

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ ОСВОЕНИЯ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Р.Н. Голых, В.Н. Хмелёв, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов, В.Д. Минаков
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, г. Бийск

Статья посвящена использованию ультразвуковых колебаний для решения задач, возникающих при эксплуатации механизмов, стационарных конструкций, обработке жидкодисперсных сред для создания новых материалов, горных работах и осуществлении множества различных процессов при экстремально низких температурах. Существует 3 направления исследований энергоэффективного использования ультразвука для решения этих задач. В рамках первого направления исследований предложен и теоретически обоснован способ управления свойствами и типом среды в режиме реального времени при ультразвуковом воздействии. Установлено, что при взаимодействии ультразвукового излучателя с твердыми материалами модуль упругости твердой среды оказывает наиболее существенное влияние на косинус угла фазового сдвига между силой и скоростью перемещения. Оценивается, что при воздействии жидких сред целесообразно рассматривать не метод измерения вязкости, а разработать критерий опережающей кавитации при текущей вязкости. В рамках второго направления исследований предложены модели преобразования структуры среды со сплошной жидкой фазой под действием ультразвуковых колебаний. Для практической реализации оптимального влияния, в итоге, в рамках третьего направления исследований разработаны критерии оптимальности оцениваемых режимов воздействия на электрический импеданс ультразвуковой колебательной системы, нагруженной на обрабатываемую среду.

Ключевые слова: ультразвук, вязкость, преобразование жидких сред.

ВВЕДЕНИЕ

Эксплуатация механизмов, стационарных конструкций, обработка жидко- дисперсных сред при создании новых материалов, добыча полезных ископаемых и реализация множества различных процессов в условиях экстремально низких температур связана с множеством проблем, основными из которых являются следующие: начальные напряжения в материалах из-за тепловых деформаций в результате перепада температур и изменения упругих свойств при низких температурах; высокая вязкость жидких сред при низких температурах; образование паразитного обледенения за счёт конденсации водяного пара на поверхностях конструкций.

Воздействие ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности позволяет решать множество из числа указанных проблем, а именно:

- получать материалы с увеличенным отношением предела прочности к модулю упругости, что позволяет уменьшить начальные напряжения при перепадах температур за счёт тепловых деформаций (речь идёт о композиционных материалах, технология получения которых дополняется ультразвуковым воздействием на смесь связующего с наполнителем, которое реструктурирует связи в макромолекулах и диспергирует частицы наполнителя);

- снижать вязкость жидкостей (нефтяные дисперсные системы, полимеры и т. д.) за счёт разрушения молекулярных связей;

- разрушать паразитное обледенение за счёт возбуждения высокочастотных колебаний конструкции с малой амплитудой.

Как следует из опыта многолетнего практического применения, ультразвуковое воздействие с режимами, способными реализовать перечисленные процессы, имеет большей частью деструктивный характер. Т.е. позволяет обеспечивать введение в вещество энергию высокой плотности, которая способна преодолеть потенциальный барьер разрыва межатомных и межмолекулярных связей.

Основные направления исследования для наиболее эффективной реализации ультразвукового воздействия описаны далее.

НАПРАВЛЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Воздействие на твёрдые тела характеризуется тем, что напряжения, возникающие в твёрдых телах под действием ультразвука, зависят от градиента деформации (относительной деформации). Когда речь идёт о тонких покрытиях, при амплитуде ультразвуковых колебаний даже 40 мкм напряжения в веществе покрытия достигают предела прочности для льда –

$$h = E \frac{A}{\sigma_{\max}} = 3 \text{ ГПа} \cdot \frac{40 \text{ мкм}}{12 \text{ МПа}} = 1 \text{ см}$$

где h – максимальная толщина слоя, которая может быть разрушена ультразвуковыми колебаниями, м; E – модуль Юнга вещества слоя, Па; A – амплитуда ультразвуковых колебаний, м.

