

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КАВИТАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ВЯЗКИХ И ДИСПЕРСНЫХ ЖИДКИХ СРЕД

В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, Р.Н. Голых, А.В. Шалунов

В статье представлены результаты исследований, направленных на поиск путей повышения эффективности ультразвукового кавитационного воздействия на химико-технологические процессы в дисперсных системах с несущей высоковязкой жидкой фазой. Проведенный теоретический анализ формирования кавитационной области в дисперсных системах с жидкой фазой позволил установить интенсивности ультразвукового воздействия, необходимые для образования кавитационных пузырьков, способных запасти максимальное количество энергии, а также размеры зоны кавитационного воздействия, формируемой в различных по вязкости средах. Разработанные ультразвуковые излучатели с увеличенной мощностью и площадью излучения позволили повысить эффективность ряда химико-технологических процессов в жидких средах, основанных на ультразвуковом кавитационном воздействии.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, вязкость, дисперсная среда, многополуволновой рабочий инструмент.

ВВЕДЕНИЕ

Ультразвуковое воздействие обеспечивает значительное ускорение различных технологических процессов, реализуемых в дисперсных системах с жидкой фазой (диспергирование, эмульгирование, экстрагирование, растворение, очистка и др.). Известно, что высокая эффективность ультразвукового воздействия обеспечивается за счет формирования в жидкой фазе технологических сред кавитационных парогазовых пузырей, накапливающих энергию при их расширении и взрывающихся при сжатии с созданием ударных волн и кумулятивных струй [1-2].

Долгие годы ультразвуковые технологии применяются для ускорения процессов в технологических средах, таких как водные и спиртовые растворы, масла и другие маловязкие жидкости. Для ускорения процессов в таких технологических средах созданы и успешно применяются на практике современные ультразвуковые аппараты [3-4].

Вместе с тем, существует необходимость ускорения процессов в технологических средах, представляющих собой дисперсные системы с высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой.

К числу таких процессов относятся:

- получение однородных систем путем равномерного перемешивания нескольких вязких жидкостей (лаков, смол, компаундов);
- получение новых материалов или улучшения свойств известных путем равно-

мерного распределения твердых дисперсных материалов (например, наночастиц, нановолокон) в высоковязких средах (смолах, пластмассах, расплавах металлов);

- снижение вязкости сред и разрушение агломератов и кристаллов в высоковязких средах для транспортировки и переработки (высоковязкая нефть, мед и т.п.).

Отличительная особенность реализуемых процессов - аномально высокое значение вязкости обрабатываемой среды.

Анализ возможностей современного ультразвукового оборудования позволил установить, что с его помощью не всегда возможно обеспечить возникновение кавитации в таких средах. А если и удастся обеспечить возникновение кавитации, объемы обработки технологических сред столь малы, что говорить о промышленном применении ультразвуковых технологий не имеет смысла.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ

Таким образом, с одной стороны существует высокая потребность в повышении эффективности технологических процессов в дисперсных системах с высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой, а с другой стороны отсутствует достоверные данные о режимах и условиях ультразвукового воздействия, при котором можно обеспечить кавитационное воздействие и определить размеры кавитационной области. Отсутствие таких знаний не позволяет выработать требования

и создать ультразвуковое оборудование для УЗ обработки высоковязких сред.

В связи с этим возникает необходимость:

1. Выявления значений интенсивности ультразвукового воздействия, способного обеспечить возникновение и протекания кавитационного процесса, характеризуемого максимальной эффективностью (режим развитой кавитации) в высоковязких средах и неньютоновских жидкостях.

2. Определения размеров и формы кавитационной зоны (зоны эффективного воздействия на технологический процесс) при различных режимах (интенсивностях) и в различных условиях (неограниченные и ограниченные объемы при наличии резонансных условий распространения колебаний) ультразвукового воздействия.

3. Разработки конструктивных схем излучателей ультразвуковых колебаний с увеличенной излучающей поверхностью и создания пьезоэлектрических преобразователей для формирования высокоинтенсивных колебаний таких излучателей.

Решению поставленных задач посвящена данная статья.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ КАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Для выявления значений интенсивностей ультразвукового воздействия, при которых обеспечивается возникновение и протекания кавитационного процесса в различных технологических средах определяются условия создания кавитационных пузырьков в обрабатываемой среде, способных запасти максимальное количество энергии и взорваться за один период колебаний ультразвукового воздействия [3].

В основу расчетов положена обобщенная линейная теория оценки эффективности ультразвукового воздействия в невязких кавитирующих жидкостях Миннерта [4], распространенная на случай вязких жидкостей. Для этого случая динамика кавитационного пузырька в линейно-вязкой несжимаемой жидкости может быть описана уравнением Нолтинга-Непайреса [4], которое позволяет определить как зависимость радиуса кавитационного пузырька от времени $R(t)$ при заданной амплитуде звукового давления p , так и максимальный средний радиус пузырька R_{MAX} ,

достигаемый при вырождении пузырька в долгоживущий.

