

Выявление Режимов Ультразвукового Воздействия, Обеспечивающих Формирование Кавитационной Области в Высоковязких и Неньютоновских Жидкостях

Владимир Н. Хмелев, Роман Н. Голых, Андрей В. Шалунов, Сергей С. Хмелев, Ксения А. Карзакова
Центр ультразвуковых технологий, Бийск, Россия

Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

Аннотация – В статье представлена феноменологическая модель формирования кавитационной области в высоковязких и неньютоновских жидких средах. Предложенная модель основана на рассмотрении формирования кавитационной области как единого целого, но с учетом основных эффектов и явлений, происходящих внутри самой области. Анализ модели позволил выявить оптимальные интенсивности ультразвукового воздействия, необходимые для возникновения режима развитой кавитации в различных по реологическим свойствам жидкостях. Анализ модели позволил установить, что оптимальные интенсивности воздействия для большинства жидкостей, используемых на практике, не превышают 40 Вт/см^2 на частоте 22 кГц , за исключением дилатантных жидкостей, для которых интенсивность воздействия может достигать 100 Вт/см^2 . В результате анализа модели установлено изменение оптимальной интенсивности для неньютоновских жидкостей с течением времени, вызванное релаксацией вязкости. Снижение или увеличение, необходимой для формирования кавитационной области, интенсивности достигает 20 Вт/см^2 . Полученные результаты могут быть использованы для выбора мощностных режимов ультразвукового технологического оборудования и управления процессом кавитационной обработки сред с различными реологическими свойствами.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, вязкость, неньютоновские жидкости.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных подходов к решению различных технологических задач современных производств является ультразвуковое (УЗ) кавитационное воздействие на жидкие и жидкодисперсные среды. Высокая эффективность и перспективность УЗ воздействия доказана многочисленными исследованиями для широкого спектра жидкостей (вода, органические растворители, масла, нефти, наполненные полимерные наноструктурированные материалы, лакокрасочные композиции, смолы, концентрированные суспензии твердых частиц и т.д.) [1-3].

Уникальность и эффективность УЗ воздействия на жидкие среды обусловлена формированием кавитационных парогазовых пузырьков, накапливающих энергию при их расширении в один полупериод колеба-

ний и образующих ударные волны и кумулятивные струи при сжатии в другой полупериод колебаний. Кавитационное воздействие позволяет изменять структуру и свойства веществ и материалов, увеличивать межфазную поверхность взаимодействия, реализовывать процессы растворения, экстрагирования, эмульгирования и т. д.

На сегодняшний день кавитационная обработка успешно реализована на практике и распространена в промышленности только для реализации процессов в маловязких средах (с вязкостью до $30 \text{ мПа}\cdot\text{с}$).

Очевидно, что ультразвуковая кавитационная обработка сред (масла, нефти, полимеры и др.) более высокой вязкости (до $2 \text{ Па}\cdot\text{с}$), а в ряде случаев сред, вязкость которых зависит от скорости сдвига, имеет не меньшую значимость. К сожалению, кавитационная ультразвуковая обработка таких сред на практике практически не реализуется в силу ряда причин:

– отсутствия научных данных о влиянии режимов УЗ воздействия на процесс формирования кавитационной области в неньютоновских средах.

– необходимости в высоких интенсивностях УЗ воздействия (более 25 Вт/см^2) для создания кавитации;

Указанные проблемы не позволяют создать ультразвуковое оборудование, обеспечивающее производительность ультразвуковой кавитационной обработки высоковязких и неньютоновских жидких сред, достаточную для промышленного использования.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для установления режимов ультразвукового воздействия, обеспечивающих создание в различных по свойствам обрабатываемых жидкостях областей развитой кавитации, необходимо построение феноменологической модели, учитывающей как все основные эффекты и явления, происходящие внутри самой области, так и позволяющей анализировать кавитационную область в целом.

Проблема усложняется тем, что в большинстве теоретических работ [3-6], направленных на разра-

ботку научных основ повышения эффективности ультразвуковой кавитационной обработки жидких сред, рассматривалось исключительно поведение одиночного пузырька в жидкостях, вязкость которых не зависит от скорости деформации (скорости сдвига). Однако к высоковязким и неньютоновским средам уже полученные результаты непригодны ввиду отсутствия учёта важнейших факторов:

1) нелинейного характера зависимости сил вязких напряжений от градиента скорости движения жидкости, препятствующих расширению кавитационной полости;

2) изменения средней вязкости обрабатываемой жидкости с течением времени за счёт влияния процессов перемешивания и гистерезиса вязкости, приводящих к снижению пороговой интенсивности, необходимой для возникновения кавитации.

