

УДК 59.03

DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_3_56_69
EDN: TIQLKT**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ СПЕКТРАЛЬНЫХ
СОСТАВЛЯЮЩИХ КАВИТАЦИОННОГО ШУМА****В.С. Минчук, А.Ю. Перхунова, В.С. Гаврилюк, Н.В. Дежкунов***Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск***INVESTIGATION OF THE CROSS-CORRELATION OF SPECTRAL
COMPONENTS OF CAVITATION NOISE****V.S. Minchuk, A.Yu. Perkhunova, V.S. Gavrilyuk, N.V. Dezhkunov***Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

Аннотация. Приводятся результаты исследования взаимной корреляции спектральных компонент кавитационного шума (КШ), в частности, основной частоты, т. е. частоты f_0 УЗ поля, субгармоники, гармоник основной частоты, непрерывной составляющей КШ и ряда других. Установлено, что основная частота слабо коррелирует с другими компонентами КШ, т. е. связь f_0 с другими частотами характеризуется низким коэффициентом корреляции. Обнаружена линейная связь между гармониками основной частоты, непрерывной составляющей спектра и интегральной мощностью кавитационного шума.

Ключевые слова: кавитация, кавитационный шум, спектральные компоненты, корреляция.

Для цитирования: Исследование взаимной корреляции спектральных составляющих кавитационного шума / В.С. Минчук, А.Ю. Перхунова, В.С. Гаврилюк, Н.В. Дежкунов // Проблемы физики, математики и техники. – 2023. – № 3 (56). – С. 69–74. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_3_56_69. – EDN: TIQLKT

Abstract. The results of the study of the cross-correlation of the spectral components of cavitation noise (CN), in particular, the fundamental frequency, i. e. frequency f_0 of the ultrasonic field, subharmonics, harmonics of the fundamental frequency, the continuous component of the CN, and a number of others are proposed. It has been established that the fundamental frequency correlates weakly with other NC components, i. e. the relationship f_0 with the other frequencies is characterized by a low correlation coefficient. A linear relationship has been found between the harmonics of the fundamental frequency, the continuous component of the spectrum, and the integral power of cavitation noise.

Keywords: cavitation, cavitation noise, spectral components, correlation.

For citation: Investigation of the cross-correlation of spectral components of cavitation noise / V.S. Minchuk, A.Yu. Perkhunova, V.S. Gavrilyuk, N.V. Dezhkunov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2023. – № 3 (56). – P. 69–74. – DOI: https://doi.org/10.54341/20778708_2023_3_56_69 (in Russian). – EDN: TIQLKT

Введение

Интенсификация ультразвуком (УЗ) физико-химических процессов в жидкостях, как известно [1]–[3], имеет кавитационную природу, т. е. связана с явлением образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа в поле переменного давления. В последнее время интенсивно расширяются возможности применения УЗ колебаний в медицине и биологии в кавитационном режиме [4]–[8].

При пульсациях и захлопывании пузырьков в кавитационной области генерируется сложный акустический сигнал с интенсивной шумоподобной компонентой – так называемый кавитационный шум (КШ). Поскольку кавитационный шум излучается пузырьками при их движении, то, как обоснованно считают многие авторы [9]–[16], он содержит информацию о динамическом поведении пузырьков. В ряде работ предлагалось использовать различные спектральные составляющие КШ для оценки уровня активности кавитации.

Авторы [9], [14], [15] использовали субгармонику $f_0/2$ основной частоты f_0 в качестве индикатора возникновения кавитации и для оценки уровня ее активности. В работе [10] исследовалась интенсивность полного сигнала КШ в диапазоне частот от 0 до 250 кГц при частоте поля $f_0 = 36$ кГц в сравнении с химической активностью кавитации. В [11] предлагалось использовать интенсивность непрерывной составляющей КШ на частоте $2,25 f_0$, т. е. фактически – между второй и третьей гармониками основной частоты. Авторами [12], [13] отмечено наличие корреляции интенсивности широкополосной составляющей КШ и активности кавитации, оцениваемой по интенсивности звуколюминесценции. Предлагалось также использовать полный сигнал КШ, не выделяя какие – либо спектральные компоненты [15].

