

# Ультразвуковой Аппарат Для Исследования Кавитационной Прочности Материалов

Владимир Н. Хмелев, Юрий М. Кузовников, Сергей С. Хмелев, Сергей С. Левин, Максим В. Хмелев

Бийский технологический институт (филиал) ФГБОУ ВО Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Бийск, Россия  
ООО «Центр ультразвуковых технологий», Бийск, Россия

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

**Ключевые слова** – Ультразвук, кавитация, кавитационная прочность материалов.

## I. ВВЕДЕНИЕ

Возникающие вблизи твёрдой поверхности ударные волны и кумулятивные струи обуславливают кавитационную эрозию материала [1-4], что сокращает срок службы деталей, узлов машин и механизмов.

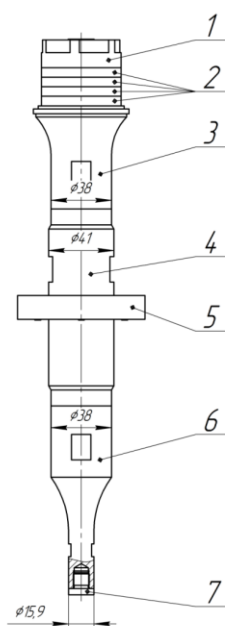
Для определения предельных сроков эксплуатации машин и механизмов, подвергаемых кавитационному воздействию, необходимо наличие знаний о кавитационной стойкости (прочности) различных материалов. Стандарт ASTM G32-10 «Стандартный метод испытаний кавитационной эрозии» регламентирует один из множества методов определения кавитационной стойкости [5]. Технически метод относительно прост и этим объясняется его широкая распространенность.

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

## II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

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).



а) конструкция колебательной системы;  
б) фото рабочих инструментов

Рис. 1. Ультразвуковая колебательная система и рабочие инструменты

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 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 были изготовлены в виде цилиндров диаметром 15,9 мм (площадь торцевой излучающей поверхности 2 см<sup>2</sup>) из алюминиевого сплава В-95 (длина 10 мм).

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

Расчетная резонансная частота колебательной системы без инструмента соответствует 22,3 кГц.

Внешний вид созданного аппарата представлен на рисунке 2.



Рис. 2. Ультразвуковой аппарат для исследования кавитационной прочности материалов

Исследование 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 (стартовые 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 I  
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ РЕЗОНАНСНОЙ ЧАСТОТЫ

	Стартовая частота, кГц	Стационарная частота, кГц
Воздух	20,7	20,62
Вода	20,68	20,65

Анализ результатов измерений свидетельствует о соответствии рабочих частот созданного аппарата с использованием инструментов из выбранного сплава требованиям стандарта и о незначительном увеличении нагрузки на колебательную систему при изменении среды, в которую реализуется излучение. Очевидно, что кавитационное разрушение инструмента приведет к росту значения резонансной частоты колебательной системы из-за уменьшения массы нагрузки, которое будет стремиться к значению частоты без инструмента, т.е. к 22,3 кГц.

Результаты контроля потребляемой электрической мощности представлены в таблице 2.

ТАБЛИЦА II  
РЕЗУЛЬТАТЫ КОНТРОЛЯ ПОТРЕБЛЯЕМОЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫМ АППАРАТОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ

	Стартовая мощность, Вт	Стационарная мощность, Вт
Воздух	100	93
Вода	140	138

Поскольку разница в волновых сопротивлениях металлов и газов огромна, незначительная разница в регистрируемых значениях мощностей определяется лишь энергией ультразвуковых 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.

ТАБЛИЦА III  
РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ МОЩНОСТИ И ИНТЕНСИВНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ, ВВОДИМЫХ В ВОДУ

Параметр	Измеренное значение
Стартовая мощность колебаний, Вт	46
Стационарная мощность колебаний, Вт	45
Стартовая интенсивность излучения, Вт/см <sup>2</sup>	23
Стационарная интенсивность излучения, Вт/см <sup>2</sup>	22,5

Для оценки эффективности аппарата определены значения мощности ультразвуковых 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 IV  
ИЗМЕРЕНИЯ КПД АППАРАТА

Параметр	Значение
Стартовый КПД (мощностные измерения) колебаний, вводимых в воду, %	31,5
Стационарный КПД (мощностные измерения) колебаний, вводимых в воду, %	32,6
КПД (калориметрические измерения) колебаний, вводимых в воду, %	36

Измерение амплитуды колебаний стробоскопическим методом [9] позволило установить соответствие между установленной мощностью аппарата и амплитудой механических ультразвуковых колебаний торцевой поверхности рабочего инструмента. Полученные результаты представлены на рисунке 3.