Таким образом, линейное ультразвуковое воздействие в твёрдых веществах способно реализовывать процессы деструкции.

В жидких средах напряжения определяет скорость деформации. При этом, для достижения напряжений, способных разорвать межатомные и межмолекулярные связи в жидкости [1], необходимо, согласно закону Бернулли, обеспечить амплитуды скоростей движения до 1000 м/с. Эту скорость невозможно создать линейными акустическими волнами. Однако жидкость не является идеально сплошной, поэтому в жидкости в определённом диапазоне интенсивностей первичной ультразвуковой волны возникают кавитационные явления [2–4]. Поэтому для реализации процессов в жидких средах, предназначенных для решения физико-технических проблем в условиях экстремально низких температур, необходимо максимально эффективно использовать, в отличие от твёрдых тел, нелинейную составляющую ультразвукового воздействия – кавитацию.

Возникающие напряжения в твёрдом теле и интенсивность кавитационных явлений в жидкости зависят не только от режимов и условий ультразвукового воздействия, но и от свойств вещества. Свойства вещества, в свою очередь, зависят от времени воздействия и перепадов температур (диапазон перепадов температур в течение года на территориях от 60 до 70 градусов северной широты может превышать 100 °С). Поэтому однозначно предсказать свойства вещества, которые будут иметь место быть к моменту ультразвукового воздействия, невозможно. В связи с этим сформулировано **первое направление исследований** для эффективного применения ультразвука с целью решения физико-технических проблем Севера – контроль свойств и типа среды (автоматическое детектирование) в режиме реального времени при осуществлении УЗ воздействия.

В таком случае, при непрерывном определении свойств среды возможно обеспечить воздействие с максимальной энергетической эффективностью (передать среде как можно большую долю энергии акустической волны после вычета паразитного нагрева). Далее следует проводить исследования в рамках второго направления – исследование влияния режимов ультразвукового воздействия на разрушение межатомных и межмолекулярных связей в среде. Поскольку оптимальные режимы воздействия необходимо поддерживать непрерывно и подстраивать режимы воздействия под текущие свойства среды, то для эффективной реализации процесса необходимо проводить исследования в третьем направлении – выработка критерия оптимальности режимов воздействующего ультразвука для электрических параметров ультразвукового излучателя.

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СРЕДЫ В ТЕЧЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В рамках первого направления исследований был использован подход, ранее предложенный авторами для обработки жидких сред – контроль параметров сред по изменению импедансных характеристик излучателя без использования внешних датчиков при наложении акустической нагрузки в виде озвучиваемой среды. Подход основан на методе электромеханических аналогий, который заключается в том, что ультразвуковой излучатель представляется в виде эквивалентной электрической схемы, содержащей три параллельно соединённые ветви [5]: ветвь, состоящая из одной ёмкости, обусловленной диэлектрическими потерями в первичном пьезопреобразователе; электрическая ветвь, состоящая из последовательно соединённых ёмкости, индуктивности и активного сопротивления, обусловленная резонансными свойствами и потерями в первичном пьезопреобразователе; механическая ветвь, состоящая из последовательно соединённых ёмкости, индуктивности и активного сопротивления, обусловленная резонансными свойствами системы «ультразвуковой концентратор – рабочий инструмент – грунт» и внутренним трением в этой системе.

Для воздействия в условиях низких температур с резкими перепадами при разработке метода был произведён дополнительный учёт изменения ёмкости диэлектрических потерь и проведены исследования влияния свойств среды на импеданс механической ветви.

Полученные теоретические зависимости свидетельствуют, что существенное влияние на косинус угла сдвига фаз между силой и скоростью смещения оказывает модуль упругости твёрдой среды. при размахе колебаний 6 мкм косинус угла сдвига фаз уменьшается почти в 2 раза при увеличении модуля упругости с $1 \cdot 10^{10}$ до $5 \cdot 10^{10}$ Па.