Отметим, что механизмы генерирования компонент КШ не выяснены однозначно. Это в значительной мере затрудняет разработку методов

исследования кавитации с использованием спектрального анализа КШ.

В данной работе ставилась задача выявить спектральные компоненты кавитационного шума, коррелирующие между собой.

1 Методика и установка

Схема установки для проведения экспериментов представлена на рисунке 1.1. Объект исследования – кавитация в ультразвуковой ванне с размерами 155×140×100 мм. Частота УЗ поля в ванне $f_0 = 35,2$ кГц.

Для регистрации кавитационного шума и его спектральных характеристик использовался кавитометр *ICA – 3DM* (БГУИР, г. Минск) с волноводным датчиком. Диаметр приемного элемента датчика равен 3 мм. Прибор позволяет регистрировать мощность полного выходного сигнала датчика H в диапазоне частот от 10 кГц до 10 МГц и интегральную мощность кавитационного шума A_{k1} в диапазоне частот от 300 кГц до 10 МГц, т. е. при вычислении A_{k1} не учитывается основная частота, субгармоника, несколько первых гармоник и непрерывная составляющая в диапазоне частот 10...300 кГц.

Встроенная в кавитометре программа позволяет реализовать спектральный анализ КШ в диапазоне частот от 0 до 500 кГц с использованием быстрого преобразования Фурье. Результаты обработки спектров сохраняются в виде изображений и текстовых файлов.

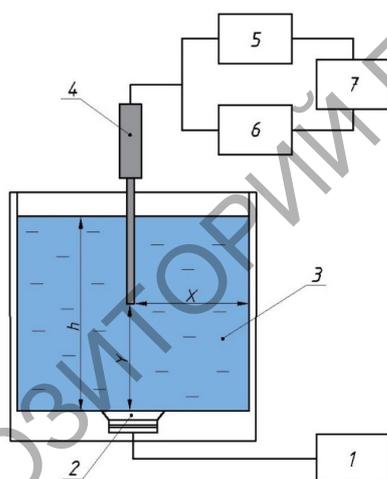


Рисунок 1.1 – Схема установки для проведения эксперимента:

- 1 – ультразвуковой генератор;
- 2 – пьезокерамический излучатель;
- 3 – жидкость;
- 4 – датчик кавитации;
- 5 – кавитометр;
- 6 – анализатор спектра;
- 7 – компьютер

Распределение кавитации в ванне неоднородно. Из-за наличия компоненты стоячей волны

в вертикальной плоскости оно включает квазипериодические максимумы и минимумы (рисунок 1.2, а). В горизонтальной плоскости поле значительно ослабевает при удалении от центра ванны (рисунок 1.2, б).

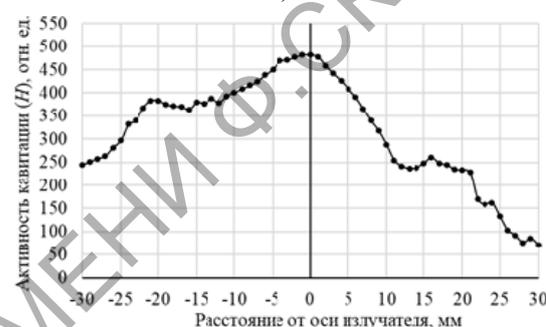
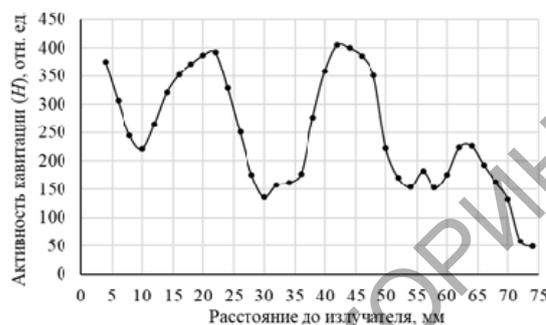


Рисунок 1.2 – Распределение активности кавитации в ультразвуковой ванне:
а – в вертикальной плоскости (по оси излучателя);
б – в горизонтальной плоскости (21 мм от излучателя)

Активность кавитации и ее распределение в объеме ванны сильно зависят от уровня жидкости в ванне h , температуры жидкости, газосодержания и др. Поэтому, изменяя уровень жидкости и/или положение (X, Y, Z) датчика в ванне, можно варьировать состояние кавитационной области вблизи датчика в широком диапазоне. Соответственно, будут варьироваться и спектры КШ.

