

РАЗДЕЛ 3. ХИМИЧЕСКАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 534.64

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД ПУТЕМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.Н. Хмелев, Р.В. Барсуков, Е.В. Ильченко, Н.С. Попова, Д.В. Генне

В статье приводятся результаты экспериментальных исследований, позволивших установить зависимости между электрическими параметрами пьезоэлектрических колебательных систем и мощностью кавитационного шума, возникающего при ультразвуковой обработке жидких технологических сред.

Ключевые слова: ультразвук, электронный генератор, нагрузка, контроль, кавитация.

Реализация большинства ультразвуковых (УЗ) технологических процессов в жидких средах возможна благодаря явлению кавитации. В связи с этим различают несколько режимов УЗ воздействия на жидкие технологические среды.

Докавитационный режим – реализуется при интенсивностях УЗ воздействия ниже порога зарождения кавитации. Для такого режима характерно отсутствие в жидкой среде кавитационных пузырьков.

Режим зарождения кавитации – реализуется при превышении интенсивности УЗ воздействия некоторого порогового значения (для каждой среды величина порога различна). Для такого режима характерно зарождение небольшого количества кавитационных пузырьков, которые в процессе роста не достигают своего максимального размера (эффективность кавитации невысокая).

Режим развитой кавитации – реализуется при больших интенсивностях УЗ воздействия (10–20 Вт/см²). Для такого режима характерны высокие концентрации зарождающихся кавитационных пузырьков, а так же высокая эффективность кавитации.

Зарождение и развитие в жидкой среде кавитации изменяет ее акустические свойства. При реализации режима развитой кавитации акустическое сопротивление кавитирующей среды в области излучателя приближается к акустическому сопротивлению газовых сред. Очевидно, что такое сильное изменение волнового сопротивления среды вблизи излучателя изменяет его механические и электромеханические параметры. Далее в работе представлены результаты исследования

влияния кавитационной активности на параметры ультразвуковых колебательных систем.

Практическую часть можно условно разбить на две части. В первой части приводятся результаты экспериментальных исследований электрических параметров пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем (УЗКС). Во второй части устанавливаются зависимости между электрическими параметрами пьезоэлектрических колебательных систем и мощностью кавитационного шума, возникающего при ультразвуковой обработке жидких технологических сред.

При проведении исследований в качестве технологических сред использовались:

– водный раствор NaCl, концентрация менялась дискретно в диапазоне 0–25 % с шагом 2,5 %;

– водный раствор сахарозы, концентрация менялась дискретно в диапазоне 0–40 %, с шагом 5 %;

– водный раствор глицерина, концентрация менялась дискретно в диапазоне 0–35 %, с шагом 5 %.

В качестве источника УЗ воздействия был использован аппарат "Волна" модели УЗТА-0,4/22-ОМ [1], электрическая схема которого была дополнена контрольными точками для проведения контрольных измерений.

В основу проводимых измерений был положен анализ физической модели (эквивалентная электрическая схема), разработанной в ранних работах [2, 3, 4] по определению RLC параметров технологической среде (рисунок 1).

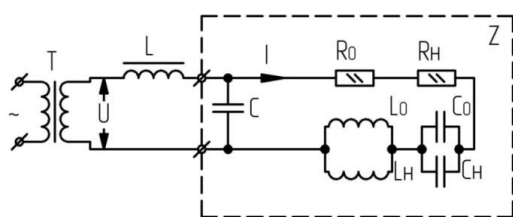


Рисунок 1 – Эквивалентная электрическая схема замещения УЗКС с преобразователем пьезоэлектрического типа

В эквивалентной электрической схеме: индуктивность L_0 – является эквивалентом колеблющейся массы, обусловленной собственными свойствами (инерционными) УЗ колебательной системы, электрическая емкость C_0 – является эквивалентом упругости материала, из которого изготовлена УЗКС, активное сопротивление R_0 – эквивалентно сопротивлению механических потерь, R_H – сопротивлению излучения колебательной системы, L_H – эквивалентна колеблющейся массе обрабатываемой жидкой фазы, присоединенной к излучающей поверхности, емкость C_H – обусловлена наличием у обрабатываемой среды упругих свойств, C – электрическая (статическая) емкость пьезопреобразователя. Элемент $R_{эКВ}$ (на схеме не показан), является суммой элементов R_0 и R_R .