Основное свойство жидкой среды, влияющее на интенсивность возникающей кавитации – это вязкость. Однако высокомолекулярные жидкости, обработка которых актуальна в северных условиях, имеют свойство изменять вязкость с течением времени, а также их вязкость зависит от скорости сдвига. Поэтому, для жидких сред целесообразно рассматривать не способ измерения вязкости, а выработать критерий развитости кавитации для текущей вязкости. Предложена модель формирования кавитационной области в жидкости с учётом её неньютоновских свойств [3], поскольку, к примеру, нефть, добываемая в северных территориях, является неньютоновской жидкостью [6]. Динамика одиночного пузырька описывается полученным уравнением

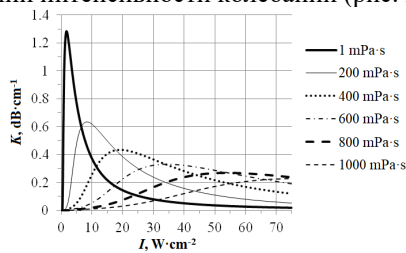
$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 = H - \frac{4\mu_0}{3\rho_\infty} \frac{d(R^3)}{dt}$$

$$\int_{r_0}^{\infty} \left(\frac{d}{dr} + \frac{3}{r} \right) \left[\frac{1}{r^3} \left(1 + \left(\frac{\kappa}{2\mu_0} \right)^{\text{sgn} \cdot N} \frac{6^{\frac{|N|}{2}} \left| \frac{d(R^3)}{dt} \right|^{|N|}}{3r^{3|N|}} \right)^{\text{sgn} \cdot N} \right] dr ;$$

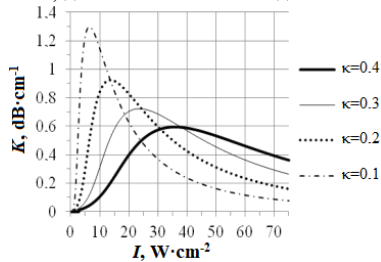
где R – радиус кавитационного пузырька, м; H – энтальпия жидкости, $\text{м}^2 \cdot \text{с}^{-2}$; ρ_∞ – плотность жидкости, $\text{кг} \cdot \text{м}^{-3}$; D – тензор деформаций; μ_0 – вязкость жидкости, при скорости сдвига, стремящейся к нулю, Па·с; κ – показатель консистенции жидкости, Па·с $^{N+1}$; N – показатель нелинейности жидкости.

Получены зависимости энергетической эффективности кавитации от интенсивности ультразвуковых колебаний (рис. 1).

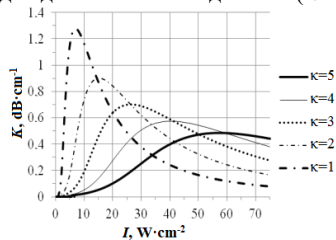
Путём численных экспериментов установлено, что максимальная энергетическая эффективность кавитации достигается в тот момент, когда волновое сопротивление практически постоянно при увеличении интенсивности колебаний (рис. 2).



а) для линейно-вязких жидкостей

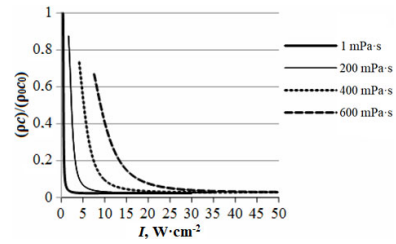


б) для дилатантных жидкостей ($N=0.1$)

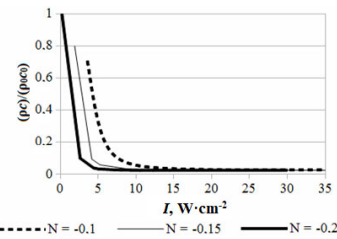


с) для псевдопластических жидкостей ($N=-0.1$)

