

Особенности Реализации Ультразвукового Воздействия в Жидких Средах при Избыточном Давлении

Владимир Н. Хмелев *SeniorMember IEEE*, Евгений В. Ильченко, Роман В. Барсуков, Дмитрий В. Генне, Светлана Ф. Рыжова
Бийский технологический институт (филиал) Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

Аннотация – В статье рассматриваются особенности осуществления ультразвукового воздействия на жидкие среды при избыточном давлении, а также анализируется влияние на характеристики кавитационного процесса избыточного давления.

Ключевые слова – Ультразвук, кавитация, избыточное давление, частота.

I. ВВЕДЕНИЕ

ПРИМЕНЕНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ колебаний высокой интенсивности позволяет ускорять эмульгирование, диспергирование, экстракции и множество других процессов, реализуемых в средах с жидкой несущей фазой. Получаемые при помощи ультразвука новые среды и материалы характеризуются уникальными свойствами (дисперсностью, стерильностью, устойчивостью, повышенным содержанием экстрагируемых веществ и т.п.) [1 – 7].

Кроме существенного повышения производительности реализуемых известных процессов, ультразвуковое воздействие позволяет инициировать нереализуемые в обычных условиях реакции, ведущие к получению новых веществ и композиций.

При реализации ультразвуковых процессов средах с несущей жидкой фазой основным действующим фактором является кавитация, которая представляет собой явление образования парогазовых полостей в жидкости в точках локального понижения давления. При прохождении ультразвуковых колебаний через жидкую среду, в фазе разрежения формируется и проходит стадию роста кавитационный парогазовый пузырек, затем в фазе сжатия, пузырек схлопывается, формируя ударную волну или кумулятивную струю. Время жизни кавитационного пузырька может составлять от одного до нескольких периодов инициирующего ультразвукового воздействия, после чего кавитационный пузырек схлопывается, возникающая при этом локальная плотность энергии достигает больших значений, что и обуславливает уникальные результаты кавитационного воздействия [8, 9].

Эффективность ультразвукового кавитационного воздействия зависит от многих факторов, в том числе от температуры рабочей жидкости, ее физико-химических свойств и создаваемого в жидкости давления [10, 11].

Увеличение эффективности кавитации при наличии избыточного давления рядом авторов [12, 13] связывается с уменьшением минимального радиуса кавитационной полости в фазе сжатия, что приводит к увеличению сил поверхностного натяжения, и как следствие к повышению скорости движения стенки полости в момент ее схлопывания.

В многочисленных работах [10, 14] доказано положительное влияния избыточного давления на процесс ультразвукового диспергирования (например, хрома, окиси свинца и окиси алюминия), заключающееся в существенном увеличении поверхности взаимодействия и увеличении доли выхода мелких фракций. Так, например, для порошка хрома выход наиболее мелкой фракции, размером в 4,2 мкм за равное время увеличивается с 46,4% при 0 МПа до 84,4% при 0,4 – 0,45 МПа избыточного давления.

Более мелкие кавитационные пузырьки, создаваемые при повышенном давлении способны проникать в полости и микротрещины частиц твердой фазы, разрушая их [14]. К более интенсивному разрушению частиц и молекулярных связей приводит и увеличенная энергетика ударных волн при схлопывании кавитационного пузырька в условиях повышенного статического давления.

Практический интерес представляет исследование влияния повышенного давления обрабатываемой среды на параметры ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) ультразвукового аппарата.

II. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ НА ПОРОГ КАВИТАЦИИ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ

В фазе роста кавитационного пузырька, его максимальный радиус, характеризующий запасаемую энергию, зависит от давления в среде

$$R_{max} = \frac{0,4}{f} \left(1 - \frac{P_0}{P_A}\right) \sqrt{\frac{P_A}{\rho}}$$

где P_A – амплитудное значение звукового давления, P_0 – внешнее давление, f – частота ультразвуковых колебаний, ρ – плотность жидкости [10].

