

УДК 620.164.1

## ИССЛЕДОВАНИЕ СРАВНИТЕЛЬНОЙ СТОЙКОСТИ К КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ И ПОКРЫТИЙ ПРОТОЧНОЙ ЧАСТИ ГИДРОМАШИН

**А.И. Петров, М.М. Скобелев, А.Г. Ханычев**

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация  
e-mail: alex\_i\_petrov@mail.ru; khanychevalexandr@gmail.com

*Приведены результаты экспериментального исследования сравнительной стойкости материалов проточной части гидромашин к кавитации. Дан краткий обзор существующих способов нормальных и ускоренных испытаний на стойкость материалов к кавитационной эрозии. Приведена методика испытаний на основе метода ультразвуковой кавитации и показана конструкция стенда. Выполнены исследования как образцов из различных марок стали, так и полимерных и резиновых покрытий разной толщины. Результаты испытаний представлены в виде зависимостей потери массы и скорости потери массы образцами из различных материалов от времени испытаний, что дает представление о сравнительной кавитационной стойкости материалов и покрытий. Приведены фотографии образцов, подвергавшихся кавитационной эрозии. Сделаны выводы о степени применимости различных материалов и покрытий для изготовления рабочих органов лопастных насосов и гидротурбин.*

**Ключевые слова:** кавитационная эрозия, ультразвуковая кавитация, испытания образцов, резиновые покрытия.

## STUDY OF COMPARATIVE RESISTANCE TO CAVITATIONAL EROSION OF MATERIAL SAMPLES AND COATINGS IN THE HYDRAULIC MACHINE FLOW SECTIONS

**A.I. Petrov, M.M. Skobelev, A.G. Khanychev**

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation  
e-mail: alex\_i\_petrov@mail.ru; khanychevalexandr@gmail.com

*The material resistance to cavitation is studied experimentally in the flow sections of hydraulic machines. A brief review of existing normal and accelerated testing methods of the material resistance to cavitation erosion is presented. The testing technique is based on the ultrasonic cavitation method. The test bench design is described. The samples of various grades of steels, as well as of polymers and rubber coatings of different thicknesses are investigated. Test results characterizing comparative resistance to cavitation of materials and coatings are presented as the relationships between the sample mass loss and the rate of mass loss for different materials and testing time. Photo images of the samples subjected to cavitation erosion are presented. Conclusions are made about the applicability of different materials and coatings for manufacturing the working parts of vane pumps and water turbines.*

**Keywords:** cavitation erosion, ultrasonic cavitation, test samples, rubber.

Задача определения абсолютной и относительной стойкости различных видов материалов и покрытий к воздействию кавитационной эрозии является актуальной для самых разных областей техники.

В частности, кавитационная эрозия имеет место в проточной части гидротурбин, в насосах самого разного назначения, в различных элементах гидропривода.

Наиболее опасной кавитационная эрозия является в сочетании с химической и электрохимической коррозией, а также с абразивной эрозией [1]. Указанное сочетание опасных факторов встречается, например, в химических насосах.

Однако для большинства видов гидравлической техники и обычная кавитационная эрозия представляет большую опасность [2, 3]. Так, кавитационная эрозия проточной части крупных гидротурбин может привести как к падению КПД и усилению вибрации ротора гидротурбоагрегата, так и к разрушению его проточной части [4], тогда как ремонт и даже осмотр проточной части турбины крайне затруднены условиями ее непрерывной эксплуатации.

Задачей настоящей работы являлось проведение сравнительных испытаний образцов материалов и покрытий на стойкость к кавитационной эрозии. Испытывались материалы (стали), применяемые в проточных частях насосов и гидротурбин, а также различные покрытия как полимерные, так и резиновые.

Испытания проводились в лаборатории кафедры “Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика” МГТУ им. Н.Э. Баумана в рамках договора с производителем данных покрытий в РФ ЗАО “ПАРМА-СЕРВИС”.

