ОБЕСПЕЧЕНИЕ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СРЕДАХ С ЖИДКОЙ ФАЗОЙ

В.Н. Хмелев¹, С.Н. Цыганок¹, Р.В. Барсуков¹, М.В. Хмелев²

¹ Бийский технологический институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова», г. Бийск

² ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», г. Бийск

Актуальность исследований обусловлена отсутствием единого подхода к обеспечению ультразвукового воздействия с максимальной эффективностью при реализации различных технологических процессов в жидкодисперсных средах. Целью исследований является выявление условий обеспечения оптимальных режимов реализации различных технологических процессов под действием ультразвуковых колебаний в средах с преимущественно жидкой фазой с учетом особенностей, связанных с формированием ультразвуковых колебаний, их введением в различные по свойствам среды и реализацией самого воздействия с максимальной эффективностью. В качестве объекта исследований выступают ультразвуковые технологические аппараты для воздействия в режиме «развитой» кавитации с целью интенсификации технологических процессов в дисперсных средах с преимущественно жидкой фазой. В результате исследований на основе анализа формирования «развитой» кавитации выявлены наиболее эффективные режимы формирования колебаний, их введения в обрабатываемые среды и обеспечения максимально эффективного кавитационного воздействия, обеспечивающего заданные преобразования структуры и свойств обрабатываемых сред при воздействии на ограниченные и «безграничные» технологические объемы, воздействию в режиме стоячей волны и воздействию в тонких слоях жидкости. Проведенные исследования позволили выработать и рекомендовать для практического применения общий алгоритм управления ультразвуковым воздействием при реализации технологических процессов в дисперсных средах с преимущественно жидкой фазой за счет непрерывного изменения в режиме реального времени частоты и уровня напряжения электронного генератора, питающего ультразвуковую колебательную систему.

Ключевые слова: Ультразвуковые колебания, ультразвуковая колебательная система, кавитация, дисперсная среда, жидкая фаза, ультразвуковое воздействие, алгоритм управления.

ВВЕДЕНИЕ

Высокоэнергетические воздействия на различные вещества и продукты – это основа реализации современных технологических процессов, позволяющих получать новые вещества и материалы или придавать известным материалам новых уникальных свойств. На сегодня одно из наиболее эффективных энергетических воздействий на различные процессы в жидких средах основано на применении механических (упругих) колебаний ультразвуковой (УЗ) частоты.

УЗ технологии сегодня решают множество проблем современных производств, таких как создание нанодисперсных, эмульсионных и стерильных материалов, получение высокооктановых бензинов, биодизелей, биологически активных веществ и многое другое). Сегодня уже многократно доказано, что реализация оптимального УЗ воздействия в каждой реализуемой технологии обеспечивает максимальную производительность получения конечных продуктов с требуемым качеством или позволяет осуществлять новые

процессы и получать такие материалы, которые не могут быть получены без УЗ воздействия [1].

Возможность обеспечения максимального по эффективности воздействия обусловлена рядом уникальных свойств УЗ колебаний, проявляющихся при их распространении в средах с жидкой фазой [2].

Наряду со способностью вносить в область воздействия значительной по величине энергии (обеспечение интенсивности I вводимых колебаний до 100 и более Вт/см²), ультразвуковое воздействие может осуществлять локальные разрывы жидкости с образованием кавитационных пузырьков, которые при формировании (расширении) запасают энергию (внутри пузырька создаются давления и температуры, достаточные для реализации термоядерных реакций), а при сжатии высвобождают ее в виде ударных волн или кумулятивных струй [3].

Анализ более чем столетнего применения УЗ технологий и повсеместное их применение сегодня позволяют сделать вывод о том, что УЗ технологические аппараты различных производителей, даже в равных условиях применения не обеспечивают одинаковой эффективности процессов (производительности и качества

получаемых продуктов). Кроме того, в связи с увеличением масштабов применения УЗ технологий, все чаще возникают ситуации, когда УЗ воздействие не позволяет достигать очевидного положительного эффекта при создании новых технологических процессов [4].

Обусловлено это наличием множества разнообразных подходов к организации и реализации воздействия УЗ колебаниями высокой интенсивности (кавитационный режим) в различных средах и условиях, а также в отсутствии реальных алгоритмов и критериев оптимизации УЗ воздействия при создании кавитации в различных процессах.

Таким образом, для обеспечения максимальной эффективности реализации УЗ технологий, необходимо предложить, разработать и реализовать принципы управления, способные обеспечить максимальную эффективность УЗ воздействия.