Для исследования корреляции спектральных компонент КШ использована следующая методика. Исходя из данных рисунка 1.2 выбрано 15 положений датчика в областях, различающихся по величине активности кавитации. В каждом положении датчика регистрировался спектр КШ в диапазоне от 0 до 500 кГц и величин H и A_{k1} . Каждый из спектров представляет собой усредненный результат 20 последовательных измерений.

По каждому из 15 спектров извлекалась информация о следующих составляющих: амплитуда основной гармоники f_0 ; амплитуда 2-й, 3-й и 4-й гармоник $f_n = nf_0$, где $n \in [2, 4]$; амплитуда субгармоники $f_s = f_0 / 2$; уровень непрерывной составляющей между f_0 и f_2 , между f_2 и f_3 и на частоте 500 кГц.

2 Результаты и обсуждение

На рисунке 2.1 в качестве примера представлено два из 15 полученных спектров в логарифмическом масштабе. Спектры включают основную частоту f_0 , гармоники nf_0 .

Видно, что они значительно различаются. Непрерывная составляющая (штриховая линия) на первом спектре (рисунок 2.1, а) находится в

диапазоне $[-64; -56]$ дБ, на втором (рисунок 2.1, б) – в пределах $[-46; -38]$ дБ.

В таблице 2.1 и 2.2 представлены по 5 записей с наименьшей и наибольшей шириной диапазона вариаций мощности ΔW . Приведены также минимальное и максимальное значение мощности КШ на каждой представленной частоте.