**Обзор существующих методик испытаний.** В настоящее время имеются три основные методики испытаний материалов на стойкость к кавитационной эрозии — гидродинамическая (естественная) (рис. 1) кавитация, гидроструйное (ударное) воздействие (рис. 2) на образец и ультразвуковая (вибрационная) (рис. 3) кавитация [5, 6].

Первый метод позволяет имитировать кавитационную эрозию наиболее близко к действительной (происходящей в проточной части гидромашин [2]), однако требует непропорционально больших затрат времени и электроэнергии, так как в этом случае время подконтрольного разрушения образца может составить сотни и даже тысячи (для высокопрочных материалов) часов непрерывной работы стенда, а затрачиваемая на циркуляцию жидкости энергия (определяемая мощностью насоса) может достичь десяти и более киловатт в час (зависит

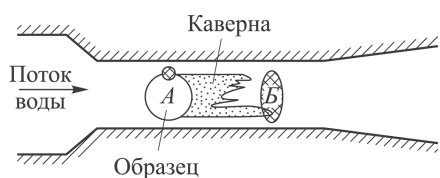


Рис. 1. Схема получения гидродинамической кавитации

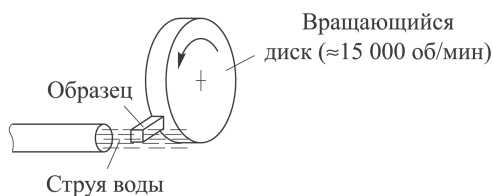
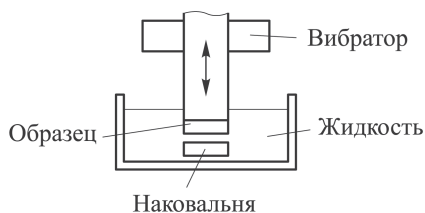


Рис. 2. Ударный метод имитации кавитационной эрозии



**Рис. 3. Схема получения вибрационной (ультразвуковой) кавитации**

имущественного разрушения. Возможен также вариант с установкой на базе кавитирующего в естественных условиях насоса (например, на подконтрольной эксплуатации), но он затруднен сложностью изготовления проточных частей из различных испытываемых материалов и невозможностью обеспечить на объекте стабильный и контролируемый режим работы насоса.

Второй метод разрушения подразумевает использование гидроструйной установки (например, на базе станка для гидроабразивной резки) и вращающегося с высокой скоростью образца [5, 7]. В этом случае время, требуемое для эрозии, снижается примерно на 2 порядка по сравнению с первым методом. Однако здесь не достигается равномерное разрушение образца, физика процесса далека от реальной кавитации, поэтому необходимо сложное оборудование.

Третий метод, применяемый в настоящей работе — это метод вибрационной (ультразвуковой) кавитации, согласно которому находящемуся в жидкости образцу сообщаются высокочастотные порядка 20 кГц (ультразвуковые) колебания вдоль вертикальной оси. При этом на нижней горизонтальной поверхности образца возникает ультразвуковая кавитация, приводящая к кавитационной эрозии.

Наличие показанной на рис. 3 наковальни не является обязательным, как указано в работе [8]. Ультразвуковая кавитация возникает на нижнем торце образца вне зависимости от наличия наковальни, однако возможно разрушение как прямое (на нижнем торце излучателя), так и косвенное — на наковальне.

Соотношение времени кавитационной эрозии образца (что выражается скоростью уноса материала с поверхности образца) и гидродинамической, ударной или ультразвуковой кавитацией может быть найдено только экспериментально, однако в работах [5, 9, 10] приводятся данные, что эта зависимость линейная как для соотношения между ударной и гидродинамической кавитациями (рис. 4), так и для соотношения между ударной и вибрационной (ультразвуковой) кавитациями (рис. 5).

