

# Интеграция системы контроля режима кавитационного воздействия в ультразвуковое технологическое оборудование

Владимир Н. Хмелев<sup>1</sup>, SeniorMember IEEE, Роман В. Барсуков<sup>1</sup>, Евгений В. Ильченко<sup>1</sup>, Дмитрий В. Генне<sup>1</sup>, Наталья С. Попова<sup>2</sup>(магистрант)

<sup>1</sup> Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия

<sup>1</sup>ООО «Центр ультразвуковых технологий», Бийск, Россия

<sup>2</sup>Алтайский государственный гуманитарно-педагогический университет имени В.М. Шукшина

**Аннотация** – Статья посвящена интегрированию системы контроля режима кавитационного воздействия в ультразвуковое технологическое оборудование, предназначенное для воздействия на жидкое технологические среды. Приводятся результаты исследования эффективности работы УЗ оборудования с системой контроля.

**Ключевые слова** – Ультразвук, электронный генератор, нагрузка, контроль, кавитация.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

УЛЬТРАЗВУК широко применяется для ускорения большинства физико-химических процессов, протекающих в жидких средах.

Интенсификация большинства ультразвуковых (УЗ) технологических процессов в жидких средах возможна благодаря явлению кавитации.

Различают несколько стадий развития. 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/см<sup>2</sup>). Для такого режима характерны высокие концентрации зарождающихся кавитационных пузырьков, а также высокая эффективность кавитации.

Режим вырожденной кавитации характеризуется наличием большого количества резонансных пузырьков, при этом эффективность кавитации уменьшается.

В настоящее время существует отечественное и импортное УЗ оборудование, предназначенное для воздействия на жидкие среды. В используемых аппаратах настройка на кавитационный режим осуществляется вручную, что сопряжено с вероятностью неоптимальной настройки.

Зарождение и развитие кавитации изменяет акустические свойства обрабатываемой жидкой среды. В большинстве случаев наиболее эффективным режимом УЗ воздействия является режим развитой кавитации.

При реализации режима развитой кавитации акустическое сопротивление кавитирующей среды вблизи излучателя приближается к акустическому сопротивлению газовых сред. Очевидно, что такое сильно изменение волнового сопротивления среды вблизи излучателя изменяет его механические и электромеханические параметры.

На протяжении нескольких лет проводились исследования возможности контроля режима кавитационного воздействия на жидкие среды [1,2] путем контроля электрических параметров пьезоэлектрических ультразвуковых колебательных систем (УЗКС).

Для анализа влияния кавитирующей технологической среды на параметры УЗКС использовалась физическая модель УЗКС в виде электрической эквивалентной схемы, представленной на рисунке 1.

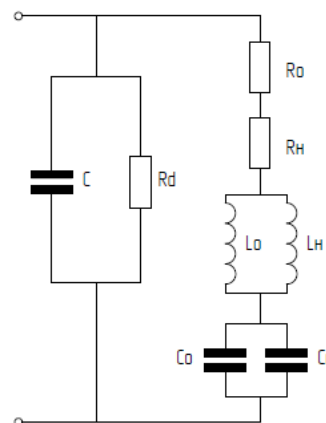


Рисунок 1 – Электрическая эквивалентная схема УЗКС

В эквивалентной электрической схеме: индуктивность  $L_0$  – является эквивалентом колеблющейся массы, обусловленной собственными свойствами (инерционными) УЗ колебательной системы, электрическая емкость  $C_0$  – является экви-

валентом 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.  $R_d$  – добавочное сопротивление. Элемент  $R_{эkv}$  является суммой элементов  $R_0$  и  $R_H$ .

Далее в работе представлены результаты интеграции в существующее УЗ оборудование системы контроля режима кавитационного воздействия на жидкие среды.