Время расширения t_p кавитационного пузырька также зависит от величины внешнего давления

$$t_p = \frac{0,4}{f} \left(1,9 - \frac{P_0}{P_A} \right).$$

Кавитация в жидкости возникает при достижении величины амплитуды акустического давления величины, называемой пороговой. Согласно классической теории Непайреса [15], порог кавитации достигается при равенстве величин потоков газа диффундирующего внутрь пузырька в фазе разрежения и из пузырька в фазе разрежения.

$$\left(\frac{P_A}{P_0} \right)^2 = \frac{3}{2} \left[1 - \frac{C_\infty}{C_0} \left[1 + \frac{2\sigma}{R_0 P_0} \right]^{-1} \right] [(1 - \beta^2)^2 + \delta^2 \beta^2],$$

где R_0 – начальный радиус пузырька, C_∞ – концентрация газа в жидкости в отсутствии пузырька, C_0 – концентрация газа в насыщенной жидкости, σ – коэффициент поверхностного натяжения, β – отношение вынужденной и резонансной частот пузырька.

Таким образом, увеличение внешнего давления P_0 приводит к увеличению порогового значения акустического давления, а также существенно меняет динамику кавитационного пузырька, оказывая влияние на размеры, время расширения и захлопывания кавитационной полости [9, 10].

III. УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ РАБОТЫ ПРИ ИЗБЫТОЧНОМ ДАВЛЕНИИ

Для обработки жидкости в проточном режиме и при избыточном давлении был разработан аппарат УЗАП-0,4/22-ОП с технологическим объемом. УЗКС с установленным технологическим объемом представлена на Рис. 1.



Рис.1. УЗКС аппарата УЗАП 0,4/22-ОП с технологическим объемом

Разработанный объем состоит из камеры обработки продукта и охлаждающей рубашки. Камера обработки может использоваться как для проточной обработки, так и для обработки продукта при избыточном давлении.

IV. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ УЗКС

Для исследования влияния избыточного давления в подвергаемой ультразвуковому (УЗ) воздействию жидкой среде был разработан специальный стенд, представленный на Рис. 3.

В составе стенда ультразвуковой генератор (УЗГ), УЗКС, установленная в технологическом объеме. Внутренний стакан технологического объема в ходе исследований заполнялся водопроводной водой и с помощью компрессора в нем создавалось избыточное давление. Величина избыточного давления изменялась вручную с помощью регулятора давления. Для измерения давления использовался манометр. В ходе исследований непрерывно контролировалась амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) колебательной системы. Поток данных, контролируемой АЧХ передавался на ПК и сохранялся в отдельных файлах.

В ходе проведения исследований контролировались АЧХ тока механической ветви [16] УЗ излучателя, при различных уровнях статического давления в обрабатываемой жидкой среде.

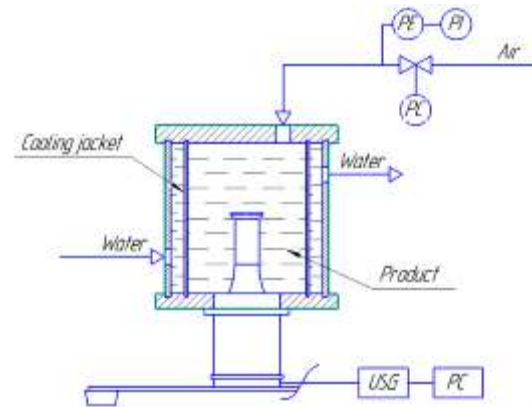


Рис. 2. Схема экспериментального стенда

При получении амплитудно-частотных характеристик величина напряжения питания УЗКС поддерживалась генератором неизменной. Длительность получения АЧХ составила 3 – 4 с, нагрев обрабатываемой среды при этом не учитывался. Величина избыточного давления изменялась в диапазоне от 0 до 0,4 МПа. Обрабатываемая среда – водопроводная вода.

Полученные амплитудно-частотные характеристики представлены на Рис. 3.

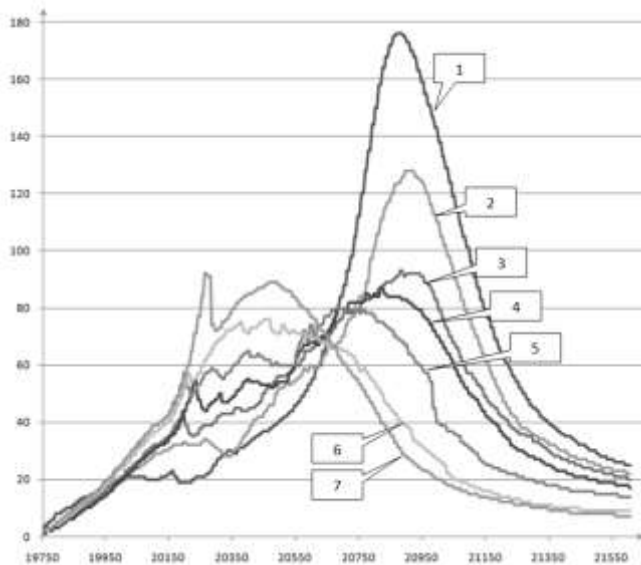


Рис.3. АЧХ тока механической ветви УЗКС при различном избыточном давлении.

