АКТИВНЫЕ ЖИДКИЕ СРЕДЫ, ОГРАНИЧЕННЫЕ ПАССИВНОЙ ГАЗОВОЙ СРЕДОЙ

Как уже было указано, определяющим фактором реализации процессов в жидких средах, ограниченных пассивной газовой средой (распыление или абсорбция) является образование поверхностных капиллярных волн.

Профиль капиллярных волн определяет критерии оптимальности этих процессов. Для реализации процесса распыления критериями оптимальности являются средний диаметр формируемых капель и производительность распыления, абсорбции – кратность увеличения поверхности

раздела фаз, при этом амплитуда капиллярной волны не должна превышать пороговой амплитуды её распада.

Поэтому для оптимизации процессов в жидких средах, ограниченных пассивной газовой средой, необходима разработка модели, позволяющей определить профиль образующихся капиллярных волн в зависимости от давления ударной волны, возникающей при схлопывании кавитационных пузырьков. Чтобы определить степени развитости кавитации, необходимо использовать разработанную модель и полученные зависимости для оптимизации ультразвуковых технологических процессов в жидких средах, ограниченных твёрдыми пассивными средами (см. раздел III). Давление ударной волны в зависимости от параметров ультразвукового воздействия и относительных геометрических размеров активной и пассивной среды определяется на основании выражения (4).

Основными параметрами профиля капиллярной волны являются длина и амплитуда волны.

В настоящее время широко известно выражение для длины капиллярной волны для случая невязких жидкостей [10]:

$$\lambda = \sqrt[3]{\frac{2\pi\sigma}{\rho f^2}}, \quad (6)$$

где σ – поверхностное натяжение жидкости, ρ – плотность жидкости, f – частота акустических колебаний.

Поскольку существует необходимость реализовывать процессы ультразвукового воздействия на активные вязкие жидкие среды, для определения длины капиллярных волн разработана модель, основанная на описании динамики жидкости при колебательных движениях капиллярных волн уравнениями Навье-Стокса (7,8) для возмущений 1-го порядка скорости и давления жидкости с граничными условиями (9-11):

$$\operatorname{div} \mathbf{u}^{(1)} = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}^{(1)}}{\partial t} = -\nabla p^{(1)} + \mu \Delta \mathbf{u}^{(1)} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \xi^{(1)}}{\partial t} = u^{(1)} \quad (9)$$

$$-p^{(1)} + 4\mu \frac{\partial u^{(1)}}{\partial y} = \sigma \frac{\partial^2 \xi^{(1)}}{\partial x^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial v^{(1)}}{\partial y} + \frac{\partial u^{(1)}}{\partial x} = 0 \quad (11)$$

Решение уравнения для скорости жидкости ищется в следующем виде:

$$\mathbf{u}^{(1)} = \nabla [B e^{ky} e^{\pm ikx - i\omega t}] + C \left(\pm i \sqrt{1 - \frac{\rho\omega}{\mu k^2}} \right) e^{\sqrt{1 - \frac{\rho\omega}{\mu k^2}} y} e^{\pm ikx - i\omega t} \quad (12)$$

где B и C – постоянные величины, определяемые из граничных условий.

С использованием ряда преобразований получено следующее соотношение для длины капиллярной волны λ :

$$(\omega - i\beta)^2 \rho \left(1 - \frac{\lambda^2 \rho (i\omega + \beta)}{8\pi^2 \mu} \right) \frac{\lambda}{2\pi} - \quad (13)$$

$$-4(i\omega + \beta) \frac{2\pi}{\lambda} \mu \left(-1 + \frac{\lambda^2 \rho (i\omega + \beta)}{8\pi^2 \mu} + \sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \rho (i\omega + \beta)}{4\pi^2 \mu}} \right) =$$

$$= -i\sigma \frac{\rho(\omega - i\beta)}{2\mu}$$

где μ – вязкость, ρ – плотность жидкости, σ – поверхност-

ное натяжение, β – декремент затухания.

Амплитуда образуемых поверхностных волн связана с давлением ударной волны, следующим выражением, полученным с использованием закона сохранения энергии (энергия ударной волны переходит в энергию капиллярной волны) выражением:

$$A = \frac{4\pi P_m \theta}{\rho f \lambda} \sqrt{\frac{c\theta}{\lambda \left(\frac{\pi^2}{4} - \frac{1}{8} \right)}} \quad (14)$$

Представленная модель позволит определить основные критерии оптимальности процессов *абсорбции* (кратность увеличения поверхности раздела фаз) и *распыления* (в зависимости от свойств обрабатываемых сред).