Далее рассмотрим последовательно условия и режимы работы ультразвуковых аппаратов при формировании колебаний, их введении в жидкие среды, создании кавитации и обеспечении кавитационного воздействия заданное время.

При реализации ультразвукового воздействия рабочее окончание колебательной системы должно находиться в обрабатываемой среде (условия в среде). Остальные элементы системы могут находиться как в среде, так и в окружающем пространстве (внешние условия). В таких условиях возникает необходимость создания УЗ колебаний.

СОЗДАНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Необходимость создания и введения УЗ колебаний заданной частоты и интенсивности в среды определяется решаемой при помощи УЗ воздействия задачей. Однако, прежде чем осуществлять воздействие на обрабатываемые среды, необходимо обеспечить формирование УЗ колебаний

Для создания колебаний применяются УЗ преобразователи, действие которых основано на использовании различных физических явлений, обеспечивающих преобразование какого либо вида энергии в энергию механических колебаний УЗ частоты некоего физического тела, называемого УЗ колебательной системой [5]. Наиболее эффективно (с максимальным КПД) формирование УЗ механических колебаний в преобразователях на основе пьезокерамических элемент ос (пьезокерамика) осуществляется за счет пьезоэлектрического эффекта [6]. Формирование УЗ колебания заданной амплитуды на определенной частоте осуществляется колебательной системой, схематично показанной на рис 1.

При этом амплитуда механических смещений поверхностей пьезокерамических элементов определяется величиной электрического поля, т.е. электрическим напряжением, прикладываемым к

противоположным поверхностям пьезоэлементов. К сожалению, амплитуда механических колебаний не может мгновенно достигать максимального значения, увеличиваясь постепенно с учетом резонансных свойств колебательной системы. Она также не может достигать беспредельных значений, имея вполне реальные ограничения по электрической и механической прочности пьезоматериала.

Рис. 1. Ультразвуковая колебательная система

Это выдвигает определенные требования, которые необходимо выполнять на этапе формирования колебаний с момента подачи электрического напряжения на электроды пьезоэлектрического элемента, обеспечивая необходимое нарастание амплитуды механических колебаний при условии совпадения частоты подаваемых электрических напряжений с непрерывно изменяющейся собственной резонансной частотой колебательной системы.

В зависимости от исходного состояния пьезоэлектрического материала и материалов самой колебательной системы, формирование колебаний необходимо осуществлять с учетом этих состояний. Так, при формировании УЗ колебаний пьезоэлектрическим преобразователем в условиях вакуума увеличение напряжения переменной частоты может привести к пробое пьезоматериала. При формировании колебаний системами, находящимися в условия низких и особенно абсолютно низких температур (до 4–10 К) может произойти механическое разрушение материалов. Поэтому, повышение напряжения в этом случае должно происходить постепенно, обеспечивая возврат номинальных пьезоэлектрических свойств, т.е. прогрев материала. Распространение колебаний во всех элементах и материалах УЗ колебательной системы (металлах) также должно обеспечивать возврат свойств этих материалов к свойствам при нормальных условиях. Формирование колебаний пьезоэлектрическими преобразователями при определенных температурах (выше температуры Кюри) принципиально невозможно, из-за отсутствия у материалов пьезоэлектрических свойств.

После безопасного вывода УЗ колебательной системы на номинальный рабочий режим формирования колебаний возникает необходимость дальнейшего повышения величины электрического напряжения, прикладываемого к электродам пьезопреобразователя. При достаточно высоком коэффициенте электромеханического преобразования (более 60%) современных пьезоматериалов наблюдаются значительные релаксационные потери, приводящие к повышению температуры пьезоэлементов и всей УЗ колебательной системы. Повышение температуры приводит к изменению свойств пьезоматериала, в частности, к снижению его эффективности (падению КПД преобразования) и к изменению резонансных свойств. При этом повышение электрического напряжения питания не приводит к линейному увеличению амплитуды механических колебаний, а потери на нагрев возрастают. При этом, может быть превышена температура разрушения пьезоэлектрических свойств (температура Кюри) и пьезокерамический материал теряет навсегда свои пьезоэлектрические свойства.

Из сказанного следует, что процесс формирования колебаний требует управления прикладываемым электрическим напряжением для стабилизации (ограничивая) потерь на нагрев и обеспечения постоянного соответствия частоты прикладываемого электрического напряжения собственной резонансной частоте УЗ колебательной системы. При несоответствии возникают дополнительные потери, усугубляющие процесс формирования колебаний.