На представленном изображении зависимости АЧХ тока механической ветви от величины избыточного давления кривая 1 – соответствует АЧХ при 0 МПа, 2 – 0,05 МПа, 3 – 0,1 МПа, 4 – 0,15 МПа, 5 – 0,2 МПа, 6 – 0,3 МПа, 7 – 0,4 МПа. Таким образом, характеристики иллюстрируют уменьшение добротности УЗ излучателя и уменьшение ее резонансной частоты по мере роста избыточного давления в обрабатываемой среде.

V. ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ДАВЛЕНИЯ НА ПАРАМЕТРЫ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Для анализа влияния избыточного давления на ультразвуковую колебательную систему, контактирующую с обрабатываемой средой используется физическая эквивалентная схема, изображенная на Рис. 4 [17 – 21].

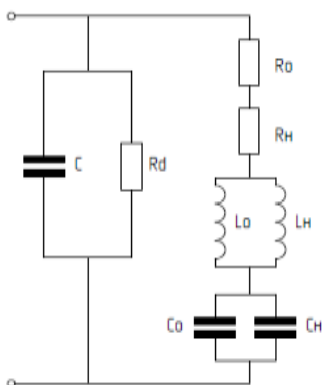


Рис. 4. Электрическая эквивалентная схема УЗКС при реализации воздействия на среду с повышенным давлением.

На представленной физической эквивалентной схеме L_0 – отражает массу УЗКС, C_0 – упругость материала УЗКС, R_0 – рассеивание механической энергии внутри УЗКС, приводящее к ее нагреву, R_n – выход механической энергии в обрабатываемую среду, L_n и C_n отражают влияние среды на резонансную частоту УЗКС, обусловленную упругостью среды и присоединенной массой, вовлеченной в колебания, C – электрическая емкость пьезопреобразователя.

Изменение свойств обрабатываемой среды приводит к изменению параметров УЗКС и требует непрерывного изменения режимов работы УЗ генератора, как показано в работах [22 – 25]. В связи с этим были проведены исследования влияния избыточного давления в обрабатываемой среде на режимы работы УЗ аппарата. Результаты измерений показали, что при обеспечении стабильной амплитуды воздействия на жидкую среду, по мере увеличения избыточного давления в объеме от 0 до 0,4 МПа, требуется увеличение мощности УЗ аппарата и изменение резонансной частоты УЗ излучателя. Результаты измерений представлены на Рис.5, 6.

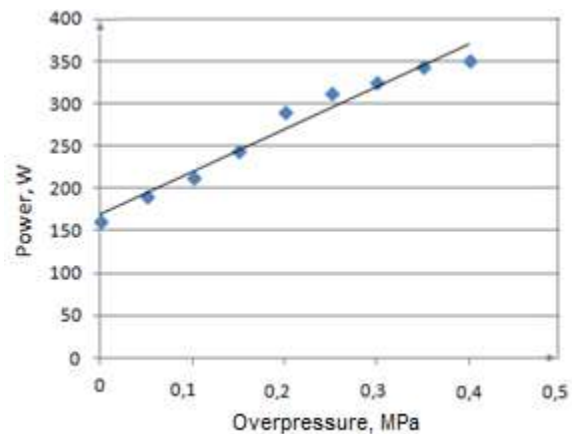


Рис.5. Зависимость потребляемой УЗКС мощности от избыточного статического давления.

Как следует из полученного результата, при обеспечении работы системы стабилизации амплитуды механических колебаний УЗКС, потребляемая УЗ аппаратом мощность возрастает более чем в два раза при увеличении давления в исследуемых пределах. Рост потребляемой УЗ аппаратом мощности, по мере увеличения избыточного статического давления в ходе УЗ воздействия, обусловлен необходимостью совершать большую работу для образования кавитационных пузырьков.