Это позволяет найти волновое сопротивление кавитирующей жидкости (1), которое согласно работам [4,5] определяет эффективность кавитационного воздействия:

$$\rho_K c_K = \rho_0 c_0 \left[\frac{(1 - \bar{K}) + \rho_n / \rho_0 \bar{K}}{(1 - \bar{K}) + \beta_{II} / \beta_0 \bar{K}} \right]^{1/2} \quad (1)$$

где ρ_0 и β_0 - плотность и сжимаемость сплошной жидкости соответственно; ρ_{II} и β_{II} - плотность и сжимаемость кавитирующей жидкости; \bar{K} - средний индекс кавитации [5]; c_K, c_0 - скорости звука в кавитирующей и сплошной жидкой среде соответственно.

Средний индекс кавитации определяется согласно следующему выражению:

$$\bar{K} = \frac{1}{T} \int_0^T R^3(t) dt / R_{MAX}$$

где T - период колебаний первичной УЗ волны, $c, R(t)$ - мгновенный радиус кавитационного пузырька в зависимости от времени t, R_{MAX} - максимальный радиус кавитационного пузырька, м.

$R(t)$ определяется путём непосредственного численного интегрирования уравнения Нолтинга-Непайреса при заданной амплитуде звукового давления.

А для определения R_{MAX} используется обобщение линейной теории Миннерта [5] на случай вязких жидкостей, согласно которой R_{MAX} связан с резонансной частотой колебаний первичного УЗ воздействия следующим соотношением:

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

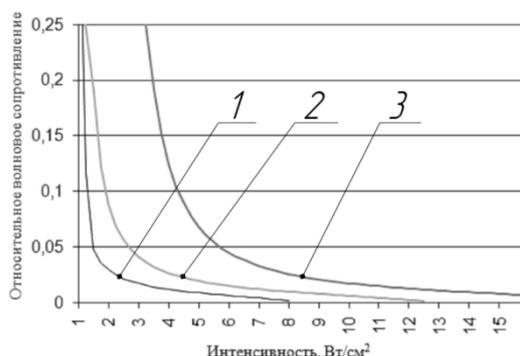
где ρ - плотность жидкости, кг/м³, γ - показатель адиабаты для воздуха, σ - поверхностное натяжение жидкости, Н/м, p_0 - статическое давление в жидкости, Па, η - динамическая вязкость жидкости, Па·с.

Численное решение полученного уравнения (2) относительно R_{MAX} позволяет определить максимальный средний радиус пузырька, достигаемый при его вырождении в долгоживущий.

Таким образом, предложенная модель позволяет определить энергозатраты на формирование кавитационного процесса по

изменению количества формируемых пузырьков (волновое сопротивление кавитирующей среды) при любой по вязкости среды.

Типичные зависимости количества формируемых кавитационных пузырьков (волнового сопротивления жидкой среды, насыщенной парогазовыми кавитационными пузырьками) от величины энергетического воздействия (интенсивности УЗ колебаний) на различные технологические среды представлены на рисунке 1.



1 – вода; 2 – машинное масло; 3 – оливковое масло

Рисунок 1 – Зависимость относительного волнового сопротивления от интенсивности УЗ воздействия для различных типов жидкостей

Значения оптимальной интенсивности для типичных технологических сред представлены в таблице 1.

Обобщение представленных результатов позволяет сделать выводы об необходимости существенного повышения интенсивности ультразвукового воздействия при реализации технологических процессов в технологических средах с высоковязкой или неньютоновской жидкой фазой.

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

Вид жидкости	Параметры жидкости		Оптимальная интенсивность, Вт/см²
	плотность, кг/м³	вязкость, 10 ⁻³ Па·с	
Вода	1000	0,82	3,5
Этиловый спирт (96%)	798	1,2	4
Трансформаторное масло	900	30	6
Оливковое Масло	950	85	17,8

Моторное масло по SAE10W-40	980	85	12,5
Глицерин	1264	400	22,7
Нефть	970	400	31
Эпоксидная смола ЭД-20	1170	520	27,6

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРОВ ЗОНЫ КАВИТАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