Кроме того эффективность кавитационного воздействия, определяемая суммарной энергией ударных волн кавитационных пузырьков, зависит не только от поведения одиночного пузырька, но и от концентрации пузырьков. Эта концентрация, благодаря взаимодействию кавитационных пузырьков, изменяется с течением времени и существенно зависит от интенсивности ультразвукового воздействия, что подтверждается результатами ранее проведенных экспериментальных исследований [3].

Таким образом, комплексное исследование процесса формирования кавитационной области должно включать:

- изучение поведения отдельного пузырька, являющегося «строительным кирпичиком» области, для выявления допустимых режимов воздействия, при которых происходит схлопывание пузырька, и он не вырождается в долгоживущий. При этом впервые учитывается наличие зависимости вязкости жидкости от скорости сдвига и релаксация вязкости в результате цикла радиального расширения и схлопывания кавитационного пузырька;

- изучение поведения всего ансамбля пузырьков с учетом их взаимодействия, определяющего энергетические характеристики области как единого целого, и выявление оптимальных режимов воздействия, при которых суммарная энергия схлопывания пузырьков максимальна.

На этом этапе используется новый подход, основанный на выявлении стационарной концентрации кавитационных пузырьков в результате их дробления и коалесценции и определении коэффициента поглощения УЗ в кавитирующей среде, вызванного затратами энергии на образование кавитации [7].

Поскольку, согласно результатам ранее проведенных исследований, наиболее часто на практике ультразвуковое воздействие осуществляется на частоте 22 кГц [1-3] далее осуществляется определение энергетических параметров воздействия на этой частоте.

АНАЛИЗ ДИНАМИКИ ОДИНОЧНОГО ПУЗЫРЬКА ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ДОПУСТИМОГО ДИАПАЗОНА ИНТЕНСИВНОСТЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Анализ динамики одиночного пузырька в зависимости от свойств жидкости заключается в определении функциональной зависимости радиуса кавитационного пузырька R от времени t , амплитуды звукового давления p и реологических свойств жидкости \mathbf{P} :

$$R = f(t, p, \mathbf{P}).$$

Искомая функциональная зависимость определяется на основании анализа полученного уравнения динамики одиночного пузырька, учитывающего зависимость вязкости жидкости от скорости сдвига:

$$\rho \left(\frac{3}{2} \dot{R}^2 + R \ddot{R} \right) = p(R) - p_\infty + \int_R^\infty \left(-\frac{2R^2 \dot{R}}{r^3} \right) \frac{\partial \varphi(\sqrt{I_2})}{\partial r} dr \quad (1)$$

где R – мгновенный радиус кавитационного пузырька, м, $p(R)$ – давление жидкости вблизи стенок кавитационного пузырька, Па, p_∞ – мгновенное значение звукового давления, Па, $\sqrt{I_2}$ – евклидова норма тензора скоростей деформации, c^{-1} , φ – некоторая функция, определяющая зависимость вязкости жидкости μ от скорости сдвига, Па·с, при этом $\mu = \frac{\varphi(\sqrt{I_2})}{2}$.

Уравнение (1) получается в результате интегрирования уравнения сохранения импульса в дифференциальной форме по объёму жидкости, обтекающей кавитационный пузырёк. Интегрируемое уравнение сохранения импульса учитывает наличие произвольной зависимости вязкости жидкости от скорости сдвига, представляющей собой евклидову норму тензора скоростей деформации $\sqrt{I_2}$.

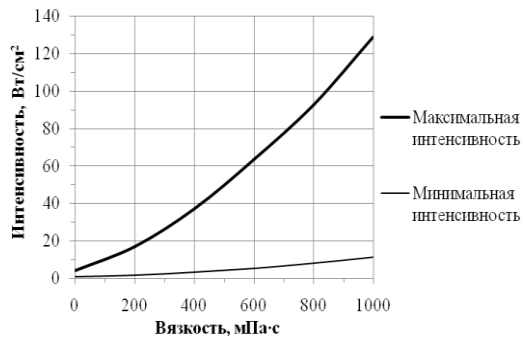
Функция φ определяется тремя параметрами, характеризующими реологические свойства жидкости: начальная вязкость μ (Па·с), показатели консистенции K (Па·с^N) и нелинейности N .