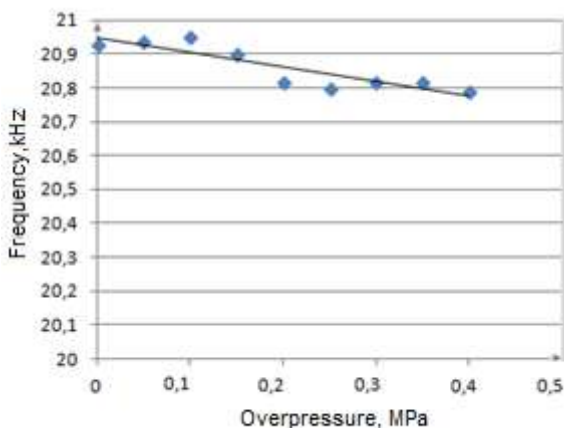


Рис.6. Зависимость резонансной частоты УЗКС от избыточного статического давления.

Зависимость резонансной частоты УЗКС от давления имеет убывающий характер. В диапазоне рабочих давлений изменение частоты составляет 150 Гц, что является не существенным, не требует изменений в настройке аппарата и обрабатывается штатной системой ФАПЧ. Для сравнения, типичное изменение рабочей частоты при увеличении температуры обрабатываемой среды на 50°С составляет 400 Гц.

VI. ВЫВОДЫ

В результате исследования были сформулированы следующие выводы:

1) избыточное давление существенно изменяет нагрузку ультразвукового аппарата. Для поддержания стабильной амплитуды при увеличении избыточного давления с 0 до 0,4 МПа требуется увеличить подводимую к УЗКС мощность более чем в два раза.

2) резонансная частота УЗКС при изменении избыточного давления от 0 до 0,4 МПа изменяется менее чем на 1% от начального значения.

Полученные экспериментальные данные показали необходимость включения в структуру УЗ аппарата системы ограничения мощности при обработке жидких сред при избыточном давлении.

Основные технические характеристики аппарата для работы при избыточном давлении и в проточном режиме УЗАП 0,4/22 представлены в Табл. I .

ТАБЛИЦА I
ТЕХНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УЗАП 0,4/22-ОП

Мощность, ВА	400
Рабочая частота, кГц	22 ±2
Габаритные размеры колебательной системы, мм	Ø70x200
Диаметр рабочего инструмента, мм	20
Диапазон допустимого избыточного давления, МПа	0 – 0,3
Объем внутреннего стакана, мл	400

