

# Контроль Импедансных Характеристик УЗ Излучателей для Исследования Процессов и Явлений, Протекающих в Жидких Средах

Владимир Н. Хмелев, Роман В. Барсуков, Евгений В. Ильченко,  
Дмитрий В. Генне, Алексей Н. Сливин, Александр Р. Барсуков  
Бийский Технологический Институт, Бийск, Россия

**Аннотация** – В статье рассматриваются вопросы, связанные с изучением возможности контроля акустических свойств озвучиваемых технологических жидких сред путем контроля параметров и характеристик ультразвуковых колебательных систем.

**Ключевые слова** – Ультразвук, контроль, процессы, УЗ излучатель.

## I. ВВЕДЕНИЕ

ОДНИМ ИЗ ВОЗМОЖНЫХ путей повышения эффективности УЗ технологических аппаратов является оптимизации УЗ воздействия в процессе реализации различных процессов. Такая оптимизация может быть обеспечена интеграцией в УЗ аппараты систем непрерывного контроля изменяющихся параметров обрабатываемых сред [1].

В работах [2] предлагается в качестве элемента, чувствительного к параметрам обрабатываемых сред, использовать УЗ преобразователь, работающий в режиме излучения. Такой подход является вполне работоспособным, поскольку озвучиваемая среда непосредственно контактирует с УЗКС посредством ее рабочего инструмента и боковой поверхности. Однако, контроль параметров в режиме кавитационного воздействия имеет существенные недостатки:

- контролируются параметры кавитирующей среды (насыщенной парогазовыми пузырьками), не соответствующей по своим параметрам формируемому продукту;

- наличие кавитационного шума в звуковом и радиоволновом диапазонах снижают чувствительность контроля.

Для более «тонкого» исследования взаимосвязи между параметрами УЗ излучателей и свойствами обрабатываемых сред может быть использован, предложенный авторами, измеритель импедансных характеристик УЗКС [3]. Особенностью таких измерений является то, что контроль параметров и характеристик УЗКС осуществляется в докавитационном режиме, при котором УЗКС не работает в «силовом» режиме и не осуществляет разрушающего воздействия на среду. Таким образом,

возникает возможность обеспечить контроль свойств образующейся, в результате УЗ воздействия, среды.

## II. ОПИСАНИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО СТЕНДА

Схематично стенд для проведения исследований представлен на рисунке 1. Он включает в себя измеритель импедансных характеристик 1, персональный компьютер 2, исследуемую ультразвуковую колебательную систему (набор УЗКС) 3, технологический объем 4, технологическую среду 5, контактирующую с УЗ излучателем, дополнительный УЗ излучатель 6, осуществляющий воздействие на жидкие среды в кавитационном режиме, ультразвуковой генератор 7, предназначенный для питания УЗКС 6.

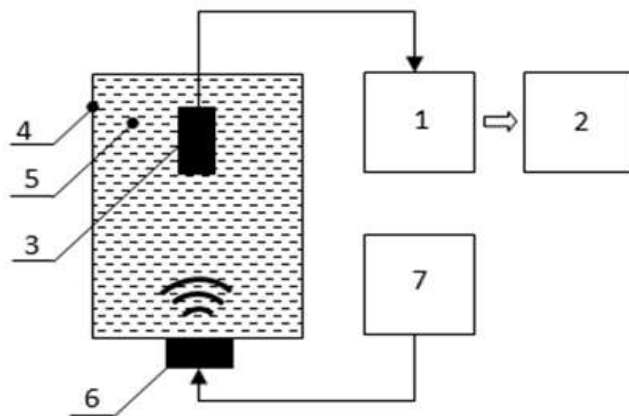


Рис. 1. Стенд для проведения измерений.

Наличие в составе измерительного стенда УЗ излучателя 6 обусловлено необходимостью исследования влияния свойств различных кавитирующих жидких сред на параметры исследуемых ультразвуковых колебательных систем [4].

Получаемые первичные данные представляют собой частотные характеристики электрического импеданса УЗКС:  $|Z|$  - модуль импеданса УЗКС,  $R$  и  $X$  - активная и реактивная составляющие импеданса УЗКС, фазочастотная характеристика.

Поскольку все УЗКС, используемые в составе УЗ технологических аппаратов являются резонансными, целесообразно проводить измерения именно в окрестностях ее резонансной частоты [5].

Вторичными данными, которые подвергались анализу, являются минимальное значение модуля импеданса УЗКС  $Z_{min}$  и соответствующая ему частота  $f_{zmin}$ .

