



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-92-104>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 534.6

ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ: РЕЗУЛЬТАТЫ, ПРАКТИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

В. С. ГАВРИЛЮК, Н. В. ДЕЖКУНОВ, А. В. КОТУХОВ, В. А. КОЛТОВИЧ,
В. С. МИНЧУК, М. П. ФЕДОРИНЧИК, Е. А. КУРЛЮК

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

Поступила в редакцию 14.02.2024

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

Аннотация. Приведены наиболее значимые результаты исследований в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники, направленных на создание методов и приборов для мониторинга кавитации и управления ее активностью. Уточнены механизмы и закономерности новых и малоизученных явлений: ультразвукового капиллярного эффекта, звуколюминесценции, кавитационного шума и его спектральных компонент, оценены возможности их использования для аппаратурной реализации в качестве индикаторов кавитации. Обнаружены новые кавитационные явления: генерирование постоянной ЭДС под действием переменного давления ультразвуковой частоты, акустическое просветление кавитационной области при импульсном модулировании ультразвукового поля, эффект долговременной памяти кавитационных свойств жидкости. Установлены неизвестные ранее закономерности: показано, что кавитационная область проходит четыре стадии развития при увеличении интенсивности ультразвука; сформулирована теорема о максимуме активности кавитации; установлены спектральные характеристики кавитационного шума, коррелирующие с интенсивностью звуколюминесценции; показано, что импульсное модулирование ультразвукового поля позволяет управлять активностью кавитации. На основании полученных данных разработаны новые методы и приборы для исследования кавитации и управления ее активностью. По ряду параметров это оборудование превосходит лучшие мировые образцы, что подтверждается поставками в Россию, страны Евросоюза, Китай, США и Южную Корею.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, датчик, кавитометр, спектральный анализ, звуколюминесценция, кавитационный шум, активность кавитации.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Исследование акустической кавитации: результаты, практическая реализация и перспективы развития / В. С. Гаврилук [и др.] // Доклады БГУИР. 2024. Т. 22, № 2. С. 92–104. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-92-104>.

RESEARCH OF ACOUSTIC CAVITATION: RESULTS, PRACTICAL IMPLEMENTATION AND DEVELOPMENT PROSPECTS

VITALIY S. GAVRILUK, NIKOLAI V. DEZHKUNOV, ALEKSEI V. KOTUKHOV,
VALERIY A. KOLTOVICH, VIACHESLAV S. MINCHUK,
MIKHAIL P. FEDORINCHIK, EVGENIY A. KURLIUK

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

Submitted 14.02.2024

Abstract. The most significant results of research performed in the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, aimed at creating methods and instruments for monitoring cavitation and controlling its activity, are presented. To achieve this goal, it was necessary to clarify the mechanisms and patterns of new and little-studied phenomena: ultrasonic capillary effect, sonoluminescence, cavitation noise and its spectral components and evaluate the possibilities of their use for hardware implementation as cavitation indicators. New cavitation phenomena have been discovered: reverse ultrasonic capillary effect, generation of constant EMF under the influence of alternating pressure of ultrasonic frequency; acoustic clearing of the cavitation area with pulsed modulation of the ultrasonic field, the effect of long-term memory of the cavitation properties of the liquid. Previously unknown patterns have been established: it is shown that the cavitation region goes through four stages of development with increasing ultrasound intensity; a theorem on the maximum cavitation activity was formulated; the spectral characteristics of cavitation noise were established, correlating with the intensity of sonoluminescence. It has been shown that pulsed modulation of the ultrasonic field makes it possible to control the dynamics of the development of the cavitation region and the activity of cavitation. Based on the data obtained, new methods and instruments have been developed to study cavitation and control its activity. In a number of parameters, the created equipment surpasses the best world samples, what is confirmed by deliveries to the Russia, EU countries, China, USA and South Korea.

Keywords: ultrasound, cavitation, sensor, cavitometer, spectral analysis, sonoluminescence, cavitation noise, cavitation activity.

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

For citation. Gavriluk V. S., Dezhkunov N. V., Kotukhov A. V., Koltovich V. A., Minchuk V. S., Fedorinchik M. P., Kurliuk E. A. (2024) Research of Acoustic Cavitation: Results, Practical Implementation and Development Prospects. *Doklady BGUIR*. 22 (2), 92–104. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2024-22-2-92-104> (in Russian).

Введение

Ультразвуковые колебания широко используются для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях. Общеизвестно, что ключевой фактор при этом – кавитация – явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа под действием переменного давления ультразвуковой частоты [1]. При захлопывании нестационарных пузырьков генерируются ударные волны в жидкости и пузырьке, высокие температуры и давления в парогазовой смеси внутри пузырьков, микроструи жидкости. Температура в пузырьке может достигать 2000–6000 К и выше [2], что приводит к возникновению свечения в видимой области спектра – звуколюминесценции (ЗЛ). При пульсациях и захлопывании полостей в кавитационной области генерируется сложный акустический сигнал – кавитационный шум (КШ). Согласно [1–4], КШ содержит информацию о состоянии кавитационной области и динамическом поведении пузырьков. Поэтому спектральный анализ КШ может служить эффективным методом исследования кавитации [3]. Предлагались и другие методы детектирования кавитации и оценки ее активности, например, по интенсивности ЗЛ или ультразвуковому капиллярному эффекту [5].

Многочисленными исследованиями показано, что активность кавитации не определяется однозначно интенсивностью ультразвука, сильно зависит от свойств жидкости, ее газосодержания, температуры, наличия зародышей кавитации и других параметров. Многие из параметров, влияющих на активность кавитации, могут неконтролируемо меняться во времени при воздействии ультразвуком на жидкости, например, за счет дегазации [1, 2, 6] или в результате химических реакций [7]. Все это в совокупности с неполнотой знаний о закономерностях генерирования кавитации является причиной недостаточно высокой воспроизводимости ультразвуковых технологических процессов.

В последние годы интенсивно исследуются возможности применения мощного ультразвука (УЗ) в кавитационном режиме в медицине и биологии в связи с обнаружением новых многообещающих эффектов. Это, например, подавление роста раковых клеток [8, 9] и повышение проницаемости клеточных мембран [10, 11]. Отмечено, что кавитация возникает при относительно невысоких интенсивностях УЗ [11, 12], используемых в терапии. Проблема контроля активности кавитации и управления кавитационными режимами ультразвукового воздействия становится особенно актуальной при проведении медико-биологических исследований и в связи с перспективой внедрения кавитационных технологий в медицинскую практику. В статье представлены результаты исследований, выполненных в БГУИР и направленных на создание методов и приборов для мониторинга кавитации и управления ее активностью.

