



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-36-43>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 534.6

ОЦЕНКА АКТИВНОСТИ КАВИТАЦИИ ПО КАВИТАЦИОННОМУ ШУМУ В РАЗЛИЧАЮЩИХСЯ ЧАСТОТНЫХ ДИАПАЗОНАХ

В. С. МИНЧУК, А. Ю. ПЕРХУНОВА, М. П. ФЕДОРИНЧИК, Н. В. ДЕЖКУНОВ

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

Поступила в редакцию 01.08.2023

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2024
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2024

Аннотация. Приведены результаты испытаний спектрально-акустического кавитометра с режимами измерений, различающимися частотными диапазонами интегрирования кавитационного шума. Для каждого из режимов *H1–H4* нижняя частота интегрирования f_{\min} составляла соответственно 1, 70, 180 и 300 кГц, верхняя частота была одинаковой для всех режимов – $f_{\max} = 10$ МГц. В качестве приемников кавитационного шума использовали пьезоэлектрические волноводные датчики. Регистрировали распределения активности кавитации в неоднородных ультразвуковых полях: в объеме ультразвуковой ванны ($f_0 = 35$ кГц) и в поле погружного излучателя ($f_0 = 21$ кГц). Частотный диапазон интегрирования варьировался за счет изменения нижней границы. Установлено, что изменение диапазона интегрирования в довольно широких пределах не оказывает заметного качественного влияния на результат измерений активности кавитации, происходит лишь кратное изменение показаний. Этот вывод подтвержден благодаря использованию датчиков, различающихся своими спектральными характеристиками.

Ключевые слова: активность кавитации, кавитационный шум, ультразвук, кавитометр, спектрально-акустический метод.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа поддержана Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований, проект № T23M-026.

Для цитирования. Оценка активности кавитации по кавитационному шуму в различающихся частотных диапазонах / В. С. Минчук [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 3. С. 36–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-36-43>.

ASSESSMENT OF CAVITATION ACTIVITY BY CAVITATION NOISE IN DIFFERENT FREQUENCY RANGES

VIACHESLAV S. MINCHUK, ALEKSANDRA Y. PERHUNOVA,
MIKHAIL P. FEDORINCHIK, NIKOLAI V. DEZHKUNOV

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

Submitted 01.08.2023

Abstract. The results of testing the spectral-acoustic cavitometer with measurement modes that differ in the frequency ranges of integration of cavitation noise are presented. For each of the *H1–H4* modes, the lower integration frequency f_{\min} is 1, 70, 180 and 300 kHz, respectively. The upper frequency is the same for all modes and is $f_{\max} = 10$ MHz. Piezoelectric waveguide sensors were used as a cavitation noise receivers. The distributions of cavitation activity in non-uniform ultrasonic fields were recorded: in the volume of the ultrasonic bath ($f_0 = 35$ kHz) and in the field of the submersible emitter ($f_0 = 21$ kHz). The frequency range of integration was

varied by changing the lower bound. It has been established that a change in the integration range within a fairly wide range does not have a noticeable qualitative effect on the result of measurements of cavitation activity, only a multiple change in the readings occurs. This conclusion was confirmed using sensors that differ in their spectral characteristics.

Keywords: cavitation activity, cavitation noise, ultrasound, cavitometer, spectral-acoustic method.

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

Gratitude. The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Basic Research, project No T23M-026.

For citation. Minchuk V. S., Perhunova A. Y., Fedorinchik M. P., Dezhkunov N. V. (2024) Assessment of Cavitation Activity by Cavitation Noise in Different Frequency Ranges. *Doklady BGUIR*. 22 (3), 36–43. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-3-36-43> (in Russian).

Введение

При воздействии ультразвуком на физико-химические процессы в жидкостях и жидкообразных средах различают два основных режима: докавитационный и кавитационный. В подавляющем большинстве ультразвуковых технологий и многих медико-биологических применениях мощного ультразвука его интенсивность обычно поддерживается выше порога кавитации [1–5]. При пульсациях и захлопывании кавитационных пузырьков генерируются ударные волны, высокие температуры и микроструи жидкости, которыми и определяются роль кавитации в упомянутых выше процессах и ее активность.