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ультразвук: Маленькая энциклопедия / Под ред. И. П. Голяминой и др. – М.: Сов. энцикл, 1979. – 400 с.
- [2] Донской, А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки [Текст] / А.В. Донской, О.К. Келлер, Г.С. Кратыш. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 208с, ил.
- [3] Шермана, Ф. Эмульсии [Текст] / Ф. Шермана – пер. с англ. под ред. А. А. Абрамзона. – Изд-во «Химия», Л., 1972. – 448 с.
- [4] Шелудко А. Коллоидная химия [Текст] / А. Шелудко – пер. с болгарского – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Мир, 1984. – 320 с.
- [5] Захарченко В.Н. Коллоидная химия: Учеб. для медико-биолог. спец. вузов [Текст] / В.Н. Захарченко – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1989. – 238 С.
- [6] Г.А. Кардашев тепломассообменные акустические процессы и аппараты [Текст] / Кардашев, Г.А., Михайлов П.Е. – М., «Машиностроение», 1973 – 223 с.
- [7] Averyanova E.V., Intensification of the Process of Ultrasonic Extraction of Dehydroquercetin from Wood Waste.[Текст] / E.V. Averyanova, M.N. Shkolnikova, S.N. Tsyganok, V.A. Shakura // 2018 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2018 - Proceedings: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2018. – P. 312-317.
- [8] А.М. Гинстлинг Ультразвук в процессах химической технологии [Текст] / Гинстлинг А.М., Барам А.А. – Л. Государственное научно-техническое издательство химической литературы, 1960 – с
- [9] Хилл К. Применение ультразвука в медицине: Физические основы [Текст] / Э. Миллер, К. Хилл, Дж. Бэмбер, Р. Дикинсон, П. Фиш, Г. Хаар; пер. с англ. под ред. Л.П. Гаврилов, А.П. Сарвазан – М.: Мир, 1989. – 568 с.
- [10] Бронин Ф.А. Исследование кавитационного разрушения и диспергирования твердых тел в ультразвуковом поле высокой интенсивности [Текст]: дис.....канд. техн. наук / Ф.А. Бронин. – Москва, 1966. – 260 с.
- [11] Сухарьков, О.В. Исследование процесса эмульгирования в многочастотном акустическом поле [Текст] / О.В. Сухарьков // Акустичний вісник. – 2009. – Том 12, № 4. С. 57 – 64.
- [12] Основы физики и техники ультразвука / Под ред. Б. А. Аграната. – М.: Высшая школа, 1987. – 352 с
- [13] Агранат Б.А. Способ повышения эффективности воздействия ультразвука на процессы протекающие в жидкостях [Текст] / Б.А. Агранат, В.И. Башкиров, Ю.И. Китайгородский // Ультразвуковая техника. ЦИТИАМ. – 1964. – вып. 3. С. 28–35.
- [14] Лузгин В.И. Ультразвуковые резонансные излучатели для технологий получения нанодисперсных эмульсий и суспензий [Текст] / В.И. Лузгин, А.Е. Шестовских, А.Ю. Петров // Промышленная энергетика. – 2015. – №7. С. 72–77.
- [15] Neppiras, E Acoustic cavitation thresholds and cyclic processes [Текст] / E. Neppiras // Ultrasonics. – 1980. – 18. P 201–209.
- [16] Khmelev V.N. The Ultrasonic Device For Treatment And Cosmetic Procedures V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, D.S. Abramenko, E.V. Ichenko // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2012: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P. 106-109.
- [17] Мэзон, У. Физическая Акустика [Текст] т.1. Методы и приборы ультразвуковых исследований часть А/ Под ред. У. Мэзона – М.:Мир, 1966. – 592с
- [18] Кикучи, Е. Ультразвуковые преобразователи [Текст] / Под ред. Е. Кикучи. – М.: издательство «МИР», 1972. – 424с.
- [19] Гальперина А.Н. Расчет сложных ультразвуковых колебательных систем с помощью эквивалентных схем [Текст] / А.Н. Гальперина // Акустический журнал. – 1977. – Т. 23, вып. 5. – С.716–723
- [20] Русаков, И.Г. Эквивалентные схемы элементов колебательных систем с распределенными постоянными [Текст] / И.Г. Русаков // Акустический журнал. – 1955. – Т. 1, вып. 3. – С.272–273.
- [21] Шутилов, В.А. Основы физики ультразвука [Текст] / В.А. Шутилов – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1980. – 280с, ил.
- [22] Khmelev V.N. Method of Control Acoustic Load [Текст] / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, D.S. Abramenko, E.V. Ichenko // International Conference and Seminar of Young

Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2011. – P.236–240.

- [23] Khmelev V.N. Determination of the concentrations of water solutions during their cavitation processing [Текст] / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, E.V. Ilchenko, N.S. Popova // 16th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2015. – P. 245–248.
- [24] Khmelev V.N. The Method of Indirect Control of the Parameters of Cavitating Liquid Media [Текст] / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, D.S. Abramenko, E.V. Ilchenko // International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2012: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P. 135–139.
- [25] Khmelev V.N. Methods of ultrasonic technological equipment improving [Текст] / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, E.V. Ilchenko // 15th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2014: Novosibirsk, NSTU, 2014. – P. 213–216.



Svetlana F. Ryzhova is a student at the Biysk Technological Institute. Her research interests are in ultrasound equipment and technology.



technological processes.

Vladimir N. Khmelev (SM'04) is deputy director for scientific and research activity at Biysk technological institute, professor and lecturer, Full Doctor of Science (ultrasound), honored inventor of Russia, laureate of Russian Government premium for achievements in science and engineering, IEEE member since 2000, IEEE Senior Member since 2004. His scientific interests are in field of application of ultrasound for an intensification of various



Evgeniy V. Ilchenko has got engineer's degree at 2012. He specializes in development and tuning of electronic schemes, and software development. His research interests are in field of measurements which are related to the applying of ultrasonic technological devices.



technological processes and for changing of materials and substances properties.

Roman V Barsukov has got engineer's degree at 1998 and Philosophy degree (Candidate of Engineering Sciences) at 2005. He is leading specialist in designing of modern electronic ultrasonic generation devices, laureate of Russian Government premium for achievements in science and engineering, docent and lecturer in Biysk Technological Institute. His research interests are in field of ultrasonic equipment and technologies and in applying of high intensive ultrasonic vibrations for intensifying of



Dmitry V. Genne has got engineer's degree on information science and measuring engineering at 2006. He is engineer and lecturer in Biysk Technological Institute. He is leading specialist in controlling of treating parameters of variously applied ultrasonic equipment. His research interests are in development of high -power electronic generators for ultrasonic technological devices.