Методики исследований и оборудование

Исследования выполнены в низкочастотных (НЧ) и высокочастотных (ВЧ) ультразвуковых полях. Использовались два основных типа излучателей: погружные с волноводами и встроенные в днище рабочей емкости. Детальное описание вариантов экспериментальных установок представлено в [5, 13–15]. Основные исследования в ВЧ-полях выполнены с использованием рабочей емкости в виде цилиндра из нержавеющей стали диаметром 100 мм и высотой 160 мм. В днище емкости вмонтирован фокусирующий излучатель ультразвуковых колебаний. Датчик акустического сигнала (гидрофон) установлен таким образом, что его приемный элемент находится на расстоянии 25 мм от фокального пятна. На уровне фокального пятна ВЧ-излучателя в боковой стенке емкости вмонтирован световод, по которому оптическое излучение из кавитационной области попадает в фотоумножитель. На рис. 1 представлен общий вид установки для исследования кавитации с использованием НЧ ультразвуковой ванны.

Технические характеристики установки позволяют регулировать скорость развития кавитационной области путем варьирования длительности и периода следования импульсов УЗ. Сигнал с гидрофона H подавался на широкополосный усилитель. На осциллографе записывались интегральный акустический сигнал H и сигнал фотоумножителя L , с помощью которого измерялась интенсивность ЗЛ. Момент возникновения нелинейно пульсирующих пузырьков фиксировался по появлению ЗЛ.



Рис. 1. Пример комплектации установки для исследования кавитации в низкочастотной ультразвуковой ванне

Fig. 1. An example of a setup for studying cavitation in a low-frequency ultrasonic bath

Результаты исследований

Стадии развития кавитационной области

Разработка приборов для исследования кавитации и измерения ее активности с использованием кавитационного шума является одним из наиболее перспективных направлений в данной области [15]. 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. Поэтому поиск спектральных характеристик КШ, коррелирующих с активностью кавитации, представляет значительный интерес с двух точек зрения: для уточнения представлений о механизме генерирования соответствующих

спектральных составляющих КШ и для оценки возможности использования параметров спектра, коррелирующих с интенсивностью ЗЛ.

В результате проведенных исследований [3, 15–19] получены данные, позволившие уточнить представления о закономерностях генерирования кавитации. На рис. 2 показаны результаты синхронной регистрации выходных сигналов фотоумножителя L (рис. 2, *a*) и гидрофона H (рис. 2, *b*) в фокусированном импульсном ультразвуковом поле при плавном увеличении напряжения на излучателе. Рабочая жидкость – дистиллированная вода при $q = (22 \pm 1,5)^\circ\text{C}$, длительность импульсов ультразвукового поля $\tau = 3$ мс, период следования $T = 100$ мс, скорость увеличения напряжения на излучателе $7,5$ В/с, $f_0 = 720$ кГц при плавном увеличении напряжения U на излучателе. Генератор включался на 5-й секунде после начала эксперимента. На первом этапе, как видно из рис. 2, *b*, выходной сигнал гидрофона увеличивается линейно со временем. Отклонение зависимости $H(t)$ от первоначальной прямой в сторону уменьшения (примерно на 13-й секунде) вызвано, очевидно, увеличением поглощения ультразвука вследствие возникновения пузырьков в фокальной области излучателя.

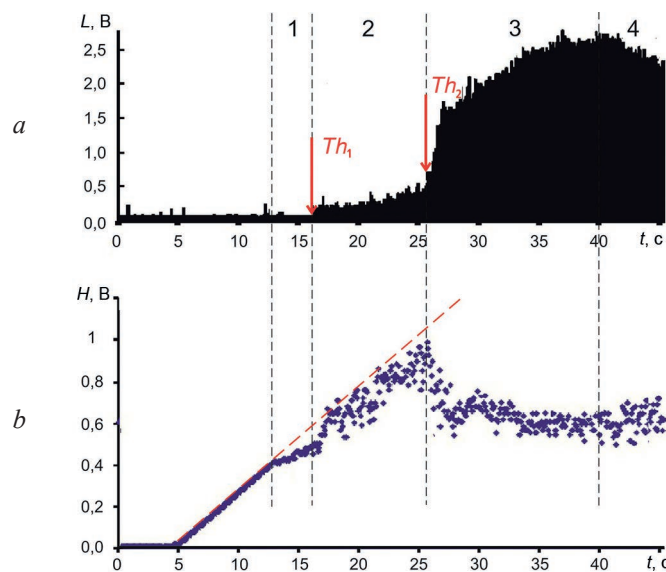


Рис. 2. Эволюция характеристик кавитационной области при увеличении напряжения на излучателе
Fig. 2. Evolution of the characteristics of the cavitation region with increasing voltage on the emitter

Свечение с интенсивностью выше уровня фоновых помех возникает примерно на 17-й секунде после начала эксперимента. Этот момент отмечен на рис. 2, *a* стрелкой Th_1 – первый порог ЗЛ. Одновременно с возникновением ЗЛ меняется характер кривой $H(t)$, а именно – появляется значительный разброс сигнала H . При некотором критическом значении напряжения U наклон зависимости $L(t)$ изменяется скачком, т. е. скорость роста интенсивности ЗЛ резко увеличивается. Этот момент отмечен на рис. 2, *a* стрелкой Th_2 – второй порог ЗЛ. Быстрый рост интенсивности ЗЛ сопровождается соответствующим быстрым падением выходного сигнала гидрофона H . Анализ представленных данных позволяет выделить четыре стадии эволюции кавитации [3, 15, 19]:

- 1 – возникновения и пульсации пузырьков при отсутствии ЗЛ;
- 2 – возникновения ЗЛ и последующего роста ее интенсивности при незначительном увеличении поглощения УЗ;
- 3 – быстрого роста ЗЛ при таком же увеличении поглощения УЗ;
- 4 – пересыщения кавитационной области пузырьками, когда активность кавитации, оцениваемая по интенсивности ЗЛ, уменьшается, несмотря на увеличение напряжения U .

На рис. 2 стадии отделены штриховыми линиями. Переход от одной стадии развития кавитационной области к другой сопровождается изменением состава регистрируемых спектров (рис. 3). Маркером на рис. 3 отмечена основная частота $f_0 = 720$ кГц, штриховой линией показан уровень широкополосного шума WBN (Wide Band Noise), т. е. непрерывной составляющей КШ. Таким образом, спектральный анализ кавитационного шума позволяет идентифицировать стадии развития кавитационной области.