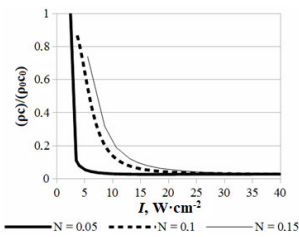
Рис. 1. Зависимости коэффициента поглощения (вызванного кавитацией) ультразвуковых колебаний от интенсивности первичной ультразвуковой волны



д) для линейно-вязких жидкостей



е) для дилатантных жидкостей ($N=0.1$)



ф) для псевдопластических жидкостей ($N=-0.1$)

Рис. 2. Зависимости волнового сопротивления кавитирующей жидкости от интенсивности первичной ультразвуковой волны

В свою очередь, волновое сопротивление может быть определено в режиме реального времени на основании контроля импедансных характеристик излучателя.

УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА МЕЖМОЛЕКУЛЯРНЫЕ И МЕЖАТОМНЫЕ СВЯЗИ В СРЕДЕ

В процессе кавитации большая часть энергии преобразуется в тепло, максимальная энергоэффективность кавитации не гарантирует максимальную энергоэффективность процесса преобразования структуры среды. Поэтому в рамках второго направления исследований были предложены модели трансформации структуры среды со сплошной жидкой фазой под действием ультразвуковых колебаний. В основе моделей лежит общее кинетическое уравнение изменения структуры среды [3]:

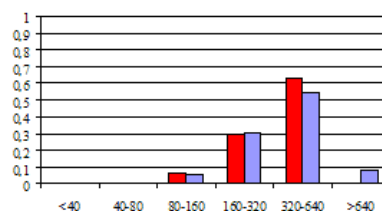
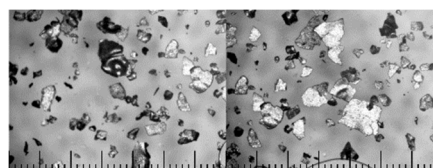
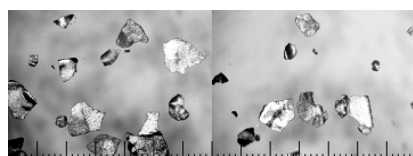
$$\frac{dC}{dt} = \sum_i \left(\sum_{j,k} \kappa(i,j,\kappa) \beta(j,\kappa; p(\mathbf{r},t)) C_j C_k - C_i \sum_j \beta(i,j; p(\mathbf{r},t)) C_j \right) \mathbf{e}_i + \sum_j (\lambda(i) \gamma(i+1, p(\mathbf{r},t)) C_{i+1} - \gamma(i, p(\mathbf{r},t)) C_i) \mathbf{e}_i$$

$$C(0) = C_0 ;$$

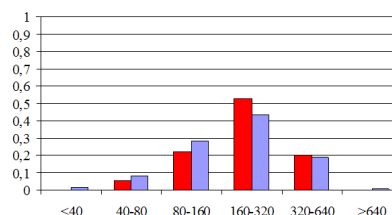
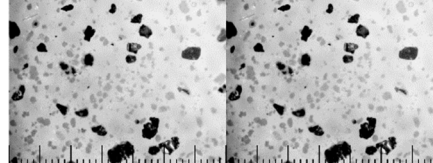
где τ время пребывания среды в локальном объеме, малом по сравнению с размером всего технологического объема, с; $p(\mathbf{r}, t)$ поле перепадов давления в жидкости, зависящее от микроскопических координат \mathbf{r} и времени t , Па; $\beta(j, k, p(\mathbf{r}, t))$ является вероятностью образования нового структурного элемента i -го типа при взаимодействии структурных элементов типов j и k , $\text{м}^3 \cdot \text{с}^{-1}$; C_i – концентрация структурных элементов среды i -го типа, м^{-3} ; $\kappa(i, j, k)$ является числом структурных элементов i -го типа, образованных в ходе элементарного акта взаимодействия пары структурных элементов j -го и k -го типов; $\gamma(i, p(\mathbf{r}, t))$ является вероятностью разрушения отдельного конструктивного элемента i -го типа внешним полем; $\lambda(i)$ – количество структурных элементов i -го типа, образовавшихся при разрушении структурного элемента $(i+1)$ -го типа.