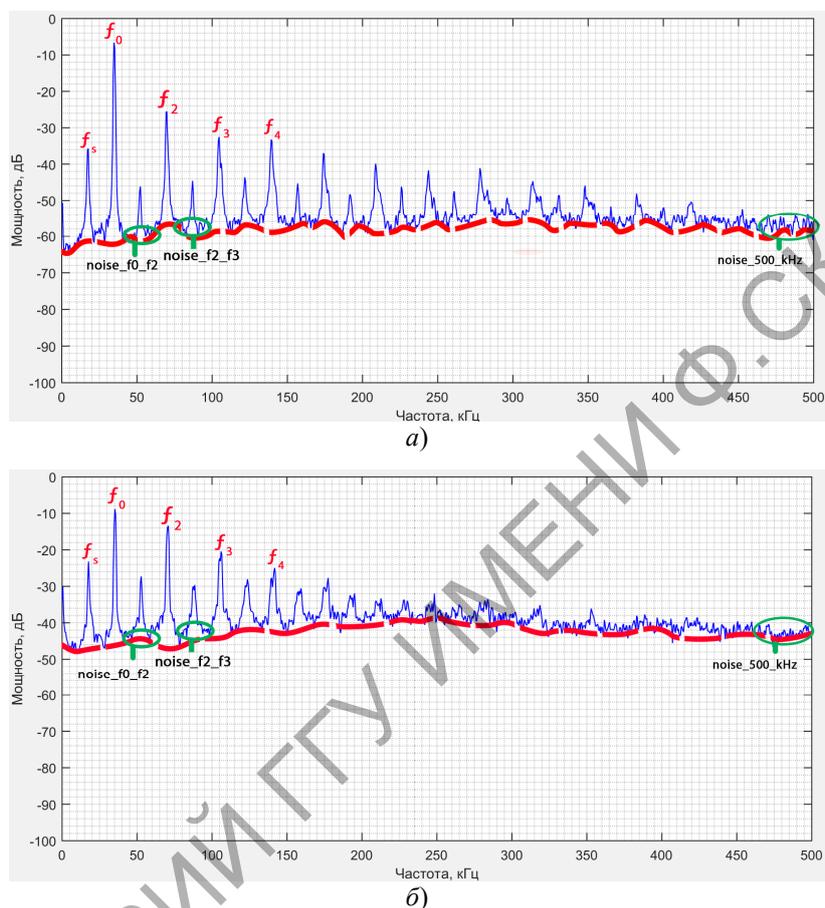


Рисунок 2.1 – Примеры полученных спектров кавитационного шума

Таблица 2.1 – Частоты наблюдения минимального изменения мощности КШ

частота, кГц	спектр №1, дБ	спектр №2, дБ	...	спектр №15, дБ	min_value, дБ	max_value, дБ	ΔW , дБ
407,226	-51,517	-51,123	...	-49,514	-60,476	-45,588	14,888
435,546	-51,598	-50,855	...	-48,102	-58,297	-42,935	15,362
425,780	-49,187	-49,013	...	-46,237	-58,131	-42,165	15,966
469,237	-48,242	-51,488	...	-49,620	-59,417	-43,317	16,100
474,120	-49,349	-50,692	...	-48,895	-62,965	-46,579	16,386

Таблица 2.2 – Частоты наблюдения максимального изменения мощности КШ

частота, кГц	спектр №1, дБ	спектр №2, дБ	...	спектр №15, дБ	min_value, дБ	max_value, дБ	ΔW , дБ
18,066	-37,848	-50,153	...	-43,749	-68,433	-23,203	45,231
0,488	-62,268	-64,111	...	-55,310	-69,420	-25,329	44,090
0,977	-59,119	-59,359	...	-50,652	-67,188	-24,024	43,164
18,555	-43,219	-51,807	...	-48,950	-69,729	-27,519	42,210
17,578	-38,464	-50,575	...	-41,947	-69,602	-28,191	41,411

На рисунке 2.2 представлен график зависимости диапазона вариаций мощности ΔW в спектре КШ от частоты. При увеличении частоты, начиная примерно с 200 кГц, ΔW плавно уменьшается и достигает минимального значения (14,8–16,4 дБ) в высокочастотной части спектра, т.е. для частот выше 400 кГц.

Наибольшие значения ΔW (41,4–45,2 дБ) наблюдаются на частотах, лежащих вблизи субгармоники $f_s = 17,5$ кГц. Значения на граничных частотах 0,49 и 0,98 кГц не принимаются во внимание, т.к. частоты ниже 10 кГц находятся вне рабочего диапазона использовавшегося прибора.

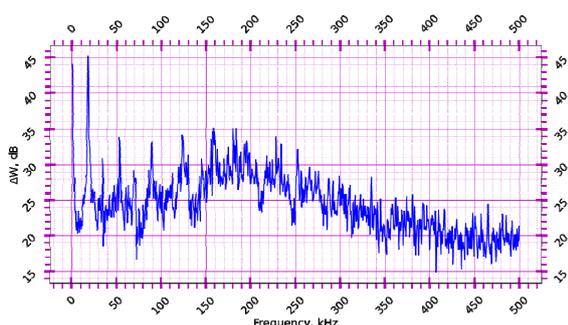


Рисунок 2.2 – Частотная зависимость ширины диапазона изменения мощности ΔW КШ

Таким образом, максимальное значение ΔW наблюдается на частоте 17,6 кГц, что соответствует частоте субгармоники. На графике наблюдаются периодические пики на частотах вблизи 18, 53, 89, 123, 158 и 228 кГц. Эти частоты с некоторым приближением кратны субгармонике, но при этом не кратны основной частоте. Т.е. их можно описать уравнением вида

$$f_{peak} = (2n + 1)f_s = \frac{(2n + 1)f_0}{2},$$

где f_{peak} – частоты, соответствующие пиковым значениям ширины диапазона вариаций мощности КШ; f_s – частота субгармоники; f_0 – основная частота (частота генератора); n – целое число.

Данной формулой не описывается пик на частоте 34,2 кГц, что несколько меньше основной частоты, для уточнения результата требуется большее число опытов. Имеется также небольшая максимум средней величины разброса для диапазона частот от 150 до 250 кГц. В целом, в низкочастотной области от 50 до 250 кГц наблюдаются более интенсивные вариации мощности сигнала по сравнению с высокочастотными составляющими, что указывает на перспективность использования данного диапазона для оценки активности кавитации.

На рисунке 2.2 заметны также провалы на частотах в районе 35, 71, 101, 141, 211 и 248 кГц, которые кратны основной частоте ультразвукового поля f_0 , т.е. их можно с некоторым приближением описать уравнением вида

$$f_{min} = nf_0,$$

где f_{min} – частота, которой соответствует уменьшение ширины диапазона вариаций мощности КШ; f_0 – основная частота (частота генератора); n – целое число.