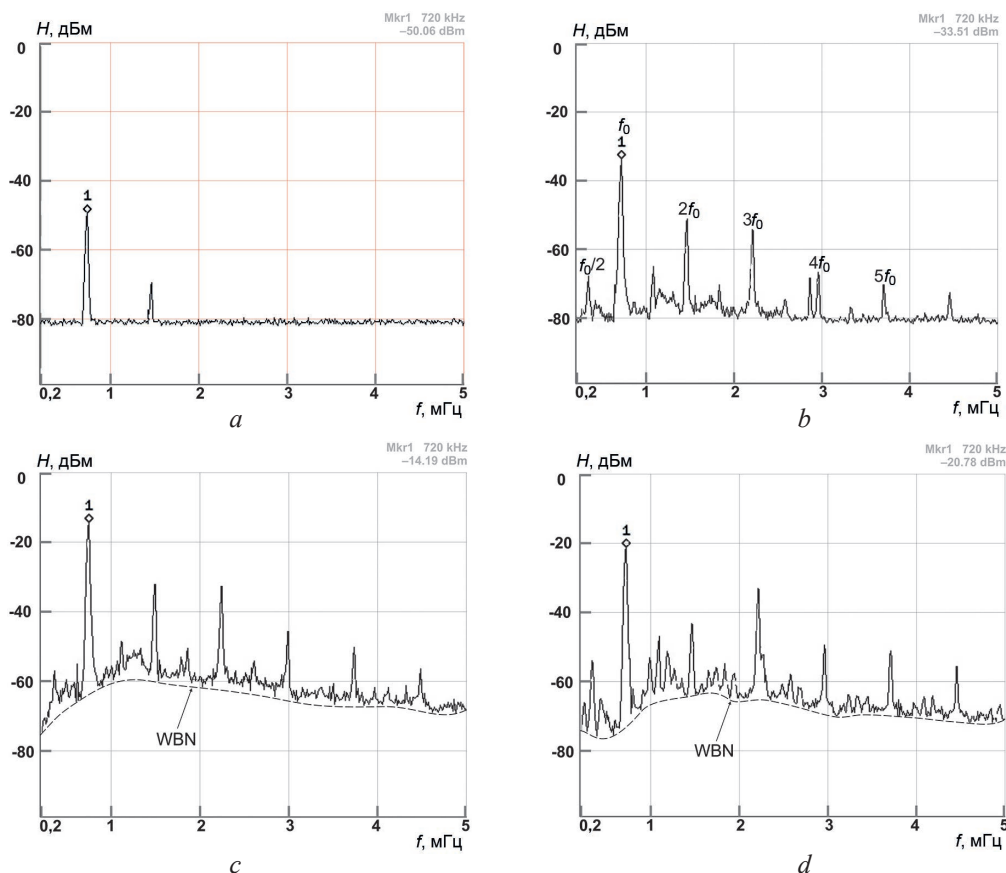


Рис. 3. Спектры акустического сигнала для стадий развития кавитационной области: *a, b, c, d* – первой, второй, третьей и четвертой соответственно; $f_0 = 720$ кГц; $\tau = 3$ мс; $T = 30$ мс; $q = (21 \pm 2)^\circ\text{C}$

Fig. 3. Spectra of the acoustic signal for different stages of development of the cavitation region: *a, b, c, d* – first, second, third and fourth, respectively; $f_0 = 720$ kHz; $\tau = 3$ ms; $T = 30$ ms; $q = (21 \pm 2)^\circ\text{C}$

Механизмы генерирования спектральных компонент кавитационного шума

Из сопоставления данных рис. 2, 3 следует, что субгармоника основной частоты $f_0/2$ и непрерывная составляющая спектра КШ (НСКШ) возникают на той же стадии развития кавитационной области, что и ЗЛ. Поэтому представляется возможным использовать любой из этих параметров для детектирования кавитации. Однако, как отмечено в [16], существуют режимы озвучивания жидкостей, при которых субгармоника отсутствует в спектре КШ. Такие спектры регистрируются, например, в частично дегазированной воде при большой скважности импульсов ультразвука $N = T/\tau$. Поэтому метод оценки активности кавитации по интенсивности субгармоники имеет существенные ограничения. С другой стороны, с ростом скважности уменьшается поглощение УЗ [17], т. е. наблюдается своего рода эффект акустического просветления кавитационной области. При этом интенсивность ЗЛ растет в широком диапазоне изменения N , что указывает на повышение эффективности преобразования и концентрации энергии кавитации при увеличении скважности импульсов УЗ-поля. Полученными в [16] результатами подтверждена гипотеза, в соответствии с которой субгармоника в спектре КШ генерируется большими пузырьками размерами больше резонансного. Такие пузырьки, согласно [1, 17, 19], пульсируют, мало меняя свои размеры, и не генерируют свечения и других кавитационных явлений, однако эффективно поглощают и рассеивают энергию УЗ. В импульсном поле концентрация больших неэффективных полостей снижается, что и обеспечивает упомянутое выше просветление кавитационной области и повышение активности кавитации.

Согласно [1, 2], интенсивность ЗЛ определяется концентрацией нестационарных полостей и эффективностью, с которой они преобразуют энергию УЗ в другие виды энергии. Поэтому ЗЛ могла бы служить надежным индикатором уровня активности кавитации. Однако возможности ее использования для таких целей существенно ограничены: во-первых, этот метод применим только для прозрачных жидкостей, во-вторых, измерения должны проводиться в затемненном

помещении, чтобы исключить влияние фоновых засветок. Поскольку кавитационный шум излучается пузырьками при их движении, то, как обоснованно считают многие авторы, он содержит информацию о состоянии кавитационной области и динамическом поведении пузырьков. Поэтому можно ожидать, что спектр КШ будет включать компоненты, генерируемые захлопывающимися полостями. С целью выявления таких компонент проведены исследования корреляции спектральных характеристик КШ и ЗЛ [18]. В табл. 1 представлен перечень параметров, по которым проводилось исследование их корреляции с активностью кавитации, оцениваемой по интенсивности ЗЛ.

Таблица 1. Параметры спектра кавитационного шума
Table 1. Parameters of the cavitation noise spectrum

Параметр H / Parameter H	Алгоритм вычисления параметра H / Algorithm for calculating parameter H
Power-1	Сумма всех точек спектра без основного сигнала
Power-123	Сумма всех точек спектра без основного сигнала (гармоника f_0) и без гармоник 1.5, 2, 2.5, 3
Power-12345	Сумма всех точек спектра без основного сигнала (гамоника f_0) и без гармоник 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5, 5
Power-All	Сумма всех точек спектра без основного сигнала и без всех гармоник и субгармоник $(n + S)f_0$
Pnoise 12	Сумма точек спектра между основным сигналом и 2-й гармоникой (учитывается 1.5-я гармоника)
Pnoise 12-1.5	Сумма точек спектра между основным сигналом и 2-й гармоникой (без 1.5-й гармоники)
Psignal	Интенсивность основного сигнала (сумма точек спектральной составляющей на частоте f_0)
Pharm 0.5	Мощность 0.5-й гармоники (субгармоника, частота в два раза меньше, чем частота основного сигнала f_0)
Psumhalfharm	Мощность всех субгармоник $(n + S)f_0$

В экспериментах увеличивали напряжение U на излучателе и регистрировали выходной сигнал L фотоумножителя, пропорциональный интенсивности ЗЛ, и спектры КШ. На рис. 4 приведены примеры сопоставления L и параметров спектра КШ при $f_0 = 720$ кГц; $\tau = 3$ мс; $T = 30$ мс; $q = (21 \pm 1,5) ^\circ\text{C}$. Здесь спектральный акустический параметр H представлен в линейном масштабе, а выходной сигнал фотоумножителя L – в логарифмическом. Показано, что в диапазоне интенсивностей, соответствующих первой стадии развития кавитационной области (рис. 4, a, b , $U < 150$ В), интенсивность ЗЛ хорошо коррелирует с интенсивностью субгармоники основного сигнала, т. е. сигнала на частоте $f_0/2$. Однако при более высоких интенсивностях УЗ зависимости $L(U)$ и $H(U)$ различаются кардинально, а именно: интенсивность ЗЛ увеличивается с ростом интенсивности УЗ, а H уменьшается. Примерно также зависит от U и параметр, полученный суммированием всех субгармоник.

