



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-8-97-103>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 534.29

ИССЛЕДОВАНИЕ СВЯЗИ ЭРОЗИОННОЙ АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ И ИНТЕНСИВНОСТИ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА

МИНЧУК В.С., ПЕРХУНОВА А.Ю., КОТУХОВ А.В., ДЕЖКУНОВ Н.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 30 ноября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Исследование эрозионной активности кавитации представляет значительный интерес для уточнения механизма воздействия кавитации на биологические ткани и клетки. В работе предложена усовершенствованная методика оценки эрозионной активности акустической кавитации. Приводятся результаты апробации данной методики применительно к задаче исследования распределения эрозионной активности в кавитационной области, генерируемой излучателем со стержневым волноводом. Эксперименты проводились с использованием погружного излучателя с резонансной частотой 32 кГц. Установлено, что при диаметре излучателя меньше или порядка длины волны в используемой жидкости эрозионная активность быстро уменьшается по мере удаления от излучателя и зависит от расстояния до излучателя L как $1/L^3$. Показано, что имеет место корреляция эрозионной активности кавитации и показаний кавитометра, выходным сигналом которого является интегральная интенсивность высокочастотной составляющей кавитационного шума в диапазоне частот до 10 МГц. Для регистрации кавитационного шума использовались пьезоэлектрические датчики. В частности, в жидкостях, характеризующихся более высоким уровнем эрозионной активности, выходной сигнал кавитометра также выше. Показания кавитометра при этом изменяются в зависимости от расстояния до излучателя как $1/L$. Исходя из полученных данных, предложен метод оценки эрозионной активности кавитации по величине интенсивности кавитационного шума в кубе. Показано, что этот параметр линейно связан с результатами измерений эрозионной активности кавитации. Полученные результаты будут использоваться при разработке специализированного кавитометра, предназначенного для оценки активности кавитации в ходе исследований воздействия ультразвука на клетки *in vitro*.

Ключевые слова: активность кавитации, эрозионные тесты, кавитометр, ультразвуковая кавитация.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Минчук В.С., Перхунова А.Ю., Котухов А.В., Дежкунов Н.В. Исследование связи эрозионной активности кавитации и интенсивности кавитационного шума. Доклады БГУИР. 2020; 18(8): 97-103.

STUDY OF THE RELATIONSHIP OF CAVITATION EROSION ACTIVITY AND CAVITATION NOISE INTENSITY

VIACHESLAV S. MINCHUK, ALEXANDRA YU. PERKHUNOVA, ALEKSEI V. KOTUKHOV,
NIKOLAI V. DEZHKUNOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 30 November 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The study of the erosion activity of cavitation is of considerable interest for clarifying the mechanism of the effect of cavitation on biological tissues and cells. This paper proposes an improved technique for assessing the erosion activity of acoustic cavitation. The results of testing this technique in relation to the problem of studying the distribution of erosion activity in the cavitation region, generated by a radiator with a rod waveguide, are presented. The experiments were carried out using a submersible emitter with a resonant frequency of 32 kHz. It was found that erosion activity rapidly decreases with distance from the emitter and depends on the distance to the emitter L as $1/L^3$ when the diameter of the emitter is less than or of the order of the wavelength in the used liquid. It was shown that there is a correlation between the erosion activity of cavitation and the readings of the cavitometer with the output signal being the integral intensity of the high-frequency component of the cavitation noise in the frequency range up to 10 MHz. Piezoelectric sensors were used to register cavitation noise. In particular, in liquids characterized by a higher level of erosion activity, the output signal of the cavitometer is also higher. In this case, the readings of the cavitometer change depending on the distance to the radiator as $1/L$. Based on the data obtained, a method is proposed for assessing the erosion activity of cavitation by the magnitude of the intensity of cavitation noise in a cube. It is shown that this parameter is linearly related to the results of measurements of the erosional activity of cavitation. The results obtained will be used in the development of a specialized cavitometer designed to assess the erosion activity of cavitation during *in vitro* studies of the effect of ultrasound on cells.