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

В ходе проведения экспериментов было принято решение ограничиться оценкой параметров  $Z_{min}$ ,  $f_{zmin}$  поскольку эти параметры определяются при работе УЗКС вблизи ее резонансной частоты, когда УЗ колебательная система совершает колебания с максимальной амплитудой, «чувствуя» при этом акустический импеданс среды.

На начальном этапе исследований было проведено несколько экспериментов, направленных на:

– исследование влияние акустических свойств различных сред на импеданс УЗКС;

– исследование влияние акустических свойств сред на импеданс УЗКС с различной площадью контакта со средой;

– исследование влияния свойств кавитирующей среды на импеданс УЗКС;

– исследование влияния изменяющихся свойств жидкой среды на импеданс УЗКС (например, в ходе формирования растворов);

На рисунке 2 представлено фото исследуемых УЗКС. Это полуволновые преобразователи стержневого типа, с пьезоэлектрическими преобразователями [6].



Рис. 2. Полуволновые УЗКС стержневого типа: а – с рабочим инструментом в виде пятака (тип 1); б – с торцевой излучающей поверхностью волновода (тип 2).

УЗКС типа 1 имеет площадь контакта со средой 479 мм<sup>2</sup>. УЗКС типа 2 имеет площадь контакта со средой 113 мм<sup>2</sup>. Представленные УЗКС предназначены для силового воздействия на жидкие среды в режиме развитой кавитации, но в рамках данных экспериментов выступают в качестве чувствительных элементов.

На рисунке 3 представлены зависимости  $Z_{min}$ , от типа жидкой среды, куда в ходе измерений помещались УЗ излучатели, параметры которых подвергались измерениям.

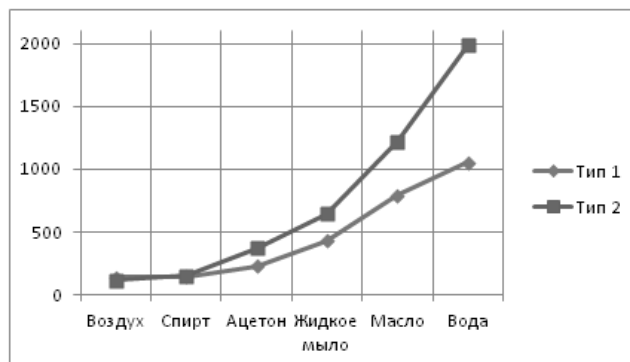


Рис. 3. Зависимость импеданса УЗКС ( $Z$ ) от типа контактирующей среды

Кривые иллюстрируют изменение (рост) импеданса УЗКС  $Z_{min}$  при контакте с различными средами, которые упорядочены по возрастанию их акустического импеданса по оси абсцисс. Расхождение кривых обусловлено различной площадью контакта УЗКС со средой, которая отличается у исследуемых систем в 4.2 раза. Для УЗКС с большей площадью контакта со средой (тип 1) кривая более крутая.

Кривые, представленные на рисунке 5, иллюстрируют влияние площади контакта УЗКС со средой на «чувствительность» такого преобразователя.

В таблице 1 представлены, более подробные результаты измерений (на воздухе и на воде) для нескольких различных по площади сменных рабочих инструментов, которые присоединялись к УЗКС типа 1.

ТАБЛИЦА I  
ПАРАМЕТРЫ УЗКС С РАЗЛИЧНЫМИ СМЕННЫМИ ИНСТРУМЕНТАМИ

№ инстр.	$S_{изл}$ , мм <sup>2</sup>	$Z_{min}$ , Ом		$f_{zmin}$ , Гц		$\Delta f_{zmin}$ , Гц		$\Delta Z_{min}$ , Ом	
		воздух	вода	воздух	вода	воздух-вода	воздух-вода		
1	177	68	178	26485	25855	630	110		
2	451	105	581	22935	22710	225	476		
3	515	431	1010	22130	21820	310	579		
4	804	251	1245	21380	21145	235	994		
5	1236	950	1854	18330	15415	2915	904		

На рисунке 4 представлена графическая зависимость изменения импеданса при смене среды (газ-жидкость) от площади излучающей поверхности рабочего инструмента.