Кратность увеличения поверхности раздела фаз α при *абсорбции* возможно оценить на основании следующего полученного выражения в зависимости от длины и амплитуды капиллярной волны:

$$\alpha = \frac{\int_0^{\frac{\lambda}{2}} 8x dx \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi A}{\lambda} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{2\pi x}{\lambda} \right)}}{\lambda^2} \approx \frac{4A}{\pi \lambda} \left[\int_0^{\pi} s \sin(s) ds \right] = \frac{4A}{\lambda}$$

Если амплитуда волны A не превышает 0,73 от длины волны λ , чтобы не происходил её распад, то согласно полученному выражению установлено, что ультразвуковое воздействие позволит увеличить поверхность раздела фаз и, следовательно, ускорить процесс абсорбции до 3-х раз.

Для оптимизации процесса *распыления* необходимо определять диаметр формируемых капель и производительность распыления. Поскольку для отрыва капли требуются большие амплитуды капиллярных волн (более чем 0,73 от длины волны), необходимо для получения информации о реальном профиле капиллярной волны рассматривать возмущения второго порядка, характеризующие его отклонение от синусоидальной формы.

Величины возмущений второго порядка определяются на основании анализа уравнений Навье-Стокса (15,16) с граничными условиями (17-19):

$$\operatorname{div} \mathbf{u}^{(2)} = 0 \quad (15)$$

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}^{(2)}}{\partial t} + (\mathbf{u}^{(1)}, \nabla) \mathbf{u}^{(1)} \right) = -\nabla p^{(2)} + \mu \Delta \mathbf{u}^{(2)}; \quad (16)$$

$$\rho^{(1)} \frac{\partial \xi^{(1)}}{\partial x} + 2\mu \left(\frac{\partial v^{(2)}}{\partial y} + \frac{\partial u^{(2)}}{\partial x} - 2 \frac{\partial v^{(1)}}{\partial x} \frac{\partial \xi^{(1)}}{\partial x} \right) = -\sigma \frac{\partial^2 \xi^{(1)}}{\partial x^2} \frac{\partial \xi^{(1)}}{\partial x} \quad (17)$$

$$-p^{(2)} + 2\mu \left(2 \frac{\partial u^{(2)}}{\partial y} - \left(\frac{\partial v^{(1)}}{\partial y} + \frac{\partial u^{(1)}}{\partial x} \right) \frac{\partial \xi^{(1)}}{\partial x} \right) = \sigma \frac{\partial^2 \xi^{(2)}}{\partial x^2} \quad (18)$$

$$\frac{\partial \xi^{(2)}}{\partial t} + \frac{\partial \xi^{(1)}}{\partial x} v^{(1)} = u^{(2)} \quad (19)$$

Для профиля капиллярной волны получено следующее выражение:

$$\xi(x, t) \approx A \sin(\omega t) \left(\cos(kx) - \left(\frac{Ak}{3} \cos(2kx) + 2Ak \right) \cos(\omega t) \right) \quad (20)$$

Средний диаметр капель определяется средней толщиной гребня капиллярной волны на основе теории распада с труп Релея:

$$D = 3,78 \frac{\int_0^{\frac{\lambda}{2}} \left(\xi(x) - \xi\left(\frac{\lambda}{2}\right) \right) dx}{\xi(0) - \xi\left(\frac{\lambda}{2}\right)} \quad (21)$$

Таким образом, диаметр капель определяется величиной возмущений второго порядка, характеризующих изменение средней толщины гребня волны.

Для производительности распыления получено следующее выражение:

$$\Pi = aVfN_s = aVfN_s = a \frac{\lambda^2 A}{2\pi} \left(\frac{\pi^2}{2} - 2 \right) f N_s; \quad (22)$$

где N_s – количество капиллярных волн на единицы площади поверхности, которое принимается равным количеству кавитационных пузырьков, f – частота колебаний рабочего инструмента, a – поправочный коэффициент, означающий долю объема капиллярной волны, распадающейся на капли.

