

## РАЗДЕЛ 3. ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 66.084.8, 620.193.16

### УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

В.Н. Хмелев, Ю.М. Кузовников, С.С. Хмелев, М.С. Зандер

*Статья посвящена созданию ультразвукового оборудования предназначенного для исследования эрозионной стойкости различных материалов к воздействию кавитации. Приведены результаты исследования функциональных свойств созданного ультразвукового аппарата.*

*Ключевые слова: ультразвук, кавитация, кавитационная прочность материалов.*

Кавитация может возникать в жидкостях и жидкофазных дисперсиях при различных воздействиях. Энергия, запасаемая в течение продолжительного времени расширения пузырька, мгновенно высвобождается в момент его схлопывания, порождая высокоамплитудные импульсы давления [1–3]. Поскольку характерная длительность импульса давления (менее 1 мкс) много меньше периода УЗ колебаний (40...50 мкс), пиковая амплитуда давления может превышать 100 МПа [1, 2].

Если кавитационный пузырек находится достаточно близко от твердой поверхности и попадает в поле ударной волны, образованной другим пузырьком, то он деформируется в направлении движения фронта и схлопывается. При этом внутри него развивается кумулятивное струйное течение в направлении твердой поверхности, скорость которого достигает десятки метров в секунду [3].

Возникающие вблизи твердой поверхности ударные волны и кумулятивные струи обуславливают кавитационную эрозию материала [4], что сокращает срок службы деталей, узлов машин и механизмов.

Для определения предельных сроков эксплуатации машин и механизмов, подвергаемых кавитационному воздействию, необходимо наличие знаний о кавитационной стойкости (прочности) различных материалов. Стандарт ASTM G32-10 «Стандартный метод испытаний кавитационной эрозии» регламентирует один из множества методов определения кавитационной стойкости [5]. Технически метод относительно прост и этим объясняется его широкая распространенность. В соответствии с требованиями стандарта, для проведения исследований рекомендовано использовать ультразвуковой аппарат, характери-

зующийся определенными конструктивными и техническими параметрами.

Поскольку специализированных аппаратов для исследования кавитационной прочности материалов нет, возникла необходимость в разработке, измерении параметров и исследовании функциональных возможностей такого ультразвукового аппарата.

Аппарат для определения кавитационной прочности материалов должен содержать в своем составе ультразвуковую колебательную систему и электронный генератор для ее питания. Далее рассматривается предложенная конструкция аппарата.

УЗ колебательная система состоит из последовательно установленных и связанных между собой пьезопреобразователя, промежуточного звена, концентратора и рабочего инструмента (рисунок 1а).

Пьезопреобразователь, состоит из акустически связанных тыльной частотопонижающей накладкой 1 (Сталь 45), четырех пьезоэлектрических элементов 2 размером 50x20x5 мм (АРС-41) и рабочей частотопонижающей накладкой 3 (алюминиевый сплав В-95) с выходным диаметром 38 мм. Рабочая частота преобразователя, закрепленного в металлическом корпусе, составляет 20,95 кГц.

К пьезопреобразователю присоединено полуволновое резонансное промежуточное звено 4 цилиндрической формы диаметром 38 мм из титанового сплава ВТ1-0, с выполненным на равных расстояниях от входного и выходного торцов пояском для установки узла крепления колебательной системы 5 на штативе. К промежуточному звену присоединяется концентратор механических колебаний 6 с переходом ступенчато-радиальной формы [7] с диаметром выходного участка

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

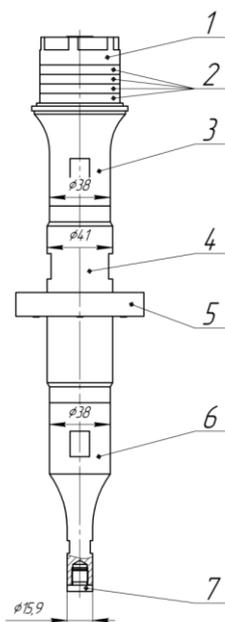
15,9 мм, к которому, посредством резьбового соединения присоединяется рабочий инструмент 7, выполняемый из различных материалов, подвергаемых исследованиям на кавитационную прочность.