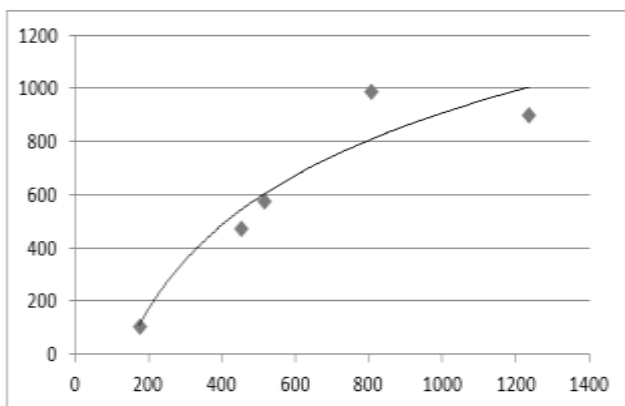


Рис. 4. Зависимость изменения импеданса ( $\Delta Z_{min}$ ) при смене среды (газ-жидкость) от площади излучающей поверхности рабочего инструмента.

Кривая иллюстрирует увеличение чувствительности преобразователя к изменению свойств среды по мере увеличения площади контакта, однако видно, что зависимость нелинейная и, при дальнейшем увеличении площади контакта со средой, величина прироста импеданса УЗКС уменьшается. Это вероятнее всего, связано с тем, что периферийная часть рабочих инструментов с большим диаметром не работает как излучатель поршневого типа.

В таблице 2 представлены результаты измерений, полученные в ходе концентрирования раствора сахарозы. Представленные в таблице 2 данные получены для УЗКС типа 2.

ТАБЛИЦА II  
ЗНАЧЕНИЕ АКТИВНОЙ ЧАСТИ ИМПЕДАНСА НА РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЕ ДВУХ РАЗЛИЧНЫХ УЗКС

Концентрация водного раствора сахарозы, %	$Z_{min}$ , Ом	$f_{zmin}$ , Гц
0	528	22730
5	1066	22820
10	1270	22905
15	1100	22830
20	1220	22895
25	1270	22870
30	1332	22900

На рисунке 5 представлена зависимость  $Z_{min}$  от концентрации раствора сахарозы.

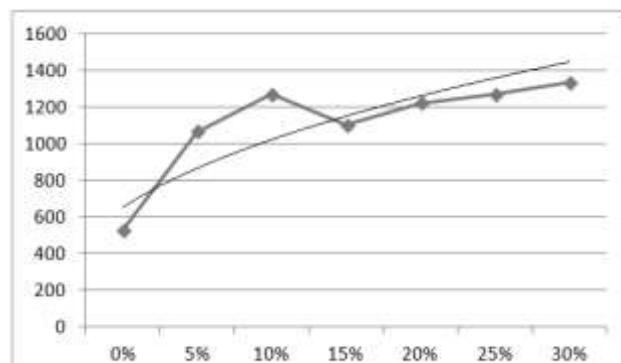


Рис. 5. Зависимость  $Z_{min}$  от концентрации раствора сахарозы (для УЗКС типа 1).

Представленные на рисунке 5 кривые иллюстрируют рост импеданса УЗКС в процессе концентрирования раствора сахарозы. Полученная зависимость показывает не линейную зависимость импеданса УЗКС от концентрации раствора, не смотря на то, что импеданс раствора сахарозы по мере его концентрирования изменяется линейно. Полученная зависимость еще раз показывает принципиальную возможность контроля процессов, протекающих в жидких средах, при условии, если эти процессы влияют на акустические свойства этих сред.

На рисунке 6 показаны частотные характеристики импеданса исследуемой УЗКС, полученные при различных уровнях развития кавитации в жидкой среде. Всего было проведено 10 экспериментов с различным уровнем УЗ воздействия на жидкую среду (от 0 до максимальной интенсивности). На графиках, для сравнения, так же приведена частотная характеристика исследуемой УЗКС, полученная в воздушной среде, поскольку известно, что импеданс кавитирующей среды стремится к импедансу газовой среды [7].

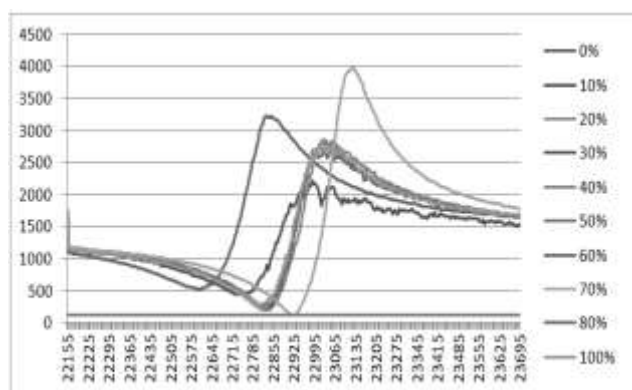


Рис. 6. Семейство частотных характеристик импеданса УЗКС в кавитирующей водной среде при различных уровнях УЗ воздействия.