Для проведения корреляционного анализа использовались значения мощности следующих величин:

- гармоники f_0, f_2, f_3, f_4 ;
- субгармоника f_s ;
- $noise_{f_0_f_2}$ – мощность непрерывной составляющей спектра между основной и 2-й гармоникой (рисунок 2.1);
- $noise_{f_2_f_3}$ – мощность непрерывной составляющей спектра между 2-й и 3-й гармоникой (рисунок 2.1);
- $noise_{500kHz}$ – мощность непрерывной составляющей спектра на частоте 500 кГц (рисунок 2.1);
- величина H – мощность полного выходного сигнала датчика в диапазоне частот от 10 кГц до 10 МГц;
- величина $r1$ – интегральная мощность кавитационного шума в диапазоне частот от 300 кГц до 10 МГц

На рисунке 2.3 представлена корреляционная матрица данных величин. На пересечениях столбцов и строк приведены коэффициенты корреляции Пирсона соответствующих величин.

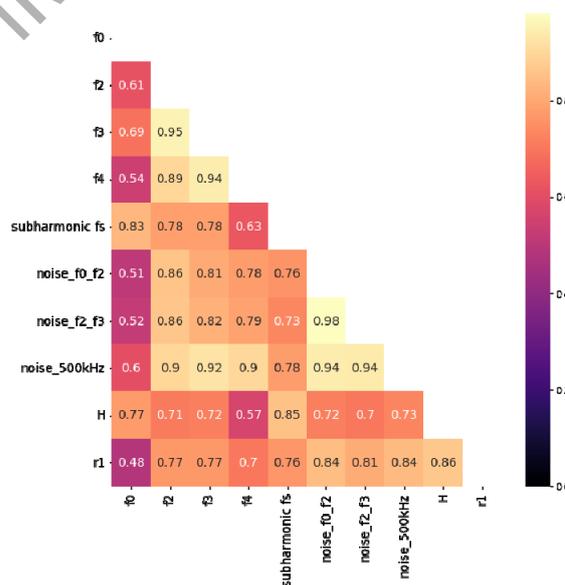


Рисунок 2.3 – Корреляция между составляющими спектра КШ

Как видно, для большинства пар характерна сильная положительная корреляция. Наиболее сильная линейная связь наблюдается попарно между непрерывными составляющими спектра $noise_{f_0_f_2}, noise_{f_2_f_3}, noise_{500kHz}$; между 2-й, 3-й и 4-й гармониками; между гармониками и непрерывной составляющей спектра.

Отдельно стоит обратить внимание на основную частоту f_0 : за исключением субгармоники

и полного сигнала H она слабо коррелирует с анализируемыми составляющими спектра КШ. Причина отсутствия связи (или слабая связь) между этими компонентами с частотой УЗ поля, вероятно, в том, что они не являются прямыми производными частоты поля, а генерируются пузырьками, динамика которых не связана линейно с вариациями давления в поле.

На рисунке 2.4 приведены примеры попарных распределений величин с высоким (рисунок 2.4, *а, б*) и низким (рисунок 2.4, *в, з*) коэффициентом корреляции. Первые два распределения хорошо аппроксимируются линейной зависимостью. Связь основной гармоники и величины непрерывной составляющей между основной и 2-й гармоникой довольно слаба ($r = 0,51$). Несмотря на относительно небольшой коэффициент корреляции зависимость на рисунке 2.4, в может быть описана прямой линией при удалении некоторых крайних точек. Для уточнения характера зависимости необходимо провести дополнительные исследования.

Наличие взаимной корреляции исследованных спектральных составляющих кавитационного шума позволяет сделать вывод, что каждая из оставшихся может использоваться для детектирования кавитации и, возможно, для оценки активности кавитации.

Заключение

Установлено, что вариации активности кавитации, действующей на датчик при изменении

его положения случайным образом в УЗ ванне, вызывают наибольшие изменения мощности кавитационного шума (КШ) на частоте субгармоники. В целом, в низкочастотной области при $f < 200$ кГц наблюдаются более интенсивные вариации мощности сигнала по сравнению с высокочастотными составляющими $f > 200$ кГц, что указывает на перспективность использования данного диапазона для оценки активности кавитации.

