

# Способ Косвенного Контроля Параметров Кавитирующих Жидких Сред

[Владимир.Н. Хмелев](#), [Роман.В. Барсуков](#), [Евгений.В. Ильченко](#), [Дмитрий.В. Генне](#), [Денис.С. Абраменко](#)

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

**Аннотация** – Статья посвящена способу косвенного контроля свойств жидких технологических сред в процессе воздействия на них ультразвуковыми колебаниями высокой интенсивности. В результате работы установлена и доказана возможность контроля акустических свойств обрабатываемых технологических сред при различных интенсивностях УЗ воздействия по изменению электрических параметров пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем.

**Ключевые слова** – Ультразвук, ультразвуковые генераторы, жидкие среды, акустическая нагрузка, контроль.

## I. ВВЕДЕНИЕ

**В** НАСТОЯЩЕЕ ВРЕМЯ, в разных областях науки и промышленности, используется физическое, химическое или биологическое действия ультразвука [1]. Наиболее широкое распространение получили процессы, реализуемые с применением ультразвука в жидких средах [2]. Обусловлено это возможностью реализации в жидких средах кавитационного процесса, изменяющего структуру и свойства веществ и материалов.

Для реализации ультразвукового воздействия на жидкие среды применяются ультразвуковые технологические аппараты (УЗТА). Для обеспечения максимальной эффективности (производительности реализации процесса) ультразвукового воздействия используемые аппараты должны обеспечивать максимально эффективное преобразование энергии электрической сети в энергию механических колебаний ультразвуковой частоты, а также ввод последних в обрабатываемые среды.

При этом, необходимость создания универсального УЗТА, обеспечивающего максимально эффективное воздействие на различные технологические среды требует решения задачи оптимального согласования системы электронного генератора – ультразвуковая колебательная система (УЗКС) – обрабатываемая среда. На практике эта задача решается путем выбора оптимальных параметров (формы, размеров, материала) элементов УЗКС (концентраторов УЗ колебаний, рабочих инструментов и т.п.) и соответствующей настройки электронного генератора.

Однако нельзя упускать из внимания тот факт, что обрабатываемая среда, являющаяся нагрузкой УЗКС, изменяет свои параметры в процессе обработки, внося определенное рассогласование в эту систему. Для поддержания оптимальных параметров передачи энергии в обрабатываемую среду,

необходимо решить задачу, связанную с контролем параметров свойств технологических сред, подверженных ультразвуковому воздействию.

Настоящая работа является продолжением подобных исследований, проведенных ранее и описанных в работах [3,4]. Необходимость проведения исследований была обусловлена рядом недостатков, выявленных в результате анализа этих работ и необходимостью их устранения.

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Для согласования УЗКС с электронным генератором ультразвуковой частоты используется следующая схема включения пьезоэлектрического преобразователя (Рис. 1) [3].

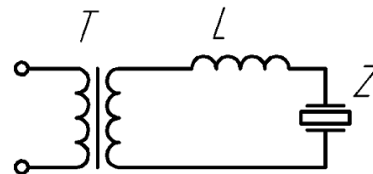


Рис. 1 – Схема согласования УЗКС с выходом электронного генератора

Представленная схема содержит элемент Z, который представляет собой ультразвуковую колебательную систему (т.е. сложную систему, объединяющую пьезоэлектрический преобразователь, концентрирующий волновод, рабочий инструмент), подверженную влиянию обрабатываемой технологической среды.

Пьезоэлектрический преобразователь трансформирует энергию электрических колебаний в энергию механических колебаний. Система электромеханических аналогий позволяет рассматривать такое преобразование энергии как включение дополнительной комплексной нагрузки в электрическую цепь. Поэтому ток, протекающий через пьезоэлектрический преобразователь будет обусловлен двумя составляющими: током механической ветви и током электрической ветви. На Рис. 2 представлена эквивалентная схема пьезоэлектрического преобразователя.

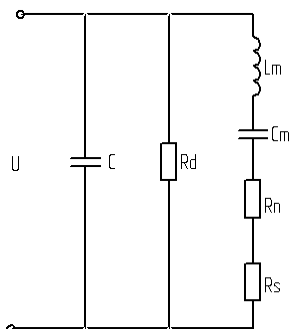


Рис. 2 – Эквивалентная электрическая схема замещения УЗКС с пьезоэлектрическим преобразователем

Электрическая ветвь включает статическую емкость пьезокерамического преобразователя  $C$  и сопротивление диэлектрических потерь  $R_d$  (Рис. 2).