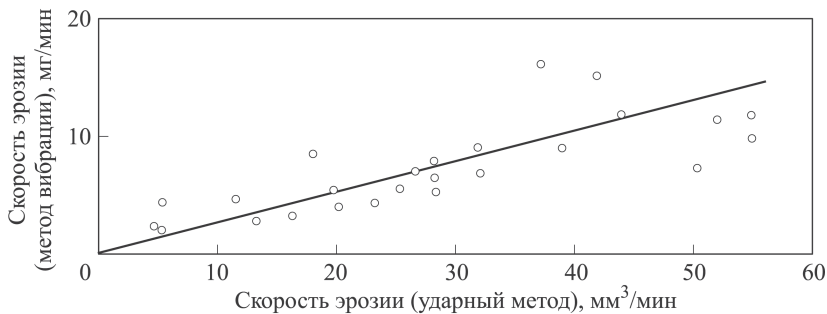
В настоящей работе была применена ультразвуковая (вибрационная) схема получения кавитационной эрозии — наиболее удобная для

от расхода жидкости в кавитаторе и размеров образца, при этом рекомендуемая скорость течения жидкости не менее 40 м/с) [7].

Обычно такой метод применяют для разрушения специальных легко-разрушаемых покрытий (например, лаковых или на основе полимеров) и определения таким образом зоны пре-



**Рис. 4. Зависимость скорости эрозии при гидродинамической кавитации и от скорости эрозии при ударном методе разрушения образца**



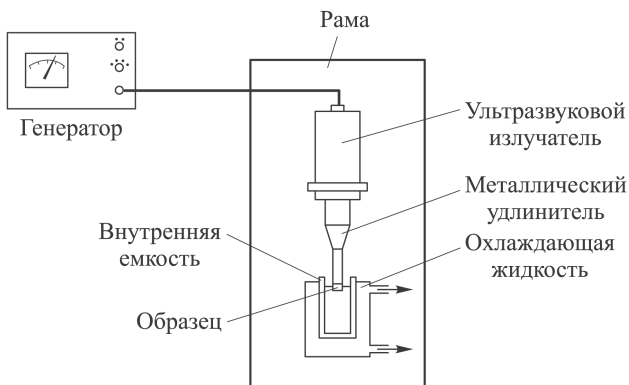
**Рис. 5. Соотношение между скоростью кавитационной эрозии материала, полученной ударным и вибрационным (ультразвуковым) методами**

проведения экспериментов с точки зрения стоимости оборудования и времени исследований образцов. Применялась прямая схема эрозии (с установкой образца на излучатель без наковальни).

**Схема установки для проведения испытаний.** Поскольку отечественных стандартов, содержащих схему установки, и методик испытаний образцов на кавитационную стойкость с помощью ультразвукового метода не существует, был принят за основу американский стандарт ASTM G32-10 [8].

Схема установки для проведения испытаний образцов приведена на рис. 6.

На рис. 6 [8] показаны вертикально установленный на раме ультразвуковой излучатель, подключенный к генератору с блоком питания. К торцу выходного сердечника генератора (на котором создаются ультразвуковые колебания) жестко прикреплен металлический удлинитель, к торцу которого, в свою очередь, жестко крепится испытуемый образец



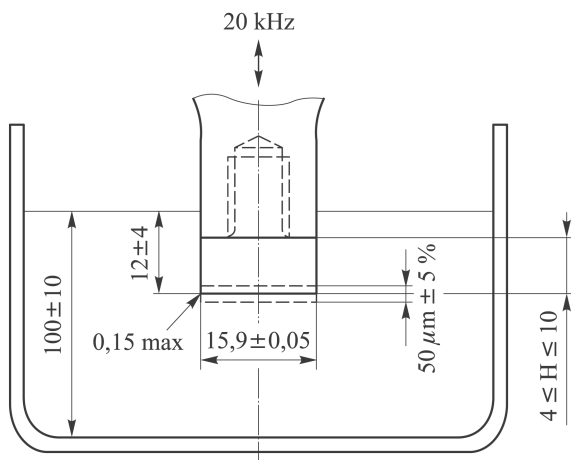
**Рис. 6. Схема установки для испытания образцов на кавитационную эрозию ультразвуковым методом**

из различных материалов. При этом ультразвуковые колебания передаются от сердечника на удлинитель и от него на образец за счет того, что их торцевые металлические поверхности плотно прилегают друг к другу.