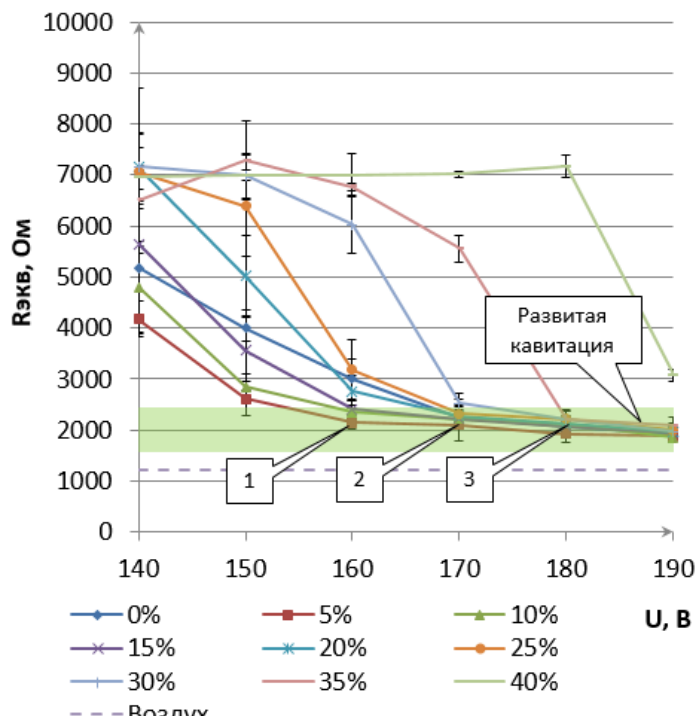
## II. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Проведенные исследования позволили установить следующее:

1. Существует взаимосвязь между  $R_H$  и степенью развитости кавитации, причем режиму развитой кавитации соответствует стабилизация активного сопротивления на уровне  $\sim 1,6R_0$ .

2. Физические свойства кавитирующей жидкой среды существенно влияют на параметры эквивалентной схемы УЗКС. Наибольшая корреляция обнаруживается между параметром  $R_H$  и вязкостью среды (коэффициент корреляции 0,78 – 0,97 для водных растворов сахарозы (0-40%), хлорида натрия (0-25%) и глицерина (0-25%))

Как наиболее перспективным для целей контроля и автоматического регулирования кавитационного режима принят параметр  $R_{эkv}=R_H+R_0$ . Типичный ход зависимости  $R_{эkv}$  от возбуждающего напряжения УЗКС (обусловленной развитием кавитации) при работе в растворе сахарозы различной концентрации представлен на рисунке 2.



1,2,3 - точки перехода к режиму развитой кавитации, зелёная полоса – момент возникновения режима развитой кавитации

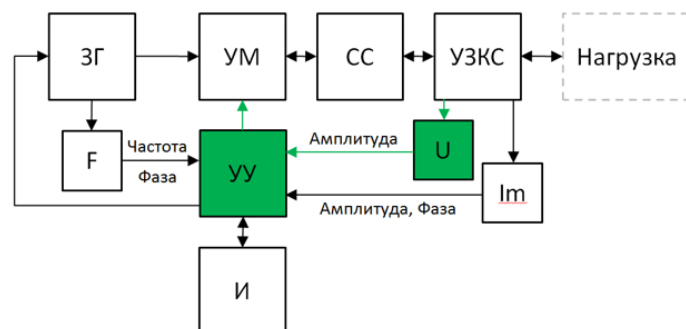
Для интеграции системы контроля режима кавитационного воздействия, а так же исследования функциональных возможностей нового аппарата был использован ультразвуковой аппарат серии Волна 0,4/22[3].

Поскольку установлено, что критерием реализации режима развитой кавитации является стабилизация  $R_{эkv}$ , существующий УЗ аппарат был снабжен дополнительными измерительными цепями, для контроля напряжения на колебательной системе (см. рис.3,4).

Кроме того было разработано и интегрировано в контроллер УЗ генератора программное обеспечение, обеспечивающее контроль режима кавитационного воздействия.

Программное обеспечение реализует следующий алгоритм настройки на режим развитой кавитации:

- 1) снижается напряжения питания УЗКС;
- 2) осуществляется измерение текущего сопротивления  $R_{эkv}$ ;
- 3) увеличивается напряжения питания УЗКС на величину  $dU$ ;
- 4) осуществляется измерение текущего сопротивления  $R_{эkv}$ ;
- 5) выполняется расчет  $dR/dU$ ;
- 6) сравнивается  $dR/dU$  с уставкой  $N$ ;
- 7) если  $dR/dU < N$ , то стабилизируем напряжение питания УЗКС, если нет, то выполняются пункты 3-6.