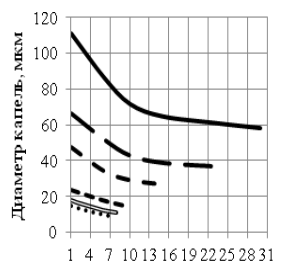
Таким образом, разработанные модели позволяют определить значения критериев оптимальности процесса ультразвукового распыления в зависимости от свойств распыляемой жидкости и параметров воздействия (частота, амплитуда).

Процесс распыления представляет наибольший практический интерес, поэтому далее рассмотрен более подробно.

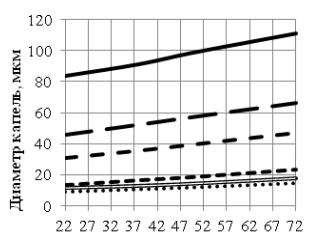
Полученные результаты расчёта при помощи разработанных моделей, представлены на рис. 3,4.

Все зависимости получены при оптимальных геометрических размерах активной среды (толщина слоя распыляемой жидкости).

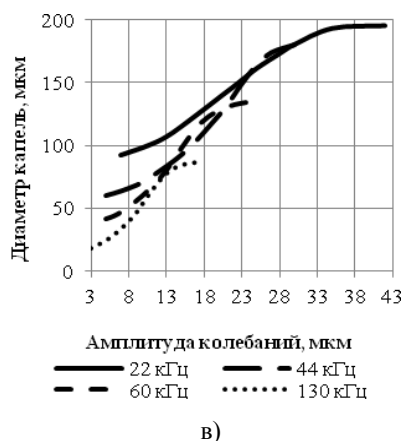
Производительность распыления определялась при значении поправочного коэффициента $a=1$ в выражении (22).



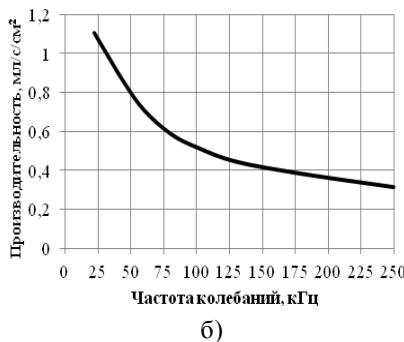
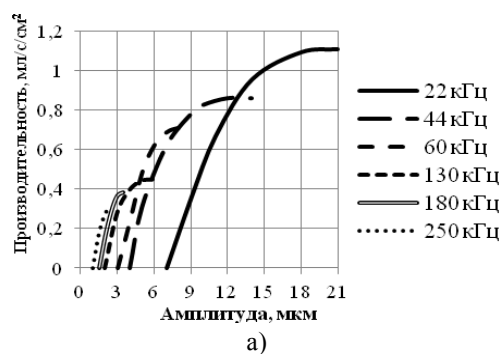
а) Диаметр капель, мкм
 Вязкость, мПа·с
 — 22 кГц — 44 кГц
 - - 60 кГц - - - 130 кГц
 — 180 кГц ····· 250 кГц



б) Диаметр капель, мкм
 Поверхностное натяжение, мН/м
 — 22 кГц — 44 кГц
 - - 60 кГц - - - 130 кГц
 — 180 кГц ····· 250 кГц



в) Рис. 3. Зависимости диаметра формируемых капель жидкости от вязкости (а), поверхностного натяжения (б) жидкости и амплитуды колебаний (в)



а) б) Рис. 4. Зависимости производительности распыления от амплитуды (а) и частоты (б) УЗ колебаний

Анализ представленных зависимостей позволяет установить наличие ограничений на максимальное значение вязкости распыляемой жидкости (30 мПа·с на частоте 22 кГц, 23 мПа·с на частоте 44 кГц, 15 мПа·с на частоте 60 кГц и 10 мПа·с на частоте 130 кГц), и удельной производительности распыления (0,62 мл/(с·см²) на частоте 22 кГц, 0,46 мл/(с·см²) на частоте 44 кГц, 0,38 на частоте 60 кГц и 0,23 мл/(с·см²) на частоте 130 кГц). Т.е. результаты моделирования позволили выявить границы физических свойств активной среды, при которых имеется принципиальная возможность реализации процесса, а также предельные значения выходных параметров процесса.