Таким образом, при формировании непрерывных колебаний необходимо обеспечивать постепенное увеличение амплитуды механических колебаний, непрерывно контролируя и обеспечивая работу на резонансной частоте всей УЗ колебательной системы, с максимально возможным коэффициентом преобразования, не допуская превышения определенного уровня температуры (не более 50...70% от температуры Кюри) пьезоэлементов и возникающих при формировании колебаний механических напряжений (не более 50% от прочности материалов).

Аналогичным образом, при формировании разрывных (импульсных) колебаний необходимо обеспечивать заданное нарастание амплитуды механических колебаний, непрерывно контролируя и обеспечивая работу на резонансной частоте УЗ колебательной системы в течение импульсного воздействия, а затем уменьшать амплитуду до нулевых (или заданных) значений. При этом формирование импульсных колебаний следует рассматривать как особенный способ УЗ воздействия, поскольку такой способ обеспечивает реализацию уникальных условий воздействия – связанных с кратковременным введением больших энергий и

исключением, при определенных условиях, кавитационного процесса в жидкостях.

Сформированные УЗ колебания вводятся в различные среды, изделия, объекты при помощи рабочих инструментов, соединенных, с одной стороны, с колебательной системой, а с другой стороны, имеющих контакт с обрабатываемым объектом (рис. 1).

Только при создании необходимых и достаточных условий для длительной и эффективной работы колебательной системы – излучателя с заданной амплитудой УЗ колебаний – можно осуществлять воздействие объекты и среды.

ВВЕДЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ В СРЕДЫ

Состояние технологических сред, в которых реализуются необходимые для человека процессы, может быть различным. Поэтому условно разделяют ультразвуковое воздействие на воздействие на вещества по их агрегатному состоянию – газообразные, жидкие и твердые.

Наибольший интерес представляют УЗ воздействия на дисперсные среды с преимущественной жидкой фазой. Различные технологические среды с жидкой фазой могут очень существенно различаться по химическому составу, плотности, температуре; находиться при избыточном, в сравнении с атмосферным, давлении. В большинстве случаев жидкие фазы таких сред могут существенно отличаться вязкостью, скоростью распространения в них ультразвуковых колебаний, их затуханием, поверхностным натяжением, кавитационной прочностью и др.

Поскольку известно [6], что основное влияние на эффективность и скорость реализации технологических процессов в средах с жидкой фазой оказывает кавитация, то основная задача УЗ воздействия – необходимость обеспечения максимально эффективного кавитационного процесса. Эффективность процессов зависит от интенсивности УЗ воздействия, как показано на рис. 2, т.е. всегда имеет экстремальный характер.

Рис. 2. График зависимости скорости процесса от интенсивности

Поэтому возникает необходимость создания определенного кавитационного процесса в различных средах. Кроме того, когда говорится о различной кавитационной прочности жидких сред, то считается, что это могут быть обычные (классические), т.н. «ньютоновские» жидкости, в которых возможно формирование кавитационного процесса и вязкость не зависит от параметров воздействия. Но, поскольку они отличаются кавитационной прочностью, порог зарождения кавитации в них будет существенно отличаться. Например в водной среде кавитационный процесс будет стабильно формироваться при интенсивности около 1 Вт/см^2 , в маслах при 10 Вт/см^2 , а в эпоксидных смолах при $30\text{--}40 \text{ Вт/см}^2$.

Кроме таких классических жидкостей существует большое количество, так называемых «неньютоновских» жидкостей, в которых вязкость зависит от различных факторов воздействия на эти среды (рис. 3) и воздействие может изменять не только структуру, но и форму объема кавитирующей среды.

Рис. 3. Ультразвуковое воздействие на ньютоновскую (слева) и на неньютоновскую (справа) жидкости

Ранее считалось, что кавитационный процесс в таких жидкостях сформировать невозможно. Однако сегодня практически во всех подобных жидкостях удастся сформировать кавитационный процесс при относительно высоких интенсивностях УЗ воздействия (более 30 Вт/см^2).

Если в жидкой однородной среде находится еще одна или несколько жидких фракций или в жидкой среде находятся инородные частицы в другом агрегатном состоянии (газовом или твердом), такие среды относятся к жидкодисперсным средам. Размер, форма, состав наполнителей определяют свойства таких сред (вязкость, плотность и т.п.), поэтому эффективное УЗ воздействие для их обработки (диспергирование, эмульгирование, растворение, распределение, разделение наночастиц или нанотрубок) требует оптимизации воздействия с учетом непрерывного изменения свойств сред в процессе их обработки.