Рабочие инструменты для проведения исследований изготовлены в виде цилиндров диаметром 15,9 мм (площадь торцевой излучающей поверхности  $2 \text{ см}^2$ ) из алюминиевого сплава В-95 (длина 10 мм), титанового сплава ВТ1-0 (длина 7 мм) и стали Ст-45 (длина 4 мм).

Внешний вид рабочих инструментов и участка их присоединения к концентратору представлен на рисунке 1б.

Зависимость рабочей частоты колебательной системы от используемых инструментов и их массы показана на рисунке 2.

Для проведения испытаний и исследований в составе аппарата использован генератор электрических колебаний ультразвуковой частоты, выполненный по схеме двухтактного инвертора с управляемым задающим генератором и системой обратной связи. В качестве элемента обратной связи используется пьезоэлектрическая колебательная система. Это позволяет контролировать резонансную частоту системы и ток механической ветви пьезоэлектрического преобразователя, определяющий амплитуду механических колебаний излучающей поверхности [8].



а) конструкция колебательной системы;  
б) фото рабочих инструментов из различных металлов

Рисунок 1 – Ультразвуковая колебательная система и рабочие инструменты

Внешний вид созданного аппарата представлен на рисунке 3.

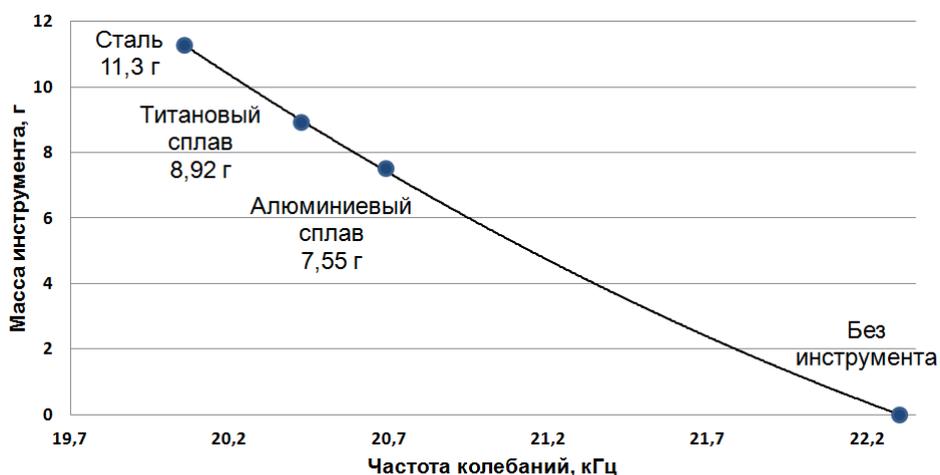


Рисунок 2 – Зависимость рабочей частоты колебательной системы от используемого инструмента



Рисунок 3 – Ультразвуковой аппарат для исследования кавитационной прочности материалов

Исследования работоспособности аппарата и измерение его параметров в процессе эксплуатации осуществлялись в полном соответствии с требованиями стандарта ASTM G32-10 [5]. В процессе испытаний контролировались резонансная частота пьезоэлектрической колебательной системы и потребляемая электрическая мощность при излучении в воздух и воду в момент включения аппарата (стартовая частота и мощность) и после 30 минут работы (выход на стационарный режим), при стабилизированной амплитуде колебаний рабочего инструмента (50 мкм).

Полученные результаты контроля частоты представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты измерения резонансной частоты

Материал инструмента	Стартовая частота в воздухе, кГц	Стартовая частота в воде, кГц	Стационарная частота в воздухе, кГц	Стационарная частота в воде, кГц
Алюминиевый сплав	20,70	20,68	20,62	20,65
Титановый сплав	20,41	20,42	20,33	20,36
Сталь	20,10	20,16	20,00	20,02

Анализ полученных результатов свидетельствует о соответствии рабочих частот созданного аппарата требованиям стандарта и о незначительном увеличении нагрузки на колебательную систему при изменении среды, в которую реализуется излучение. Очевидно, что кавитационное разрушение инструментов приведет к росту рабочей частоты

колебательной системы для каждого инструмента из-за уменьшения массы нагрузки. При этом значение резонансной частоты системы с инструментом будет стремиться к значению частоты без инструмента, т.е. к 22,3 кГц.

