

УДК 534.838.7

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВЯЗКИХ И ДИСПЕРСНЫХ ЖИДКИХ СРЕД

В.Н. ХМЕЛЕВ, С.С. ХМЕЛЕВ, Р.Н. ГОЛЫХ, Р.В. БАРСУКОВ

Статья посвящена решению проблемы, возникающей при ультразвуковой обработке жидких сред с высоким затуханием ультразвуковых колебаний. Выявляются недостатки существующего ультразвукового оборудования и предлагаются новые подходы к реализации процессов ультразвуковой кавитационной обработки вязких сред, позволяющие реализовать технологические процессы, не реализуемые в обычных условиях без ультразвукового воздействия.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, вязкие жидкости, интенсивность.

### Введение

Применение ультразвуковых колебаний высокой интенсивности позволяет существенно интенсифицировать различные процессы химических технологий, протекающие в жидких средах.

Ультразвуковая интенсификация процессов основана на введении ультразвуковых колебаний высокой интенсивности (более  $3 \dots 10 \text{ Вт/см}^2$ ) непосредственно в жидкие среды. На практике успешно реализуются несколько вариантов контактного введения ультразвуковых колебаний в жидкие среды. Один из самых распространенных – это обработка путем погружения рабочего инструмента ультразвуковой колебательной системы в технологический объем или обработка в реакторах, содержащих технологический объем в виде проточной камеры.

Ультразвуковое воздействие на жидкие среды настолько эффективно и уникально, что аналогичных результатов невозможно достичь высокоскоростным перемешиванием или низкочастотной вибрацией. Уникальность воздействия обеспечивается возникновением в жидких средах кавитационных парогазовых пузырей, накапливающих энергию при их расширении и взрывающихся при сжатии с созданием ударных волн и коммультативных струй.

Традиционными средами для эффективной реализации ультразвуковых технологий (растворение, экстрагирование, очистка, диспергирование, эмульгирование) являются вода, органические растворители, жидкие среды на водной основе с малым объемным содержанием твердых фракций. Применение водных сред обусловлено возможностью создания режима развитой кавитации при минимальных энергетических затратах.

Однако, имеющиеся результаты многочисленных лабораторных исследований [1, 2] показывают, что ультразвуковые колебания высокой интенсивности позволяют ускорять процессы в средах, значи-

тельно отличающихся по своим свойствам от воды и имеющих высокую вязкость или высокую концентрацию дисперсной фазы. Типичными примерами реализации процессов в таких средах являются процессы полимеризации и деполимеризации высокомолекулярных соединений, модификации эпоксидных олигомеров, смешивания расплавов, получения консистентных смазок, красок, эмульсий, растворения нефтешламовых отложений, диспергирования и равномерного распределения твердых веществ в полимерных материалах и технических маслах.

Такие процессы сегодня составляют большую часть процессов химической технологии и широко востребованы промышленностью, поэтому, применение УЗ колебаний высокой интенсивности при их реализации может существенно повысить производительность производств, улучшить качество и придать новые свойства конечному продукту.

### Постановка задач

К сожалению, ультразвуковые колебания высокой интенсивности для интенсификации различных процессов в высоковязких и высокодисперсных средах не получили широкого распространения из-за отсутствия специализированного оборудования, способного обеспечить кавитационный режим обработки.

Причины отсутствия такого оборудования связаны с несколькими принципиальными физическими ограничениями, возникающими при попытках реализации ультразвуковых технологий в высоковязких и высокодисперсных средах.

Основной проблемой, решаемой при интенсификации технологических процессов, является обеспечение, в автоматическом режиме, оптимальной интенсивности ультразвукового излучения, при которой эффективность процесса будет максимальной при минимальных энергозатратах. При этом, реша-

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВЯЗКИХ И ДИСПЕРСНЫХ ЖИДКИХ СРЕД

ется задача обеспечения максимального кавитационного воздействия, т.е. создания максимального количества кавитационных пузырьков в обрабатываемой среде, способных запастись максимальное количество энергии и взорваться за один период колебаний ультразвукового воздействия.