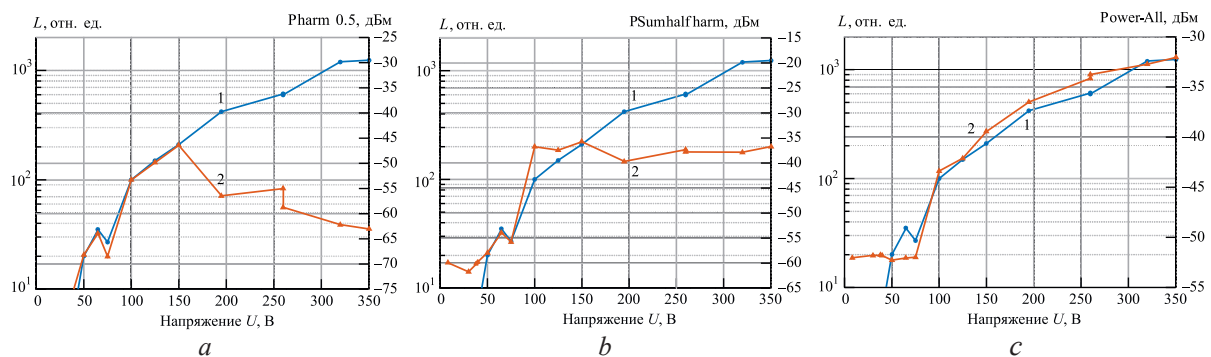


Рис. 4. Корреляция интенсивности звуколюминесценции L и параметров спектра кавитационного шума:
1 – L ; 2 – H ; a – интенсивность первой субгармоники; b – суммарная интенсивность всех субгармоник;
 c – интенсивность непрерывной составляющей спектра кавитационного шума

Fig. 4. Correlation of sonoluminescence intensity L and cavitation noise spectrum parameters:
1 – L ; 2 – H ; a – intensity of the first subharmonic; b – total intensity of all subharmonics;
 c – intensity of the continuous component of the cavitation noise spectrum

Из представленных в табл. 1 параметров однозначную связь с интенсивностью ЗЛ показали полная интенсивность КШ без первых трех гармоник и интенсивность КШ без всех гармоник и субгармоник (рис. 4, *c*). Последний параметр представляет собой интегральную интенсивность НСКШ. Высокая степень корреляции НСКШ и ЗЛ подтверждает гипотезу, в соответствии с которой генерирование НСКШ происходит вследствие захлопывания кавитационных полостей, и поэтому может использоваться в качестве индикатора уровня активности нестационарной кавитации. В [20] анализ механизма генерирования НСКШ выполнен путем моделирования возможных искажений (возмущений) исходного синусоидального УЗ-поля, вносимых кавитационными полостями. Использовался следующий алгоритм моделирования КШ. В докавитационном режиме давление в звуковом поле считается изменяющимся по синусоидальному закону. При возникновении кавитации на исходный синусоидальный сигнал накладываются акустические возмущения. Вид результирующего возмущения выбирается исходя из известных закономерностей динамики отдельных пузырьков и кавитационной области в целом. Сформированный таким способом сигнал в цифровом представлении подвергается спектральному анализу методом преобразования Фурье.

В качестве первого приближения рассмотрен случай единичного пузырька в сферически симметричном фокусированном УЗ-поле. Этот случай реализуется в экспериментах с однопузырьковой сонолюминесценцией (ОПЗЛ) [2]. В такой системе быстрое сжатие пузырька (захлопывание) происходит в конце первой или в начале второй половины полупериода сжатия ультразвуковой волны. Процесс повторяется в каждом периоде в одной и той же фазе с высокой степенью периодичности и сопровождается синхронным генерированием акустического импульса и вспышки света. Результирующий акустический сигнал представлен на рис. 5, *a* при $f_0 = 35$ кГц и амплитуде периодического импульса $0,9P_a$. Спектр включает основную частоту f_0 и гармоники nf_0 . Непрерывная составляющая отсутствует (рис. 5, *b*). Известно [2], что при увеличении амплитуды звукового давления P_a более $1,5P_0$ (где P_0 – гидростатическое давление) однопузырьковая система переходит в режим неустойчивого генерирования ЗЛ. Пузырек при этом неустойчив и хаотически колеблется в пространстве вблизи точки максимального давления. Фаза пульсаций такого пузырька варьируется стохастически около некоторого среднего положения относительно фазы волны.

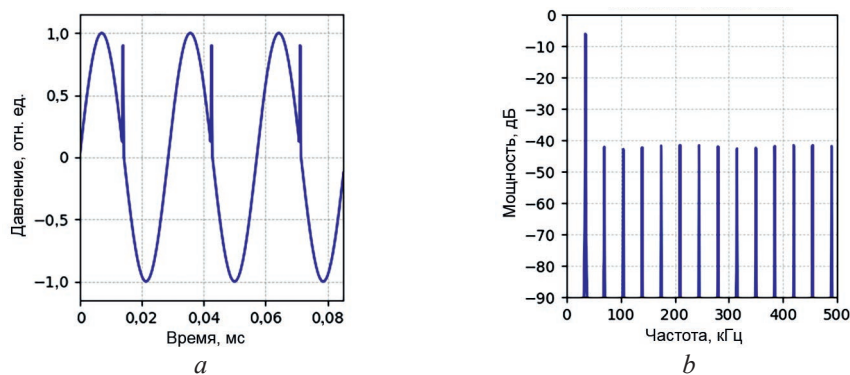


Рис. 5. Акустический сигнал и его спектр

для случаев периодического импульсного возмущения синусоидального сигнала

Fig. 5. Acoustic signal and its spectrum for the case of periodic pulsed disturbance of a sinusoidal signal

При моделировании соответствующего акустического сигнала для каждого последовательного периода ультразвука задавалось смещение генерируемого пузырьком импульса Δt от среднего положения, варьируемое случайным образом с ограничением максимальной величины Δt^* . Спектр такого сигнала представлен на рис. 6, *a* для $f_0 = 35$ кГц, амплитуды аperiodического импульса $0,3P_a$, $\Delta t^* = 0,1T_0$ ($T_0 = 1/f_0$). Таким образом, источником непрерывной составляющей могут быть не только ударные волны, генерируемые при захлопывании пузырька, но и аperiodичность следования импульсов. С ростом аperiodичности увеличивается и интенсивность НСКШ. В многопузырьковой кавитационной области суммарный акустический сигнал в любой заданной достаточно малой области поля, где находится датчик, формируется из возмущений, генерируемых не только близлежащими пузырьками, но также и находящимися на значительном удалении. Импульсы от удаленных пузырьков в данную точку будут приходить с некоторой задержкой во времени по отношению к моменту захлопывания.