К настоящему времени предложено немало методов оценки уровня активности кавитации, основанных на регистрации эффектов, сопровождающих ее. Это такие явления, как кавитационная эрозия (разрушение твердых тел под действием кавитации), генерирование свечения в видимой области спектра – звуколюминесценция, кавитационный шум (КШ), ультразвуковой капиллярный эффект, различные звукохимические реакции [6]. Разработка приборов для исследования кавитации с использованием КШ или его спектральных составляющих – одно из наиболее перспективных направлений в данной области [6–8]. Обусловлено это тем, что КШ легко преобразуется в электрический сигнал и может регистрироваться относительно простыми методами, в том числе в оптически непрозрачных жидкостях, суспензиях, эмульсиях и биологических тканях. Для оценки активности кавитации в [6–9] предлагалось использовать различные составляющие спектра кавитационного шума.

Интегрирование акустического сигнала в некотором диапазоне частот является одним из наиболее распространенных алгоритмов обработки спектра КШ при оценке активности кавитации [9–11]. При выборе диапазона интегрирования обычно исключают низкочастотную часть, поскольку считается, что первые гармоники основной частоты могут возникать вследствие нелинейных искажений звуковой волны, т. е. напрямую не связаны с пульсациями и захлопыванием кавитационных полостей. Естественно, исключается и основная частота f_0 , как не связанная с кавитацией.

В статье показано, что изменение диапазона интегрирования в довольно широких пределах не оказывает заметного влияния на результат исследования активности кавитации.

Методика и оборудование

Для оценки активности кавитации A_k использовали экспериментальный кавитометр ИСА-4М (БГУИР). Алгоритм обработки спектра КШ, реализованный в данном приборе, обеспечивает вычисление интегральной интенсивности КШ в четырех различающихся частотных диапазонах $H1$ – $H4$. При помощи аналоговых фильтров для каждого из режимов выделялась исследуемая область спектра. Верхняя граница диапазона для всех режимов была одинаковой – 10 МГц. Различия между режимами заключались в нижней границе. Для имеющихся режимов она составляла: $H1$ – 1 кГц, $H2$ – 70 кГц, $H3$ – 180 кГц, $H4$ – 300 кГц.

Отметим, что в соответствии с [12] граница определяется как частота, на которой интенсивность сигнала составляет 70 % от уровня насыщения. На рис. 1 приведены амплитудно-частотные характеристики для каждого из использовавшихся режимов. В качестве примера рассмотрим режим $H2$ (рис. 1, *b*).