Keywords: cavitation activity, erosion tests, cavitometer, ultrasonic cavitation.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Minchuk V.S., Perkhunova A.Yu., Kotukhov A.V., Dezhkunov N.V. Study of the relationship of cavitation erosion activity and cavitation noise intensity. Doklady BGUIR. 2020; 18(8): 97-103.

Введение

Ультразвук применяется для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях уже несколько десятилетий [1–3]. В настоящее время сфера применения мощного ультразвука интенсивно расширяется. Особенно интенсивно происходит внедрение нового оборудования и технологий в сферу медицины.

Известно, что воздействие мощного ультразвука на биологические объекты во многих случаях имеет кавитационную природу, т. е. связано с возникновением, пульсациями и захлопыванием микропузырьков газа в жидкости [4–9]. Захлопывание сопровождается генерированием микроструй жидкости и ударных волн, которыми обеспечивается интенсивное воздействие на клетки, например, подавление жизнедеятельности опухолевых клеток [4, 7], выделение лекарств из носителей [8] или повышение проницаемости клеточных мембран [9].

Эрозионное разрушение твердых поверхностей в мощном ультразвуковом поле также обусловлено захлопыванием кавитационных полостей [10]. Поэтому исследование эрозионной активности кавитации представляет интерес для уточнения механизма воздействия кавитации на клетки. С другой стороны, поиск спектральных характеристик кавитационного шума (КШ), коррелирующих с кавитационной эрозией (КЭ), является необходимым условием создания прибора для исследования кавитации в медицинских и биологических применениях мощного ультразвука. Разработка приборов для исследования кавитации и измерения ее активности

с использованием кавитационного шума или спектральных составляющих КШ является одним из наиболее перспективных направлений в данной области. Это обусловлено тем, что КШ легко преобразуется в электрический сигнал и может регистрироваться относительно простыми методами, в том числе в оптически непрозрачных жидкостях, эмульсиях и биологических тканях и суспензиях клеток.

Однако известные методы оценки КЭ, основанные на измерении убыли массы эрозионных тестов, характеризуются большой трудоемкостью и низкой воспроизводимостью измерений. В данной работе предложены и апробированы две новые модификации метода эрозионных тестов, обеспечивающие снижение трудоемкости таких исследований и повышение воспроизводимости измерений КЭ.

Экспериментальная установка и методика исследований

В качестве эрозионного теста использовались полоски алюминиевой фольги с размерами 30×30 мм и толщиной 10 мкм. За меру активности эрозии принята величина $Q=1/T$, где T – время полного разрушения образца.

Регистрация кавитационного шума осуществлялась с использованием кавитометра ИСА-3М (БГУИР, Минск). Датчик представляет собой волновод диаметром 3 мм из нержавеющей стали, на одном торце которого установлена пьезопластина. Пьезопластина служит преобразователем акустического сигнала в электрический.

Схема установки представлена на рис. 1. Она использовалась в двух модификациях: для эрозионных тестов (рис. 1, а) и для регистрации КШ (рис. 1, б). Диаметр излучателя – 20 мм, резонансная частота – 32 кГц. Длина волны в воде на данной частоте – 46 мм, т. е. размеры излучающей поверхности меньше длины волны.