Представленные зависимости выходных параметров процесса распыления позволили сделать вывод, что даже на

частотах порядка 250 кГц значение удельной производительности распыления достигает достаточных для практического использования значений (~ 0,3 мл/(с·см²), т.е. увеличение частоты в 10 раз с 22 кГц до 250 кГц приводит к уменьшению удельной производительности распыления менее чем в 5 раз с 1,1 до 0,3 мл/(с·см²). Поэтому для мелкодисперсного распыления с высокой производительностью необходимо разрабатывать новые высокочастотные УЗ колебательные системы для распыления жидкостей. Для обеспечения возможности регулирования диаметра капель достаточно выбрать единую рабочую частоту УЗ преобразователя, а изменять только его амплитуду (например, на 22 кГц возможно варьировать диаметр капель в пределах 90-180 мкм, на 44 кГц – 60-120 мкм, на 130 кГц – 20-50 мкм). Это избавит от необходимости проектирования многочастотных рабочих инструментов, поскольку распыление возможно только при работе преобразователя на его собственной резонансной частоте.

Полученные зависимости могут быть использованы для выбора рабочей частоты и амплитуды УЗ распылителей при их проектировании. Для распыления более вязких жидкостей необходимо выбирать пониженную частоту или повышенную амплитуду колебаний для получения заданного среднего диаметра капель. Для обеспечения возможности регулирования диаметра капель достаточно выбрать единую рабочую частоту УЗ преобразователя, а изменять только его амплитуду (например, на 22 кГц возможно варьировать диаметр капель в пределах 90-180 мкм, на 44 кГц – 60-120 мкм, на 130 кГц – 20-50 мкм). Это избавит от необходимости проектирования многочастотных рабочих инструментов, поскольку распыление возможно только при работе преобразователя на его собственной резонансной частоте. Для получения аэрозолей с высоким разбросом капель по размерам (СКО) необходимо выбирать более высокую частоту колебаний на высоких амплитудах, поскольку экспериментально установлено, что дисперсия функции распределения капель по размерам с ростом частоты возрастает, а теория показывает возможность получения одного и того же среднего диаметра капель на разных частотах при достаточно высоких амплитудах.

IV. ОПТИМИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА АКТИВНЫЕ ГАЗОВЫЕ СРЕДЫ, ОГРАНИЧЕННЫЕ ПАССИВНОЙ ТВЁРДОЙ СРЕДОЙ

Как было отмечено ранее, при излучении УЗ колебаний в активную газообразную среду с дисперсными частицами, заполняющую некоторую камеру (т.е. твёрдые стенки представляют собой пассивную среду), создаваемая стоячая звуковая волна обуславливает большое количество разнообразных эффектов приводящих к коагуляции дисперсных частиц.

При этом необходимо обеспечить такие режимы воздействия при которых скорость коагуляции максимальны.

Основным критерием оптимальности процесса является доля частиц крупных размеров, образовавшихся в результате агломерации мелких. Поскольку доля крупноразмерных частиц напрямую связана с их концентрацией (при увеличении доли падает суммарная концентрация частиц), необходимо разработать модели, позволяющие определить суммарную

концентрацию аэрозольных частиц в зависимости от параметров воздействия (уровень звукового давления и частота акустических колебаний).

Частота колебаний возмущений давления газа определяется частотой колебаний рабочей поверхности излучателя. Амплитуду звукового давления можно определить согласно полученному выражению:

$$P = \left| \frac{2\pi\rho c f A (e^{ikx} - e^{2ikL - ikx})}{1 + e^{2ikL}} \right| \quad (23)$$

где f и A – частота и амплитуда колебаний излучающей поверхности соответственно; ρc – волновое сопротивление газовой среды; L – продольные размеры рабочей зоны коагуляционной камеры (относительные размеры активной и пассивной среды); $k = \frac{2\pi f}{c}$ – волновое число.

Поскольку наибольший практический интерес представляет коагуляция мелко дисперсных аэрозольных частиц размерами до 10 мкм, представляющих наибольшую опасность для жизнедеятельности человека, для оптимизации режимов воздействия необходимо изучить особенности происходящих при коагуляции физических явлений применительно к дисперсным частицам малых размеров.