Результаты контроля потребляемой электрической мощности представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты контроля потребляемой ультразвуковым аппаратом электрической мощности

Материал инструмента	Стартовая мощность в воде, Вт	Стартовая мощность в воздухе, Вт	Стационарная мощность в воде, Вт	Стационарная мощность в воздухе, Вт
Алюминиевый сплав	146	100	138	93
Титановый сплав	152	95	138	83
Сталь	158	95	146	86

Поскольку разница в волновых сопротивлениях металлов и газов огромна, незначительная разница в регистрируемых значениях мощностей определяется лишь энергией УЗ механических колебаний, вводимых в жидкость. Получаемая разница позволяет

оценить интенсивность излучения с торцевой поверхности рабочего инструмента диаметром 15,9 мм и площадью 2 см<sup>2</sup>. Полученные значения мощности и интенсивности УЗ колебаний, вводимых в воду, представлены в таблице 3.

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

Таблица 3 – Результаты измерения мощности и интенсивности ультразвуковых колебаний

Материал инструмента	Стартовая мощность колебаний, выводимых в воду, Вт	Стационарная мощность колебаний, выводимых в воду, Вт	Стартовая интенсивность излучения в воду, Вт/см <sup>2</sup>	Стационарная интенсивность излучения в воду, Вт/см <sup>2</sup>
Алюминиевый сплав	46	45	23	22,5
Титановый сплав	57	55	28,5	27,5
Сталь	63	60	31,5	30,0

Для определения эффективности аппарата оценены значения мощности УЗ колебаний, вводимых в воду путем контроля прироста температуры жидкости (калориметрический метод) в соответствии с требованиями

стандарта МЭК [6]. Полученные результаты, в сравнении с данными инструментальных измерений потребляемой электрической мощности, (КПД) представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Измерения КПД аппарата с различными инструментами

Материал инструмента	Стартовый КПД (мощностные измерения) колебаний, выводимых в воду, %	Стационарный КПД (мощностные измерения) колебаний, выводимых в воду, %	КПД (калориметрические измерения) колебаний, выводимых в воду, %
Алюминиевый сплав	31,5	32,6	36
Титановый сплав	37,5	39,8	42
Сталь	39,8	41,1	50

Измерение амплитуды колебаний стробоскопическим методом [9] позволило установить соответствие между установленной мощностью аппарата и амплитудой механи-

ческих ультразвуковых колебаний торцевой поверхности рабочих инструментов из различных материалов. Полученные результаты представлены на рисунке 4.

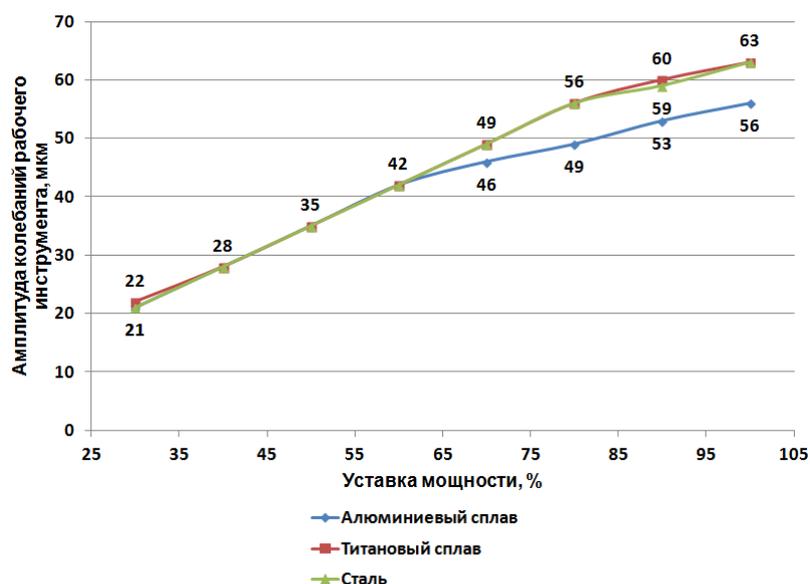


Рисунок 4 – Зависимость амплитуды колебаний рабочих инструментов из различных материалов от мощности аппарата

На завершающем этапе было исследовано влияние уменьшения массы инструмента, при обрезке его параллельно торцевой поверхности, на резонансную частоту системы (имитация кавитационного разрушения).