Механическая ветвь содержит последовательно соединенные индуктивные, емкостные и активные элементы, определяемые свойствами обрабатываемой среды. Согласно существующим представлениям [2] индуктивность  $L_M$  эквивалентна колеблющейся массе преобразователя, емкость  $C_M$  – гибкости, активное сопротивление включает два слагаемых:  $R_{II}$  – соответствующее сопротивлению механических потерь;  $R_S$  – соответствующее сопротивлению излучения.

Для проведения измерений параметров жидких сред, подверженных ультразвуковому воздействию, был разработан измерительный стенд. Структурная схема измерительного стенда представлена на Рис. 3.

Конструктивно стенд состоит из модуля выделения тока механической ветви  $I_m$  [5],  $F$  – канала измерения частоты,  $U_{tr}$  – канала измерения напряжения на вторичной обмотке трансформатора  $T$  (Рис. 1),  $U_s$  – канала измерения напряжения на УЗКС.

Существенным недостатком измерительного стенда, использованного при проведении экспериментов и описанного в работе [3], было отсутствие стабилизации амплитуды возбуждающего напряжения на первичной обмотке трансформатора  $T$  при снятии амплитудно-частотных характеристик. В результате, по мере приближения частоты генератора к резонансной частоте УЗКС, на вторичной обмотке трансформатора наблюдался значительный провал напряжения. Поскольку расчеты эквивалентных электрических параметров среды делаются в предположении, что движущая сила при снятии АЧХ остается постоянной, измеренные значения амплитуды тока механической ветви и напряжения на пьезоэлементах оказываются не соответствующими действительности. В предлагаемом измерительном стенде напряжение на трансформаторе стабилизируется при помощи регулятора мощности, управляемого микроконтроллером УЗТА.

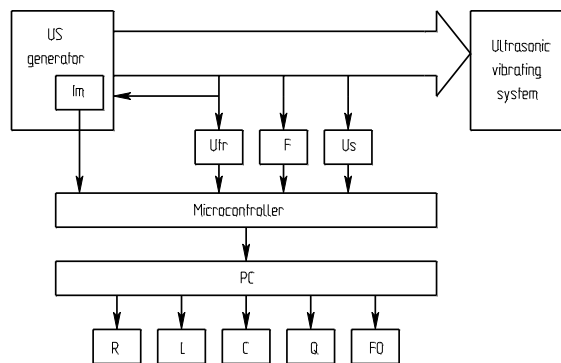


Рис. 3 – Структурная схема измерительного стенда

При использовании схемы выделения тока механической ветви [5], получаемые значения оказываются пропорциональными току  $I_m$  и пригодными для построения АЧХ тока механической ветви, а также для дальнейшего вычисления добротности механического контура. Однако, для получения значения эквивалентных электрических величин в единицах измерения СИ требуется знать абсолютное значение тока механической ветви, а также абсолютное значение напряжения на пьезоэлементах. С целью получения абсолютных значений указанных величин была проведена градуировка (калибровка) каналов измерения тока механической ветви ( $I_m$ ) напряжения на системе ( $U_s$ ) и напряжения на трансформаторе ( $U_{tr}$ ) измерительного стенда.

Для расчета параметров эквивалентной схемы были использованы следующие выражения:

$$R_M = \frac{U_{s0}}{I_{M0}}, \quad (1)$$

$$L_M = \frac{QR_M}{\omega_0} = \frac{QU_{s0}}{\omega_0 I_{M0}}, \quad (2)$$

$$C_M = \frac{1}{QR_M \omega_0} = \frac{I_{M0}}{Q \omega_0 U_{s0}}, \quad (3)$$

где  $I_{M0}$  – значение тока механической ветви на резонансе;  $U_{s0}$  – падение напряжения, на пьезокерамическом преобразователе;  $Q$  – добротность системы;  $\omega_0$  – резонансная частота.

Для расчета значения добротности была использована АЧХ тока механической ветви, типичная форма которой представлена на Рис. 4.

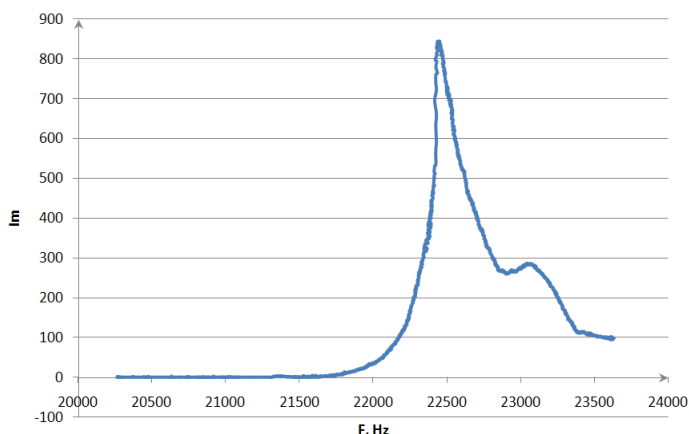


Рис. 4 – АЧХ тока механической ветви

Добротность рассчитывается из выражения (4), связывающего ток, протекающий в колебательном контуре с током на резонансе и частотой [6]