Воздействие в таких случаях осуществляется не только непосредственно на жидкие среды, но чаще, целью воздействий становится преобразование различных сред или объектов, находящиеся в них (твердые или жидкие частицы) или отделенных от излучателей жидкими промежутками (дегазация).

РЕАЛИЗАЦИЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В процессе реализации УЗ воздействия следует учитывать условия распространения УЗ колебаний в обрабатываемых средах, находящихся в различных по размерам и форме технологических объемах. В частности различные условия воздействия возникают в условно безграничных средах, разных по размерам слоях, имеющих собственные ограничения (отражатели) или даже в слоях, размеры которых меньше длины волны формируемых УЗ колебаний (рис. 4).

Рис. 4. Формирование ультразвуковых колебаний в слоях

В общем случае необходимо различать различные условия распространения УЗ колебаний:

- УЗ воздействие на безграничные технологические объемы, при использовании которых УЗ колебания распространяются без каких либо отражений, т.е. вся энергия распространяемых УЗ колебаний затрачивается на реализацию положительного действия – от возникновения и создания кавитационной области, в которой реализуется основной технологический процесс (кавитационное преобразование) с последующим УЗ воздействием в безкавитационном режиме (дегазация, активация бактерий, деимпульгирование и т.п.) до полного затухания колебаний;

- УЗ воздействие на ограниченные по размерам технологические объемы, в которых УЗ колебания распространяются с большим количеством безрезонансных или резонансных отражений. Когда реализуются безрезонансные условия отражений, происходит некоторое усреднение амплитуды колебаний, возникают зоны повышенной интенсивности и зоны отсутствия колебаний. Воздействие в таких случаях становится неэффективным;

- УЗ воздействие в резонансном режиме в ограниченных средах (при наличии твердого отражателя) при котором возможно формирование режима «стоячей» УЗ волны и повышение

амплитуды колебаний не менее чем в три раза. При этом вся энергия распространяемых УЗ колебаний затрачивается на реализацию положительного действия – создания кавитационной области, в которой реализуется основной технологический процесс (кавитационное преобразование). Максимальный положительный эффект такого воздействия достигается при реализации однородного кавитационного облака во всем резонансном промежутке;

– УЗ воздействие на ограниченный по размерам жидкостный промежуток реализуется при формировании УЗ колебаний в тонком слое жидкости, ограниченным газовой средой. В таком случае, УЗ воздействие формирует кавитационные пузырьки в жидкости вблизи колеблющейся поверхности. Формируемые парогазовые пузырьки взрываются в жидкой среде, формируя ударные волны. Ударные волны достигают границы с воздушной средой и формируют на поверхности жидкости (в газе) капиллярные поверхностные волны. Если вдоль сформированных волн (между гребнями) пропускать инородный газ – он будет очень эффективно поглощаться жидкостью. Так реализуются технологии поглощения вредных газов. Если энергия ударных волн на поверхности становится достаточной для формирования поверхностных волн, гребни которых фокусируют колебания и разрушаются, создавая и разбрасывая от поверхности жидкости частички жидкой среды. Причем размеры этих частиц определяются частотой колебаний, а производительность амплитудой колебаний и толщиной слоя;

– УЗ воздействие на жидкие среды в тонких слоях для исследования кавитационной прочности материалов и покрытий в кавитационном поле. Этот случай связан с необходимостью формирования максимального по содержанию парогазовых пузырьков кавитационного облака в тонком слое. В таком случае могут реализовываться некоторые псевдорезонансные условия, при которых возможно повышение насыщенности газом (энергонасыщенности слоя) до максимальных значений по кавитационной разрушительной эрозии.

В каждом отдельном случае возникает необходимость создания кавитационного процесса, обеспечивающее достижение поставленной цели с максимальным эффектом, т.е. управления процессом воздействия.

ПРИНЦИПЫ УПРАВЛЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ ВОЗДЕЙСТВИЕМ

Управление УЗ воздействием на жидкие или жидкодисперсные среды должно включать последовательность следующих действий.

1. Погружение УЗ излучателя или его части (рабочего инструмента) в обрабатываемую среду,

подключение его к электронному генератору и подача минимального питающего пьезоэлектрический преобразователь электрического напряжения.

2. Плавное увеличение при помощи электронного генератора величины питающего электрического напряжения и при одновременном изменении частоты в определенном диапазоне, соответствующем диапазону нахождения собственной резонансной частоты всей УЗ колебательной системы (предварительно установленному при сборке и испытаниях на измерительном стенде).