Сделано это на примере инструмента из алюминиевого сплава. На рисунке 5 приведены результаты, демонстрирующие изменение значения частоты при уменьшении массы инструмента.

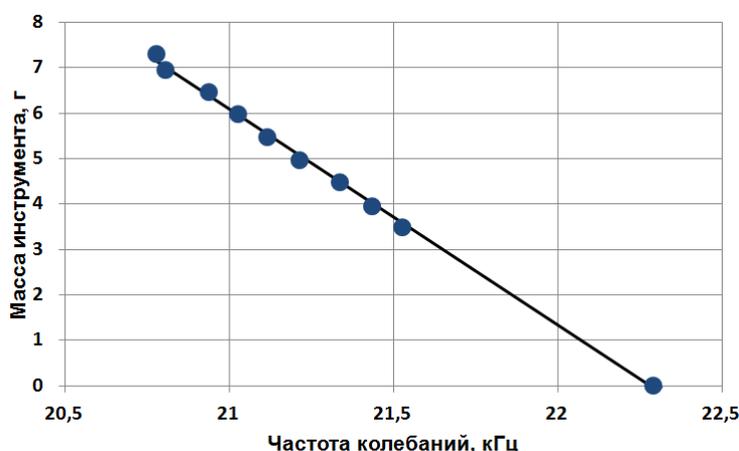


Рисунок 5 – Зависимость резонансной частоты колебательной системы от массы инструмента при обрезке его параллельно торцевой поверхности

Очевидно, что зависимость носит линейный характер. Ожидаемая частота при полном удалении инструмента находится вблизи 22,3 кГц.

Затем, для сопоставления с данными экспериментов по уменьшению массы путем изменения размера инструмента параллельно торцевой поверхности, были выполнены

исследования при уменьшении массы рабочего инструмента из алюминиевого сплава путем ее удаления под углом к торцевой поверхности. Значения углов были выбраны равными 0°, 10°, 15° и 20°. Зависимости значения резонансной частоты системы от величины массы инструмента представлены на рисунке 6.

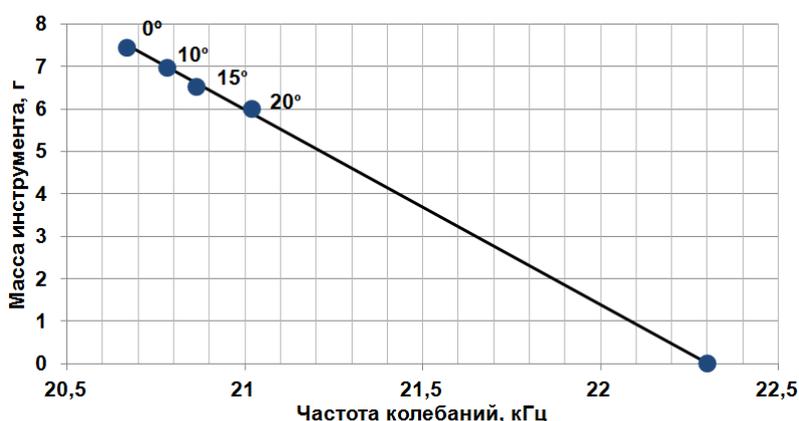


Рисунок 6 – Зависимость значения резонансной частоты колебательной системы от величины массы инструмента при уменьшении его продольного размера под углом к торцевой поверхности

Анализируя полученные результаты, можно утверждать, что угол среза существенного влияния на параметры аппарата не оказывает. Но, как и в предыдущих исследованиях, на рост частоты влияет уменьшение массы инструмента. Полученные результаты свидетельствуют о том, что неравномерность

кавитационного разрушения не повлияет на результаты исследований. Это позволяет проводить исследования для определения разрушения поверхностей, расположенных под углом к направлению кавитационного воздействия.

Таким образом, предложен и разработан

## УЛЬТРАЗВУКОВОЙ АППАРАТ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ МАТЕРИАЛОВ

ультразвуковой технологический аппарат, полностью соответствующий требованиям регламентированного испытательного метода и исследованы его функциональные возможности для определения кавитационной прочности материалов.