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}, \quad (4)$$

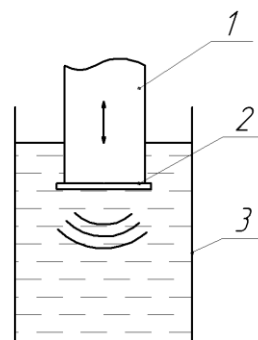
где  $\omega_0$  – резонансная частота;  $\omega$  – текущая частота;  $I_0$  – ток на резонансной частоте;  $I$  – ток на текущей частоте,  $Q$  – добротность контура, было получено выражение для добротности резонансного контура.

$$Q = \sqrt{\frac{\left( \frac{I_0}{I} \right)^2 - 1}{\left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}. \quad (5)$$

На практике такое выражение добротности оказывается более удобным, поскольку не требует построения полной АЧХ контура.

В качестве основы измерительного стенда был использован генератор ультразвукового аппарата Волна 0.4/22 ОМ [7] с полуволновой ультразвуковой колебательной системой и рабочим окончанием с площадью излучения 176 мм<sup>2</sup>. В качестве исследуемых сред были использованы дистиллированная вода, ацетон, спирт, машинное масло. Измерения проводились при различных уровнях мощности УЗ воздействия, в двух различных технологических объемах.

Обработка технологических сред проводилась в цилиндрических емкостях (как показано на Рис. 5 объемом 500 мл и 250 мл, высота столба жидкости при этом составляла 95 мм и 90 мм соответственно. Расстояние от дна сосуда до поверхности рабочего инструмента для объемов 500 мл и 250 мл составляло 73 мм 68 мм соответственно.



1 – волновод-концентратор; 2 – рабочий инструмент; 3 – технологический объем.

Рис. 5 – Размещение УЗ излучателя в объеме

Для каждой из выбранных жидкостей проводилось 5 измерений на каждом из 6 уровней мощности.

На основе полученных экспериментальных данных с использованием формул (2) (3) (4) были рассчитаны значения  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементов эквивалентной электрической схемы УЗКС.

На Рис. 6 представлены зависимости активного сопротивления механической ветви от тока механической ветви  $I_m$ .

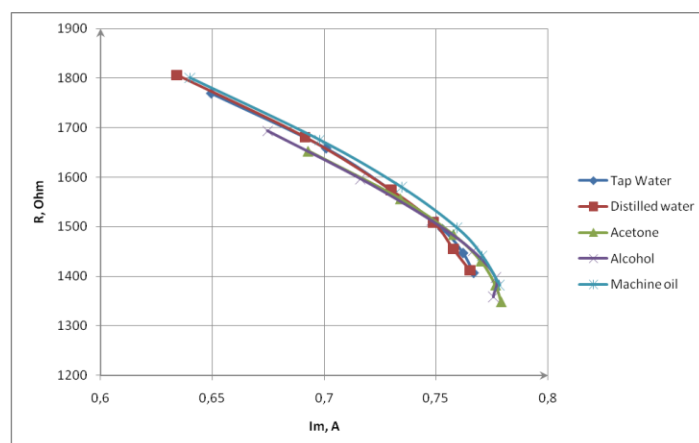


Рис. 6 – Зависимость активного сопротивления механической ветви от тока механической ветви

Представленные зависимости имеют убывающий характер. С увеличением амплитуды колебаний поверхности рабочего инструмента, в среде происходит развитие кавитации, при этом степень затухания звуковых колебаний в обрабатываемой среде увеличивается, однако в противовес этому эффекту возникают явления отражения звука от формируемых вблизи рабочего инструмента паргазовых пузырьков. В целом, свойства среды приближаются к свойствам воздушной среды, эквивалентное активное сопротивление которой ниже чем сопротивление жидкости.

Знание величины активного сопротивления эквивалентной электрической схемы замещения УЗКС, диапазона его изменения, позволит на этапе настройки выполнить оптимальное согласование УЗКС с электронным генератором.

На Рис. 7 представлены зависимости индуктивной части импеданса механической ветви от тока механической ветви  $I_m$ .