ЗГ – задающий генератор; УМ – усилитель мощности; СС – система согласования; УУ – устройство управления; И – индикация; U – канал измерения напряжения приложенного к УЗКС; Im – канал измерения тока механической ветви; F – канал измерения частоты

Рисунок 3 – Структурная схема модернизированного аппарата

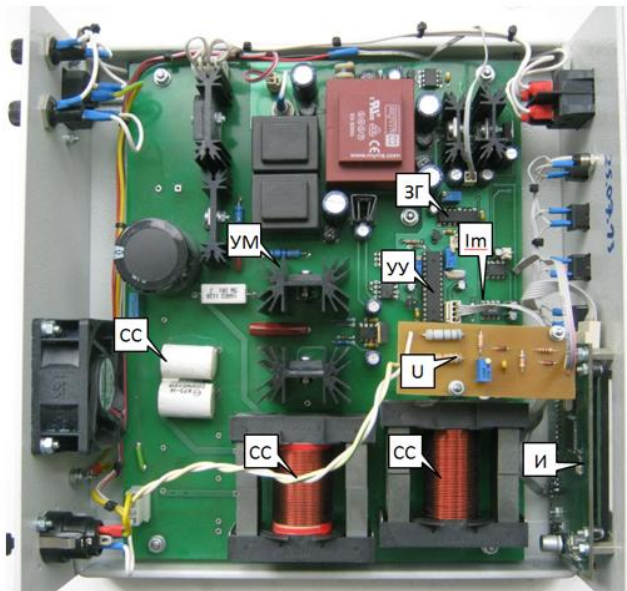


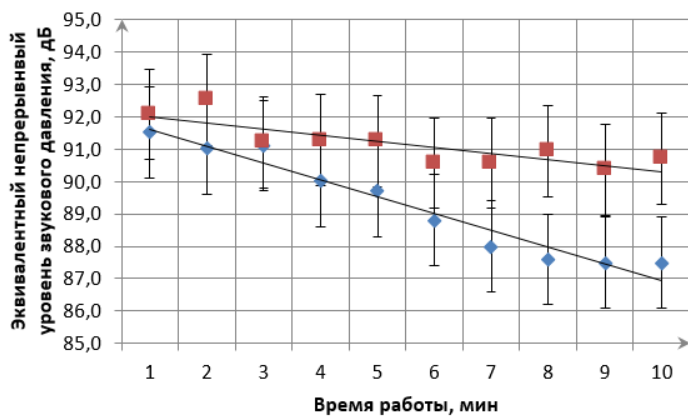
Рисунок 4 – Внешний вид модернизированного аппарата

Новое ПО ультразвукового генератора позволяет выполнить расчет напряжения питания УЗКС, величина которого выбирается из условия  $dR/dU=N$ , где  $N$  – уставка, величина которой выбирается из условия настройки на режим развитой кавитации.

Основная особенность оборудования – адаптивная настройка на режим развитой кавитации.

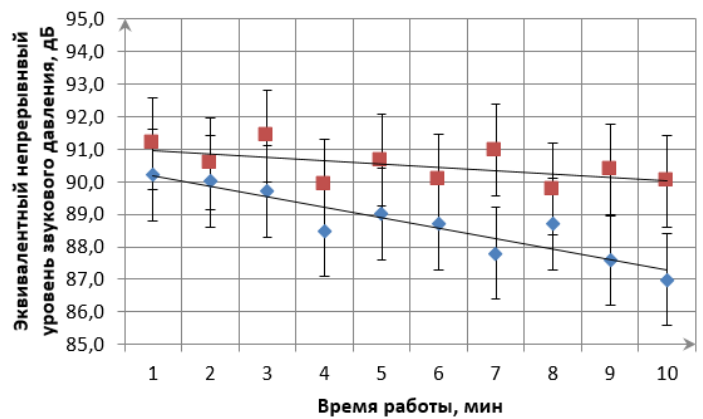
Для исследования функциональных возможностей созданного оборудования были проведены следующие эксперименты:

1) Измерение кавитационного шума, который является мерой активности кавитации при обработке растворов сахарозы различной концентрации (рисунок 5,6).



Красные маркеры – модернизированный аппарат, синие маркеры – существующий аппарат

Рисунок 5 – Измерение кавитационного шума при обработке раствора сахарозы 20% концентрации

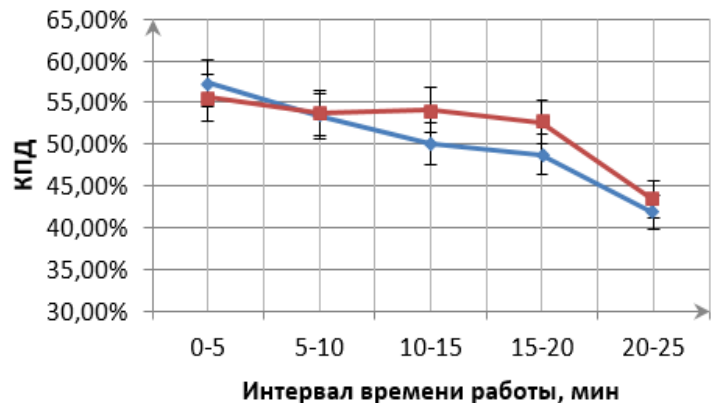


Красные маркеры – модернизированный аппарат, синие маркеры – существующий аппарат