Поэтому, основным параметром, характеризующим эффективность кавитационного воздействия, является индекс кавитации, который определяется как отношение объема кавитационных пузырьков  $\Delta V$  к объему жидкости  $V$ , в котором локализовано это облако.

В работе [1] предложена методика определения индекса кавитации или значения волнового сопротивления кавитирующей жидкости в зависимости от перепадов звукового давления (интенсивности ультразвуковых колебаний) в распространяющейся волне. Возможность контроля величины значения волнового сопротивления жидкости в процессе ультразвукового воздействия позволяет управлять процессом создания и поддержания заданного уровня ультразвуковой кавитации. Осуществляется это на основании результатов непрерывного контроля величины волнового сопротивления обрабатываемой жидкости за счет регулирования величины выводимой УЗ энергии, необходимой для достижения заданного индекса кавитации.

Однако известная методика [1] определения параметров кавитирующей среды основывается на допущении о полном отсутствии вязкости жидкости. Наличие же вязкости значительно снижает эффективность работы или делает невозможным использование существующих ультразвуковых аппаратов.

В связи с этим возникла необходимость в уточнении известной методики, позволяющей определить волновое сопротивление кавитирующей среды в зависимости от параметров акустического воздействия. В частности, для определения индекса кавитации линейно- и нелинейно вязких жидкостей, согласно модели [1] необходимо получить зависимости резонансных размеров пузырьков и радиусов парогазовых пузырьков от параметров воздействия с учетом вязкости.

Второй существенной причиной, ограничивающей возможности специализированного ультразвукового оборудования для воздействия на высоковязкие и высокодисперсные среды является аномально высокое затухание ультразвуковых колебаний в таких материалах. Аномально высокое затухание ультразвуковых колебаний в вязких и дисперсных средах ограничивает область распространения ультразвуковых колебаний и размеры зон, в которых интенсивность колебаний достигает значений, достаточных для реализации кавитационного процесса. Очевидно, что, даже в случае реализации кавитационного процесса в небольшом объеме, вблизи излучающей поверхности и обеспечении интенсивного перемешивания обрабатываемой технологической среды,

производительность процесса будет очень малой, т.е. не приемлемой для производственного применения, а равномерность обработки всего объема среды в этом случае обеспечить практически невозможно.

Таким образом, в связи с высокой эффективностью ультразвуковой обработки при ускорении процессов и получении новых материалов, невозможностью ее практического применения из-за отсутствия информации об оптимальных режимах кавитационного воздействия, а также из-за аномально высокого затухания колебаний в вязких и дисперсных средах и необходимостью обеспечения равномерной обработки увеличенных объемов обрабатываемых сред, необходимо предложить и разработать эффективные способы введения и распространения ультразвуковых колебаний в средах с высоким затуханием и реализовать предложенные способы в реальных ультразвуковых аппаратах, пригодных для производственного применения в различных отраслях промышленности.

## Определение оптимальных режимов кавитационного воздействия

Для получения выражения для резонансного размера кавитационной полости обобщается линейная теория Миннерта, разработанная для невязких кавитирующих жидкостей на случай вязких жидкостей. Динамика кавитационного пузырька в линейно-вязкой несжимаемой жидкости описывается следующим уравнением [3]:

$$\rho \left( \frac{3\dot{R}^2}{2} + R\ddot{R} \right) = -\frac{2\sigma}{R} + p_{e0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - 4\eta \frac{\dot{R}}{R} - p_{\infty} \quad (1)$$

где  $\rho$  — плотность рассматриваемой жидкости;  
 $R$  — радиус газового пузырька;  
 $R_0$  — радиус зародыша;  
 $p_{e0}$  — давление газа в зародыше;  
 $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости;  
 $\eta$  — вязкость жидкости;  
 $p_{\infty}$  — давление жидкости на больших расстояниях от центра кавитационной полости;  
 $\gamma$  — показатель адиабаты для воздуха.