Поскольку, известно, что поверхностное натяжение жидкости оказывает незначительное влияние на максимальный радиус пузырька, то при анализе формирования кавитационной области его допустимо не учитывать, принимая равным 0,072 Н/м, [1-3]. Плотность большинства жидкостей варьируется в достаточно узком диапазоне (900...1200 кг/м³) и также не оказывает значительного влияния на кавитационный процесс.

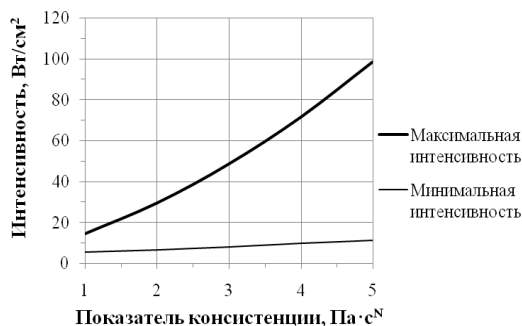
Поэтому основное внимание в работе было уделено исследованию влияния реологических свойств жидкости на оптимальные режимы воздействия.

При этом в зависимости от реологических свойств жидкости подразделяются на *линейно-вязкие* (вязкость не зависит от скорости сдвига), *псевдопластические* (вязкость уменьшается с ростом скорости сдвига) и *дилатантные* (вязкость увеличивается с ростом скорости сдвига). Полученные далее результаты приведены для всех трех типов жидкостей.

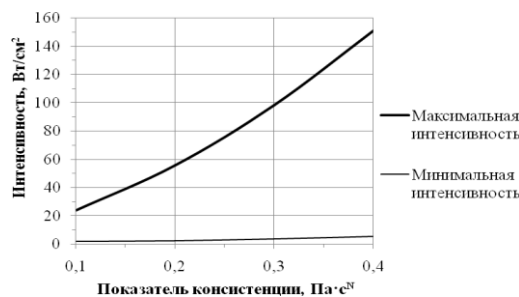
Анализ динамики одиночного пузырька позволил выявить допустимый диапазон интенсивностей, в котором необходимо осуществлять УЗ воздействие, в зависимости от начальной вязкости, показателя консистенции K и нелинейности N жидкости (рис. 1).



а) линейно-вязкие



б) псевдопластические (показатель нелинейности $N=0,1$, начальная вязкость – 1 Па·с)



в) дилатантные (показатель нелинейности $N = 0,15$, начальная вязкость 0,1 Па·с)

Рис. 1. Зависимости граничных интенсивностей воздействия от реологических свойств жидкостей

При минимальной интенсивности, определяемой с помощью данных зависимостей, кавитация только начинает зарождаться (скорость схлопывания стенок пузырька достигает скорости звука в чистой жидкости), а при максимальной – схлопывание пузырьков практически не происходит (отсутствие схлопывания в течении 5-ти периодов первичной УЗ волны и более с момента первоначального расширения пузырька).

Как следует из представленных зависимостей, ширина диапазона допустимых интенсивностей воздействия может превышать 100 Вт/см².

Таким образом, теоретический анализ динамики одиночного пузырька является недостаточным для выявления оптимальных режимов и условий воздействия, поскольку при граничных интенсивностях энергия ударных волн, создаваемых совокупностью пузырьков, оказывается также близкой к нулю, и, следовательно, эффективность обработки будет ничтожной.

Очевидно, что в данном диапазоне существует более узкий диапазон оптимальных интенсивностей, при которых эффективность кавитации будет максимальной. Чтобы выявить этот диапазон интенсивностей, необходимо исследование формирования ансамбля кавитационных пузырьков, поскольку энергия кавитационного воздействия определяется суммарной энергией ударных волн, образуемых каждым отдельно взятым кавитационным пузырьком.

АНАЛИЗ ФОРМИРОВАНИЯ АНСАМБЛЯ ПУЗЫРЬКОВ ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ИНТЕНСИВНОСТЕЙ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Анализ совокупности кавитационных пузырьков проводится в области с характерными размерами L , много меньшими длины УЗ волны λ , но много большими радиуса кавитационного пузырька R :

$$\lambda \gg L \gg R.$$

Это позволяет выявить зависимости концентрации n (m^{-3}) и объёмного содержания δ кавитационных пузырьков (индекса кавитации) от амплитуды звукового давления, времени и реологических свойств жидкости P .

$$\delta(t, p, P) = \frac{4}{3} \pi R^3 n(t, p, P)$$

Зависимости концентрации кавитационных пузырьков выявляются на основании уравнения кинетики дробления и коалесценции пузырьков, полученного Маргулисом [8].