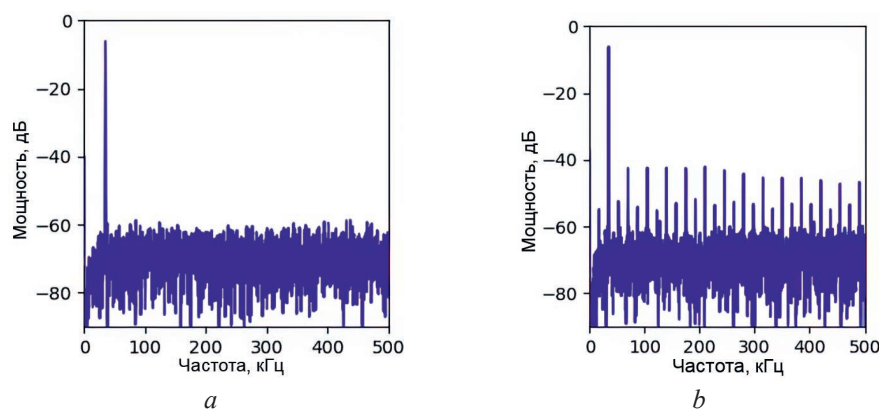


Рис. 6. Спектры результирующих сигналов для режимов однопузырьковой сонолюминесценции (а) и многопузырьковой кавитационной области (b)

Fig. 6. Spectra of the resulting signals for the single-bubble sonoluminescence (a) and multi-bubble cavitation region (b) modes

Кавитационная область, как известно, включает пузырьки разных размеров, и распределение по размерам может меняться от периода к периоду. Учитывая изложенное, логично предположить, что результирующее акустическое возмущение, генерируемое многопузырьковой кавитационной областью в заданной точке поля, не может быть строго периодическим. Такое возмущение в [20] моделировали в виде последовательных импульсов, интенсивность и фаза которых варьировались случайным образом в некотором заданном диапазоне величин. Спектр результирующего сигнала включает основную частоту и непрерывную составляющую.

Распределение пузырьков по размерам в кавитационной области имеет вид кривой с максимумом [1]. При этом наибольшее количество пузырьков (более 50 %) сосредоточено в узком диапазоне размеров. Ясно, что пузырьки из этого диапазона будут захлопываться с незначительной задержкой друг относительно друга, формируя при этом квазипериодический импульс, т. е. импульс, фаза которого хаотически варьируется вблизи некоторого положения относительно фазы волны. Спектр результирующего сигнала (рис. 6, b) включает основную частоту, гармоники и непрерывную составляющую, т. е. по составу аналогичен регистрируемым экспериментально спектрам [3, 14]. В [21] выявлена линейная связь между гармониками основной частоты, непрерывной составляющей спектра и интегральной мощностью кавитационного шума в исследуемом частотном диапазоне. Отсутствие связи (или слабая связь) данных компонент с частотой УЗ-поля указывает на то, 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.

Кавитация в импульсных ультразвуковых полях

При увеличении интенсивности УЗ выше порога кавитации увеличивается концентрация пузырьков в кавитационной области, соответственно растет активность кавитации как в целом в объеме жидкости, так и в любой точке. Однако, с другой стороны, с ростом концентрации пузырьков на пути звуковой волны увеличивается поглощение УЗ в кавитационной области. Кроме того, ухудшаются условия передачи энергии от излучателя в жидкость вследствие уменьшения ее волнового сопротивления. Это приводит к тому, что, начиная с некоторой амплитуды колебаний излучателя A , в любой заданной точке звукового поля, несмотря на увеличение A (или излучаемой мощности), активность кавитации достигает максимума и затем либо мало меняется с увеличением излучаемой мощности [7, 17, 19, 22], либо начинает уменьшаться.

В ходе исследований зависимости активности кавитации от параметров поля и свойств жидкости в импульсных УЗ-полях установлена неизвестная ранее связь между порогом кавитации и ее активностью. Активность кавитации оценивалась по интенсивности ЗЛ. Исследовались зависимости интенсивности ЗЛ от напряжения U , приложенного к излучателю, при котором возникает кавитация. Значения максимальной интенсивности ЗЛ, полученные при варьировании напряжения на излучателе (амплитудное значение) в диапазоне 0–250 В, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Максимальная интенсивность звуколюминесценции и пороговые давления ультразвука для различных жидкостей

Table 2. Maximum sonoluminescence intensity and ultrasound threshold pressures for various liquids

Параметр / Parameter	Жидкость / Liquid						
	1	2	3	4	5	6	7
P_{th} , атм	8,3	5,5	4,3	3,1	2,5	1,5	1,9
L_{max} , мВ	1380	790	420	109	46	19	8
U_{th} , В	87,9	59,7	46,7	33,7	22,8	16,3	15,0

Обозначения: 1, 2 – раствор NaCl 270 и 100 г/л соответственно; 3 – дистиллированная вода; 4 – хлорбензин; 5 – бензин; 6 – этиловый спирт; 7 – ацетон.

Примечание – Порог кавитации в данной серии экспериментов определялся по возникновению высокочастотного кавитационного шума с помощью кавитометра ICA-4D при скорости увеличения напряжения на излучателе 5 В/с, $T = 30$ мс, $\tau = 3$ мс, $q = 25$ °С.

Как видно из табл. 2, чем выше порог, тем выше максимальная активность кавитации. Зависимости, полученные для различных режимов УЗ-воздействия, подчиняются такой же закономерности. Исходя из данного анализа и экспериментальных результатов, представленных выше и в [7, 17, 19], сформулировано следующее утверждение (теорема о максимуме активности кавитации): максимум активности кавитации в многопузырьковой кавитационной области, достигаемый при варьировании излучаемой мощности УЗ в достаточно широких пределах, всегда выше в тех жидкостях и для тех параметров УЗ-воздействия, в которых для генерирования кавитации требуется более высокая интенсивность УЗ, т. е. в которых выше порог кавитации.

Использование этого результата облегчает задачу оптимизации воздействия УЗ на физико-химические процессы в жидкостях, выбора или синтеза жидкостей с наиболее высокой активностью кавитации. Для управления активностью кавитации и динамикой развития кавитационной области предлагается использовать импульсное модулирование УЗ-поля [12, 17]. Установлено, что зависимости интенсивности ЗЛ от скважности импульсов имеют вид кривых с максимумом. С ростом интенсивности УЗ максимум L смещается в сторону больших скважностей. Следует отметить, что спектральные характеристики КШ в импульсном поле меняются при увеличении скважности импульсов. Это указывает на изменение распределения по размерам пузырьков в кавитационной области. В частности, при больших скважностях в спектре КШ отсутствует субгармоника [18], которую обычно считают признаком наличия в кавитационной области пузырьков с размерами больше резонансного.