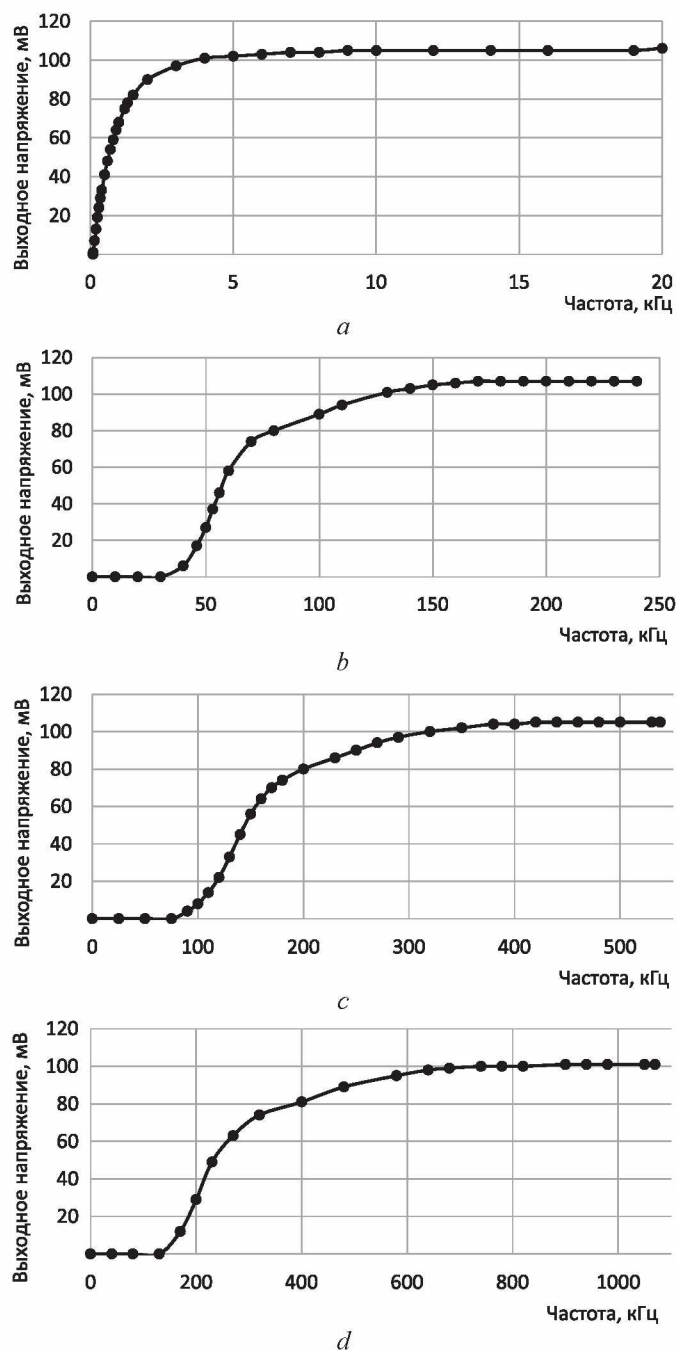


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики режимов кавитометра: *a* – *H1*; *b* – *H2*; *c* – *H3*; *d* – *H4*
Fig. 1. Amplitude-frequency characteristics of cavitometer modes: *a* – *H1*; *b* – *H2*; *c* – *H3*; *d* – *H4*

Фильтр полностью подавляет сигнал на частотах менее 30 кГц. При увеличении частоты доля пропускаемого сигнала плавно увеличивается и достигает насыщения при напряжении 105 мВ на частоте 150 кГц. 70 % от уровня насыщения (74 мВ) достигается на частоте 70 кГц, которая принимается в качестве нижней границы анализируемого диапазона. В режиме *H1* интегрированию подлежал полный выходной сигнал датчика, включавший в том числе основную частоту f_0 . В режиме *H2* частота f_0 полностью подавлялась, сигнал начинал проходить со второй гармоники $2f_0$. В режимах *H3* и *H4* (рис. 2, *c*, *d*) нижние границы используемых фильтров сдвигались в более высокочастотные области – 180 и 300 кГц соответственно.

В исследовании использовали три типа датчиков кавитации, обозначаемых далее *S1*, *P1*, *U2*. Датчики имели идентичный пьезопреобразователь (диск $\varnothing 5$ мм и толщиной 1 мм, ЦТС-19). Конструктивные различия этих приборов обуславливали соответствующие различия в регистрируемых спектрах (рис. 2). Спектры на рис. 2 получены в идентичных условиях разными датчиками.