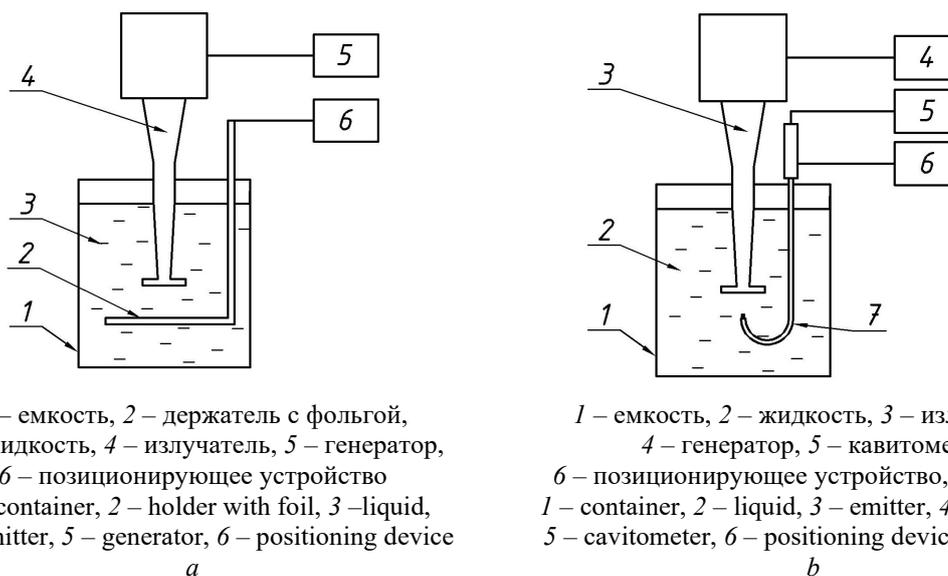


Рис. 1. Схема установки: а – эрозионный метод; б – анализ кавитационного шума

Fig. 1. Installation diagram: а – erosion method; б – cavitation noise analysis

В прямоугольную ванну размером 240×180×100 мм, заполненную водой, опускается ультразвуковой излучатель и фиксируется на определенном расстоянии от дна ванны. Под излучатель помещается тест-образец или U-образный датчик. Для каждого из методов снимается зависимость исследуемой величины от расстояния до излучателя L .

Держатель тест-образца представляет собой две тонкие металлические пластины. В верхней пластине выполнено отверстие диаметром 14 мм. Образец находится между пластинами. В опытах по эрозии фиксируется время полного разрушения фольги T в пределах отверстия в верхней пластине, т. е. в круге диаметром 14 мм. По средним значениям T для каждого уровня рассчитывалась мера кавитационной эрозии $Q=1/T$.

При регистрации кавитационного шума (рис. 1, *b*) датчик устанавливается таким образом, чтобы его торец находился на оси излучателя. Позиционирующее устройство позволяет перемещать датчик вдоль оси излучателя.

Сигнал с датчика поступает на кавитометр, который фиксирует интенсивность кавитационного шума (в относительных единицах), и затем – на компьютер, где в специальной программе сохраняется и визуализируется.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2, *a* представлена зависимость эрозионной активности от расстояния до излучателя L . Отметим, что в проведенных опытах предел изменения L довольно мал. Это связано с тем, что при $L < 5$ мм визуальный контроль разрушений затруднителен, а при $L > 15$ мм эрозия фольги происходила очень медленно. Из данного графика следует, что эрозионная активность быстро уменьшается по мере удаления от излучателя. На рис. 2, *b* эти же данные приведены в виде зависимости от $1/L^3$. Экспериментальные данные с высокой степенью точности укладываются на прямой линии, т. е. эрозионная активность кавитации обратно пропорциональна кубу расстояния от излучателя.

Следует отметить, что при уменьшении L растет эффект, оказываемый акустическими течениями вблизи излучателя, которые «откусывают» большие части от тестового образца.