Разработанная модель основывается на системе известных уравнений Смолуховского [17], описывающей кинетику процесса коагуляции и развиваемой исследователями процесса коагуляции. Система уравнений Смолуховского позволяет осуществить прямые вычисления суммарной концентрации частиц, которую необходимо оптимизировать. Рассматривая особенности физических явлений при коагуляции мелкодисперсных аэрозолей, отличиям предложенной модели от ранее известных (предложенных ранее Changdong Sheng, Xianglin Shen) является учет вязкости газовой дисперсионной среды при определении компоненты вероятности парного столкновения дисперсных частиц. Учет вязкости газа обусловлен необходимостью коагуляции мелкодисперсных аэрозолей (менее 10 мкм), поскольку при столь малых размерах частиц в силу малости числа Рейнольдса вязкость газа оказывается очень существенной. Более того, при коагуляции аэрозолей с размерами частиц до 1–2 мкм число Рейнольдса остаётся малым даже при очень высоких уровнях звукового давления (до 165 дБ), что делает невозможным анализ процесса коагуляции без учета вязкости.

Сущность применяемого подхода к построению модели коагуляции заключается в следующем. Предполагается, что масса каждой частицы пропорциональна m_0 , то есть каждая отдельно взятая частица имеет массу km_0 , где k – целое число, больше либо равное 1. Далее вводятся функции $n_k(t)$, каждая из которых – суть концентрация частиц, имеющих массу km_0 , или k -мер. Кинетика коагуляции в предположении, что коагуляция происходит главным образом за счёт парных столкновений, описывается системой уравнений Смолуховского:

$$\frac{\partial n_k}{\partial t}(t) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \beta_{i,k-i} n_i(t) n_{k-i}(t) - n_k \sum_{i=1}^{\infty} \beta_{i,k} n_i(t), \quad (24)$$

где k – натуральное число, изменяющееся в пределах от 1 до бесконечности (искомая система состоит из уравнений (24) при различных значениях k); $\beta_{i,k}$ – ядро коагуляции, не

зависящее от времени, характеризующее интенсивность соударений i -мер и k -мер, m^3/c ; $n_k(t)$ – концентрация k -мер в момент времени t , m^3 . Первое слагаемое правой части характеризует интенсивность увеличения концентрации k -мер за счёт столкновения i -мер и k -мер, а второе слагаемое – убыль концентрации k -мер за счёт столкновения k -мер с любыми другими частицами.

Ядро коагуляции представимо в виде суммы двух компонент:

$$\beta_{i,k} = \beta_{O_{i,k}} + \beta_{H_{i,k}},$$

где $\beta_{O_{i,k}}$ – компонента ядра коагуляции, характеризующая сближение частиц за счёт механизма ортокинетического взаимодействия, m^3/c ; $\beta_{H_{i,k}}$ – компонента ядра коагуляции, характеризующая сближение частиц за счёт механизма гидродинамического взаимодействия, m^3/c . Эти компоненты, определяющие вероятность столкновения i -меры и j -меры (здесь и далее по тексту понятие j -меры эквивалентно понятию k -мер), находятся следующим образом [17]:

$$\beta_{O_{i,j}} = 2(a_i + a_j)^2 U_0 H_{i,j}, \quad (25)$$

$$\beta_{H_{i,j}} = \frac{(a_i + a_j)^2}{3\mu} \left(\frac{1}{a_i} + \frac{1}{a_j} \right) \int_0^\pi h(f_{21}) f_{21} \sin \theta d\theta, \quad (26)$$

$$h(f_{21}) = \begin{cases} h(f_{21}) = 1, & \text{если } f_{21} \geq 0 \\ h(f_{21}) = 0, & \text{если } f_{21} < 0 \end{cases} \quad (27)$$

где a_i, a_j – радиус i -меры и j -меры соответственно, мкм; μ – вязкость несущей (газовой) фазы, Па·с; $H_{i,j} = |H_i - H_j|$ – модуль разности коэффициентов увлечения i - и j -меры, характеризующий амплитуду колебательной скорости относительного смещения i - и j -меры. Вероятность столкновения пропорциональна этому модулю разности. Т.е. согласно ортокинетическому механизму с ростом амплитуды скорости колебательного смещения частиц увеличивается их вероятность столкновения. U_0 – амплитуда колебательной скорости газовой среды в отсутствие аэрозольных частиц, м/с; θ – угол между волновым вектором акустической волны и линией центров частиц, градус; f_{21} – сила взаимодействия частиц, Н.