Для процесса кавитационного диспергирования с помощью моделей были получены гистограммы фракционного состава суспензий. Полученные зависимости фракционного состава частиц подтверждаются экспериментальными данными, которые также указывают на наличие оптимальной интенсивности при одинаковом суммарном потреблении энергии (произведение интенсивности колебаний на время воздействия есть константа) (рис. 3).

Детальные расчеты для других процессов (например, ультразвуковой механодеструкции макромолекул) показали, что интенсивность ультразвукового воздействия, обеспечивающая максимальную энергетическую эффективность преобразования структуры среды, отличается от интенсивности, обеспечивающей максимальную энергоэффективность кавитации, на поправочный коэффициент, который зависит от типа процесса (для механодеструкции макромолекул – 0,63; и для диспергирования твердых частиц – 1,75).



После ультразвукового диспергирования без оптимизации (I (интенсивность) = 2 Вт/см² t (время) = 30 мин)



После ультразвукового диспергирования с оптимизацией ($I=4$ Вт/см² $t=15$ мин)

Рис. 3. Фракционный состав суспензии алюминия (сверху – микрофотография (цена деления 100 мкм); снизу – гистограммы (абсцисса – диапазон размеров частиц, мкм; ордината – массовая доля))

Теоретически выявленные интенсивности, обеспечивающие максимальную энергетическую эффективность преобразования структуры среды, подтверждены экспериментальными исследованиями [3].

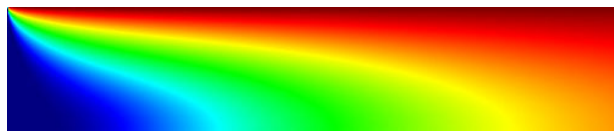
ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для практической реализации оптимального воздействия, в конечном итоге, выработаны критерии оптимальности выявленных режимов воздействия для электрического импеданса ультразвуковой колебательной системы, нагруженной на обрабатываемую среду. Критерий основан на активном сопротивлении механической ветви эквивалентной электрической схемы ультразвуковой колебательной системы. Максимум активного сопротивления – это максимальная активная акустическая нагрузка (например, кавитация). Однако для жидкости интенсивность, обеспечивающая максимальное активное сопротивление, корректируется поправочным коэффициентом в

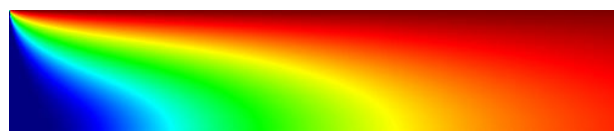
зависимости от процесса, поскольку основной проблемой является обеспечение максимальной энергетической эффективности формирования структуры среды, а энергия, необходимая для изменения структуры среды, мала по сравнению с общей акустической энергией.

Таким образом, проведённые исследования позволили создать ультразвуковое оборудование для воздействия на жидкие и твёрдые вещества, пригодное для работы при экстремально низких температурах и позволяющее решать широкий спектр физико-технических проблем Севера.

Современная тенденция потепления климата из-за накопления парниковых газов и накопления дымовых выбросов в глобальном масштабе, с одной стороны может в ближайшей перспективе поспособствовать автоматическому устранению обозначенных проблем. Однако данная ситуация является недопустимой, поскольку таяние мерзлот и ледников приводит к нарушению экологического баланса, активизации древних болезнетворных микроорганизмов и новым эпидемиям. Следует отметить, что ультразвуковое воздействие не только на жидкие и твёрдые, но и на газовые и на газодисперсные среды способно решить и данный вопрос. Теоретически и экспериментально доказано, что ультразвуковая интенсификация абсорбции способна не менее чем в 2 раза повысить эффективность поглощения парниковых газов и наиболее трудноулавливаемых дисперсных частиц жидкостью (рис. 4).



