

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ КАВИТАЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ВЯЗКИХ И ЖИДКИХ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ СРЕД

Р.Н. Голых, С.С. Хмелёв, В.Н. Хмелёв

Бийский технологический институт, г. Бийск

Статья посвящена поиску путей решения проблем, возникающих при ультразвуковой интенсификации процессов в жидких средах с высокой вязкостью и дисперсностью, характеризующихся аномально высоким затуханием ультразвука и повышенной кавитационной прочностью. Предложен новый подход к созданию методики определения режимов ультразвуковой кавитационной обработки линейно- и нелинейно-вязких сред, позволяющей осуществлять автоматическую оптимизацию ультразвукового воздействия на основе непрерывного контроля волнового сопротивления кавитирующей вязкой среды.

*Ключевые слова:* ультразвук, кавитация, вязкость, неньютоновская жидкость.

### 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 произвольный технологический объем или обработка в реакторах проточного типа, содержащих технологический объем в виде проточной камеры и расположенный в ней излучатель ультразвуковых колебаний.

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 кумулятивных 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, значительно 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, повысить качество и придать новые свойства конечному продукту.

К сожалению, широкие возможности ультразвуковых колебаний 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 решается задача обеспечения максимального кавитационного воздействия, т.е. создания максимального количества кавитационных пузырьков в обрабатываемой среде, способных запасти 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, т.е. оптимизировать процесс. 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.

### МОДЕЛЬ КАВИТИРУЮЩЕЙ ЛИНЕЙНО-ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

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]:

$$\rho \left( \frac{3\dot{R}}{2} + R\ddot{R} \right) = -\frac{2\sigma}{R} + p_{z0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - 4\eta \frac{\dot{R}}{R} - p_{\infty}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность рассматриваемой жидкости;  $R$  – радиус газового пузырька;  $R_0$  – радиус зародыша;  $p_{z0}$  – 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

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

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

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;  $\phi$  – 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  $R_{MAX}$ :

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

Индекс кавитации определяется по формуле, приведенной в [1], как отношение среднего куба радиуса пузырька к кубу резонансного радиуса. Средний куб радиуса кавитационной полости определяется на основании численного анализа уравнения (1).

### МОДЕЛЬ КАВИТИРУЮЩЕЙ НЕЛИНЕЙНО-ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ

В настоящее время возникает необходимость ультразвуковой кавитационной обработки жидкостей, особенность которых заключается в наличии зависимости вязкости от скорости сдвига (неньютоновские жидкости). К таким классам жидкостей относятся

концентрированные суспензии твёрдых частиц (с размерами частиц 20 мкм и менее), полимерные расплавы и растворы и т. д. Однако в настоящее время теория кавитации в неньютоновских жидкостях практически не развита, в связи с этим возникает необходимость построения теоретических моделей кавитирующих жидкостей с наличием зависимости вязкости от градиента скорости. Далее будет предложена модель, позволяющая определить зависимость радиуса кавитационного пузырька от времени и параметров акустического воздействия.

При построении модели принимается допущение о радиальной симметрии кавитационного пузырька.

Поле обтекания жидкости описывается системой уравнений неразрывности и сохранения импульса в дифференциальной форме.

$$\begin{cases} \operatorname{div} \mathbf{v} = 0 \\ \rho \left( \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v}, \nabla \mathbf{v} \right) = \operatorname{div} \mathbf{P} \end{cases}$$

где  $\mathbf{v}$  – скорость движения жидкости;  $\mathbf{P}$  – тензор напряжений жидкости;  $\rho$  – плотность жидкости.

С учетом зависимости вязкости жидкости от скорости сдвига необходимо найти новое значение тензора напряжений.

Тензор напряжений нелинейно-вязкой несжимаемой жидкости описывается следующим соотношением:

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= -p\mathbf{I} + \tau \mathbf{D} \ , \\ \tau \mathbf{D} &= 2\eta D_2 \mathbf{D} \ , \end{aligned}$$

где  $D_2$  – скорость сдвига;  $\eta(D_2)$  – вязкость жидкости;  $\mathbf{I}$  – единичный тензор 2-го ранга;  $\mathbf{D}$  – тензор скоростей деформации.

С учетом уравнения неразрывности и радиальной симметрии кавитационной полости радиальная скорость движения жидкости представляется в виде:

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial r} = \frac{C}{r^2} \ ,$$

где  $C$  – величина, независящая от координаты точки жидкости, а только от времени;  $v$  – радиальная скорость движения жидкости;  $r$  – расстояние от центра кавитационной полости;  $\phi$  – потенциал скорости движения жидкости.