Если пузырёк пульсирует, изменяя свои размеры незначительно, то

$$p_{\infty} = p_0 + p \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$R = R_{MAX} (1 + \alpha \sin(\omega t + \varphi)) \quad (3);$$

где  $\alpha$  — относительная амплитуда колебаний радиуса пузырька;  
 $R_{MAX}$  — средний размер полости;  
 $p$  — амплитуда колебаний давления жидкости;  
 $p_0$  — статическое давление;  
 $\omega$  — круговая частота акустических колебаний;

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВЯЗКИХ ИДИСПЕРСНЫХ ЖИДКИХ СРЕД

$\varphi$  — фазовый сдвиг малых колебаний полости относительно колебаний жидкости.

Находим решение уравнения (1) относительно  $\omega$  с учетом условия резонанса для  $\alpha$ , подставив в него выражения (2) и (3).

Отсюда получается выражение для резонансной частоты  $f$  пузырька радиусом  $R_{MAX}$ :

$$f = \frac{1}{2\pi R_{MAX}} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left( 3\gamma \left( \frac{2\sigma}{R_{MAX}} + p_0 \right) - \frac{2\sigma}{R_{MAX}} - \frac{8\eta^2}{\rho R_{MAX}^2} \right)} \quad (4)$$

На рисунках 1 и 2 приведены зависимости относительного волнового сопротивления от интенсивности воздействия для различных жидкостей, используемых на практике, построенные с использованием выражения 4.

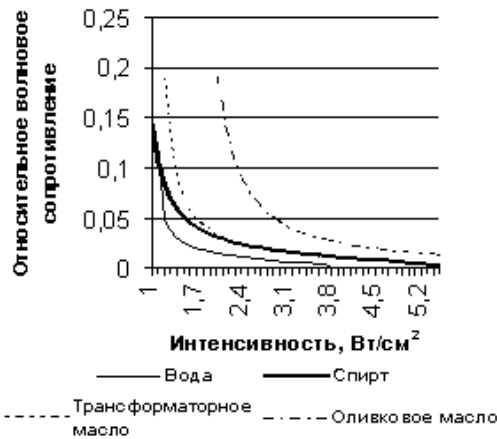


Рисунок 1 — Зависимость относительного волнового сопротивления от интенсивности воздействия для различных типов жидкостей

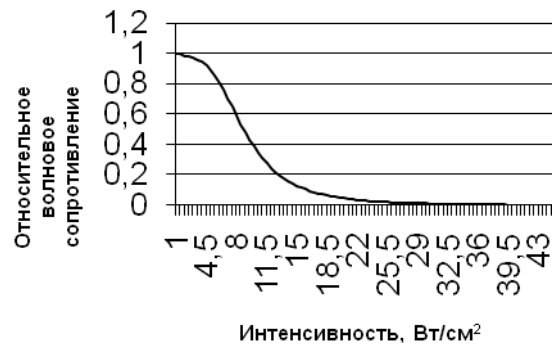


Рисунок 2 — Зависимость относительного волнового сопротивления от интенсивности воздействия для глицерина

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

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

## Новые подходы к обработке вязких сред

Достижение указанных интенсивностей ультразвукового воздействия для зарождения и поддержания режима развитой кавитации предполагает работу существующих УЗ аппаратов в недопустимых мощностных режимах.

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

| Вид жидкости           | Параметры жидкости  |                              |                                 |   | Оптимальная интенсивность, Вт/см <sup>2</sup> |
|------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------------------|---|---|
|                        | Скорость звука, м/с | Плотность, кг/м <sup>3</sup> | Вязкость, 10 <sup>-3</sup> Па·с | Поверх. натяжение, 10 <sup>-3</sup> 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                         | ~1000                           | 59,4                                    | 20...25                                       |

Единственный путь обеспечения их работы в таких жидкостях связан с уменьшением излучающей поверхности ультразвуковой колеблющейся системы и соответственно снижения потребляемой мощности (при неизменной интенсивности). Однако, такой подход влечет за собой уменьшение объема единовременной обрабатываемой жидкости, что является неприемлемым при организации серийных производств.