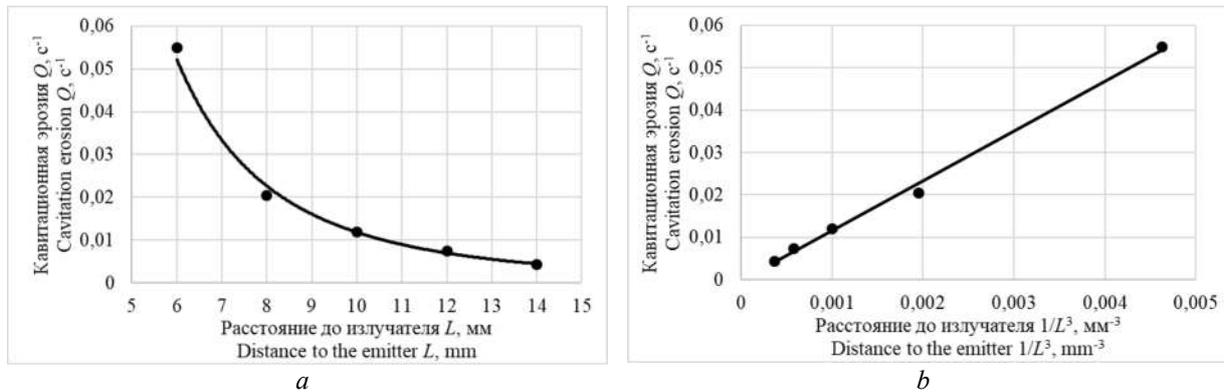


Рис. 2. Зависимость кавитационной эрозии от расстояния до излучателя L : *a* – от L ; *b* – от $1/L^3$
 Fig. 2. Cavitation erosion vs distance to the emitter L : *a* – on L ; *b* – on $1/L^3$

На рис. 3, *a* представлена зависимость интенсивности кавитационного шума A от расстояния до излучателя L , на рис. 3, *b* представлена та же зависимость, но в диапазоне L , в котором регистрировалась эрозия. Анализ результатов показывает, что интенсивность кавитационного шума обратно пропорциональна расстоянию до излучателя.

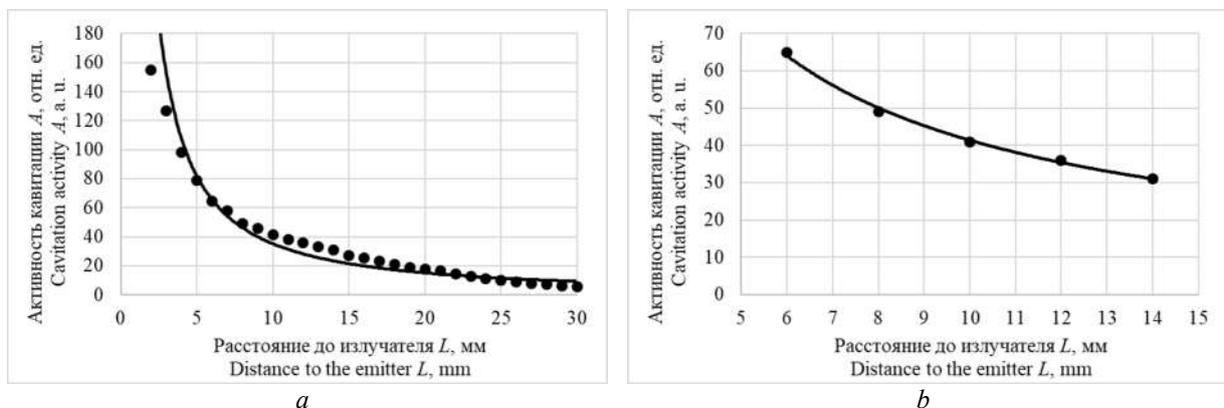


Рис. 3. Зависимость активности кавитации от расстояния до излучателя L : *a* – $2 \leq L \leq 30$; *b* – $6 \leq L \leq 14$
 Fig. 3. Cavitation activity vs distance to the emitter L : *a* – $2 \leq L \leq 30$; *b* – $6 \leq L \leq 14$

Из полученных результатов следует, что кавитационная эрозия коррелирует с оценкой активности кавитации по кубическому закону (рис. 4). Поэтому имеет смысл в качестве оценки

активности кавитации использовать куб суммы составляющих спектра кавитационного шума. В таком случае новая оценка активности кавитации будет линейно коррелировать с результатами эрозионных тестов.