После проведения ряда преобразований получено следующее выражение для скорости сдвига в зависимости от расстояния от центра кавитационного пузырька:

$$D_2 = -\frac{6C^2}{r^6} \ .$$

С учетом найденной скорости сдвига уравнение сохранения импульса запишется в следующем виде:

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v^2}{2} \right) \right) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial \eta}{\partial r} D_2 \left( 2r \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{v}{r} \right) + \frac{2v}{r} \right) \ .$$

Граничные условия для давления запишутся следующим образом:

$$p = -\frac{2\sigma}{R} + p_{z0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - 4\eta \left( -\frac{6C^2}{R^6} \right) \dot{R} \ ,$$

где  $\sigma$  – поверхностное натяжение жидкости;  $p_{z0}$  – давление газа в зародыше;  $R_0$  – радиус зародыша.

А скорость движения жидкости вблизи стенки пузырька равна:

$$v|_{r=R} = \dot{R} \ ,$$

где  $r$  – расстояние от центра кавитационной полости;  $v$  – радиальная скорость движения жидкости.

С учетом граничных условий и уравнения сохранения импульса уравнение пульсаций кавитационного пузырька в нелинейно-вязкой жидкости запишется следующим образом:

$$\rho \left( \frac{3\dot{R}^2}{2} + R\ddot{R} \right) = -\frac{2\sigma}{R} + p_{z0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + 4\eta \left( -\frac{6C^2}{R^6} \right) \dot{R} -$$

$$- \int_R^\infty \frac{144C^3}{r^{10}} \frac{\partial \eta \left( -\frac{6C^2}{r^6} \right)}{\partial \gamma} dr \ .$$

Легко видеть, что в случае отсутствия зависимости вязкости от скорости сдвига ( $\frac{\partial \eta}{\partial \gamma} = 0$ ) уравнение сводится к уравнению пульсаций кавитационного пузырька в линейно-вязкой жидкости.

Для определения резонансного размера кавитационной полости представим вязкость в виде степенного ряда по скорости сдвига.

Для определения резонансного размера кавитационной полости представим вязкость в виде степенного ряда по скорости сдвига.

Если  $\eta \gamma = \sum_{n=0}^{\infty} \eta_n \gamma^n$ , то получается

$$\rho \left( \frac{3\dot{R}}{2} + R\ddot{R} \right) = -\frac{2\sigma}{R} + p_{c0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + 4 \sum_{n=0}^{\infty} \eta_n \left( -\frac{6C^2}{R^6} \right)^n \frac{\dot{R}}{R} -$$

$$- \int_{\frac{R}{r}}^{\frac{144C^3}{r^{10}}} \sum_{n=1}^{\infty} m\eta_n \left( -\frac{6C^2}{r^6} \right)^{n-1} dr = -\frac{2\sigma}{R} + p_{c0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} +$$

$$+ 4 \sum_{n=0}^{\infty} \eta_n \left( -\frac{6\dot{R}}{R^2} \right)^n \frac{\dot{R}}{R} -$$

$$- 144 C^3 \sum_{n=1}^{\infty} m\eta_n - 6 C^2 \int_{\frac{R}{r}}^{\frac{1}{r^{4+6n}}} dr = -\frac{2\sigma}{R} + p_{c0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} +$$

$$+ 4 \sum_{n=0}^{\infty} \eta_n \left( -\frac{6\dot{R}}{R^2} \right)^n \frac{\dot{R}}{R} -$$

$$- 144 R^6 \dot{R} \sum_{n=1}^{\infty} m\eta_n \left( -6 R^4 \dot{R} \right)^{n-1} \frac{1}{(6+6n)^{3+6n}}.$$

При рассмотрении малых колебаний пузырька вокруг резонансного радиуса и пренебрежении членами порядка малости, начиная со 2-го, получается:

$$\rho \left( \frac{3\dot{R}}{2} + R\ddot{R} \right) = -\frac{2\sigma}{R} + p_{c0} \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} - 4\eta_0 \frac{\dot{R}}{R}.$$

Таким образом, для нахождения резонансного радиуса пузырька в нелинейно-вязких жидкостях применима формула (4) для линейно-вязких жидкостей, в которой за вязкость принимается вязкость при скорости сдвига, близкой к нулю. Таким образом, на резонансный размер нелинейность вязкости жидкости существенного влияния не оказывает.

Рассмотренная модель кавитирующей нелинейно-вязкой жидкости может быть использована для практического установления определённого индекса кавитации в автоматическом режиме с использованием методики, описанной для вязких жидкостей в предыдущих разделах.

Для определения резонансного размера кавитационной полости и среднего куба размера полости для нахождения индекса кавитации с помощью метода, рассмотренного в [1], используется модель кавитирующей нелинейно-вязкой жидкости, описанная ранее.

## АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЯЗКОСТИ НА ЗНАЧЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАВИТИРУЮЩЕЙ СРЕДЫ

На рис. 1 приведены зависимости индекса кавитации от величины звукового давления, на рис. 2 приведены зависимости отношения волнового сопротивления кавитирующей среды к волновому сопротивлению рассматриваемой жидкости  $\frac{\rho_k c_k}{\rho_j c_j}$  для

диталантной (жидкостей, вязкость которых растёт с увеличением скорости сдвига, к которым относятся, например, суспензии твёрдых частиц), идеальной и линейно-вязкой жидкости при прочих равных условиях. Волновое сопротивление определялось на основании найденного значения индекса кавитации с помощью выражения, приведённого в [1].

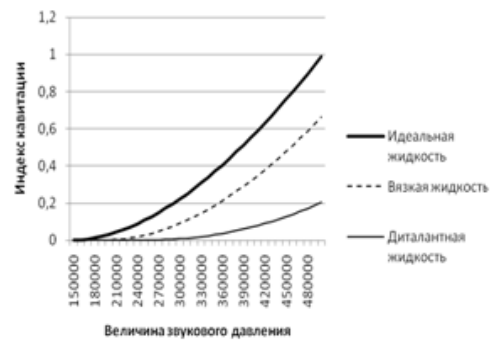


Рис. 1. Зависимости индекса кавитации от величины звукового давления для идеальной, вязкой и диталантной жидкости

Обобщение представленных зависимостей позволяет сделать выводы об уменьшении степени развитости кавитации (рис. 1) и увеличении оптимальной амплитуда колебаний давления среды (рис. 2) за счёт влияния вязкости обрабатываемой жидкости, а также за счёт роста вязкости с увеличением скорости сдвига.

За оптимальную принимается такая амплитуда звукового давления, при которой дальнейший её рост не вызывает существенного падения волнового сопротивления кавитирующей жидкости.

На рис. 3 и 4 приведены зависимости относительного волнового сопротивления обрабатываемой среды от интенсивности воздействия для различных жидкостей, используемых на практике.

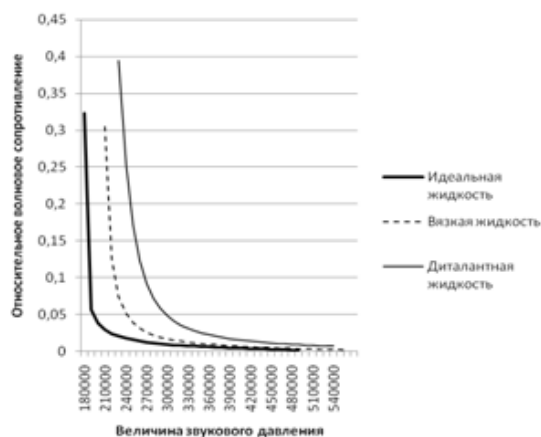


Рис. 2. Зависимости индекса кавитации от величины звукового давления для идеальной, вязкой и диталантной жидкости



Рис. 3. Зависимость относительного волнового сопротивления от интенсивности воздействия для различных типов жидкостей

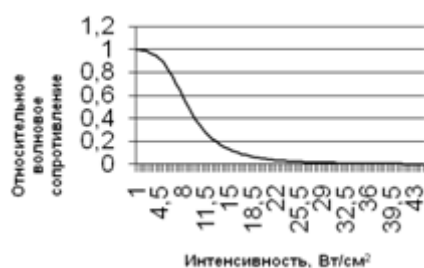


Рис. 4. Зависимость относительного волнового сопротивления от интенсивности воздействия для глицерина

В табл. 1 приведены численные показатели интенсивности, при которой в жидкости развивается «развитый» кавитационный процесс для различных типов жидкости с указанием их основных параметров.

Приведённые зависимости (рис. 3, 4) также позволяют установить, что при прочих равных условиях наличие вязкости влечёт за собой достижения мень-

шей степени развитости кавитации и больших значений оптимальных интенсивностей акустического воздействия.

**Табл. 1. Параметры жидкостей и интенсивности воздействия для каждой из них, соответствующие режиму «развитой» кавитации**

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

### 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.

Использование полученных результатов позволило создать практические конструкции ультразвуковых аппаратов и внедрить ультразвуковое технологическое оборудование для реализации технологических 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 ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Хмелёв, В.Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве [Текст]. / БТИ АлтГТУ. – Бийск, 2007. – 400 с.
2. Хмелёв, В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве [Текст]. / В.Н. Хмелёв, 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.] // Intrnational Workshops and Tutorials on Electron Devices and Materials EDM'2007 / NSTU. – Novosibirsk, 2007.

6. Ультразвуковая колебательная система [Текст]: пат. 2332266 Российская Федерация: Хмелёв 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».

*Голых Роман Николаевич – студент, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.*

*Хмелёв Сергей Сергеевич – аспирант кафедры методов и средств измерений и автоматизации, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: ssh@bti.secna.ru.*

*Хмелёв Владимир Николаевич – д.т.н., профессор, заместитель директора по научной работе, Бийский технологический институт (филиал) ГОУ ВПО АлтГТУ, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.*