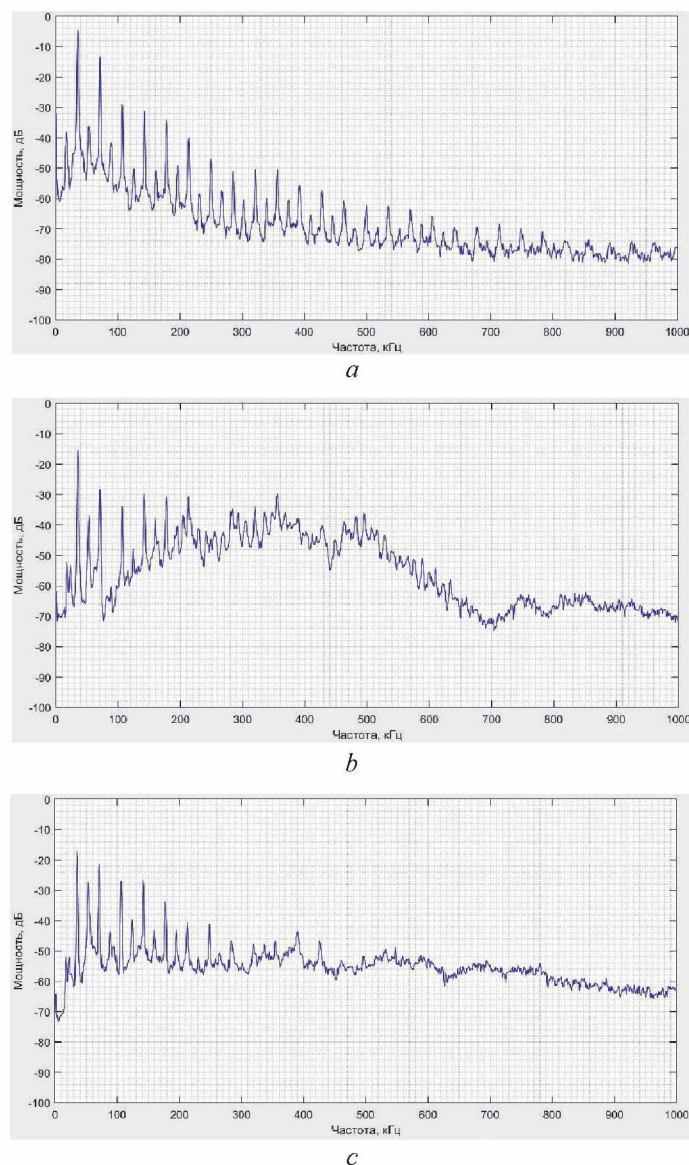


Рис. 2. Спектры выходного сигнала датчиков: *a* – *S1*; *b* – *P1*; *c* – *U2*
Fig. 2. Spectra of the sensor output signal: *a* – *S1*; *b* – *P1*; *c* – *U2*

Для генерирования кавитации использовали ультразвуковую ванну (рис. 3, *a*) или погружной излучатель с волноводом (рис. 3, *b*). В экспериментах с ванной в исходном положении датчик размещался на границе раздела жидкость–газ на оси излучателя, который был смонтирован в дно ванны. Затем включали генератор, и датчик равномерно перемещался в направлении к излучателю. Кавитометр передавал показания на компьютер в реальном времени. Таким образом, получили зависимость оценки активности кавитации от расстояния до излучателя (дна ванны). Опыт повторяли 6–9 раз, результаты усредняли. При изменении уровня жидкости *h* в ванне вследствие изменения условий формирования стоячей волны существенно изменялись как величина активности кавитации, так и ее распределение по объему (рис. 4). Использовали следующие величины уровня жидкости в ванне: 66, 68, 70, 72, 74, 81 и 82 мм. Для опытов в ультразвуковой ванне применяли датчики *S1* и *P1*.

В экспериментах с погружным излучателем использовали датчики *U2* и *S1*. Датчик *U2* имел *U*-образный металлический волновод, его расположение показано на рис. 3, *b*. Датчик *S1* имел прямой волновод, сам датчик располагался под углом так, чтобы его торец находился на оси излучателя. Регистрировали изменение активности кавитации при удалении датчика от торца излучателя. Опыты повторяли 3–5 раз, результаты усредняли.

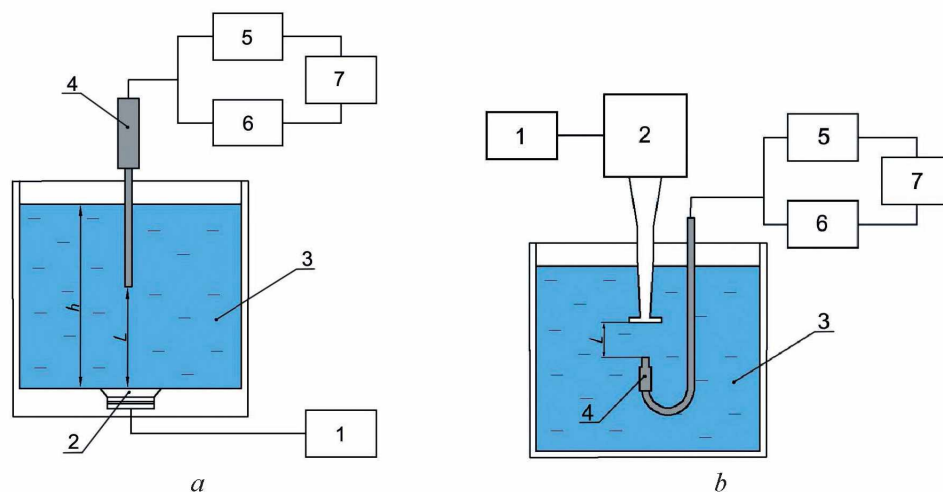


Рис. 3. Схема установки для проведения экспериментов:

a – с ультразвуковой ванной; *b* – с ультразвуковым диспергатором; 1 – ультразвуковой генератор; 2 – пьезокерамический излучатель/диспергатор; 3 – жидкость; 4 – датчик кавитации; 5 – кавитометр; 6 – анализатор спектра; 7 – компьютер