Рисунок 5 – Измерение кавитационного шума при обработке раствора сахарозы 25% концентрации

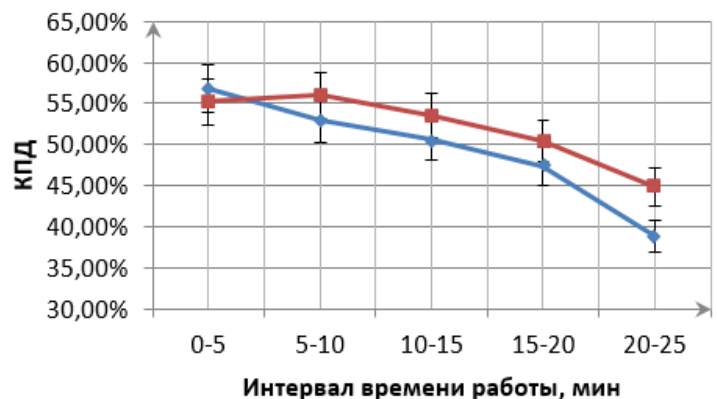
Полученные зависимости свидетельствуют о том, что использование алгоритма со стабилизацией  $dR/dU$  позволяет обеспечить более стабильный уровень активности кавитации, что подтверждает правильность выбранного параметра.

2) Исследование КПД стандартного и модернизированного ультразвукового аппарата в процессе работы. Обрабатываемая среда – водный раствор сахарозы концентрацией 0% – 40%, начальная температура раствора 20°C (рисунок 7,8).



Красные маркеры – модернизированный аппарат, синие маркеры – существующий аппарат

Рисунок 7 – Зависимость КПД стандартного и модернизированного ультразвукового аппарата от времени работы ультразвукового аппарата в водном растворе 10% сахарозы

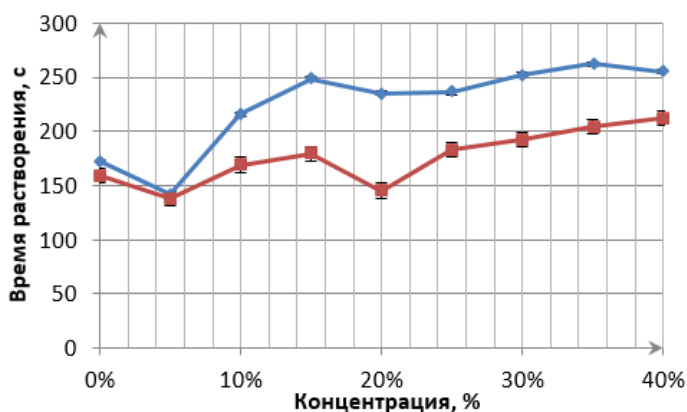


Красные маркеры – модернизированный аппарат, синие маркеры – существующий аппарат

Рисунок 8 –Зависимость КПД стандартного и модернизированного ультразвукового аппарата от времени работы ультразвукового аппарата в водном растворе 30% сахарозы

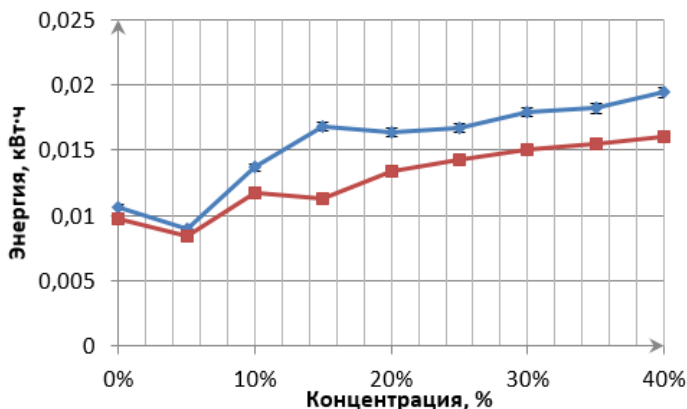
Работа модернизированного аппарата показала увеличение КПД до 8-9% .