Методика определения RLC элементов эквивалентной электрической схемы замещения УЗКС подробно описана в работе [1].

Результаты экспериментальных исследований были получены при кавитационной обработке водного раствора NaCl различных концентраций. Для раствора каждой концентрации измерения проводились на различных уровнях напряжения питания УЗКС. Ниже представлены зависимости сопротивления элемента $R_{эКВ}$ от напряжения питания УЗКС U при различных концентрациях растворов. Зависимости значений элементов C_H и L_H в данной статье не рассматриваются, поскольку полученные в ходе экспериментов данные не имеют характерных особенностей и анализу не поддаются.

На рисунке 2 представлены кривые, иллюстрирующие зависимость сопротивления элемента $R_{эКВ}$ от напряжения питания УЗКС в процессе изменения концентрации раствора NaCl.

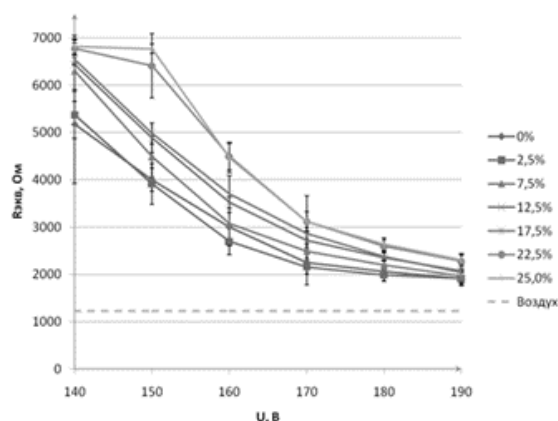


Рисунок 2 – Зависимость активного элемента $R_{эКВ}$ механической ветви УЗКС от напряжения питания УЗКС для различных концентраций раствора NaCl

Из представленных на рисунке 2 зависимостей следует, что возникающая в среде кавитация приводит к изменению активного сопротивления УЗКС при изменении напряжения её питания. Далее, по мере увеличения напряжения, значения элемента $R_{эКВ}$ (для всех концентраций раствора) стремятся к одному значению. Этот факт обусловлен развитием в жидкой среде кавитации и достижением, при определенной интенсивности УЗ воздействия, режима развитой кавитации (насыщения жидкой среды парогазовыми пузырьками), которому свойственно сопротивление нагрузки $R_{эКВ}$, близкое к сопротивлению газовой среды.

Еще одной особенностью представленных зависимостей является величина уровня напряжения питания УЗКС, при котором начинается спад $R_{эКВ}$. Различный уровень напряжения, при котором сопротивление $R_{эКВ}$ начинает изменяться обусловлен зависимостью кавитационной прочности раствора от его концентрации. По мере увеличения концентрации раствора, растет его кавитационная прочность.

Аналогичные измерения были проведены в ходе концентрирования растворов сахарозы и глицерина.

На рисунке 3 представлены зависимости сопротивления $R_{эКВ}$ от напряжения питания УЗКС, полученные для различных концентраций растворов глицерина и сахарозы.

Представленные на рисунке 3 кривые, как и для раствора NaCl, иллюстрируют убывающий характер $R_{эКВ}$, что связано с развитием в жидких средах явления кавитации по мере увеличения напряжения питания УЗКС.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД ПУТЕМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Контроль кавитационной активности в ходе проведения экспериментов осуществлялся путем измерения уровня звукового давления, создаваемого кавитационным шумом. Измерения проводились с помощью шумомера-анализатора спектра "АССИ-СТЕНТ СИУ30" в звуковом диапазоне. Подобный метод оценки активности кавитации описан в [5], а также положен в основу принципа действия ряда кавитометров [6].

Методика проведения измерений заключалась в измерении уровня звукового давления в воздушной среде, обусловленного кавитационным шумом при работе УЗКС на различных уровнях напряжения питания УЗКС.