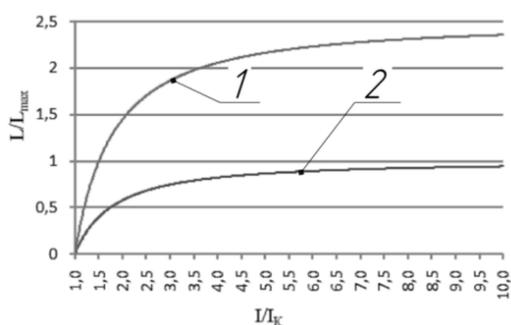
Ранее представленные результаты позволяют установить интенсивности ультразвукового воздействия, необходимые для поддержания кавитационного процесса в локальном малом (по сравнению с длиной УЗ волны) объеме обрабатываемой жидкости. Однако в практических приложениях необходимо создавать кавитацию в области обрабатываемой жидкости как можно большего размера, чтобы обеспечить достаточную для промышленного использования производительность химико-технологических процессов. Высокие требуемые интенсивности, а также затухание УЗ колебаний в высоковязких кавитирующих средах приводит к ограниченности зоны кавитационного воздействия, поэтому наряду с интенсивностью необходимо установить оптимальные условия воздействия (положение отражающей границы относительно излучателя), чтобы увеличить размер кавитационной зоны за счёт взаимного усиления падающей и отражённой УЗ волны.

Для этого предложена и разработана математическая модель процесса формирования кавитационной зоны в вязких средах под воздействием ультразвуковых колебаний, основанная на предположении, что в режиме развитой кавитации волновое сопротивление кавитирующей среды равно 0,03–0,06 от значения волнового сопротивления жидкости без кавитации.

$$\iiint_{\omega_i} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{c^2 \rho_{жс}}{2\rho_0} + E_b - \frac{2\rho_0 b}{c} R^3 \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^3 - b\rho_{жс} \frac{p_0}{\rho_0} (R^3 - R_0^3) + \frac{\rho_0 u^2}{2} \right) dV = - \iiint_{\partial\omega_i} \left(pu - bp(R^3 - R_0^3)u + E_b u - \frac{2\rho_0 ub}{c} R^3 \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^3 \right) dS$$

где c – скорость звука в жидкости, м/с; p – звуковое давление в среде, Па; u – колебательная скорость движения жидкости; $\rho_{ж}$ – текущая плотность жидкости; ω_t и $d\omega_t$ – выделенный объём жидкости и его граница соответственно; R_0 – радиус кавитационного зародыша, dV – малый объём жидкости, по которому производится интегральное суммирование, $E_b = \frac{3}{2} \rho_0 b R^3 \left(\frac{\partial R}{\partial t} \right)^2$ – кинетическая энергия жидкости при расширении полостей, b – счётная концентрация кавитационных пузырьков, м⁻³.

Зависимости величины продольного размера от интенсивности воздействия представлены на рисунке 2. Из представленных зависимостей следует возможность увеличения продольных размеров кавитационной области примерно в 2,5 раза при обеспечении режима «стоячей волны» в ограниченном по размерам объеме.



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

Рисунок 2 – Зависимость относительного значения продольного размера кавитационной области от относительной интенсивности воздействия

Примеры значений продольного размера зоны кавитационного воздействия для некоторых технологических сред представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Размеры зон кавитационного воздействия

Технологическая среда	Размер кавитационной области в режиме бегущей волны, см	Оптимальный размер кавитационной области в режиме стоячей волны, см
Вода	15	34
Масло по SAE10W-40	8	23
Эпоксидная смола ЭД-20	2	6

Таким образом, предложенная модель позволяет не только определять продольный размер зоны кавитационного воздействия, но и выявлять условия увеличения размеров этой зоны при использовании ограниченных по размерам технологических объемов, в которых обеспечиваются резонансные условия распространения колебаний.

РАЗРАБОТКА ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Знание продольного размера зоны кавитационного воздействия свидетельствует о том, что единственным путем увеличения объемов обрабатываемых технологических сред (производительности процессов) является увеличение размеров колеблющихся поверхностей ультразвуковых излучателей.

Излучатель (рабочий инструмент колебательной системы) может содержать в своем составе последовательно установленные резонансные (полуволновые) волноводы (рисунок 3), диаметр которых меняется и излучение УЗ колебаний осуществляют с поверхностей участков переходов между участками различного диаметра.

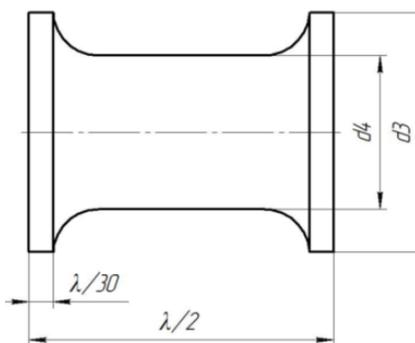


Рисунок 3 – Проектирование многополуволновых рабочих инструментов

Создание излучателя (рабочего инструмента) с увеличенной поверхностью излучения реализуется последовательным соединением необходимого количества полуволновых волноводов.