Сила взаимодействия между частицами определяется согласно следующему выражению:

$$f_{21} = (\vec{F}_A - \vec{F}_B) \cdot \vec{l}, \quad (28)$$

где \vec{l} – единичный вектор линии центров частиц; F_A, F_B – силы, действующие на частицы А и В в вязкой среде, определяемые по следующим выражениям:

$$F_{A_i} = \iint_{S_A} \left(-pn_i + \sum_{j=1}^3 \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) n_j \right) dS,$$

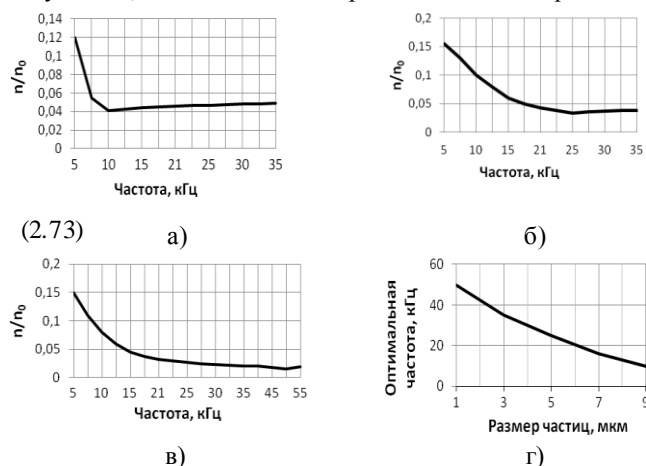
$$F_{B_i} = \iint_{S_B} \left(-pn_i + \sum_{j=1}^3 \eta \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) n_j \right) dS,$$

где x_i и x_j – i -я и j -я координаты поверхности сферы соответственно, по которой берётся интеграл соответственно; S_A, S_B – поверхности сфер А и В соответственно; η – динамическая вязкость газовой среды, Па·с; u_i и u_j – i -я и j -я компоненты скорости газовой среды соответственно, м/с; n_i и n_j – i -я и j -я компоненты вектора нормали к поверхностям взаимодействующих частиц; p – давление газа на частицу, Па.

После скоростей и давлений газовой среды, окружающей взаимодействующие частицы определяются на основании анализа системы уравнений Навье-Стокса для режима вязкого обтекания, поскольку размеры аэрозольных частиц составляют менее 10 мкм.

На основании анализа системы уравнений Смолуховского рассчитываются оптимальные частоты и уровни звукового давления в зависимости от дисперсных характеристик рассматриваемого аэрозоля.

На первом этапе был проведен анализ зависимости эффективности (отношение n/n_0 , где n – концентрация аэрозоля в конце численного эксперимента, m^{-3} ; n_0 – концентрация аэрозоля в начале эксперимента, m^{-3}) процесса коагуляции от частоты акустического воздействия (рисунок 3.10). Расчёты проводились при постоянном уровне звукового давления 130 дБ, модельное время воздействия ультразвуковыми колебаниями составляло 2 мин. При расчетах принималось допущение, что изначально аэрозоль монодисперсный.



а) – размер частиц 9 мкм; б) – размер частиц 5 мкм; в) – размер частиц 1 мкм; г) – зависимость оптимальной частоты от размера аэрозольных частиц

Рис. 5 – Зависимость эффективности коагуляции от частоты воздействия для аэрозолей с различными размерами частиц

Полученные результаты расчетов (см. рис. 5) показывают, что критерий оптимальности (минимум функции n/n_0) достигается для аэрозолей с начальным размером частиц 10 мкм на частоте 10 кГц, аэрозолей с начальным размером частиц 5 мкм на частоте 25 кГц, аэрозолей с начальным размером частиц 1 мкм на частоте 50 кГц.

В целом, обобщение представленных зависимостей на рисунке 5 позволяет сделать вывод о возрастании оптимальной частоты с увеличением дисперсности аэрозоля. Оптимальная частота для аэрозоля с начальными размерами частиц порядка 10 мкм лежит ниже границы **(2,79)** **(2,80)** диапазона (рис. 5,а), в то время как аэрозоли с размерами частиц 5 мкм и менее наиболее эффективно коагулируются в УЗ диапазоне частот (рис. 5,б,в).