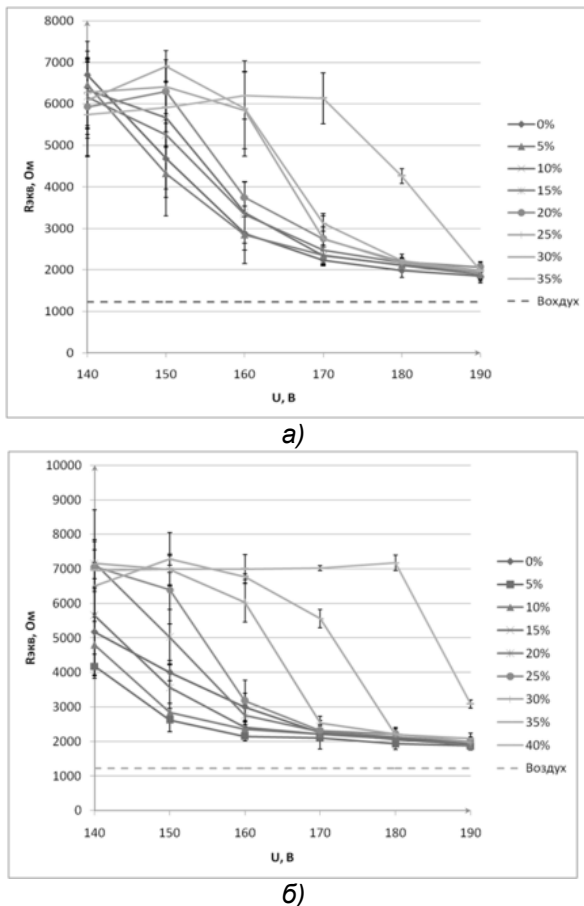


Рисунок 3 – Зависимость активного элемента $R_{эКВ}$ механической ветви УЗКС от напряжения питания УЗКС для растворов: а) глицерина б) сахарозы

Микрофон при этом располагался на расстоянии 0,3 м от УЗКС. Время экспозиции выбиралось из условия стабилизации показаний прибора и в среднем составляло 60 с. Измерения звукового давления, для каждого уровня напряжения питания УЗКС, осуществ-

лялись после выхода УЗ генератора на стабильный режим работы.

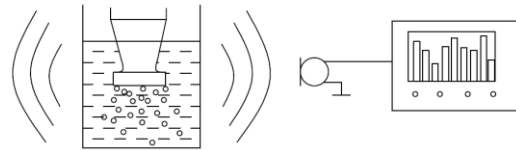


Рисунок 4 – Эскиз экспериментальной установки

При помощи шумомера-анализатора спектра были получены значения эквивалентных уровней звукового давления кавитационного шума в третьоктавных частотных полосах со средними геометрическими частотами от 25 Гц до 20 кГц при работе ультразвукового генератора на дискретных уровнях возбуждающего напряжения от 120 до 190 В.

На рисунке 5 представлены спектры для минимального и максимального напряжений питания УЗКС.

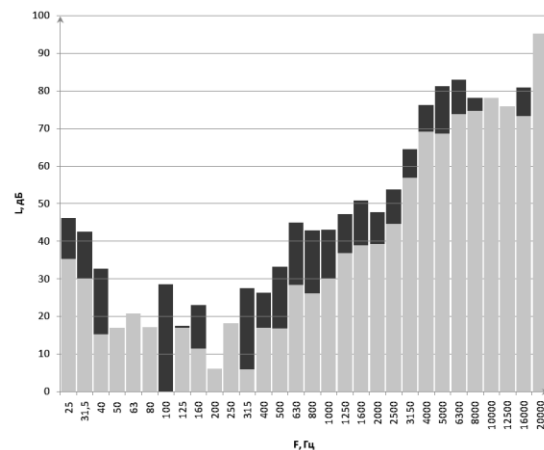


Рисунок 5 – Спектры кавитационного шума приведенные для напряжения питания УЗКС 120 В (серый) и 190 В (черный)

Анализ полученных спектрограмм показывает, что при дискретном увеличении напряжения питания УЗКС величина эквивалентных уровней звукового давления в третьоктавных полосах, начиная с частоты 250 Гц до 2 кГц, увеличиваются не пропорционально (существенно различны) по мере увеличения напряжения питания УЗКС.