Кавитация при взаимодействии сильно различающихся по частоте ультразвуковых полей

Исследованы закономерности генерирования ЗЛ при взаимодействии сильно различающихся по частоте УЗ-полей [23]. На рис. 7, а, б представлен пример синхронной регистрации выходных сигналов гидрофона H и фотомножителя L при взаимодействии НЧ- и ВЧ-полей. Данные для рис. 7: длительность импульсов ВЧ-поля $\tau = 2$ мс; период следования импульсов $T = 300$ мс; напряжение на излучателе 135 В; амплитуда колебаний НЧ-излучателя 8 мкм. Время работы ВЧ- и НЧ-излучателей отмечено в нижней части рис. 7 закрашенными участками соответственно верхней и нижней полос.

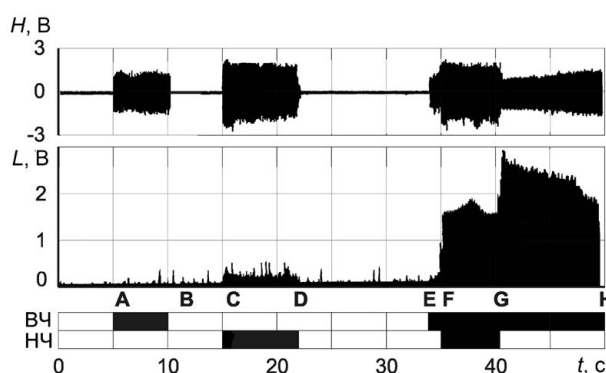


Рис. 7. Временные осциллограммы выходных сигналов гидрофона H (а) и фотомножителя L (б)
Fig. 7. Time oscillograms of the output signals of hydrophone H (a) and photomultiplier L (b)

Режимы работы ВЧ- и НЧ-излучателей в данном примере таковы, что интенсивность ЗЛ при работе каждого из них отдельно (рис. 7, участки АВ и CD соответственно) незначительно превышает уровень фоновых импульсов. При совместной работе излучателей (участок FG) суммарный эффект более чем в 10 раз превосходит сумму эффектов, вызываемых отдельно НЧ- и ВЧ-полями. Установлено, что при интенсивностях НЧ-поля, превышающих пороги кавитации, основным механизмом усиления ЗЛ является генерирование зародышей кавитации НЧ при их коллапсе. Механизмы усиления ЗЛ, связанные с непосредственным взаимодействием полей [24], реализуются, если только оба поля включены. Тот факт, что в момент отключения НЧ-поля интенсивность ЗЛ не падает мгновенно (рис. 7, *b*, участок GH), а плавно уменьшается, позволяет считать, что вклад данных механизмов в исследуемый эффект незначителен и основным фактором является, скорее всего, генерирование новых зародышей кавитации при захлопывании пузырьков. Таким образом, неаддитивное усиление ЗЛ (синергизм) имеет место не только при одновременном воздействии полей на жидкость, но также и в ВЧ-поле после предварительного озвучивания жидкости НЧ-полем, т. е. обнаружен эффект длительного последействия НЧ-поля на кавитацию.

Практическая реализация результатов исследований и перспективы их развития

Представленные результаты фундаментальных исследований использованы при создании оборудования для исследования кавитации, измерения уровня ее активности и генерирования мощного УЗ в жидкостях и жидкообразных средах. С использованием этих результатов совершенствуется программное обеспечение, которым комплектуются разрабатываемые приборы [25]. Созданы новые образцы УЗ-оборудования, внедренные на предприятиях Беларуси и поставляющиеся в страны ближнего и дальнего зарубежья. Среди них можно отметить прибор для исследования кавитации в низкочастотных УЗ-полях – кавитометр, по ряду параметров превосходящий лучшие мировые образцы, что подтверждается поставками в Россию, Китай, страны Евросоюза, США и Южную Корею. Для испытаний кавитометров и датчиков кавитации создан ультразвуковой кавитационный комплекс, который может использоваться также для оптимизации режимов работы УЗ-оборудования. На рис. 8 представлены образцы приборов: стационарный ICA-3M (*a*) и переносной ICA-4D (*b*) кавитометры, переносной кавитометр ICA-5DM (*c*) с USB выходом и программой обработки данных.

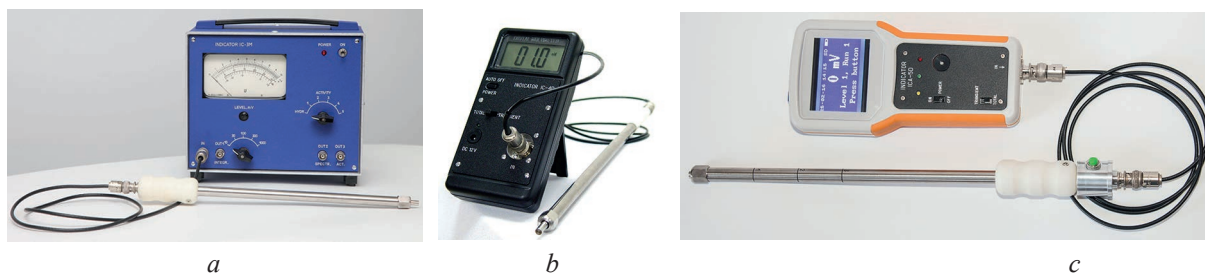


Рис. 8. Общий вид базовых образцов ультразвукового оборудования
Fig. 8. General view of basic samples of ultrasonic equipment

Одна из наиболее важных задач в области фундаментальных исследований – разработка физических основ метрологического обеспечения измерений активности кавитации и создание эталона кавитации. Ее решение является необходимым условием стандартизации измерений и введения единицы активности кавитации, что позволит закрепить лидирующее положение белорусских ученых в этой области. В ближайшее время планируется совершенствовать и создавать новые образцы датчиков и приборов для исследования кавитации. В рамках ГНТП «Национальные эталоны и высокотехнологичное исследовательское оборудование» будет создан новый спектрально-акустический индикатор кавитации (планируемое название – ИКА-С). Прибор впервые обеспечит возможность синхронной регистрации активности кавитации в различных частотных диапазонах и будет оснащен системой позиционирования датчика в звуковом поле.

Перспективным направлением является разработка специализированных датчиков кавитации и кавитометров для применения в медико-биологических исследованиях. Кроме того, планируется разработка специализированных излучателей и генераторов для ультразвуковой обработки

суспензий наночастиц во взаимодействующих НЧ и ВЧ УЗ-полях, для интенсификации процессов гальванической обработки и повышения качества получаемых покрытий и пленок, для прецизионной УЗ-очистки в технологических процессах микроэлектроники.

Заключение

1. Представлены результаты исследований кавитации, выполненных в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники и направленных на создание методов и приборов для мониторинга кавитации и управления ее активностью.

2. Показано, что кавитационная область проходит четыре стадии развития при увеличении интенсивности ультразвука, а импульсное модулирование ультразвукового поля позволяет управлять активностью кавитации; сформулирована теорема о максимуме активности кавитации; установлены спектральные характеристики кавитационного шума, коррелирующие с интенсивностью звуколюминесценции.

3. На основании полученных данных разработаны новые методы и приборы для исследования кавитации и управления ее активностью. По ряду параметров созданное оборудование превосходит лучшие мировые образцы, что подтверждается поставками в Россию, страны Евросоюза, Китай, США и Южную Корею.