Fig. 3. Diagram of the installation for conducting experiments:

a – with an ultrasonic bath; *b* – with an ultrasonic dispersant; 1 – ultrasonic generator; 2 – piezoceramic emitter/dispersant; 3 – liquid; 4 – cavitation sensor; 5 – cavitometer; 6 – spectrum analyzer; 7 – computer

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 4 представлено изменение оценки активности кавитации при удалении от излучателя диспергатора ($f_0 = 21$ кГц). Измерения проводили в режимах *H1* и *H2* датчиками *U2* и *S1*. Полученные оценки активности кавитации обозначим A_{kH1} и A_{kH2} (или A_{kHi}). Режиму *H1* соответствует шкала слева, режиму *H2* – справа. Полученные распределения имеют вид быстро убывающих логарифмических кривых.

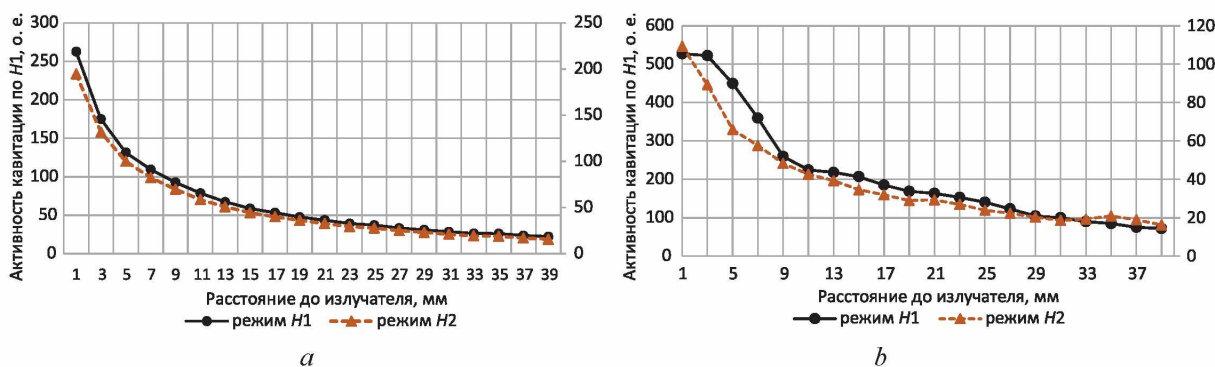


Рис. 4. Распределение активности кавитации под излучателем диспергатора при измерении датчиком: *a* – *U2*; *b* – *S1*

Fig. 4. Distribution of cavitation activity under the dispersant emitter when measured by a sensor: *a* – *U2*; *b* – *S1*

Распределения A_{kH1} и A_{kH2} на рис. 4, *a* являются линейно зависимыми между собой, т. е. имеют идентичную форму. Оценка A_{kH1} (режим *H1*) в 1,34 раза выше A_{kH2} на всем исследуемом промежутке. При использовании датчика *S1* заметно небольшое расхождение в форме полученных распределений (рис. 4, *b*). При небольших расстояниях до излучателя (1–9 мм) показания различаются от 5 до 7 раз, при расстоянии 10–31 мм – в 5,7 раза, при наибольшем удалении от излучателя – до 4 раз. Отметим, что режим *H2* отличается от *H1* тем, что из спектра вырезана низкочастотная часть (до 70 кГц), включая f_0 . Однако это не вызвало существенных отклонений вида зависимостей, полученных для данных режимов датчиками *U2* и *S1*. Различия в отношениях A_{kH1}/A_{kH2} для разных датчиков обусловлены различиями их спектральной чувствительности.

Результаты сканирования объема ультразвуковой ванны ($f_0 = 35,5$ кГц) датчиком $S1$ представлены рис. 5. Получены распределения A_{kH1} и A_{kH2} вдоль оси излучателя для шести различных уровней жидкости h в ванне: 66, 68, 70, 72, 74 и 81 мм. Уровень жидкости сильно влияет как на величину активности кавитации, так и на ее распределение по объему. В четырех экспериментах формы распределений A_{kH1} и A_{kH2} совпали с точностью не менее точности измерений (т. е. данные распределения линейно зависимы), в двух отмечены расхождения. Формы распределений A_{kH1} и A_{kH2} совпадали при $h = 74$ мм (рис. 5, *a*), наибольшие расхождения наблюдались при $h = 68$ мм (рис. 5, *b*). Каждая кривая является результатом усреднения шести–деяти сканирований. Представленные зависимости имеют вид кривых с чередующимися максимумами и минимумами, что обусловлено наличием компоненты стоячей волны в результирующем ультразвуковом поле.