Контроль значения эквивалентного непрерывного уровня звука L_{AeqT} при изменении напряжения питания УЗКС в диапазоне от 120 до 190 В позволил выявить следующую зависимость (рисунок 6).

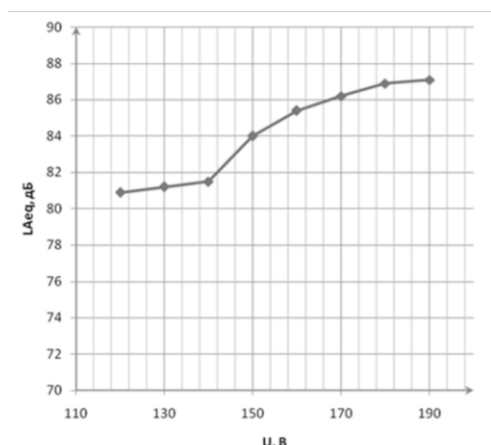


Рисунок 6 – Зависимость эквивалентного непрерывного уровня звука кавитационного шума от напряжения питания УЗКС

Полученная зависимость имеет выраженный асимптотический характер, соответствующий процессу развития в жидкой среде явления кавитации.

Считая, что эквивалентный непрерывный уровень звука является мерой активности кавитации, построим график зависимости (рисунок 7) активного сопротивления механической ветви $R_{\text{экв}}$ УЗКС при работе в водной среде от уровня звука при различных напряжениях питания УЗКС.

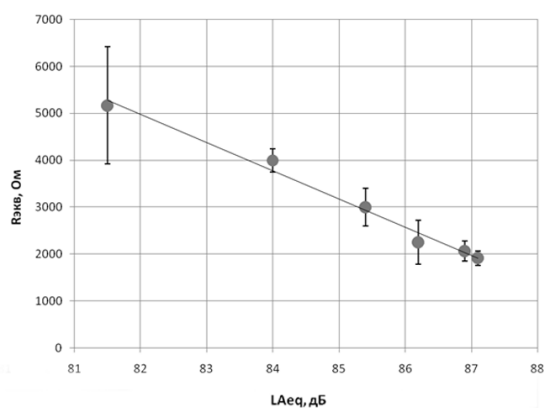


Рисунок 7 – Зависимость активного сопротивления механической ветви УЗКС от эквивалентного непрерывного уровня звука кавитационного шума

Полученные данные аппроксимируются линейной зависимостью, величина коэффициента детерминации равна 0,972, что позволяет сделать вывод о том, что активное сопротивление механической ветви УЗКС может быть использовано в качестве меры активности кавитации.

Ниже представлены (рисунок 8) графики зависимости эквивалентного непрерывного

уровня звука кавитационного шума в зависимости от напряжения питания УЗКС при работе в среде водных растворов сахарозы различной концентрации.

Для водного раствора сахарозы зависимость сопротивления от уровня звука также аппроксимируется линейной функцией, при этом коэффициент детерминации в зависимости от концентрации раствора принимает значения от 0,751 до 0,972.

Особенностью представленных на рисунке 8 является наличие точек излома, в которых наблюдается стремительное увеличение непрерывного эквивалентного уровня звука, при этом кривые делятся на три группы: первая для концентраций 5 % и 10 % для которых увеличение величины кавитационного шума начинается с напряжения 140 В, вторая включает графики, полученные для концентраций 0 %, 15 %, 20 %, 25 %, для которых наблюдается излом при напряжении 150 В, третья группа – кривые полученные для растворов концентрацией 30 % и 35 %, для которых характерный излом происходит на 170 В.