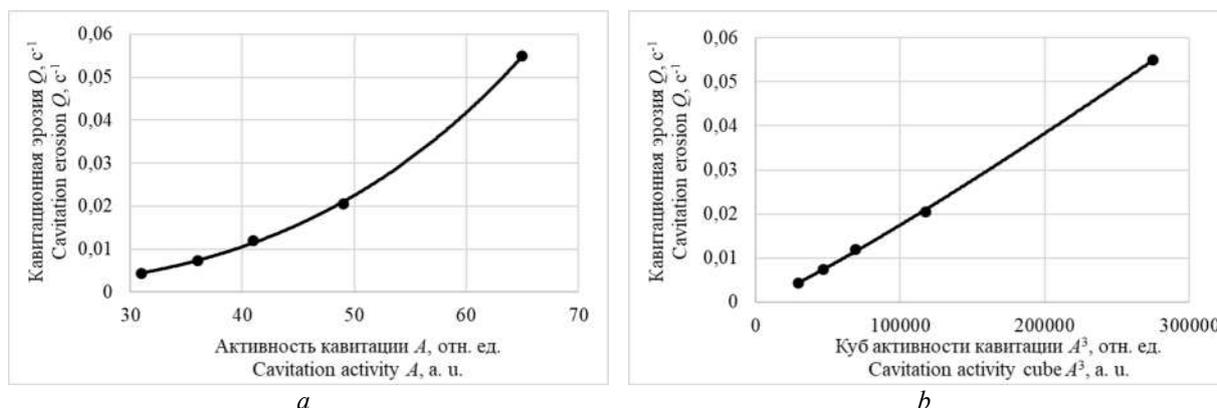


Рис. 4. Зависимость кавитационной эрозии от активности кавитации: *a* – от A ; *b* – от A^3
Fig. 4. Cavitation erosion vs cavitation activity: *a* – on A ; *b* – on L^3

Заключение

Установлено, что при диаметре излучателя меньше или порядка длины волны в используемой жидкости эрозионная активность быстро уменьшается по мере удаления от излучателя и зависит от расстояния до излучателя L как $1/L^3$. Интенсивность кавитационного шума при этом зависит от расстояния до излучателя обратно пропорционально L .

Исходя из полученных данных, предложен метод оценки эрозионной активности кавитации по величине интенсивности кавитационного шума в кубе. Показано, что этот параметр линейно связан с результатами измерений эрозионной активности кавитации. Полученные результаты будут использоваться при разработке специализированного кавитометра, предназначенного для оценки эрозионной активности кавитации в ходе исследований воздействия ультразвука на клетки *in vitro*.

Список литературы

1. Голямина И.П. *Ультразвук: маленькая энциклопедия*. Москва: Советская энциклопедия; 1979.
2. Новицкий Б.Г. *Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах*. Москва: Химия; 1983.
3. Абрамов В.О., Приходько М.В. *Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении*. Москва: Русавиа; 2006.
4. Бэйли М.Р., Хохлова В.А., Сапожников О.А., Каргл С.Т., Крам Л.Л. Физический механизм терапевтического эффекта ультразвука (Обзор). *Акустический журнал*. 2003;4:437.
5. Николаев А.Л., Гопин А.В., Божевольнов В.Е., Трещалина Е.М., Андропова Н.В., Мелихов И.В. Применение твердофазных неоднородностей для повышения эффективности ультразвуковой терапии онкологических заболеваний. *Акустический журнал*. 2009;55(4–5):565-574.
6. Trendowski M. Using the Promise of Sonodynamic Therapy in the Clinical Setting against Disseminated.Chemother. *Res. Pract.* 2015:1-16.
7. Canavese G, Ancona A., Racca L, Canta M., Dumontel B., Barbaresco F, Limongi L., Cauda V. Ultrasound using nanoparticles: special attention to sonodynamic therapy against cancer. *Chemical Engineering Journal*. 2018;340:155-172.
8. Beguin E., Shrivastava S., Dezhkunov N. Direct evidence of multi-bubble sonoluminescence using therapeutic ultrasound and microbubbles. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2019;11(12):19913-19919.
9. Lopez-Marin LM, Rivera AL, Fernandez F, Loske AM. Shock wave-induced permeabilization of mammalian cells. *Phys Life Rev.* 2018;26/27:1-38.
10. Сиротюк М. Г. *Акустическая кавитация*. Москва: Наука; 2008.