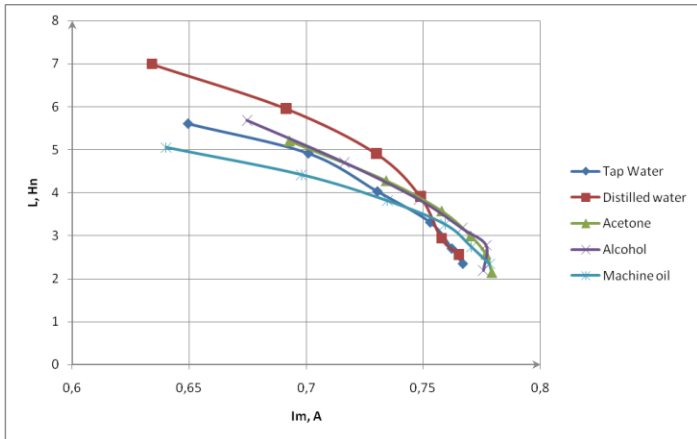


Рис. 7 – Зависимость индуктивности механической ветви от тока механической ветви

Представленные на рисунке кривые имеют убывающий характер, что объясняется снижением плотности озвучиваемой среды, вследствие разрыхления ее парогазовыми пузырьками.

На Рис. 8 представлены графики зависимости емкостной части импеданса механической ветви от тока механической ветви

Возрастание емкостной составляющей также связано с развитием в среде степени кавитации и, как следствие, увеличением сжимаемости жидкости.

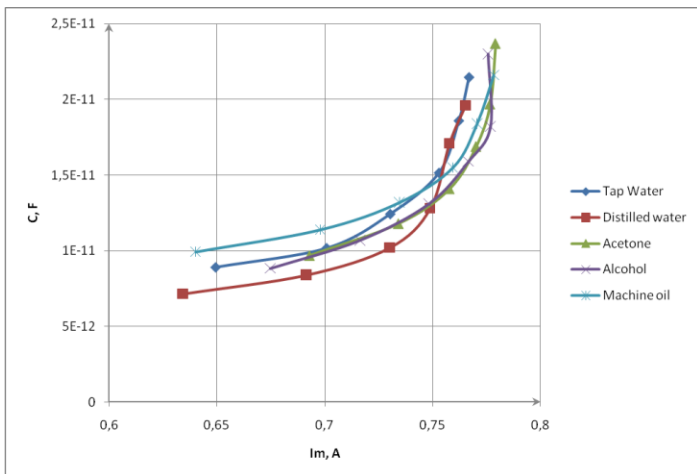


Рис. 8 – Зависимость емкости механической ветви от тока механической ветви

Знание величины реактивных элементов эквивалентной электрической схемы замещения УЗКС, диапазона их изменения, позволяет, во-первых осуществить первоначальную настройку УЗТА на этапе отладки, во-вторых, появляется возможность в процессе работы УЗ аппарата, в случае изменения реактивных свойств обрабатываемых сред, осуществлять корректировку элементов цепей согласования [8].

Кроме свойств обрабатываемых среды, таких как коэффициент затухания УЗ волны, плотность, сжимаемость на степень согласование системы «УЗ генератор – УЗКС – обрабатываемая среда» влияют также параметры технологического объема. Для оценки характера и степени влияния рабочего объема на параметры эквивалентных схем были проведены

измерения R, L, C параметров при обработке различных объемов.

Результаты измерений представлены на Рис. 9, 10, 11.

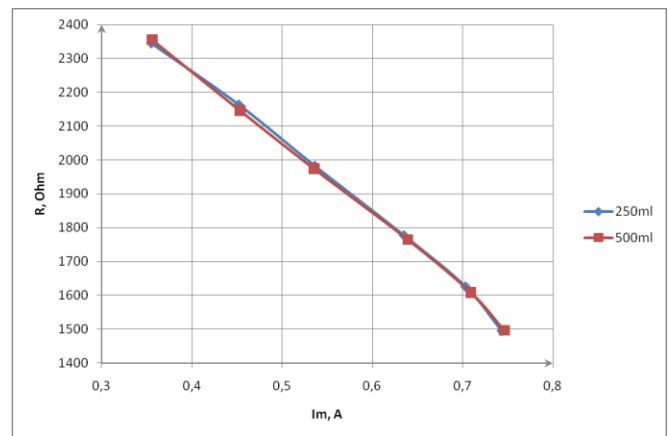


Рис. 9 – Зависимость активного сопротивления механической ветви от тока механической ветви.

Из представленной на Рис. 9 зависимости видно, что изменение рабочего объема оказывает минимальное влияние на активную составляющую импеданса механической ветви, то есть активное сопротивление механической ветви зависит от параметров среды, но не зависит от геометрии технологического объема.