без ультразвука



с ультразвуком

Рис. 4. Распределение концентрации CO₂ в движущемся слое жидкости во время поглощения (жидкость перемещается слева направо; темно-синий - нулевая концентрация; темно-красный - максимальная концентрация)

Несмотря на то, что северные территории отличаются малой плотностью населения и соответственно, малым количеством промышленных предприятий (за исключением крупных по добыче и переработке полезных ископаемых и теплогенерирующих компаний), из-за циркуляции воздуха в атмосфере проблему отделения парниковых газов и дисперсных выбросов необходимо решать в глобальном масштабе (внедрять технологии

ультразвуковой очистки газов, исходящих от промышленных предприятий).

Кроме того, поскольку климат территорий от 60 до 70 градусов северной широты является засушливым в летний период, высок риск возникновения трудноустраиваемых лесных пожаров. Для защиты людей (в первую очередь, с хроническими заболеваниями органов дыхания) полностью очистить территорию населённого пункта от смога представляет собой технически нереализуемую задачу. Однако можно установить системы ультразвуковой очистки газа в вентиляционные каналы отдельных зданий (индивидуальные очистители), тем самым обеспечив безопасность людей.

Таким образом, применение ультразвуковых колебаний позволяет решать широкий круг задач освоения северных территорий.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследования воздействия ультразвука на высокомолекулярные соединения выполнены при поддержке гранта Президента РФ МК-5387.2021.1.1. Исследования воздействия ультразвука на твёрдые вещества для разрушения покрытий выполнены при поддержке гранта РФФИ № 20-21-00017 Росатом. Исследования возможности применения ультразвука для очистки газов выполнены при поддержке гранта РНФ № 22-29-00828.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бреннен С. Е. Кавитация и динамика пузырьков, 1995 (Оxford: издательство Оксфордского университета).
2. O'Neill B.E., Chang E., Yu N 2014 Возможное использование порога ультразвуковой кавитации для неинвазивной дифференциации кистозных масс Open Journal of Radiology 4 329
3. Голых Р. Н. 2020 Повышение эффективности воздействия ультразвуковых исследований на процессы в системе с жидкой фазой: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук (Бийск: Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета).
4. Голых Р. Н. 2021 Феноменологическое моделирование систем с непрерывной жидкой фазой для оптимального управления ультразвуковым кавитационным воздействием Journal of Physics: Conference Series 1889
5. Хмелёв В. Н., Барсуков Р. В., Генне Д. В., Шалунов А. В., Абраменко Д. С., Ильченко Е. В. 2011 Практические исследования метода косвенной проверки параметров Международной акустической конференции и семинара по микро/нанотехнологиям и электронным устройствам. EDM'2011: Материалы конференции 241
6. Муллакаев М.С., Прачкин В.Г., Асылбаев Д.Ф., Волкова Г.И. 2014 Изучение влияния ультразвуковой и термической обработки на реологические свойства нефти Усть-Тегусского месторождения Химическое и нефтяное машиностроение. 49, № 9–10, январь.

Голых Роман Николаевич – доктор технических наук, профессор, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grn@bti.secna.ru.

Хмелёв Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, Заслуженный Изобретатель Российской Федерации, заместитель директора по научной работе, Бийский

технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Барсуков Роман Владиславович – кандидат технических наук, начальник отдела научно-исследовательской работы сотрудников и преподавателей, доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru.