Создание излучателей с увеличенной поверхностью (более 100–500 см²) излучения позволит существенно увеличить производительность реализуемых технологических процессов. Однако, создание требуемых интенсивностей излучения (более 10 Вт/см²) с увеличенных поверхностей (более 100–500

см²) излучения требует существенного увеличения мощности (более 1000–5000 Вт) пьезоэлектрических преобразователей, предназначенных для питания таких излучателей.

СОЗДАНИЕ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ МОЩНОСТИ

Ограниченные размеры производимых промышленностью пьезоэлементов (диаметром не более 50–70 мм) не позволяют создавать пьезоэлектрические преобразователи

требуемой мощности. Поэтому, представляется целесообразным применение нескольких пьезоэлектрических преобразователей, объединенных на общей излучающей накладке.

Конструктивные схемы трех, четырех и семи пакетных пьезокерамических преобразователей (на основе пьезоэлементов типоразмера 50(70)х20х6 мм) мощностью более 3000, 4000 и 7000 Вт показаны на рисунке 4.

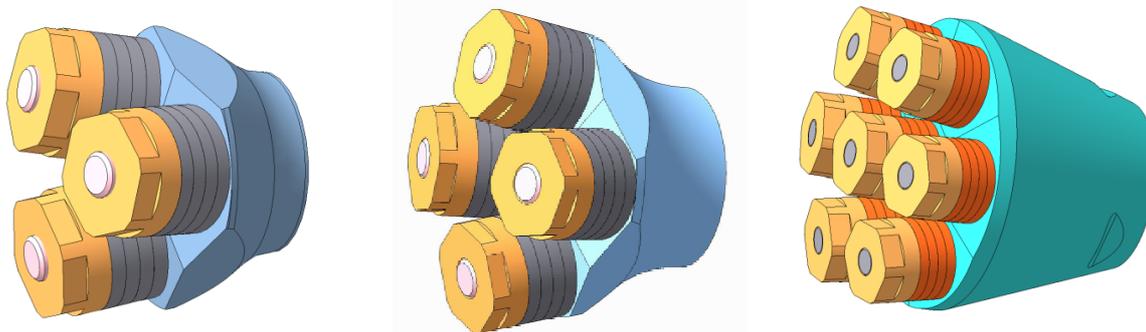


Рисунок 4 – Многопакетные пьезоэлектрические преобразователи

Созданные пьезоэлектрические преобразователи способны обеспечить питание излучателей с увеличенной поверхностью излучения и обеспечить введение в технологические среды требуемых энергий ультразвуковых колебаний.

Создание, на базе новых знаний о режимах и условиях формирования зон кавитационного воздействия в дисперсных системах с высоковязкими и неньютоновскими жидкими фазами, новых ультразвуковых технологических аппаратов обеспечило возможность ускорения различных технологических процессов в промышленных условиях.

Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-179.2014.8 и гранта РФФИ № 14-08-31521 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новицкий, Б.Г. Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах (Процессы и аппараты химической и нефтехимической технологии) [Текст] / Б.Г. Новицкий. – М.: Химия, 1983. – 192 с.

2. Физические основы ультразвуковой технологии [Текст] / Под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1969. – 689 с.

3. Хмелев, В.Н. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных жидких сред [Текст] / В.Н. Хмелев, С.С. Хмелев, Р.Н. Голых, Р.В. Барсуков // Ползуновский вестник №3/2010/ Алт. гос. техн. ун-т. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2010. – с. 321-325.

4. Хмелев, В.Н. Повышение эффективности ультразвуковой кавитационной обработки вязких и дисперсных сред / Хмелев В.Н., Голых Р.Н., Хмелев С.С., Барсуков Р.В., Шалунов А.В.; ООО «Центр ультразвуковых технологий». – Бийск, 2011. – 102 с. – Библиогр.: 23 назв. – Рус. Деп. в ВИНТИ 25.02.2011 № 86-B2011.

5. Хмелев, В.Н. Моделирование процесса формирования кавитационной области в вязких жидкостях для определения оптимального обрабатываемого технологического объема и режимов воздействия [Текст] / В.Н. Хмелев, Р.Н. Голых, С.С. Хмелев, Р.В. Барсуков, А.В.Шалунов // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2010. – № 4 (22). – С. 58–62.

Хмелёв В.Н. – д.т.н., профессор, Бийский технологический институт, (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854) 432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru;

Хмелёв С.С. – к.т.н., доцент, Бийский технологический институт, (филиал) ФГБОУ ВПО АлмГТУ, тел. (3854) 432570, e-mail: ssh@bti.secna.ru;

Голых Р.Н. – аспирант, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ

ВПО АлмГТУ. тел. (3854) 432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Шалунов А.В. – д.т.н., доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлмГТУ. тел. (3854) 432570, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.