Список литературы

1. Сиротюк, М. Г. Акустическая кавитация / М. Г. Сиротюк. М.: Наука, 2008.
2. Brenner, M. P. Single-Bubble Sonoluminescence / M. P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse // *Rev. Mod. Phys.* 2002. Vol. 74. P. 65–144.
3. Sonoluminescence and Acoustic Emission Spectra at Different Stages of Cavitation Zone Development / N. V. Dezhkunov [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018. Vol. 40, No 1. P. 104–109.
4. Dynamic Behavior of Polymer Microbubbles During Long Ultrasound Tone-Burst Excitation and Its Application for Sonoreperfusion Therapy / Xianghui Chen [et al.] // *Ultrasound Med Biol*. 2023. Vol. 49. P. 996–1006.
5. Дежкунов, Н. В. Исследование связи звуколюминесценции и ультразвукового капиллярного эффекта / Н. В. Дежкунов, Т. Г. Лейтон // *Инженерно-физический журнал*. 2004. Т. 77, № 1. С. 45–51.
6. Кавитация в водных растворах углекислого газа / А. В. Котухов [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. 2019. Т. 41, № 4. С. 35–41.
7. Characterization of Transient Cavitation Activity During Sonochemical Modification of Magnesium Particles / N. Brezhneva [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2021. Vol. 70, No 3–4.
8. Протопович, Е. Л. Противоопухольевая эффективность сонодинамической терапии с фотосенсибилизатором хлоринового ряда в эксперименте / Е. Л. Протопович, Д. А. Церковский // *Российский биотерапевтический журнал*. 2022. Т. 21, № 1. С. 68–75.
9. Физический механизм терапевтического эффекта ультразвука / М. Р. Бэйли [и др.] // *Акустический журнал*. 2003. Т. 49, № 4. С. 369–388.
10. Burgess, M. T. Control of Acoustic Cavitation for Efficient Sonoporation with Phase-Shift Nanoemulsions / M. T. Burgess, T. M. Porter // *Ultrasound in Medicine and Biology*. 2019. Vol. 45, No 3. P. 846–858. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.
11. Direct Evidence of Multibubble Sonoluminescence Using Therapeutic Ultrasound and Microbubbles / E. Beguin [et al.] // *ACS Appl. Mat. Interfaces*. 2019. Vol. 11, No 22. P. 19913–19919.
12. Insight into Ultrasound-Mediated Reactive Oxygen Species Generation by Various Metal-Porphyrin Complexes / F. Giuntini [et al.] // *Free Radic. Biol. Med*. 2018. Vol. 121, No 1. P. 109–121.
13. Влияние импульсного модулирования ультразвукового поля на динамику развития кавитационной области и активность кавитации / Н. В. Дежкунов [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2012. № 2. С. 92–98.
14. Комбинированный метод исследования акустической кавитации / А. В. Котухов [и др.] // *Доклады БГУИР*. 2020. Т. 18, № 4. С. 80–88. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88>.
15. Исследование корреляции звуколюминесценции и кавитационного шума в поле фокусирующего излучателя / А. В. Котухов [и др.] // *Проблемы физики, математики и техники*. 2020. Т. 45, № 4. С. 32–36.
16. Наблюдение кавитационного шума без субгармоники / А. В. Котухов [и др.] // *Письма в Журнал технической физики*. 2023. Т. 49, № 6. С. 39–42.
17. Кавитация в импульсных ультразвуковых полях / Н. В. Дежкунов [и др.] // *Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: матер. IV Междунар. науч. конф., г. Витебск, 29–31 марта 2023 г. Минск: ИВЦ Минфина, 2023. С. 149–151.*
18. Звуколюминесценция и спектральные характеристики кавитационного шума в фокусированном ультразвуковом поле / В. С. Гаврилюк [и др.] // *Сб. тр. 34-й сессии Рос. акуст. общ., г. Москва, 14–18 февраля 2022 г. М.: ГЕОС, 2022. С. 1073–1080.*

19. Дежкунов, Н. В. Связь порога кавитации и максимальной интенсивности звуколюминесценции / Н. В. Дежкунов // Письма в Журнал технической физики. 2008. Т. 34, № 8. С. 59–67.
20. Анализ механизма генерирования непрерывной составляющей кавитационного шума / Н. В. Дежкунов [и др.] // Письма в Журнал технической физики. 2024. Т. 50, № 6. С. 7–10.
21. Исследование взаимной корреляции спектральных составляющих кавитационного шума / В. С. Минчук [и др.] // Проблемы физики, математики и техники. 2023. Т. 56, № 3. С. 69–74.
22. Сравнение методов оценки активности кавитации / Н. А. Жарко [и др.] // Техническая акустика: разработки, проблемы, перспективы: матер. IV Междунар. науч. конф., г. Витебск, 29–31 марта 2023 г. Минск: ИВЦ Минфина, 2023. С. 88–90.
23. Механизмы усиления звуколюминесценции во взаимодействующих ультразвуковых полях / А. В. Котухов [и др.] // Сб. тр. 34-й сессии Рос. акуст. общ., г. Москва, 14–18 февраля 2022 г. М.: ГЕОС. С. 1005–1010.
24. Дежкунов, Н. В. Механизмы усиления звуколюминесценции при взаимодействии сильно различающихся по частоте ультразвуковых полей / Н. В. Дежкунов // Сборник «Двадцать конкурсных лет». Минск: Беларуская навука, 2012. С. 133–146.
25. Cavitation [Электронный ресурс] // Исследования, технологии приборы, оборудование. Режим доступа: <https://cavitation.bsuir.by/ru/kavitometr>. Дата доступа: 11.02.2024.