3. Непрерывный контроль механических колебаний УЗ колебательной системы до выявления момента соответствия частоты электрического питающего напряжения собственной частоте всей УЗ колебательной системы.

4. По мере увеличения питающего электрического напряжения при обеспечении соответствия частот питания и собственной частоты системы, увеличивается выход энергии из рабочего инструмента системы в обрабатываемую среду, т.е. начинается непосредственное УЗ воздействие на обрабатываемую среду. Поскольку среда начинает подвергаться УЗ воздействию, то в ней, в местах наличия каких-либо центров инициализации, начинают возникать разрывы жидкой среды в моменты прохождения зон разряджения УЗ колебаний. Фактически вокруг какого-либо зародыша (газовый пузырек, твердая субмикронная частица) формируется разрыв жидкой среды. В зоне отрицательных давлений УЗ колебаний этот пузырек начинает увеличиваться в размерах за счет диффузии в него растворенных в жидкости газов. Пузырек возрастает в размерах, запасая внутри себя энергию колебаний.

5. Кавитационные изменения обрабатываемой среды приводят к росту собственной рабочей частоты УЗ колебательной системы. Частота питающего электрического напряжения начинает не совпадать с собственной частотой УЗ колебательной системы, и резонансные колебания уменьшаются. Для компенсации потерь электронный генератор должен увеличивать амплитуду питающего напряжения.

6. Дальнейшее повышение питающего напряжения необходимо осуществлять только с учетом получаемой информации об изменениях собственной резонансной частоты УЗ колебательной системы. Такие изменения собственной частоты происходят непрерывно, поскольку количество кавитационных пузырьков постоянно возрастает, и в каждом из пузырьков происходит накопление энергии колебаний. Электронный генератор должен непрерывно увеличивать напряжение питания, одновременно изменяя частоту питающего напряжения для обеспечения накачки кавитационных пузырьков энергией по мере их роста (расширения).

7. Когда количество кавитационных пузырьков достигнет определенного значения (определенного индекса кавитации, зависящего от многих условий), плотность кавитационного облака перед излучающей поверхностью будет такова, что обрабатываемая среда будет обладать практически свойствами газа (парогазовых пузырьков в жидкости) и собственная резонансная частота УЗ колебательной системы, будет соответствовать ее собственной частоте в воздухе.

8. Поскольку возникновение, рост и разрушение кавитационных пузырьков являются основным действующим фактором, обеспечивающим диспергирование, эмульгирование, экстракцию, растворение, стерилизацию, гомогенизацию и т.п., т.е. обеспечение положительного эффекта УЗ воздействия, то необходимо обеспечивать непрерывную подачу электрической энергии на собственной частоте УЗ колебательной системы для поддержания кавитационного процесса в режиме «развитой» кавитации. Фактически создать такой режим, при котором осуществляется максимальное энергетическое воздействие на обрабатываемые среды (т.е. обеспечивается получение продукта требуемого качества с максимальной производительностью).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Практическая реализация различных технологических процессов под действием ультразвуковых колебаний в средах с преимущественно жидкой фазой, требует учета большого количества особенностей, связанных с формированием ультразвуковых колебаний, их введением в различные по свойствам среды и реализацией самого воздействия с максимальной эффективностью.

Необходимость обеспечения максимальной эффективности технологических процессов требует применения единых регламентированных принципов управления аппаратами, т.е. создания аппаратов, обеспечивающих оптимальное ультразвуковое воздействие за счет автоматической системы управления работой электронного генератора.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Росатом в рамках научного проекта № 20-21-00017.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Gong Jing. Study on deacidification process of waste internal combustion engine oil under the action of ultrasound // IOP Conf. Ser.: Earth Environ. – 2020. – Sci. 467 012046
- Seyed M., Mohsen M.-G., Roghayeh G.-G., Massoud M., Pedram Safarpoura S., Majid Z. Ultrasonic nano-emulsification – A review // Ultrasonics Sonochemistry. – 2019. – 52. – P. 88–105.
- Leong T.S.H., Manickam S., Martin G.J.O., Li W., Ashokkumar M. Applications of Ultrasonic Emulsification. In: Ultrasonic Production of Nano-emulsions for Bioactive Delivery in

Drug and Food Applications // Springer: Briefs in Molecular Science. – Springer, Cham. – 2018. – 36 p.

4. Рохлова М.В., Богуш В.И., Юшина Е.А. Основные направления применения акустической кавитации в производстве пищевых продуктов // E-Scio. – 2020. – № 6 (45). – С. 85–97.