На частотах, кратных субгармонике (или близких кратным субгармонике), но не кратных основной частоте, наблюдаются пики вариаций мощности. На частотах, кратных основной частоте, наоборот, имеют место провалы вариаций мощности.

Обнаружена линейная связь между гармониками основной частоты, непрерывной составляющей спектра и интегральной мощностью кавитационного шума.

Корреляция основной частоты, т. е. частоты ультразвукового поля с большинством составляющих спектра выражена довольно слабо. Отсутствие связи (или слабая связь) этих компонент с частотой УЗ поля обусловлено, скорее всего тем, что эти составляющие не являются прямыми производными частоты поля, т. е. не возникают, например, вследствие нелинейных искажений волны, а генерируются пузырьками, динамика которых не связана линейно с вариациями давления в поле.

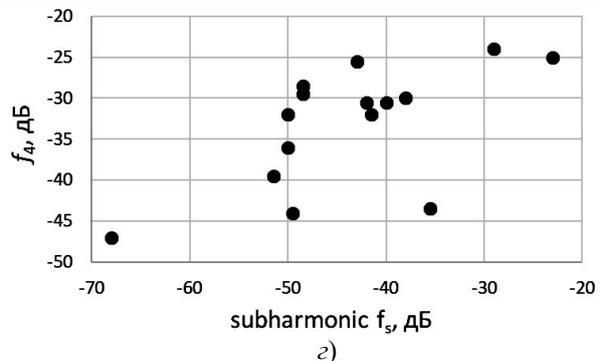
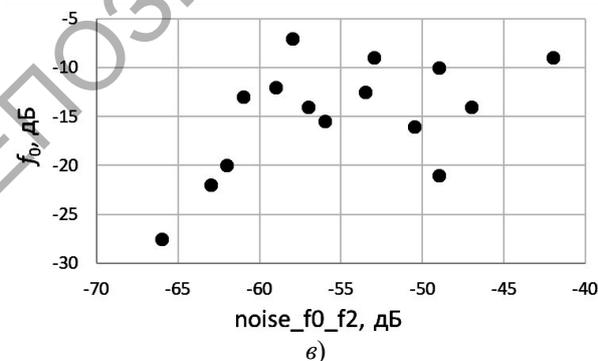
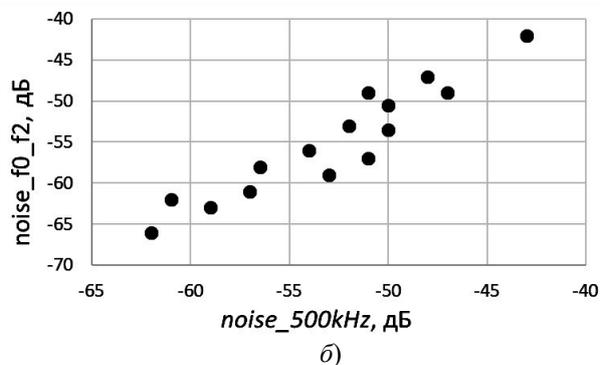
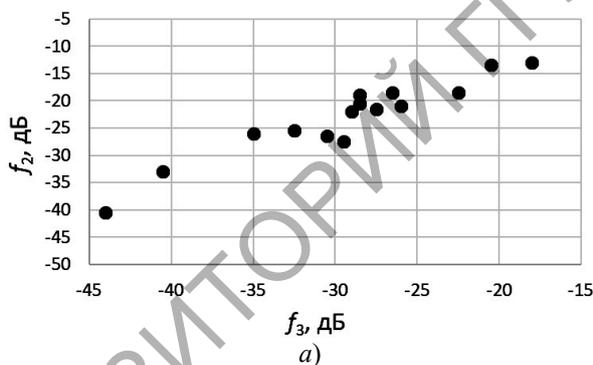


Рисунок 2.4 – Попарные распределения между составляющими спектра КШ: *а* – коэффициент корреляции $R^2 = 0,95$; *б* – коэффициент корреляции $R^2 = 0,94$; *в* – коэффициент корреляции $R^2 = 0,51$; *з* – коэффициент корреляции $R^2 = 0,63$