References

1. Sirotyuk M. G. (2008) *Acoustic Cavitation*. Moscow, Nauka Publ. (in Russian).
2. Brenner M. P., Hilgenfeldt S., Lohse D. (2002) Single-Bubble Sonoluminescence. *Rev. Mod. Phys.* 74, 65–144.
3. Dezhkunov N. V., Fransecutto A., Serpe L., Canaparo R., Cravotto G. (2018) Sonoluminescence and Acoustic Emission Spectra at Different Stages of Cavitation Zone Development. *Ultrasonics Sonochemistry*. 40 (1), 104–109.
4. Xianghui Chen, Xucui Chen, Jianjun Wang, Francois T. H. Yu, Flordeliza S. Villanueva, John J. Pacella (2023) Dynamic Behavior of Polymer Microbubbles During Long Ultrasound Tone-Burst Excitation and Its Application for Sonoreperfusion Therapy. *Ultrasound Med. Biol.* 49, 996–1006.
5. Dezhkunov N. V., Leighton T. G. (2004) Study of the Connection Between Sonoluminescence and Ultrasonic Capillary Effect. *Engineering and Physics Journal*. 77 (1), 45–51 (in Russian).
6. Kotukhov A. V., Zharko N. A., Minchuk V. S., Dezhkunov N. V. (2019) Cavitation in Aqueous Solutions of Carbon Dioxide. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 41 (4), 35–41 (in Russian).
7. 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).
8. Protopovich E. L., Tzerkovsky D. A. (2022) Antitumor Efficiency of Sonodynamic Therapy in Combination with Chlorine-Based Photosensitizer in Experiments. *Russian Journal of Biotherapy*. 21 (1), 68–75 (in Russian).
9. Bailey M. R., Kargl S. G., Crum L. A., Khokhlova V. A., Sapozhnikov O. A. (2003) Physical Mechanisms of the Therapeutic Effect of Ultrasound. *Acoustical Physics*. 49 (4), 369–388 (in Russian).
10. Burgess M. T., Porter T. M. (2019) Control of Acoustic Cavitation for Efficient Sonoporation with Phase-Shift Nanoemulsions. *Ultrasound in Medicine and Biology*. 45 (3), 846–858. DOI: 10.1016/j.ultrasmedbio.
11. Beguin E., Shrivastava S., Dezhkunov N. V., McHale A. P., Callan J. F., Stride E. (2019) Direct Evidence of Multibubble Sonoluminescence Using Therapeutic Ultrasound and Microbubbles. *ACS Appl. Mat. Interfaces*. 11 (22), 19913–19919.
12. Giuntini F., Foglietta F., Marucco A. M., Troia A., Dezhkunov N. V., Pozzoli A., et al. (2018) Insight into Ultrasound-Mediated Reactive Oxygen Species Generation by Various Metal-Porphyrin Complexes. *Free Radic. Biol. Med.* 121 (1), 109–121.
13. Dezhkunov N. V., Kotukhov A. V., Stoler V. A., Koltovich V. A., Nikolaev A. L. (2012) The Influence of Pulse Modulation of an Ultrasound Field on the Dynamics of Cavitation Zone Development and on Cavitation Activity. *Doklady BGUIR*. (2), 92–98 (in Russian).
14. 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. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88> (in Russian).
15. Kotukhov A. V., Gavriluk V. S., Zharko N. A., Minchuk V. S., Dezhkunov N. V. (2020) Investigation of the Correlation Between Sound Luminescence and Cavitation Noise in the Field of a Focusing Emitter. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 45 (4), 32–36 (in Russian).
16. Kotukhov A. V., Efremov D. V., Bannikova I. A., Bayandin Yu. V., Uvarov S. V., Naimark O. B., et al. (2023) Observation of Cavitation Noise Without Subharmonics. *Technical Physics Letters*. 49 (6), 39–42 (in Russian).
17. Dezhkunov N. V., Rubanik V. V., Naimark O. B., Minchuk V. S. (2023) Cavitation in Pulsed Ultrasonic Fields. *Technical Acoustics: Developments, Problems, Prospects, Materials of the IV International Scientific Conference, Vitebsk, March 29–31*. Minsk, Information and Computing Center of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus. 149–151 (in Russian).

18. Gavrilyuk V. S., Minchuk V. S., Zharko N. A., Nikolaev A. L., Dezhkunov N. V. (2022) Sonoluminescence and Spectral Characteristics of Cavitation Noise in a Focused Ultrasonic Field. *Collection of Proceedings of the 34th Session of the Russian Acoustical Society, Moscow, Febr. 14–18*. Moscow, GEOS Publ. 1073–1080 (in Russian).
19. Dezhkunov N. V. (2008) Relationship Between the Cavitation Threshold and the Maximum Dose of Sonoluminescence. *Technical Physics Letters*. 34 (8), 59–67 (in Russian).
20. Dezhkunov N. V., Minchuk V. S., Uvarov S. V., Kurlyuk E. A. (2024) Analysis of the Mechanism for Generating a Continuous Component of Cavitation Noise. *Letters to the Technical Physics*. 50 (6), 7–10 (in Russian).
21. Minchuk V. S., Perkhunova A. Yu., Gavrilyuk V. A., Dezhkunov N. V. (2023) Investigation of the Cross-Correlation of Spectral Components of Cavitation Noise. *Problems of Physics, Mathematics and Technics*. 56 (3), 69–74 (in Russian).
22. Zharko N. A., Minchuk V. S., Nikolaev A. L., Dezhkunov N. V. (2023) Comparison of Methods for Assessing Cavitation Activity. *Technical Acoustics: Developments, Problems, Prospects, Materials of the IV International Scientific Conference, Vitebsk, March 29–31*. Minsk, Information and Computing Center of the Ministry of Finance of the Republic of Belarus. 88–90 (in Russian).
23. Kotukhov A. V., Minchuk V. S., Perkhunova A. Yu., Nikolaev A. L., Dezhkunov N. V. (2022) Mechanisms of Amplification of Sonoluminescence in Interacting Ultrasonic Fields. *Collection of Proceedings of the 34th Session of the Russian Acoustical Society, Moscow, Febr. 14–18*. Moscow, GEOS Publ. 1073–1080 (in Russian).
24. Dezhkunov N. V. (2012) Mechanisms of Amplification of Sonoluminescence During the Interaction of Ultrasonic Fields of Very Different Frequencies. *Collection “Twenty Competitive Years”*. Minsk, Belaruskaya Navuka Publ. 133–146 (in Russian).
25. Cavitation (2024) *Research, Technology, Devices, Equipment*. Available: <https://cavitation.bsuir.by/ru/kavitometr> (Accessed 11 February 2024).

Вклад авторов / Authors' contribution

Авторы внесли равный вклад в написание статьи / The authors contributed equally to the writing of the article.

Сведения об авторах

Гаврилюк В. С., инж.-програм. науч.-исслед. лаб. «Ультразвуковые технологии и оборудование» (НИЛ 5.2) НИЧ, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

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

Котухов А. В., зам. декана факультета компьютерного проектирования, БГУИР

Колтович В. А., канд. техн. наук, ст. науч. сотр. НИЛ 5.2 НИЧ, БГУИР

Минчук В. С., мл. науч. сотр. НИЛ 5.2 НИЧ, БГУИР

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

Курлюк Е. А., оператор ПЭВМ НИЛ 5.2 НИЧ, БГУИР

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 17 293-86-35
E-mail: dnv@bsuir.by
Дежкунов Николай Васильевич

Information about the authors

Gavriluk V. S., Software Engineer at the Scientific Research Laboratory “Ultrasound Technologies and Equipment” (Lab. 5.2) of R&D Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Dezhkunov N. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Lab. 5.2 of R&D Department, BSUIR

Kotukhov A. V., Deputy Dean of the Faculty of Computer-Aided Design, BSUIR

Koltovich V. A., Cand. of Sci., Senior Researcher at the Lab. 5.2 of R&D Department, BSUIR

Minchuk V. S., Junior Researcher at the Lab. 5.2 of R&D Department, BSUIR

Fedorinchik M. P., Researcher at the Lab. 5.2 of R&D Department, BSUIR

Kurliuk E. A., PC Operator at the Lab. 5.2 of R&D Department, 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: dnv@bsuir.by
Dezhkunov Nikolai Vasilievich