Образец заглубляется на 12 мм (не более, фактически была принята глубина 8... 9 мм для исключения попадания воды в резьбовое соединение образца, рис. 7) под уровень дистиллированной воды, налитой во внутреннюю емкость, которая помещена во внешнюю емкость, заполненную охлаждающей жидкостью, имеющей некоторую циркуляцию. Также охлаждается сам излучатель — вода под давлением прокачивается через предусмотренные для этого каналы.

Внешний кожух звуковой защиты на данном стенде не устанавливался (для экономии времени на сборку стенда и смену образцов), что допустимо, так как испытания проводились в помещении лаборатории без постоянного присутствия персонала.

Для проведения испытаний использовалось ультразвуковое обо-



**Рис. 7. Размеры и схема размещения образца в емкости**

рудование отечественного производства (генератор УЗГМ 2-22 МС и излучатель ПМС 1-22).

**Состав испытываемых образцов.** В процессе испытаний образцы (табл. 1) были подвергнуты кавитационной эрозии.

Таблица 1

**Испытываемые образцы**

Номер образца	Тип материала/покрытия	Толщина покрытия, мм	Примечание
1	Подложка 1341, покрытие 2141	1	резина
2	Подложка 1341, покрытие 2141	2	резина
3	1341	3	резина
4	1391	3	полимер
5	Сталь 25Л	—	сталь
6	12Х18Н10Т	—	сталь

**Методика проведения испытаний.** Испытания проводились в чистой воде методом высокочастотной вибрации образца с частотой  $20 \pm 0,5$  кГц. Амплитуда колебаний образца составляла (согласно документации на излучатель) 50 нм, излучаемая акустическая мощность (замеряемая на генераторе ультразвуковых колебаний) составляла от 0,9 до 1 кВт.

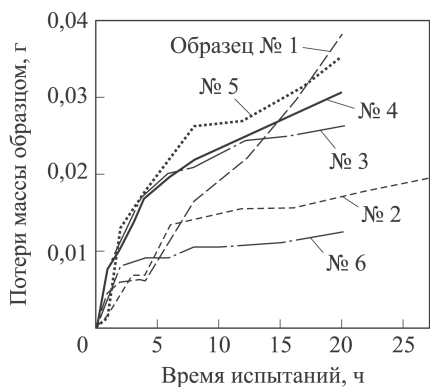
Срок непрерывной работы излучателя был установлен равным 1, 2 или 4 ч. Затем излучатель автоматически отключался для охлаждения генератора (сам излучатель охлаждался постоянно протекающей через него водой).

Емкость с дистиллированной водой охлаждалась посредством циркуляции жидкости во второй емкости большего объема, внутрь которой была вставлена первая емкость. Температура жидкости в процессе испытаний составляла  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ .

После каждого цикла работы образец фотографировался для получения визуального ряда нарастания следов эрозии. Через каждые 2 цикла работы (через 8 ч) образец демонтировали и высушивали, затем образец взвешивали на точных весах для определения потери массы.

Для образцов с покрытиями было проведено длительное контрольное погружение в воду, чтобы исключить влияние возможного впитывания материалом покрытия воды и соответствующего увеличения массы образца.

Общий цикл работы с одним образцом составлял до 20 ч, или до разрушения образца, за исключением образцов № 2 и № 6, которые были подвергнуты испытаниям в течение 40 ч.



**Рис. 8.** Зависимость потери массы образцами от времени наработки

**Результатами испытаний** являются полученные сравнительные зависимости потери массы образцов от времени (рис. 8). Кроме того, развитие кавитационной эрозии с течением времени можно отследить по фотографиям образцов (рис. 9), сделанным с определенными временными интервалами. В табл. 2 приведены средние скорости потери массы образцами из различных материалов.

Таблица 2

**Значения скорости потери массы образцами**

Номер образца	Материал	Средняя скорость потери массы, мг/ч
1	2141	1,93
2	2141	0,63
3	1341	1,32
4	1391	1,55
5	Сталь 25Л	1,78
6	12Х18Н10Т	0,62

На рис. 10 приведены наиболее характерные зависимости скорости потери массы для четырех основных типов испытываемых образцов — стали, коррозионно-стойкой стали, резинового и полимерного покрытия (см. табл. 2).