ЛИТЕРАТУРА

1. Сиротюк, М.Г. Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк; отв. ред.: В.А. Акуличев, Л.Р. Гаврилюк; Российская акад. наук, Дальневосточное отделение, Тихоокеанский технологический ин-т им В.И. Ильичева – Москва: Наука, 2008. – 270 с.
2. *Применение ультразвука высокой интенсивности в промышленности* / В.Н. Хмелев [и др.]. – Бийск: Изд-во АлГТУ им. И.И. Ползунова, 2010. – 250 с.
3. *A volume in Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials* / ed. J. A. Gallego-Jarez, K.F. Graff and M. Lucas // *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. Book – 2nd Edition*, 2023. – 921 p. – DOI: <https://doi.org/10.1016/C2019-0-00783-2>.
4. *Ellens, N.P.K. High-intensity focused ultrasound for medical therapy* / N.P.K. Ellens, K. Hynynen // *Power Ultrasonics: Applications of High-Intensity Ultrasound. Book*; ed. J.A. Gallego-Jarez, K.F. Graff. – 2nd Edition, 2023. – P. 661–693. – DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-1-78242-028-6.00022-3>.
5. *Физический механизм терапевтического эффекта ультразвука (Обзор)* / М.Р. Бэйли [и др.] // *Акустический журнал*. – 2003. – № 4. – С. 437.
6. *Применение твердофазных неоднородностей для повышения эффективности ультразвуковой терапии онкологических заболеваний* / А.Л. Николаев [и др.] // *Акустический журнал*. – 2009. – Т. 55. – № 4-5. – С. 565–574.
7. *Direct evidence of multi-bubble sonoluminescence using therapeutic ultrasound and microbubbles* / E. Beguin, S. Shrivastava, N. Dezhkunov [et al.] // *ACS Applied Materials and Interfaces*. – 2019. – Vol. 11 (12). – P. 19913–19919.
8. *Гаврилюк, Л.Р. Фокусированный ультразвук высокой интенсивности в медицине* / Л.Р. Гаврилюк; науч. ред. академик РАН В.А. Акуличев. – Москва: ФАЗИС, 2013. – 656 с.
9. *Subharmonic emission as an indicator of ultrasonically-induced biological damage* / K.I. Morton, G.R. ter Haar, I.J. Stratford, C.R. Hill // *Ultrasound in Med. and Biol.* – 1983. – Vol. 9. – № 6. – P. 629–633.
10. *Acoustic emission spectra and sonochemical activity in a 36 kHz sonoreactor* / Younggyu Son, Myunghee Lim, Jeehyeong Khim, Muthupandian Ashokkumar // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2012. – Vol. 19. – P. 16–21.
11. *Measurement of cavitation noise in ultrasonic baths and ultrasonic reactors* / Technical Specification IEC TS 63001. – 1-st Edition. – 2019. – 28 p.
12. *Sonoluminescence and acoustic emission spectra at different stages of cavitation zone development* / N.V. Dezhkunov, A. Francescutto, L. Serpe, R. Canaparo, G. Cravotto // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2018. – Vol. 40, № 1. – P. 104–109.
13. *Исследование корреляции звуколюминесценции и кавитационного шума в поле фокусирующего излучателя* / А.В. Котухов [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. – 2020. – № 4 (45). – С. 32–36.
14. *Кавитационная прочность водных суспензий пористых кремниевых наночастиц с различной степенью гидрофобности поверхности* / В.Д. Егошина [и др.] // *Акустический журнал*. – 2023. – Т. 69, №1. – С. 92–100.
15. *Acoustic characterization of cavitation intensity: A review* / Pengfei Wu, Xiuming Wang, Weijun Lin, Lixin Bai // *Journal of Ultrasonics Sonochemistry*. – Jan. 2022. – Vol. 82. – P. 105878. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105878>.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проект № T23M-026.

Поступила в редакцию 13.07.2023.

Информация об авторах

Минчук Вячеслав Сергеевич – инженер-электроник
Перхунова Александра Юрьевна – стажер мл.н.сотр.
Гаврилюк Виталий Степанович – инженер-программист
Дежкунов Николай Васильевич – к.т.н., доцент