В ходе проведенных исследований установлено следующее:

1. Значение резонансной частоты колебательной системы увеличивается по мере уменьшения массы инструмента в независимости от его материала, при этом частота линейно стремится к значению, соответствующему значению резонансной частоты системы без инструмента.

2. Созданный УЗ аппарат обеспечивает стабилизацию значения амплитуды колебаний рабочих инструментов, при этом наблюдается существенное уменьшение потребляемой мощности при работе на воздухе, относительно значений, зарегистрированных при излучении в воду.

3. Установлены значения интенсивности колебаний, вводимых в воду, при этом наименьшее значение получено при использовании инструмента из алюминиевого сплава, а наибольшее – для инструмента из стали.

4. Определены значения амплитуды колебаний рабочих инструментов из различных материалов для соответствующих уставок мощности ультразвукового аппарата.

5. Практически изучен характер влияния массы инструмента на резонансную частоту колебательной системы при изменении его размера путем удаления части инструмента, параллельно торцевой поверхности и под некоторым углом к ней, установлена зависимость резонансной частоты от удаляемой массы и независимость от места и направления ее среза.

6. Проведенные измерения и исследования позволяют рекомендовать аппарат для изучения кавитационной стойкости различных материалов в соответствии с регламентированным испытательным методом.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хмелев, В. Н. Ультразвук. Аппараты и технологии [Текст] / В. Н. Хмелев, А. В. Шалунов, С. С. Хмелев, С. Н. Цыганок. – Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2015. – 687 с.

2. Перник, А. Д. Проблемы кавитации [Текст] / А. Д. Перник. – 2-ое изд. – Л. : Судостроение, 1966. – 435 с.

3. Кедринский, В. К. Гидродинамика взрыва: эксперимент и модели [Текст] / В. К. Кедринский. – Новосибирск : Издательство СО РАН, 2000. – 435 с.

4. Steller, J. International Cavitation Erosion Test and quantitative assessment of material resistance to cavitation. *Wear Volumes 233–235* [Text] / J. Steller. – December 1999. – P. 51–64.

5. ASTM G32-10, Standard Test Method for Cavitation Erosion Using Vibratory Apparatus [Web resource] / ASTM International: West Conshohocken, PA. – 2010, URL: [www.astm.org](http://www.astm.org).

6. Стандарт Международной электротехнической комиссии МЭК, публикация 782, раздел 12, 1987. – 12.1 п.

7. Патент 2141386 Российская Федерация, МПК В06В 3/00. Ультразвуковая колебательная система [Текст] / Барсуков Р. В., Хмелев В. Н., Цыганок С. Н.; заявитель и патентообладатель Бийский технологический институт Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. – № 97120873/28; заявл. 15.12.1997; опубл. 20.11.1999.

8. Хмелев, В. Н. Источники ультразвукового воздействия. Особенности построения и конструкции / В. Н. Хмелев, С. С. Хмелев, С. Н. Цыганок, С. В. Левин // Алт. гос. техн. ун-т, БТИ. – Бийск : Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2013. – 196 с.

9. Патент 2292530 Российская Федерация, МПК G01Н9/00. Способ измерения амплитуды колебаний [Текст] / Леонов Г. В., Хмелев В. Н., Савин И. И., Абраменко Д. С.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова» (АлтГТУ). – № 2005111032/28; заявл. 14.04.2005; опубл. 27.01.2007, Бюл. № 3. – 10 с.

**Хмелев В.Н.**, д.т.н., профессор, директор по научной работе, МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», тел.: 8(3854) 43-25-70, e-mail: [vnh@bti.secna.ru](mailto:vnh@bti.secna.ru).

**Кузовников Ю.М.**, к.т.н., инженер, МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», тел.: 8(3854) 43-25-70, e-mail: [kuzovnikov@bti.secna.ru](mailto:kuzovnikov@bti.secna.ru).

**Хмелев С.С.**, к.т.н., главный конструктор, МИП ООО «Центр ультразвуковых технологий АлтГТУ», тел.: 8(3854) 43-25-70, e-mail: [ssh@bti.secna.ru](mailto:ssh@bti.secna.ru).

**Зандер М.С.**, к.т.н., ведущий инженер отдела корпоративных исследований, ООО «Роберт Бош», тел.: +79215761755, e-mail: [mikhael.sander@ru.bosch.com](mailto:mikhael.sander@ru.bosch.com).