5. Жарова В.Д. Применение ультразвуковых технологий при очистке изделий машиностроения // Научное знание современности. – 2019. – № 1 (25). – С. 29–33.

6. Zhengwei Li, Zhiwu Xu, Degang Zhao, Shu Chen, Jiuchun Yan. Ultrasonic cavitation at liquid/solid interface in a thin Ga-In liquid layer with free surface // Ultrasonics – Sonochemistry. – 2021. – V. 71. – 105356. – P. 1–13.

7. Fuentes-Garcia J. A., Santoyo-Salzar J., Rangel-Cortes E., Goya G.F., Cardozo-Mata V., Pescador-Rojas J.A. Effect of ultrasonic irradiation power on sonochemical synthesis of gold nanoparticles // Ultrasonics – Sonochemistry. – 2021. – V. 70. – 105274. – P. 1–8.

8. Bulychev N.A. Application of optical spectroscopy for investigation of synthesis of hydrogen and nanoparticles in electric discharge in liquid-phase media // International journal of hydrogen energy. – 2021. – V. 46 (1). – P. 61–65.

9. Нигметзянов Р.И., Казанцев В.Ф., Приходько В.М., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Повышение эффективности ультразвуковой жидкостной обработки путем активации энергии кавитационных кластеров // СТИН. – 2019. – № 3. – С. 19–23.

10. Голых Р.Н., Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Цыганок С.Н. Ультразвук. Воздействие на системы с несущей жидкой фазой: монография. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2018. – 276 с.

11. Голых Р.Н., Хмелёв В.Н., Шалунов А.В., Боброва Г.А., Нестеров В.А., Титов Г.А., Доровских Р.С. Моделирование формирования кавитационной области для определения режимов воздействия, обеспечивающих максимально эффективное изменение свойств веществ и материалов // Научно-технический вестник Поволжья. – 2017. – № 5. – С. 88–90.

12. Свиридов Д.П., Семёнов И.А., Сучков Д.Н., Ульянов Б.А. Оценка энергетической эффективности процесса кавитационного измельчения // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52. – № 3. – С. 103–105.

13. Maeda K., Colonius T., Kreider W., Maxwell A., Cunitz B., Bailey M. Modeling and experimental analysis of acoustic cavitation bubbles for Burst Wave Lithotripsy // Journal of physics. Conference series. – 2015. – Vol. 656. – 0120027. – P. 1–4.

14. Mamvura T.A., Iyuke S.E., Paterson A.E. Energy changes during use of high-power ultrasound on food grade surfaces // South African Journal of Chemical Engineering. – 2018. – V. 25. – P. 62–73.

15. Голых Р.Н., Хмелёв В.Н., Барсуков Р.В. Моделирование развития кавитации в жидкостях вблизи фазовых переходов // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 6 (34). – С. 247–254.

16. Пьезоэлектрическая керамика: принципы применения / Пер. с англ. С.Н. Жуков. – Мн. ООО «ФУ Аинформ», 2003. – 112 с.

17. Brujan E.A., Williams P.R. Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids // Rheology reviews. – The British Society of Rheology. – 2005. – P. 147–172

18. Khmelev S.S., Khmelev V.N., Golykh R.N. Evaluation of Optimum Modes and Conditions of Ultrasonic Cavitation Influence on High-Viscous and Non-Newtonian Liquid Mediums // Romanian Journal of Acoustics and Vibration. – 2015. – Iss. 1. – P. 20–28.

19. Vachaparambil K.J., Einarsrud K.E. Explanation of Bubble Nucleation Mechanisms: A Gradient Theory Approach // Journal of The Electrochemical Society. – 2018. – V. 165 (10). – P. 504–512.

20. Голых Р.Н., Боброва Г.А., Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Генне Д.В., Абраменко Д.С., Шакура В.А., Титов Г.А., Ильченко Е.В. Влияние длительности ультразвукового импульса на пороговую интенсивность колебаний, приводящую к возникновению кавитации в жидкостях различной вязкости // Южно-Сибирский научный вестник. – 2020. – № 2 (30). – С. 57–61.