Таким образом, оптимальные частоты акустического воздействия для осуществления процесса коагуляции лежат в области ультразвуковых частот, так как в этом случае обеспечивается высокая эффективность коагуляции мелкодисперсных аэрозолей (менее 5 мкм) при

незначительном снижении эффективности грубодисперсных аэрозолей (10 мкм и более).

На втором этапе проводился анализ зависимости времени коагуляции от уровня звукового давления. Характер влияния уровня звукового давления на эффективность процесса ультразвуковой коагуляции показан зависимостями, приведенными на рис. 6. Условия моделирования: частота колебаний 20 кГц; время воздействия – 5 мин с момента начала процесса; размер частиц 3 мкм.

Анализ приведенных зависимостей (см. рис. 6) подтверждает рост скорости коагуляции при увеличении уровня звукового давления. Так, повышение уровня звукового давления с 130 до 140 дБ позволяет сократить время коагуляции более чем в 3 раза.



Рис. 6 – Зависимости эффективности коагуляции от уровня звукового давления

Значения приращения $\frac{\Delta n}{n_0} / \Delta L_{SP}$ (см. рис. 6) для аэрозоля с начальным размером частиц 3 мкм и концентрацией $9 \times 10^8 \text{ м}^{-3}$ становится малым, начиная с 140 дБ; для аэрозоля с начальным размером частиц 3 мкм и концентрацией $3 \times 10^8 \text{ м}^{-3}$ становится малым, начиная с 145 дБ.

Это подтверждает тот факт, что коагуляция аэрозолей под действием акустических колебаний происходит более интенсивно при высоких концентрациях аэрозоля.

В результате проведенных теоретических исследований были выявлены оптимальные режимы ультразвуковой коагуляции. Согласно полученным результатам оптимальными параметрами разрабатываемого оборудования будут являться:

- создаваемый уровень звукового давления в газодисперсной среде не менее 130 дБ;
- диапазон оптимальных частот ультразвукового воздействия от 20 до 30 кГц в зависимости от размера частиц коагулируемого аэрозоля в конкретном технологическом процессе.

V. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен общий подход к оптимизации режимов и условий ультразвукового воздействия на различные технологические среды. Предложенный подход заключается в разработке математических моделей физических эффектов, определяющих течение технологического процесса в зависимости от агрегатного состояния активной и пассивной сред. Разработанные модели учитывают в достаточной степени влияние свойств обрабатываемых сред и относительных размеров активной и пассивной среды на распространение гидродинамических потоков. Разработанные модели позволили выявить оптимальные режимы и условия воздей-

ствия для широкого спектра ультразвуковых технологических процессов в газовых и жидких активных средах с различными свойствами.

Полученные результаты позволили сформулировать ряд рекомендаций к проектированию специализированного ультразвукового оборудования:

- для обработки жидкостей с вязкостью выше 400 сПз необходимо обеспечивать интенсивности воздействия не менее 25 Вт/см^2 ;

- с целью обеспечения максимального размера кавитационной области расстояние от излучающей поверхности до стенки технологического объема должно составлять не более 35 см (для воды), которое для высоковязких жидкостей (например, эпоксидная смола) должно быть уменьшено до 10 см;

- для распыления более вязких жидкостей необходимо выбирать пониженную частоту или повышенную амплитуду колебаний, чтобы получить заданный средний диаметр капель;

- для возможности мелкодисперсного распыления необходимо разрабатывать новые высокочастотные колебательные системы (до 250 кГц), поскольку не происходит значительного снижения производительности по сравнению с низкими частотами (до 130 кГц), а диаметр формируемых капель существенно уменьшается (меньше 10 мкм);

- для реализации процесса коагуляции необходимо обеспечивать уровень звукового давления не ниже 130 дБ в частотном диапазоне 20..30 кГц.

Результаты расчётов хорошо согласуются с экспериментами, проведёнными в лаборатории акустических процессов и аппаратов БТИ АлтГТУ (различие не более 25%), и позволяют разработать специализированное ультразвуковое оборудование для реализации процессов в вязких жидких и газовых средах в промышленных масштабах.