Решением проблемы может стать обработка жидких вязких сред через резонансные промежутки, таким образом, что в момент возникновения колеба-

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВЯЗКИХ И ДИСПЕРСНЫХ ЖИДКИХ СРЕД

ний на поверхности рабочего излучающего инструмента расстояние от этой поверхности до отражающей стенки реактора кратно  $\lambda/2$  в жидкости, заполняющей реактор [4].

Когда в жидкости создается ультразвуковое поле, амплитуда давления которого превышает порог возникновения кавитации  $P_m$ , в ней возникает кавитационное облако. При этом в обрабатываемом объеме под излучающей поверхностью существенно меняются акустические свойства среды, следовательно, меняются резонансные условия. В данном случае необходимо путем перемещения рабочего излучающего инструмента менять расстояние от отражающей стенки, устанавливая резонансный размер в режиме кавитации. При такой обработке возможно достижение резонансных явлений в различных жидких средах при расстояниях, превышающих несколько  $\lambda/2$ .

Для увеличения мощности, подводимой к ультразвуковой колебательной системе, возможно использование многопакетного пьезоэлектрического преобразователя [5], в котором энергия нескольких пьезопреобразователей суммируется в излучающем инструменте и позволяет достичь интенсивности ультразвуковых колебаний более 20 Вт/см

Для увеличения объема одновременно обрабатываемой вязкой жидкости необходимо построение колебательной системы с многополуволновым излучателем, представляющим собой систему из последовательно состыкованных единичных полуволновых элементов [6]. Внешний вид такого излучателя представлен на рисунке 3.

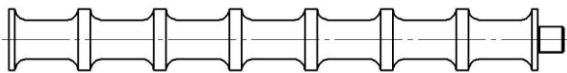


Рисунок 3 – Внешний вид многополуволнового излучателя

Отличительной особенностью таких УЗ колебательных систем является то, что рабочий излучающий инструмент выполнен в виде стержня, состоящего из последовательно расположенных участков цилиндрической формы различного диаметра. Излучение УЗ колебаний осуществляют с поверхности излучателя в зонах переходов между цилиндрическими участками различного диаметра. УЗКС закрепляется на оси проточной камеры реактора вдоль направления потока движения жидкости. Развитая поверхность излучения позволяет проводить обработку большого объема жидкости в единицу времени.

При реализации на базе такого излучателя ультразвукового проточного реактора эффективная обработка всего объема вязкой жидкости в реакторе возможна только в случае обеспечения непрерывной смены жидкости в объемах, между соседними участками излучателя большего сечения. Обеспечить такую смену в цилиндрическом объеме невозможно, даже при малой скорости протока, с учетом перемещающего воздействия ультразвуковых колебаний и распространения колебаний за счет многократных

отражений. В этом случае обработке подвергаются маленькие объемы жидкости, находящиеся между участками большего диаметра, а основной объем протекающей жидкости практически не подвергается ультразвуковому воздействию.

Устранение указанных недостатков возможно при реализации технического решения, когда ультразвуковые колебания направляются непосредственно в объем камеры, обеспечивая многократные отражения УЗ колебаний от внутренней поверхности проточной камеры и участков излучателя и создания условий распространения колебаний, обеспечивающих резонансное усиление УЗ колебаний. Конструкция и принцип работы предлагаемого УЗ проточного реактора поясняются рисунком 4.