**Рис. 9.** Вид кавитационной эрозии на образце из стали марки Ст3 (слева) и на полимерном покрытии после 8 ч наработки



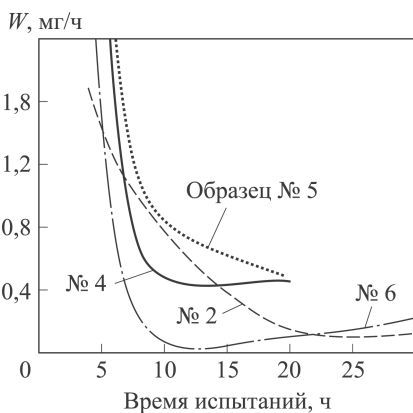
**Выводы.** 1. Подтверждена применимость предложенной методики испытаний для оценки сравнительной кавитационной стойкости образцов из различных материалов к эрозии. Данная методика может быть использована для испытаний материалов и покрытий любых видов. Однако для получения удовлетворительных формул пересчета стойкости материалов в условиях гидродинамической кавитации требуются дополнительные исследования.

2. Испытания образцов показали высокую сравнительную стойкость резиновых покрытий (образцы № 2) с толщиной покрытия 2 мм к кавитационной эрозии. Скорость потери массы образцами с таким покрытием была в 2,7 раза меньше таковой у образцов (№ 5) из стали 25Л. Из этого следует целесообразность применения данного типа покрытий в проточной части гидромашин для повышения их ресурса работы.

3. Образцы (№ 1) с резиновым покрытием толщиной 1 мм показали значительно меньшую стойкость (сравнимую со стойкостью стали 25 Л), что, возможно, вызвано распространением ультразвуковых колебаний в тонком слое резины с отражением волны от поверхности металла основы [6].

4. Наибольшую стойкость к кавитационной эрозии показал образец (№ 6) из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т, что, возможно, определяется влиянием окислительных процессов [4].

5. Образцы с полимерными покрытиями (№ 3 и № 4) показали низкую кавитационную стойкость и их применение в гидромашине для защиты от кавитационной эрозии не оправдано.



**Рис. 10.** Зависимость скорости уноса материала от времени

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ковалев А.А., Спокойный И.А., Шапурин В.Д. Оценка кавитационной стойкости узлов и деталей машин, работающих в жидких агрессивных средах // Вестник машиностроения. 2014. № 5. С. 50–55.
2. Карелин В.Я. Кавитационные явления в центробежных и осевых насосах. М.: Машиностроение, 1976. 325 с.
3. Ковалев А.А. Моделирование кавитационного воздействия на рабочую поверхность изделия, эксплуатируемого в гидродинамической среде // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2013. № 11. С. 25–36.
4. Тимербулатов М.Г. Влияние коррозионного фактора на кавитационную стойкость металла // Труды координационных совещаний по гидротехнике. Л.: Энергия, 1973. Вып. 79 (Коррозия и защита от нее металлоконструкций гидротехнических сооружений). С. 38–44.



5. Kendrick H. Light. Development of cavitation erosion resistant advanced material system. Orono (Maine, USA). The University of Maine, 2005. 76 p.
6. Бронин Ф.А. Исследование кавитационного разрушения и диспергирования твердых тел в ультразвуковом поле высокой интенсивности. Автореф. дисс. . . . на соискание уч. степ. канд. техн. наук. 1967. 16 с.
7. Перник А.Д. Проблемы кавитации. Л.: Судостроение, 1966. 239 с.
8. ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. Pub. Dec. 1, 2010.
9. Кнепп Р., Дейли Дж., Хеммит Ф. Кавитация. М.: Мир, 1974. 687 с.
10. Бахтин Б.И., Иваишов А.И., Кузнецов А.В., Скороходов А.С. Экспериментальное исследование особенностей формирования кавитационных зон в сильных ультразвуковых полях // ИФЖ. 2014. Т. 87. № 3. С. 650–663.