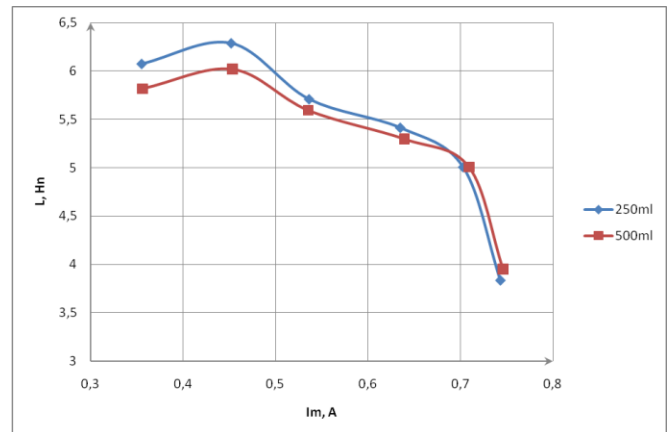


Рис. 10 – Зависимость индуктивности механической ветви от тока механической ветви

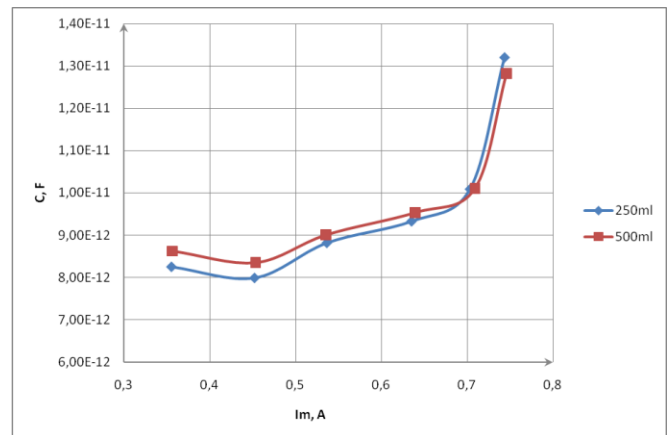


Рис. 11 – Зависимость емкости механической ветви от тока механической ветви

В то же время, исходя из зависимостей, представленных на Рис. 10 и 11, следует, что изменение габаритов рабочего объема оказывает существенное влияние на реактивную составляющую импеданса механической ветви. Изменение размеров объема приводит к изменениям в картине распределения колебаний, возможно возникновение стоячих волн (резонансных промежутков) и, как следствие, это накладывает отпечаток на реактивную составляющую акустического импеданса среды.

### Ш. ВЫВОДЫ

Проведенные измерения позволили уточнить и подтвердить наличие зависимости между параметрами обрабатываемых технологических сред и измеряемыми электрическими величинами, характеризующими работу УЗ колебательных систем. Характер этих зависимостей является сложным и определяется параметрами УЗ колебательных систем, параметрами обрабатываемых сред и параметрами рабочего объема. Возможность контроля параметров УЗКС, связанных со свойствами озвучиваемых сред позволяет создавать системы оперативного контроля процессов, протекающих в поле, оптимизировать работу ультразвуковых технологических аппаратов в целом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Ультразвуковые преобразователи / Под ред. Е. Кичуци. – М.: издательство «МИР», 1972. – 424с.
- [2] Донской, А.В. Ультразвуковые электротехнологические установки – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1982. – 208с, ил.
- [3] Khmelev, V.N. Method of Control Acoustic Load [Текст] / V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, D.S. Abramenko, E.V. Ilchenko // International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2011. – P.236–240.
- [4] Khmelev, V.N. Practical Investigations of the Method of Indirect Parameter Checkout of the Acoustic Load Parameters [Текст] / 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 EDM2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2011. – P.241–244.
- [5] Патент 2240073 Российская Федерация. Способ управления процессом ультразвуковой липосакции / Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Сливин А.Н., Шалунов А.В.; заявитель и патентообладатель Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. – №2003107030
- [6] Зернов, Н.В., Карпов, В.Г. Теория радиотехнических цепей – Л.: Энергия, 1965 – 892с,
- [7] <http://u-sonic.ru/devices/volna>
- [8] Хмелев, В.Н. Согласование электронных генераторов с пьезоэлектрическими колебательными системами для повышения эффективности ультразвуковых аппаратов / В.Н. Хмелев, Д.В. Генне, Р.В. Барсуков, С.Н. Цыганок, А.В. Шалунов, Д.С. Абраменко // Известия Томского политехнического университета. – 2010. Т. 317. № 4. – С. 139–143.