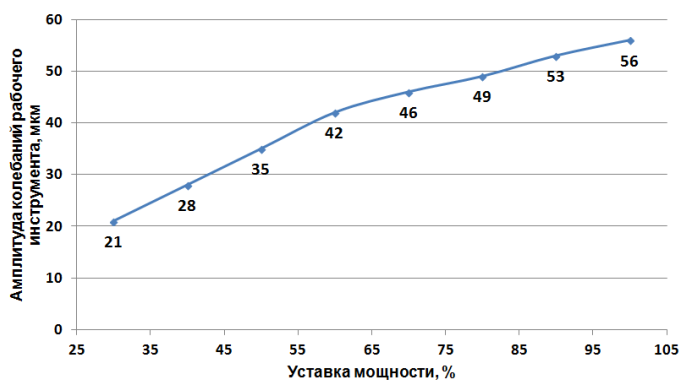


Рис. 3. Зависимость амплитуды колебаний рабочего инструмента от мощности аппарата

На завершающем этапе было исследовано влияние уменьшения массы инструмента, при обрезке его параллельно торцевой поверхности, на резонансную частоту системы (имитация кавитационного разрушения). На рисунке 4 приведены результаты, демонстрирующие изменение значения частоты при уменьшении массы инструмента.

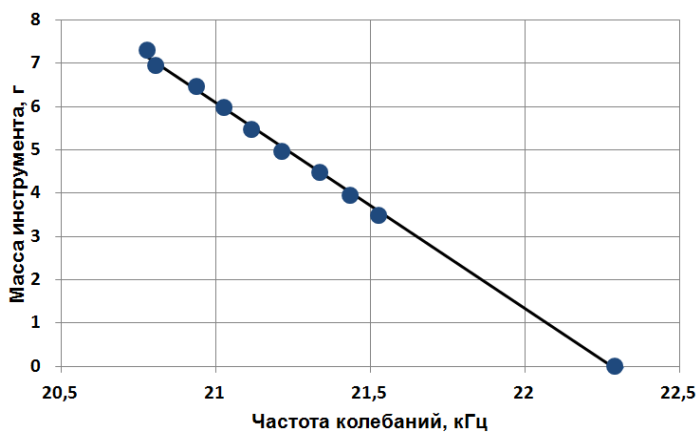


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты колебательной системы от массы инструмента при обрезке его параллельно торцевой поверхности

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 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 5.

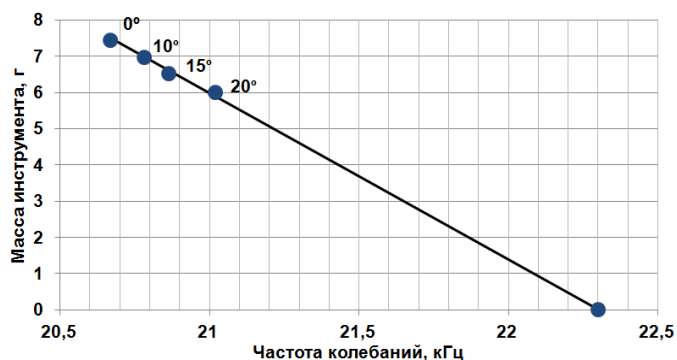


Рис. 5. Зависимость значения резонансной частоты колебательной системы от величины массы инструмента при уменьшении его продольного размера

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.

## VI. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, был предложен и разработан 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, при этом частота линейно стремится к значению, соответствующему значению резонансной частоты системы без инструмента.

2. Установлены значения интенсивности колебаний, вводимых в воду, а также определены значения амплитуды колебаний рабочего инструмента для соответствующих уставок мощности ультразвукового аппарата.

3. 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 убыли.

Проведенные измерения и исследования позволяют рекомендовать разработанный 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.
- [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 G01H9/00. 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.