## REFERENCES

- [1] Kovalev A.A., Spokoynyy I.A., Shashurin V.D. Evaluation of cavitation stability of machine units and parts operating in corrosive liquids. *Vestn. Mashinostr.* [Russ. Eng. Res.], 2014, no. 5, pp. 50–55 (in Russ.).
- [2] Karelin V.Ya. Kavitatsionnye yavleniya v tsentrobeznykh i osevykh nasosakh [Cavitation phenomena in centrifugal and axial pumps]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 325 p.
- [3] Kovalev A.A. Simulation of cavitation effect on the working surface of the product operating in the hydrodynamic environment. *Jelekt. Nauchno-Tehn. Izd "Nauka i obrazovanie" MGTU im. N.E. Baumana* [El. Sc.-Tech. Publ. "Science and Education" of Bauman MSTU], 2013, no. 11, pp. 25–36 (in Russ.).
- [4] Timerbulatov M.G. Influence of corrosion factor on cavitation resistance of metals. *Tr. koordinatsionnykh soveshchaniy po gidrotekhnike* [Proc. of coordinating meetings in hydraulic engineering]. Leningrad, Energiya Publ., 1973, iss. 79 (Corrosion and corrosion protection of waterworks' metal constructions), pp. 38–44 (in Russ.).
- [5] Kendrick H. Light. Development of cavitation erosion resistant advanced material system. Orono (Maine, USA). The University of Maine, 2005. 76 p.
- [6] Bronin F.A. Issledovanie kavitatsionnogo razrusheniya i dispergirovaniya tverdykh tel v ul'trazvukovom pole vysokoy intensivnosti [Study of cavitation destruction and dispersion of solids in highly intensive ultrasonic field]. Diss. kand. tekhn. nauk [Cand. tech. sci. diss.], 1967. 16 p.
- [7] Pernik A.D. Problemy kavitatsii [Cavitation problems]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1966. 239 p.
- [8] ASTM G32-10 Standard test method for cavitation erosion using vibratory apparatus. Pub. Dec. 1, 2010.
- [9] Knepp R., Deyli Dzh., Khemmit F. Kavitatsiya [Cavitation]. Russ. Ed. Moscow, Mir Publ., 1974. 687 p.
- [10] Bakhtin B.I., Ivashov A.I., Kuznetsov A.V., Skorokhodov A.S. Experimental study of the particulars of cavitation zone formation in strong ultrasonic fields. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal* [J. Eng. Phys. Thermophys.], 2014, vol. 87, no. 3, pp. 650–663 (in Russ.).

Статья поступила в редакцию 23.06.2014

Петров Алексей Игоревич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Гидромеханика, гидромашин и гидропневмоавтоматика” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области лопастных гидромашин.  
МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Petrov A.I. — Cand. Sci. (Eng.), assoc. prof. of “Hydromechanics, Hydromachines and Hydropneumoautomatics” department of the Bauman Moscow State Technical University. Specializes in the field of vane hydraulic machines.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Скобелев Михаил Михайлович — канд. техн. наук, начальник патентного отдела Центра защиты интеллектуальной собственности МГТУ им. Н.Э. Баумана, патентный поверенный РФ, доцент кафедры “Подводные роботы и аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Skobelev M.M. — Cand. Sci. (Eng.), head of patent department of the Bauman Moscow State Technical University Center of intellectual property protection, RF patent agent, associate professor of “Underwater Robots and Devices” department of the Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.

Ханычев Александр Геннадьевич — инженер кафедры “Гидромеханика, гидромашины и гидропневмоавтоматика” МГТУ им. Н.Э. Баумана.

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

Khanychev A.G. — engineer of “Hydromechanics, Hydromachines and Hydropneumoautomatics” department of the Bauman Moscow State Technical University.

Bauman Moscow State Technical University, 2-ya Baumanskaya ul. 5, Moscow, 105005 Russian Federation.