Из графиков видно, что частотные характеристики, соответствующие различным уровням развития кавитации в жидкой среде визуально сильно отличаются от частотной характеристики УЗКС размещенной в некавитирующей среде, а значения  $Z_{min}$

лежат в диапазоне между  $Z_{min}$  УЗКС размещенной в некавитирующей среде и  $Z_{min}$  УЗКС размещенной в газо-воздушной среде.

На рисунке 7 представлена зависимость импеданса  $Z_{min}$  УЗКС от уровня УЗ воздействия на жидкую среду, который, в конечном итоге, определяет степень развития в ней кавитации.

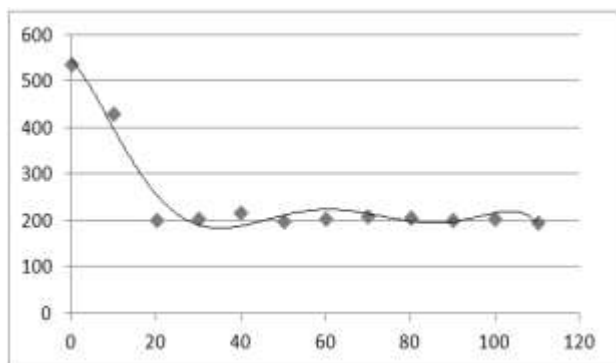


Рис. 7. Зависимость  $Z_{min}$  УЗКС от уровня УЗ воздействия на жидкую среду.

Кривая иллюстрирует изменение (уменьшение) импеданса УЗКС связанное с развитием кавитационных явлений в жидкой среде. Увеличение мощности УЗ воздействия на жидкую среду в диапазоне от 0 до 20% (от максимальной мощности УЗ аппарата) приводит к резкому уменьшению импеданса исследуемой УЗКС в диапазоне от 540 Ом до 200 Ом, что связано с резким падением волнового сопротивления озвучиваемой среды, обусловленного ее насыщением кавитационными пузырьками.

Данный эксперимент еще раз подтверждает, что импеданс УЗКС зависит не только от свойств среды, с которой она контактирует, но и от кавитационных явлений в жидкой среде, а именно степени развития кавитации [8], показывает возможность контроля кавитационных явлений при озвучивании жидких сред.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Контроль импедансных характеристик различных УЗ излучателей, имеющих акустический контакт с озвучиваемыми средами, представляет определенный научный интерес, связанный с изучением влияния величины и характера акустической нагрузки на параметры и характеристики ультразвуковых колебательных систем. Это позволит с одной стороны оптимизировать параметры и характеристики существующего УЗ оборудования, а с другой стороны позволит, без применения дополнительных измерительных средств, обеспечить контроль свойств образующейся, в результате УЗ воздействия, среды, контролировать процессы, протекающие в озвучиваемых средах.

Работа выполнена в рамках гранта РФФИ ГФЕН\_а № №19-52-53018

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Система контроля свойств технологических сред, при воздействии на них ультразвуковых полей высокой интенсивности Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В. Датчики и системы. 2013. № 6 (169). с. 52-56.
- [2] Интеграция системы контроля режима кавитационного воздействия в ультразвуковое технологическое оборудование Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В., Генне Д.В. Ползуновский вестник. 2016. № 2. С. 87-90.
- [3] Khmelev V.N., Barsukov R.V., Ilchenko E.V., Genne D.V. Measuring Instrument of Impedance Characteristics of the Ultrasonic Vibrating Systems // 19<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2018: Novosibirsk, NSTU, 2018, p.347-349
- [4] Исследование кавитационной активности жидких сред путем контроля параметров пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В., Попова Н.С., Генне Д.В. Ползуновский вестник. 2015. № 3. С. 67-71.
- [5] Полуволновые пьезоэлектрические ультразвуковые колебательные системы Хмелев В.Н., Цыганок С.Н., Барсуков Р.В., Лебедев А.Н. Техническая акустика. 2005. Т. 5. С. 318-330.
- [6] Ультразвуковая колебательная система Барсуков Р.В., Хмелев В.Н., Цыганок С.Н. Патент на изобретение RUS 2141386 15.12.1997
- [7] Контроль параметров ультразвуковых колебательных систем для исследования кавитационной активности Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В., Попова Н.С., Генне Д.В. Вопросы электротехнологии. 2015. № 2 (7). С. 22-27.
- [8] Контроль параметров пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем для исследования кавитационной активности в жидких средах Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Ильченко Е.В., Попова Н.С., Генне Д.В. Датчики и системы. 2015. № 7 (194). С. 25-30