VI. БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ № МК-369.2011.8 «Разработка и исследование мелкодисперсных распылителей вязких жидкостей на основе новых физических принципов многократного поверхностного и высокочастотного ультразвукового воздействия».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Хмелев, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве [Текст] / В.Н. Хмелев, Г.В. Леонов, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. – Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2007. – 414 с.
- [2] Хмелев, В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве [Текст] / В.Н. Хмелев, О.В. Попова. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – 160 с.
- [3] Хмелёв, В.Н. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В.Н. Хмелёв, А.Н. Сливин, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов. – Бийск: Изд-во АлтГТУ, 2010. – 203 с.
- [4] Хмелёв, В.Н. Комплексное исследование акустической коагуляции мелкодисперсного аэрозоля / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, К.В. Шалунова, Р.Н. Гольх // Ползуновский вестник №3. – Барнаул: АлтГТУ, 2010. – С. 303-309.
- [5] Немчин, А.Ф. Влияние кавитационного воздействия на углеводородное

- топливо / А.Ф. Немчин, В.А. Михайлик, Г.Т. Тодорашко, Е.В. Щепкин // Промышленная теплотехника, т.4, № 6, 2002. – С. 60-63.
- [6] Шебанов, С.М. Деформативность нанокompозита эпоксидная смола - многослойные углеродные нанотрубки при многократном сжатии / С. М. Шебанов, Н. В. Гаевой // Композитный мир, июль-август, 2010. – С. 104-109.
- [7] Хмелёв, В.Н. Разработка и исследование новых принципов построения мелкодисперсных ультразвуковых распылителей вязких жидкостей / В.Н. Хмелёв, А.В. Шалунов, Д.В. Генне, А.В. Шалунова, Р.Н. Голых // Известия Томского политехнического университета, т. 319, № 4. – Томск: Изд-во ТПУ. – С. 158-163.
- [8] Новицкий, Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах [Текст] / Б.Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 192 с.
- [9] Розенберг Л.Д. Мощные ультразвуковые поля. – М: Наука, 1968. – 265 с.
- [10] Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука. – Т. 3. Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] – М.: Наука, 1970. – 688 с.
- [11] Холопов, Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов [Текст] / Ю.В. Холопов. – Л.: Машиностроение, 1988.
- [12] Волков, С.С. Сварка пластмасс ультразвуком [Текст] / С.С. Волков, Б.Я. Черняк – 9-е изд. – М.: Химия, 1986. – 256 с.
- [13] Шестопал, А.Н. Справочник по сварке и склеиванию пластмасс [Текст] / А.Н. Шестопал, Ю.С. Васильев, Э.А. Минеев. – Киев: Техніка, 1986. – 194 с.
- [14] Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов [Текст] / А.И.Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с., ил.
- [15] Розенберг, Л.Д. О физике ультразвуковой обработки твердых материалов [Текст] / Л.Д. Розенберг, В.Ф. Казанцев // ДАН СССР. – 1959. – т. 124, вып 1. – С. 79–82.
- [16] Кедринский, В.К. Гидродинамика взрыва. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. – 435 с.
- [17] Sheng, C.D. Modelling Acoustic Agglomeration Processes Using Direct Simulation Monte Carlo Method [Text] / C.D. Sheng, X.L. Shen // Journal of Aerosol Science. – 2006. – Issue 37. – pp. 16–36.



Андрей В. Шалунов закончил Бийский технологический институт в 2003 г., в 2006 году защитил кандидатскую диссертацию. Является ведущим специалистом по построению интерфейсных для ультразвуковых технологических аппаратов, доцент и преподаватель Бийского технологического института, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники. Область научных интересов - разработки ультразвукового технологического оборудования, применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности для интенсификации технологических процессов и изменения свойств веществ и материалов.



Владимир Н. Хмелев (SM'04)

– заместитель директора по научной работе Бийского технологического института, профессор, доктор технических наук, заслуженный изобретатель РФ, лауреат премии Правительства в области науки и техника, IEEE member с 2000, IEEE Senior Member с 2004. Область научных интересов - применение ультразвука для интенсификации различных технологических процессов. Биография опубликована в 7-ой и 10-й редакции сборника «Marquis How's How in Science and Engineering».



Роман Н. Голых (S'10)

– студент Бийского технологического института, член IEEE с 2010 г. Область научных интересов: ультразвуковые технологии аппараты, математическое моделирование технологических процессов под воздействием ультразвуковых колебаний в различных средах.