References

1. Goljamina I.P. [*Ultrasound: a small encyclopedia*]. Moscow: Sovetskay Encyclopedia; 1979. (in Russ.)
2. Novitsky B.G. [*The use of acoustic vibrations in chemical-technological processes*]. Moscow: Himia; 1983. (in Russ.)
3. Abramov O.V., Prikhodko V.M. [*Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering*]. Moscow: Rusavia; 2006. (in Russ.)
4. Bailey M.R., Khokhlova V.A., Sapozhnikov O.A., Kargl S.G., Crum L.A. [Physical Mechanisms of the Therapeutic Effect of Ultrasound (A Review)]. *Acusticheskiy jurnal*. 2003;4:437. (In Russ.)
5. Nikolaev A.L., Gopin A.V., Bozhevovnov V.E., Treschalina E.M., Andronova N.V., Melikhov I.V. [Application of solid-phase inhomogeneities to improve the efficiency of ultrasound therapy for oncological diseases]. *Acusticheskiy jurnal*. 2009;55(4–5):565-574. (In Russ.)
6. Trendowski M. Using the Promise of Sonodynamic Therapy in the Clinical Setting against Disseminated. *Chemother. Res. Pract.* 2015:1-16.
7. Canavese G, Ancona A., Racca L, Canta M., Dumontel B., Barbaresco F, Limongi L., Cauda V. Ultrasound using nanoparticles: special attention to sonodynamic therapy against cancer. *Chemical Engineering Journal*. 2018;340:155-172.
8. Beguin E., Shrivastava S., Dezhkunov N. Direct evidence of multi-bubble sonoluminescence using therapeutic ultrasound and microbubbles. *ACS Applied Materials and Interfaces*. 2019;11(12):19913-19919.
9. Lopez-Marin L.M., Rivera A.L., Fernandez F., Loske A.M. Shock wave-induced permeabilization of mammalian cells. *Phys Life Rev*. 2018;26/27:1-38.
10. Sirotiyuk M. G. [*Acoustic cavitation*]. Moscow: Nauka; 2008.

Вклад авторов

Минчук В.С. разработал методику проведения экспериментов, провел экспериментальные исследования, проанализировал результаты, оформил статью.

Перхунова А.Ю. провела экспериментальные исследования, оформила статью.

Котухов А.В. выполнил измерение амплитуды колебаний излучателя, подготовил оборудование для проведения исследований.

Дежкунов Н.В. сформулировал задачу исследования, выполнил анализ результатов.

Authors' contribution

Minchuk V.S. developed the experimental technique, conducted experimental research, analyzed the results and designed the article.

Perkhunova A.Yu. conducted experimental research, designed the article.

Kotukhov A.V. measured the oscillation amplitude of the emitter and prepared the equipment for research.

Dezhkunov N.V. formulated the research task and analyzed the results.

Сведения об авторах

Минчук В.С., инженер-электроник лаборатории 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Перхунова А.Ю., студентка Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Котухов А.В., заместитель декана факультета компьютерного проектирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дежкунов Н.В., к.т.н., доцент, заведующий лабораторией 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Minchuk V.S., Electronic Engineer of the R&D Lab 5.2 "Ultrasonic technologies and facilities" of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Perkhunova A.Yu., Student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kotukhov A.V., Vice Dean of the faculty of Computer-aided Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dezhkunov N.V., PhD, Associate Professor, Head of the R&D Lab 5.2 "Ultrasonic technologies and facilities" of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-222-28-64;
e-mail: kavax@bsuir.by
Котухов Алексей Валерьевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-222-28-64;
e-mail: kavax@bsuir.by
Kotukhov Aleksei Valerievich