Найденные зависимости объёмного содержания кавитационных пузырьков от времени составляют основу для дальнейшего определения коэффициента поглощения, который пропорционален суммарной энергии ударных волн и служит мерой эффективности кавитационного воздействия [9].

При этом коэффициент поглощения в кавитирующей среде определяется на основании следующего полученного выражения:

$$K_* = -\frac{\omega}{c_0} \operatorname{Im} \frac{\rho_0 c_0^2 \bar{\delta}_1}{p_1},$$

где \bar{p}_1 и $\bar{\delta}_1$ – комплексные амплитуды 1-х гармоник давления (Па) и объёмного содержания среды соответственно, ω – частота колебаний акустического излучателя в жидкой среде, c^{-1} , ρ_0 – равновесная плотность жидкой фазы, kg/m^3 , c_0 – скорость звука в чистой жидкости, м/с.

Зависимости коэффициента поглощения от интенсивности воздействия для жидкостей с различными реологическими свойствами приведены на рис. 2.

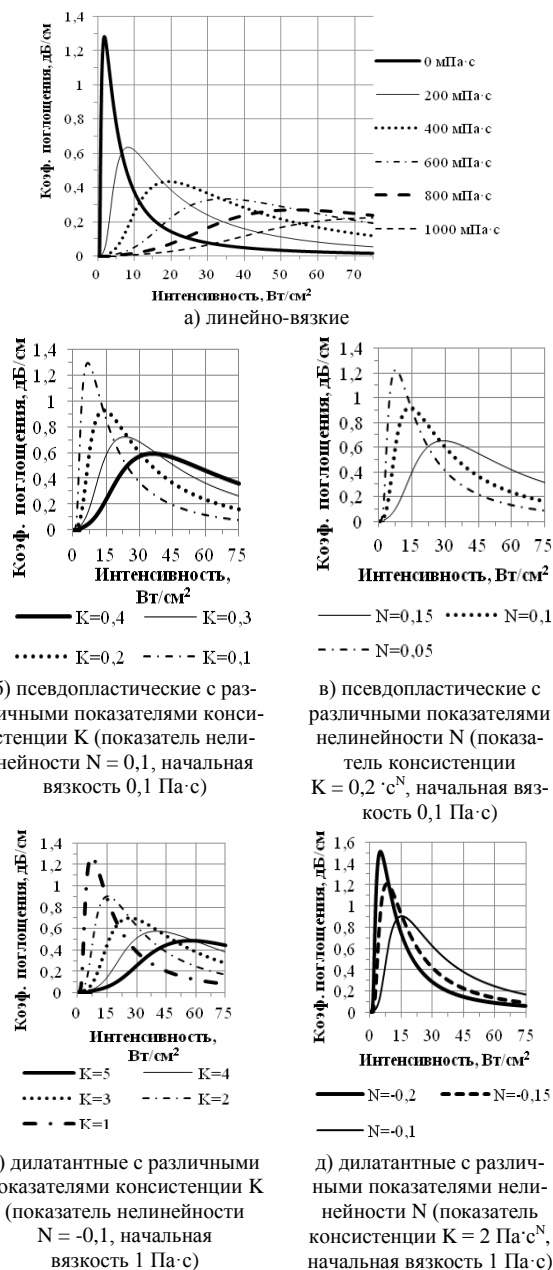


Рис. 2. Зависимости коэффициента поглощения от интенсивности воздействия для жидкостей с различными реологическими свойствами

Зависимость коэффициента поглощения от интенсивности воздействия имеет экстремальный характер, и положение максимума определяет оптимальную интенсивность УЗ воздействия, поскольку в данном случае достигается максимальная степень трансформации энергии первичной УЗ волны в энергию ударных волн, создаваемых кавитационными пузырьками. Таким образом, при оптимальной интенсивности достигается максимальный КПД УЗ кавитационного воздействия. Зависимости минимальной, максимальной и оптимальной интенсивностей воздействия для линейно-вязких жидкостей приведены на рис. 3.