Хмелев Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры методов и средств измерений и автоматизации, заместитель директора по науке Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, тел. (3854)432570, e-mail: vnh@bti.secna.ru

Цыганок Сергей Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, тел. (3854)432570, e-mail: grey@bti.secna.ru

Барсуков Роман Владиславович – кандидат технических наук, доцент кафедры методов и средств измерений и автоматизации Бийского технологического института Алтайского государственного технического университета, тел. (3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru

Хмелев Максим Владимирович – директор ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ» тел. (3854)432570, e-mail: maxx@u-sonic.ru

ENSURING THE MAXIMUM EFFICIENCY OF ULTRASONIC TECHNOLOGIES IN MEDIA WITH A LIQUID PHASE

V.N. Khmelev¹, S.N. Tsyganok¹, R.V. Barsukov¹, M.V. Khmelev²

¹ Biysk Technological Institute (branch) of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Altai State Technical University named after I.I. Polzunova", Biysk

² LLC "Center of Ultrasonic Technologies AltGTU", Biysk

Abstract – The relevance of research is due to the lack of a unified approach to providing ultrasonic exposure with maximum efficiency in the implementation of various technological processes in liquid-dispersed media. The aim of the research is to identify the conditions for ensuring optimal modes for the implementation of various technological processes under the action of ultrasonic vibrations in media with a predominantly liquid phase, taking into account the peculiarities associated with the formation of ultrasonic vibrations, their introduction into media of different properties and the implementation of the action itself with maximum efficiency. The object of research is ultrasonic technological devices for exposure in the "developed" cavitation mode in order to intensify technological processes in dispersed media with a predominantly liquid phase. As a result of studies based on the analysis of the formation of "developed" cavitation, the most effective modes of formation of oscillations, their introduction into the processed media and provision of the most effective cavitation effect, providing the specified transformations of the structure and properties of the processed media when exposed to limited and "unlimited" technological volumes, exposure in a standing wave mode and exposure to thin layers of liquid. The studies carried out made it possible to develop and recommend for practical application a general algorithm for controlling ultrasonic action in the implementation of technological processes in dispersed media with a predominantly liquid phase due to a continuous change in real time of the frequency and voltage level of the electronic generator supplying the ultrasonic oscillatory system.

Index terms: Ultrasonic vibrations, ultrasonic oscillation system, cavitation, dispersed medium, liquid phase, ultrasonic action, control algorithm.