3) Сравнение времени растворения и энергии, затраченной при растворении сухого прессованного образца в водном растворе сахарозы с концентрацией 0% – 40% интенсифицируемого при помощи стандартного и модернизированного ультразвукового аппарата (рисунок 9,10).



Красные маркеры – модернизированный аппарат, синие маркеры – существующий аппарат

Рисунок 9 –График времени растворения сухого прессованного образца в водном растворе сахарозы концентрацией 0% – 40%



Красные маркеры – модернизированный аппарат, синие маркеры – существующий аппарат

Рисунок 10 –График энергии, затраченной для растворения сухого прессованного образца в водном растворе сахарозы концентрацией 0% – 40%

При использовании модернизированного аппарата происходит увеличение скорости растворения сухого прессованного образца по сравнению со стандартным аппаратом при

больших концентрациях водного раствора сахарозы. Также модернизированный аппарат характеризуется меньшей энергией, затраченной на растворение образца. Модernизированный аппарат обеспечивает стабилизацию режима развитой кавитации, что приводит к максимальной эффективности УЗ воздействия и ускорению растворения образца.

### III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Интеграция в существующее УЗ оборудование системы контроля режима кавитационного УЗ воздействия, исследование функциональных возможностей модернизированного УЗ оборудования показали целесообразность ее применения. Разработанная система контроля позволит в автоматическом режиме настраиваться и поддерживать режим развитой кавитации при реализации физико-химических процессов, протекающих в жидких средах, а так же оптимизировать УЗ воздействие по мере изменения физических свойств обрабатываемых жидких сред.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] V.N. Khmelev, R. V. Barsukov, E.V. Ilchenko, D.V. Genne, N.S. Popova. Determination of the concentrations of water solutions during their cavitation processing 16th International Conference on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2015: Conference Proceedings. – Novosibirsk, NSTU, 2015. – P. 245–248
- [2] V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, E.V. Ilchenko, D.S. Abramenko, A.V. Shalunov. Practical Investigations of the Method of Indirect Parameter Checkout of the Acoustic International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2011. – P. 241–244.
- [3] Ультразвуковой технологический аппарат серии «Волна» [Электронный ресурс] Режим доступа: [http://www.usonic.com/catalog/apparaty\\_dlya\\_uskoreniya\\_protsesovov\\_v\\_zhidkikh\\_sredakh/ult\\_razvukovoy\\_tekhnologicheskij\\_apparat\\_serii\\_volna\\_v1/](http://www.usonic.com/catalog/apparaty_dlya_uskoreniya_protsesovov_v_zhidkikh_sredakh/ult_razvukovoy_tekhnologicheskij_apparat_serii_volna_v1/)
- [4] V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, E.V. Ilchenko, D.V. Genne, D.S. Abramenko. The Method of Indirect Control of the Parameters of Cavitating Liquid Media International Conference and Seminar on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2012: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2012. – P. 135–139.
- [5] V.N. Khmelev, R.V. Barsukov, D.V. Genne, E.V. Ilchenko, D.S. Abramenko. Method of Control Acoustic Load International Conference and Seminar of Young Specialists on Micro / Nanotechnologies and Electron Devices EDM'2011: Conference Proceedings. – Novosibirsk: NSTU, 2011. – P. 236–240.



**Владимир Николаевич Хмелев** с 2004 года является заместителем директора по научно-исследовательской работе Бийского технологического института, профессор и преподаватель, доктор технических наук, заслуженный изобретатель России, лауреат премии Правительства Российской Федерации за достижения в науке и технике, член IEEE с 2000 года, область его научных интересов применения ультразвука для интенсификации различных технологических процессов



**Барсуков Роман Владиславович.**

Получил диплом инженера в 1998 году, кандидат технических наук с 2005 года. Является ведущим специалистом в области проектирования электронных ультразвуковых генераторов, лауреат премии Правительства Российской Федерации за достижения в области науки и техники, доцент и преподаватель в Бийского технологического института. Область его научных интересов применение высоко интенсивных ультразвуковых колебаний для интенсификации технологических процессов и изменения свойств материалов и веществ.



**Ильченко Евгений Владимирович** аспирант Бийского технологического института. Область его научных интересов измерения в ультразвуковых технологических аппаратах.



**Попова Наталья Сергеевна** магистрант Бийского технологического института. Родилась 4 марта 1994 года. Бакалавр специальности приборостроение. Область её научных интересов измерения связанные с применением ультразвуковых технологических аппаратов.