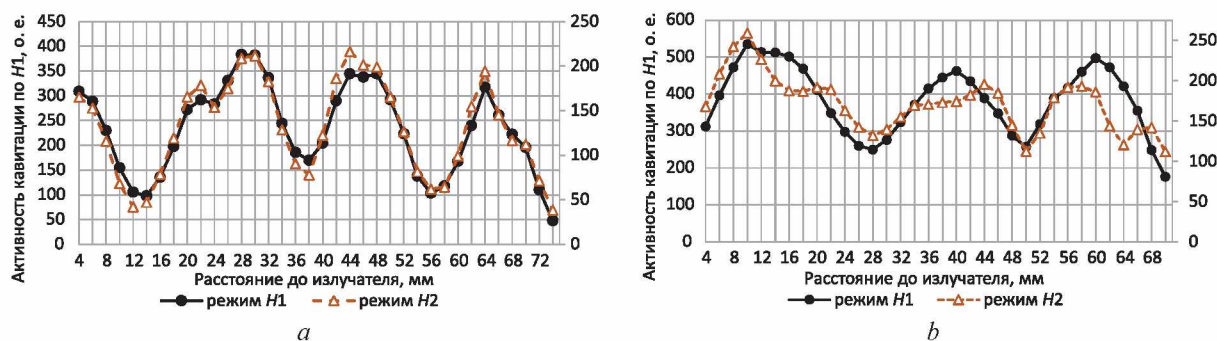


Рис. 5. Распределение активности кавитации в ультразвуковой ванне, полученное датчиком $S1$, при уровне жидкости: *a* – 74 мм; *b* – 68 мм

Fig. 5. Distribution of cavitation activity in an ultrasonic bath, obtained by sensor $S1$, at liquid level: *a* – 74 mm; *b* – 68 mm

Датчиками $S1$ и $U2$ измерения проводили только для режимов $H1$ и $H2$. В более высокочастотных диапазонах ($H3$ и $H4$) значения A_{kH3} и A_{kH4} этих датчиков незначительно превышали уровень фонового шума, что не позволяло обеспечить достаточный уровень воспроизводимости измерений. Приборы $S1$ и $U2$ характеризуются более низкой спектральной чувствительностью в диапазоне частот 300–500 кГц (рис. 2, *a, c*) по сравнению с датчиком $P1$ (рис. 2, *b*), чем, вероятно, и обусловлен низкий уровень генерируемых этими датчиками сигналов для режимов $H3$ и $H4$.

Датчик $P1$ позволяет получить распределения активности кавитации для всех четырех частотных диапазонов. На рис. 6 приведены результаты сканирования ультразвуковой ванны (вдоль оси излучателя) этим датчиком при уровне жидкости над излучателем 68 мм.

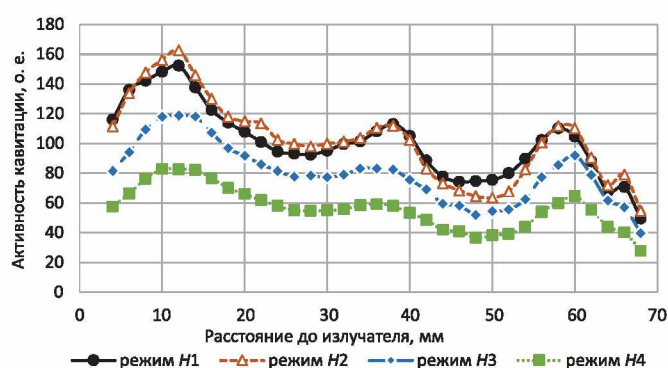


Рис. 6. Распределение активности кавитации в ультразвуковой ванне, полученное датчиком $P1$ при уровне жидкости 68 мм

Fig. 6. Distribution of cavitation activity in an ultrasonic bath, obtained by sensor $P1$ at a liquid level of 68 mm

Полученные оценки активности кавитации A_{kHi} в разных режимах являются линейно зависимыми между собой, т. е. изменяются пропорционально друг другу с точностью, не менее точности измерений. Аналогичные опыты были проведены для уровней жидкости h в ванне 70, 74 и 82 мм. Во всех случаях различия в форме распределения A_{kHi} обнаружено не было. Таким образом,

исключение низкочастотной области вплоть до 300 кГц никак не изменило форму получаемых распределений. Из этого можно сделать вывод, что исследованные части спектра взаимосвязаны и изменяются пропорционально при изменении кавитационной активности, что открывает новые возможности для совершенствования методов измерения активности кавитации.