REFERENCES

1. Gong Jing. Study on deacidification process of waste internal combustion engine oil under the action of ultrasound. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ.*, 2020., Sci. 467 012046
2. Seyed M., Mohsen M.-G., Roghayeh G.-G., Massoud M., Pedram Safarpoura S., Majid Z. Ultrasonic nano-emulsification – A review. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2019, vol. 52, pp. 88-105.
3. Leong T.S.H., Manickam S., Martin G.J.O., Li W., Ashokkumar M. Applications of ultrasonic emulsification. In: ultrasonic production of nano-emulsions for bioactive delivery in drug and food applications. Springer: Briefs in Molecular Science, 2018. 36 p.
4. Rohlova M.V., Bogush V.I., Yushina E.A. Osnovnyye napravleniya primeneniya akusticheskoy kavitatsii v proizvodstve pishchevkh produktov [The main areas of application of acoustic cavitation in food production]. *E-Scio*, 2020, no. № 6 (45), pp. 85–97.
5. Zharova V.D. Primeneniye ul'trazvukovykh tekhnologiy pri ochestke izdeliy mashinostroyeniya [The use of ultrasonic technologies in the cleaning of mechanical engineering products]. *Nauchnoye znaniye sovremennosti*, 2019, no. 1(24), pp. 29–33.
6. Zhengwei Li, Zhiwu Xu, Degang Zhao, Shu Chen, Jiuchun Yan. Ultrasonic cavitation at liquid/solid interface in a thin Ga-In liquid layer with free surface. *Ultrasonics–Sonochemistry*, 2021, vol.71., 105356, pp 1-13.
7. Fuentes-Garcia J. A., Santoyo-Salzar J., Rangel-Cortes E., Goya G.F., Cardozo-Mata V., Pescador-Rojas J.A. Effect of ultrasonic irradiation power on sonochemical synthesis of gold nanoparticles. *Ultrasonics– Sonochemistry*, 2021, vol.70.,105274, pp 1–8.
8. Bulychiev N.A. Application of optical spectroscopy for investigation of synthesis of hydrogen and nanoparticles in electric discharge in liquid-phase media. *International journal of hydrogen energy*, 2021, vol. 46 (1), pp. 61–65.
9. Nigmatzyanov R.I., Kazantsev V.F., Prikhodko V.M., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. Povysheniye effektivnosti ul'trazvukovoy zhidkostnoy obrabotki putem aktivatsii energii kavitatsionnykh klasterov [Improving the efficiency of ultrasonic liquid treatment by activating the energy of cavitation clusters]. *STIN*, 2019, no. № 3, pp. 19–23.
10. Golykh R.N., Khmelev V.N., Shalunov A.V., Tsyganok S.N. Ul'trazvuk. Vozdeystviye na sistemy s nesushchey zhidkoy fazoy: monografiya [Ultrasonic. Influence on systems with a carrier liquid phase: monograph.]. Barnaul: AltSTU Publishing House, 2018. 276 p.
11. Golykh R.N., Khmelev V.N., Shalunov A.V., Bobrova G.A., Nesterov V.A., Titov G.A., Dorovskikh R.S. Modelirovaniye formirovaniya kavitatsionnoy oblasti dlya opredeleniya rezhimov vozdeystviya, obespechivayushchikh maksimal'no effektivnoye izmeneniye svoystv veshchestv i materialov [Modeling the formation of the cavitation region to determine the modes of action that ensure the most effective change in the properties of substances and materials]. *Nauchno-tekhnicheskiy vestnik Povolzh'ya*, 2017, no. 5, pp. 88–90.
12. Sviridov D.P., Semonov I.A., Suchkov D.N., Ulyanov B.A. Otsenka energeticheskoy effektivnosti protsessa kavitatsionnogo izmel'cheniya [Estimation of the energy efficiency of the cavitation grinding process]. *Izv. vuzov. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya*, 2009, vol. 52, no. 3, pp. 103–105.
13. Maeda K., Colonius T., Kreider W., Maxwell A., Cunitz B., Bailey M. Modeling and experimental analysis of acoustic cavitation bubbles for Burst Wave Lithotripsy. *Journal of physics. Conference series*, 2015, vol. 656, 0120027, pp 1–4.
14. Mamvura T.A., Iyuke S.E., Paterson A.E. Energy changes during use of high-power ultrasound on food grade surfaces. *South African Journal of Chemical Engineering*, 2018, vol. 25, pp. 62–73.
15. Golykh R.N., Khmelev V.N., Barsukov R.V. Modelirovaniye razvitiya kavitatsii v zhidkostyakh vblizi fazovykh perekhodov [Modeling the development of cavitation in liquids near phase transitions]. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2020, no. 6 (34), pp. 247–254.
16. P'yezoelektricheskaya keramika: printsipy primeneniya [Piezoelectric ceramics: principles of application] / Per. from English S.N. Zhukov. Mn. LLC "FU Ainform", 2003. 112 p.
17. Brujan E.A., Williams P.R. Bubble dynamics and cavitation in non-newtonian liquids. *Rheology reviews. – The British Society of Rheology*, 2005, p. 147–172

18. Khmelev S.S., Khmelev V.N., Golykh R.N. Evaluation of Optimum Modes and Conditions of Ultrasonic Cavitation Influence on High-Viscous and Non-Newtonian Liquid Mediums. *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, 2015, vol. 1, pp. 20–28.

19. Vachaparambil K.J., Einarsrud K.E. Explanation of Bubble Nucleation Mechanisms: A Gradient Theory Approach. *Journal of The Electrochemical Society*, 2018, vol. 165 (10), pp. 504–512.

20. Golykh R.N., Bobrova G.A., Khmelev V.N., Barsukov R.V., Genne D.V., Abramenko D.S., Shakura V.A., Titov G.A., Ilchenko E.V. Vliyaniye dlitel'nosti ul'trazvukovogo impul'sa na porogovuyu intensivnost' kolebaniy, privodyashchuyu k vozniknoveniyu kavitatsii v zhidkostyakh razlichnoy vyazkosti [Influence of the duration of an ultrasonic pulse on the threshold intensity of vibrations leading to the occurrence of cavitation in liquids of different viscosities]. *Yuzhno-Sibirskiy nauchnyy vestnik*, 2020, no.2 (30), pp. 57–61.

Khmelev Vladimir Nikolaevich – Deputy Director for Science, Biysk Technological Institute, (3854)432581, e-mail: vnh@bti.secna.ru.

Tsyganok Sergey Nikolaevich – Associate Professor, Department of Methods and Means of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: grey@bti.secna.ru.

Barsukov Roman Vladislavovich Sergey Nikolaevich – Associate Professor, Department of Methods and Means of Measurement and Automation, Biysk Technological Institute, (3854)432570, e-mail: roman@bti.secna.ru.

Khmelev Maksim Vladimirovich - Director of LLC "Center for Ultrasonic Technologies AltGTU" tel. (3854) 432570, e-mail: maxx@u-sonic.ru