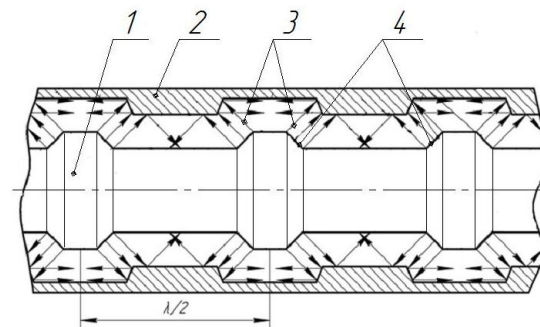


Рисунок 4 - Принцип работы УЗ проточного реактора

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

# ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КАВИТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВЯЗКИХ ИДИСПЕРСНЫХ ЖИДКИХ СРЕД

проточной камеры создается ультразвуковое поле с интенсивностью, необходимой и достаточной для образований и поддержания режима развитой кавитации.

Примером использования таких систем могут служить аппараты серии «Булава-П» модель УЗАП-8/22-ОП (рисунок 5).



Рисунок 5 – Внешний вид ультразвукового технологического аппарата «Булава-П», модель УЗАП-8/22-ОП

Показанный на рисунке УЗ аппарат был построен по вышеприведенным принципам и позволил обеспечить обработку нефтепродуктов в проточном режиме с производительностью до  $1\text{ м}^3/\text{ч}$  и интенсивностью не менее  $13\text{ Вт}/\text{см}^2$ .

## Выводы и заключение

В результате проведенных исследований установлено, что существующее ультразвуковое оборудование не пригодно для кавитационной обработки высоковязких и высокодисперсных жидких сред, в силу необходимости работы в недопустимых мощностных режимах и малой производительности процесса.

Предложена уточненная методика определения режимов ультразвукового воздействия, позволяющая осуществлять автоматическую оптимизацию воздействия на основе непрерывного контроля волнового сопротивления кавитирующей вязкой среды, зависящего от параметров акустического воздействия.

Предложен новый подход к ультразвуковой обработке вязких жидких сред в проточных реакторах с излучателем протяженного типа, и проточной камерой, имеющей внутреннюю поверхность, создающую условия для резонансного усиления распространяющихся колебаний.

Использование полученных результатов, позволило создать практические конструкции ультразвуковых аппаратов и внедрить ультразвуковое технологическое оборудование для реализации технологи-

ческих процессов в условиях промышленных производств. Это не только обеспечит повышение эффективности процессов ультразвуковой обработки вязких и дисперсных сред, но и позволит реализовать новые технологические процессы, не реализуемые в обычных условиях без УЗ воздействия.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев В.Н. [Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве](#)/ БТИ АлтГТУ. – Бийск, 2007. – 400 с.
  2. Хмелев В.Н. [Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве](#)/ В.Н. Хмелев, О.В. Попова. – Барнаул: АлтГТУ, 1997. – 160 с.
  3. Ультразвуковая технология [Текст] / под ред. Б.А. Аграната. – М.: Металлургия, 1974. – 505 с.
  4. Khmelev, V.N. [Effectiveness Increase of Ultrasonic Cavitation Processing of Viscous Liquid Media](#) [Текст] / V.N. Khmelev [и др.] //10<sup>th</sup> International Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2009: Workshop Proceedings. - Novosibirsk: NSTU, 2009.
  5. Khmelev, V.N. High Power Ultrasonic Oscillatory Systems [Текст] / V.N. Khmelev [и др.] // International Workshops and <http://u-sonic.ru/pubs/ultrazvukovye-kolebatelnye-sistemy-bolshoi-moshchnosti> Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007 / NSTU. – Novosibirsk, 2007.
  6. [Ультразвуковая колебательная система](#) [Текст]: пат. 2332266 Российская Федерация: Хмелев В.Н., Савин И.И., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Лебедев А.Н.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».
- Д.т.н., профессор [Хмелев В.Н.](#), тел./факс (3854) 43-25-81, e-mail: [vnh@bti.secna.ru](mailto:vnh@bti.secna.ru);  
аспирант [Хмелев С.С.](#) тел. (3854) 43-25-70;  
студент [Голых Р.Н.](#) тел. (3854) 43-25-70; к.т.н., доцент, [Барсуков Р.В.](#), тел. (3854) 43-25-70;

Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».