Заключение

1. По результатам проведенных исследований разработан прибор, позволяющий оценивать активность кавитации по кавитационному шуму в четырех различных частотных диапазонах. При этом выходной сигнал формируется как результат интегрирования кавитационного шума в некотором диапазоне частот от f_{\min} до f_{\max} . Верхняя граница интегрирования f_{\max} для всех использовавшихся диапазонов одинакова и равна 10 МГц. В нижней границе f_{\min} значения различались и составляли 1, 70, 180 и 300 кГц соответственно для каждого из режимов работы.

2. Установлено, что изменение диапазона интегрирования в довольно широких пределах за счет изменения нижней границы интегрирования не оказывает заметного влияния на результат измерений активности кавитации, происходит лишь кратное изменение показаний. Этот вывод подтвержден благодаря использованию датчиков, различающихся своими спектральными характеристиками для условий генерирования кавитации погружным излучателем с волноводом и ультразвуковой ванной.

3. Исследованы распределения кавитационного поля в объеме ультразвуковой ванны (частота 35 кГц) и в поле погружного излучателя (21 кГц). В ванне зависимости активности кавитации от расстояния до излучателя имеют вид кривых с чередующимися максимумами и минимумами, что обусловлено наличием компоненты стоячей волны в результирующем ультразвуковом поле. В поле погружного излучателя активность кавитации быстро затухает по мере удаления от него.

Список литературы

1. Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности / В. Н. Хмелев [и др.]. Бийск: Изд-во Алтайского госуд. технич. ун-та им. И. И. Ползунова, 2010. 250 с.
2. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / В. О. Абрамов [и др.]. М.: Русавиа, 2006. 687 с.
3. Жулай, Ю. А. Кавитация как средство интенсификации технологических процессов. Опыт применения и перспективы (обзор) / Ю. А. Жулай, В. Ю. Скосарь // Авиационно-космическая техника и технология. 2013. Т. 105, № 8. С. 7–15.
4. Characterization of Transient Cavitation Activity During Sonochemical Modification of Magnesium Particles / N. Brezhneva [et al.] // Ultrasonics Sonochemistry. 2021. Vol. 70, No 3–4. P. 105315–105327.
5. Gogate, P. R. Design and Scale-Up of Sonochemical Reactors for Food Processing and Other Applications / P. R. Gogate, A. V. Pandit, A. P. Bhat // Power Ultrasonics. 2023. P. 639–663. DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00001-4.
6. Скворцов, С. П. Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации / С. П. Скворцов // Наука и образование. 2015. № 2. С. 83–100. DOI: 10.7463/0215.0759806.
7. Hodnett, M. Measurement Techniques in Power Ultrasonics / M. Hodnett, P. Prentice // Power Ultrasonics, 2nd ed. 2023. P. 131–146. DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00001-4.
8. Комбинированный метод исследования акустической кавитации / А. В. Котухов [и др.] // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 4. С. 80–88.
9. Pengfei, W. Acoustic Characterization of Cavitation Intensity: A Review / W. Pengfei // Ultrasonics Sonochemistry. 2022. Vol. 70. 105878 p.
10. Measurement of Cavitation Noise in Ultrasonic Baths and Ultrasonic Reactors: IEC TS 63001:2019. 29 p.
11. Cavitation. Исследования, технологии, приборы, оборудование [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://cavitation.bsuir.by/ru/kavitometr>. Дата доступа: 15.02.2023.
12. Соколов, Н. М. Лабораторный практикум по радиоэлектронике. Ч. 2. Колебательные контуры с сосредоточенными постоянными / Н. М. Соколов, С. С. Фефелов. Ярославль: Ярослав. госуд. педаг. ун-т им. К. Д. Ушинского, 2017.