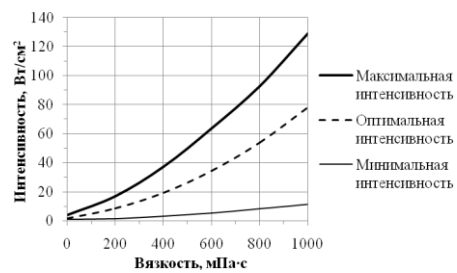
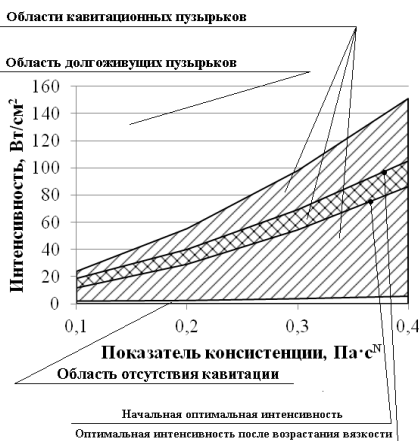


Рис. 3. Зависимости максимальной, минимальной и оптимальной интенсивностей воздействия для линейно-вязких жидкостей

Следует отметить, что в случае нелинейно-вязких жидкостей зависимость оптимальной интенсивности от параметров характеризующих их реологические свойства, представляет собой некоторый диапазон. Это обусловлено изменением их реологических свойств в процессе обработки за счёт релаксации вязкости. Зависимости диапазона оптимальных интенсивностей для неньютоновских жидкостей приведены на рис. 4.



а) для псевдопластических жидкостей (показатель нелинейности N = -0,1)



б) для дилатантных жидкостей (показатель нелинейности N = 0,1)
Рис. 4. Зависимости граничных интенсивностей воздействия от реологических свойств неньютоновских жидкостей

Как следует из рис. 4, в процессе воздействия оптимальная интенсивность снижается на 5...20 Вт/см² для псевдопластических жидкостей, в то время как для дилатантных жидкостей ввиду их возрастания вязкости под воздействием УЗ

интенсивность увеличивается на 5...15 Вт/см². Это обуславливает необходимость подстройки выходной мощности УЗ аппарата в процессе обработки.

В табл. 1 приведены значения оптимальных интенсивностей воздействия для различных жидкостей, используемых на практике. Указанные в таблице значения получены с использованием зависимостей, приведенных на рис. 2.

Табл. 1. Значения оптимальных интенсивностей воздействия для жидкостей, используемых на практике

Наименование жидкости	Начальная вязкость, Па·с	K, Па·с ^N	N	Оптимальная интенсивность, Вт/см ²	Оптимальный размах, мкм
Вода	0,00082	0	0	1,73	0,7
Оливковое масло	0,085	0	0	4,51	1,7
Моторное масло ПМС-400	0,4	0	0	19,25	7,4
Глицерин	0,6	0	0	34,4	13,3
Эпоксидная смола ЭД-5	3	5	-0,15	19,95...24,77	7,7...9,6
Трехфункциональный олигоэфирциклокарбонат на основе окиси пропилена	4	5	-0,2	11,92...23,4	4,6...9,03
Водоугольная суспензия (массовая конц. 20%)	0,1	0,1	0,1	13,74...18,74	5,3...7,2

Представленные результаты могут быть в непосредственном виде использованы для выбора мощностных режимов работы ультразвукового оборудования, при известных реологических свойствах обрабатываемой жидкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведенных исследований впервые предложен подход к выявлению оптимальных режимов ультразвукового воздействия, основанный рассмотрении формирования кавитационной области, как единого целого. При этом разработанная феноменологическая модель формирования кавитационной области впервые учитывает основные эффекты и явления, происходящие внутри самой области:

- коалесценцию пузырьков при радиальных колебаниях и дробление при схлопывании;
- влияние зависимости вязкости жидкости от скорости сдвига на динамику одиночного пузырька.
- релаксацию вязкости жидкости с течением времени под воздействием кавитации.

Анализ модели позволил выявить оптимальные интенсивности ультразвукового воздействия, необходимые для создания развитой кавитации в различных по реологическим свойствам жидкостях. Установлено, что оптимальные интенсивности воздействия для большинства жидкостей, используемых на практике, не превышают 40 Вт/см², однако для дилатантных жидкостей с показателем нелинейности 0,15 и более

интенсивность воздействия может достигать 100 Вт/см².

Определено, что за счёт релаксации вязкости происходит изменение оптимальной интенсивности для неньютоновских жидкостей с течением времени. Ширина диапазона изменения интенсивности достигает 20 Вт/см².

Полученные результаты могут быть использованы для определения интенсивности УЗ воздействия обеспечивающей максимальную эффективность обработки жидкостей с известными реологическими свойствами.