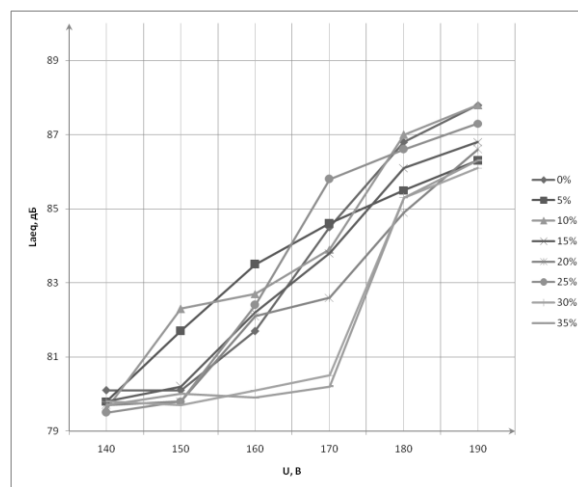


Рисунок 8 – Зависимость эквивалентного непрерывного уровня звука кавитационного шума от возбуждающего напряжения при работе УЗКС в среде водного раствора сахарозы

Сопоставляя полученные графики и зависимости активного сопротивления механической ветви УЗКС от напряжения возбуждения (рисунок 3) можно заметить, что кривые на рисунке 3 располагаются в соответствующем порядке, то есть самые низкие значения наблюдаются для графиков полученных при работе УЗКС в среде растворов 5 % и 10 %, затем 0 %, 15 %, 20 %, 25 %, графики, полученные для растворов концентрацией 30 %, 35 %.

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ ЖИДКИХ СРЕД ПУТЕМ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

35 % и 40 % лежат выше остальных графиков и их уменьшение начинается при больших уровнях возбуждающего напряжения, а именно при 160 В, в то время как остальные графики уменьшаются уже при 140–150 В.

В целом можно сделать вывод о том, что в практических целях для поддержания режима развитой кавитации могут быть использованы значения активного сопротивления механической ветви, измеренные в процессе непрерывной работы ультразвукового аппарата.

Полученные результаты экспериментальных исследований подтвердили наличие ярко выраженной зависимости между электрическими параметрами ультразвуковых колебательных систем и кавитационными явлениями, возникающими в жидких технологических средах. Результаты исследований могут быть использованы для создания систем косвенного контроля режимов кавитационной обработки жидких сред при реализации в них различных технологических процессов. Создание подобных систем позволяет вывести существующее УЗ оборудование на новый технический уровень.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна». URL: http://www.u-sonic.com/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protsestov_v_zhid_kikh_sredakh/ultrazvukovoy_tekhnologicheskij_apparat_serii_volna_v1/ (дата обращения: 18.05.2015).

2. Khmelev, V. N. Practical Investigations of the Method of Indirect Parameter Checkout of the Acoustic Load Parameter / V. N. Khmelev, R. V. Barsukov, D. V. Genne, D. S. Abramenko, A. V. Shalunov, E. V. Ilchenko // International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU. – 2011. – P. 241–244.

3. Хмелев, В. Н. Контроль параметров кавитирующих жидких сред, подвергаемых ультразвуковому воздействию / В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, Д. В. Генне, Д. С. Абраменко, Е. В. Ильченко // Ползуновский вестник. – 2012. – № 2/1. – С.154–159.

4. Хмелев, В. Н. Пути совершенствования электронных генераторов ультразвуковых технологических аппаратов / В. Н. Хмелев, Р. В. Барсуков, Е. В. Ильченко // Научно-технический вестник Поволжья. – 2014. – № 3. – С. 247–254.

5. Leonov, G. V. Modeling Of Cavitation, Initiated By Ultrasonic Oscillators / G. V. Leonov, E. I. Savina. EDM'2006.

6. Колесников, А. Е. Ультразвуковые измерения / А. Е. Колесников, – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Изд-во стандартов, 1970. – 248 с.

Хмелёв Владимир Николаевич – д.т.н., МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», vnh@bti.secna.ru, +7 (3854) 43-25-81.

Барсуков Роман Владислаович – к.т.н., МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», roman@bti.secna.ru, +7 (3854) 43-25-70.

Ильченко Евгений Владимирович – инженер МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», iev@bti.secna.ru, +7 (3854) 43-25-70.

Попова Наталья Сергеевна – специалист научно-исследовательского отдела ФГБОУ ВПО «АГАО», nsp.bsk@gmail.com, +7 (3854) 41-64-38.

Генне Дмитрий Владимирович – инженер МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», gdv@bti.secna.ru, +7 (3854) 43-25-81.