References

1. Hmelev V. N., Slivin A. N., Barsukov R. V., Tsiganok S. N., Shalunov A. V. (2010) *Application of High-Intensity Ultrasound in Industry*. Biysk, Polzunov Altai State Technical University Publ. 250 (in Russian).
2. Abramov V. O., Abramov O. V., Artemiev V. V. et al. (2006) *Powerful Ultrasound in Metallurgy and Mechanical Engineering*. Moscow, Rusavia Publ. 687 (in Russian).

3. Zhulay Yu. A., Skosar V. Yu. (2013) Cavitation as a Means of Intensification of Technological Processes. Application Experience and Prospects (Review). *Aerospace Engineering and Technology*. 105 (8), 7–15 (in Russian).
4. Brezhneva N., Dezhkunov N. V., Ulasevich S. A., Skorb E. V. (2021) Characterization of Transient Cavitation Activity During Sonochemical Modification of Magnesium Particles. *Ultrasonics Sonochemistry*. 70 (3–4), 105315–105327.
5. Gogate P. R., Pandit A. B., Bhat A. P. (2023) Design and Scale-Up of Sonochemical Reactors for Food Processing and Other Applications. *Power Ultrasonics*. 639–663. DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00001-4.
6. Skvortsov S. P. (2015) Techniques of Ultrasound Cavitation Control. *Science and Education*. (2), 83–100. DOI: 10.7463/0215.0759806 (in Russian).
7. Hodnett M., Prentice P. (2023) Measurement Techniques in Power Ultrasonics. *Power Ultrasonics*. 131–146. DOI: 10.1016/B978-0-12-820254-8.00001-4.
8. Kotukhov A. V., Gavrilyuk V. S., Minchuk V. S., Dezhkunov N. V. (2020) Combined Method for Acoustic Cavitation Research. *Doklady BGUIR*. 18 (4), 80–88 (in Russian).
9. Pengfei W. (2022) Acoustic Characterization of Cavitation Intensity: A Review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 70, 105878.
10. IEC TS 63001:2019. *Measurement of Cavitation Noise in Ultrasonic Baths and Ultrasonic Reactors*. 29.
11. *Cavitation. Research, Technology, Devices, Equipment*. Available: <https://cavitation.bsuir.by/ru/kavitometr> (Accessed 15 February 2023) (in Russian).
12. Sokolov N. M., Fefelov S. S. (2017) *Laboratory Practice on Radioelectronics. Part 2. Oscillatory Circuits with Concentrated Constants*. Yaroslavl, Yaroslavl State Pedagogical University named after K. D. Ushinsky Publ. (in Russian).

Вклад авторов

Минчук В. С. разработал концепцию исследования, проанализировал полученные данные, подготовил текст статьи.

Перхунова А. Ю. выполнила исследования, оформила статью для публикации.

Федоринчик М. П. разработал прибор для измерения активности кавитации.

Дежкунов Н. В. интерпретировал результаты исследований, выполнил редактирование статьи.

Authors' contribution

Minchuk V. S. developed the concept of the study, analyzed the data obtained, prepared the text of the article.

Perhunova A. Y. completed the research, designed the article for publication.

Fedorinchik M. P. developed a device for measuring the activity of cavitation.

Dezhkunov N. V. interpreted the research results, edited the article.

Сведения об авторах

Минчук В. С., мл. науч. сотр. науч.-исслед. лаб. «Ультразвуковые технологии и оборудование» (НИЛ 5.2), Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Перхунова А. Ю., стажер, мл. науч. сотр. НИЛ 5.2, БГУИР

Федоринчик М. П., науч. сотр. НИЛ 5.2, БГУИР

Дежкунов Н. В., канд. техн. наук, доц., зав. НИЛ 5.2, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-35
E-mail: slava.minchuk@bk.ru
Минчук Вячеслав Сергеевич

Information about the authors

Minchuk V. S., Junior Researcher at the Scientific Research Laboratory of Ultrasonic Technologies and Equipment (Lab. 5.2), Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Perhunova A. Y., Intern, Junior Researcher at the Lab. 5.2, BSUIR

Fedorinchik M. P., Researcher at the Lab. 5.2, BSUIR

Dezhkunov N. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Lab. 5.2, BSUIR

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 17 293-86-35
E-mail: slava.minchuk@bk.ru
Minchuk Viacheslav Sergheevich