Цыганок Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО АлтГТУ, тел. (3854)432570, e-mail: grey@bti.secna.ru

Шалунов Андрей Викторович – д.т.н., профессор, заведующий каф. МСНА, Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО АлтГТУ им. И.И. Ползунова, тел. (3854)432571, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Минаков Вячеслав Дмитриевич – студент группы МИСТ-11 Бийского технологического института (филиала) ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова», тел.: +79833555916, Электронная почта: slava2926@mail.ru

APPLICATION OF ULTRASOUND TO SOLVING PHYSICAL AND TECHNICAL PROBLEMS OF THE DEVELOPMENT OF THE NORTHERN TERRITORIES

R.N. Golykh, V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, S.N. Tsyganok, A.V. Shalunov, V.D. Minakov

Biysk Technological Institute, Biysk

Abstract – The article is devoted to use ultrasonic vibrations to solve problems arising during the operation of mechanisms, stationary structures, the processing of liquid-dispersed media for the creation of new materials, mining and the implementation of many different processes at extremely low temperatures. There are 3 research directions for the energetically efficient using of ultrasound in order to solve these problems. As part of the first line of research, a method for controlling the properties and type of the medium in real time during ultrasonic exposure is proposed and theoretically justified. It is evaluated that when an ultrasonic radiator interacts with solid materials, the elastic modulus of a solid medium has the most significant effect on the cosine of the phase shift angle between the force and the displacement velocity. It is evaluated that when exposed to liquid media, it is advisable to consider not a method of measuring viscosity, but to develop a criterion for the advanced cavitation at the current viscosity. As part of the second line of research, models of transformation of the structure of a medium with a continuous liquid phase under the action of ultrasonic vibrations are proposed. For the practical realization of the optimal influence, in the end, within the framework of the third line of research, criteria for the optimality of the evaluated modes of exposure for the electrical impedance of an ultrasonic oscillatory system loaded on the treated medium have been developed.

Index terms: ultrasound, viscosity, liquid media conversion.

REFERENCES

1. Brennen C. E. 1995 Cavitation and Bubble Dynamics (Oxford: Oxford University Press)
2. O'Neill B. E., Chang E, Yu N 2014 Potential Use of Ultrasonic Cavitation Threshold to Non-Invasively Differentiate Cystic Masses Open Journal of Radiology 4 329
3. Golykh R. N. 2020 Increasing the effectiveness of the impact of ultrasound studies on processes in the body with a liquid phase: thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences (Biysk: Biysk Technological Institute of Altai State Technical University) In Russian
4. Golykh R. N. 2021 Phenomenological modeling of systems with continuous liquid phase for optimal control of ultrasonic cavitation influence Journal of Physics: Conference Series 1889
5. Khmelev V. N., Barsukov R. V., Genne D. V., Shalunov A. V., Abramenko D. S. and Ilchenko E. V. 2011 Practical Investigations of the Method of Indirect Parameter Checkout of the Acoustic International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices. EDM'2011: Conference Proceedings 241
6. Mullakaev M. S., Prachkin V. G., Asylbaev D. F., Volkova G. I. 2014 Study of the effect of ultrasonic and thermal treatment on rheological properties of oil in the Ust'-Tegusskoe field Chemical and Petroleum Engineering, Vol. 49, Nos. 9–10, January.

Golykh Roman Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor of the chair of methods and means of measurement and automation of BTI AltSTU, phone: +79231629327, E-mail: grn@bti.secna.ru

Khmelev Vladimir Nikolaevich – doctor of technical sciences, professor, Honored Inventor of the Russian Federation, Deputy Director for scientific work of BTI AltSTU, phone: +7 (3854) 43-25-81, E-mail: vnh@bti.secna.ru

Barsukov Roman Vladislavovich – Ph. D., associate professor of BTI AltSTU, phone +73854432570, E-mail: roman@bti.secna.ru

Tsyganok Sergey Nikolaevich – PhD in Technology, assistant professor, Biysk Technological Institute (branch) of the Altay State Technical University, (3854)432570, e-mail: grey@bti.secna.ru.

Shalunov Andrey Viktorovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department. MSIA, Biysk Technological Institute (branch) of ASTU named after I.I. Polzunova, tel. (3854) 432571, e-mail: shalunov@bti.secna.ru.

Minakov Vyacheslav Dmitrievich – student of mIST-11 group of BTI AltSTU, phone: +79833555916, E-mail: slava2926@mail.ru