

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА КАВИТАЦИОННОГО ШУМА В ПОЛЕ ПОГРУЖНОГО УЛЬТРАЗВУКОВОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

В.С. Минчук, В.С. Гаврилюк, Т.А. Дежкунов, А.Ю. Перхунова, Н.В. Дежкунов

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск*

## STUDY OF THE SPECTRUM OF CAVITATION NOISE IN THE FIELD OF A SUBMERSIBLE ULTRASONIC EMBEDIER

V.S. Minchuk, V.S. Gavgiluk, T.A. Dezhkunov, A.Yu. Perkhunova, N.V. Dezhkunov

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk*

**Аннотация.** Исследован ряд составляющих спектра кавитационного шума, использующихся для оценки активности кавитации. Показано, что характер зависимостей исследованных параметров от интенсивности ультразвука различается для малых и больших расстояний от излучателя. Установлено, что связь исследованных параметров между собой характеризуется высокой степенью корреляции для близких расстояний от излучателя в условиях развитой кавитационной области. В кавитационной области вдали от излучателя эти параметры не связаны однозначно между собой и характеризуются низким уровнем корреляции. На основании полученных данных предложен подход к выбору оптимального метода оценки активности кавитации.

**Ключевые слова:** кавитация, ультразвук, кавитационный шум, спектр кавитационного шума.

**Для цитирования:** Исследование спектра кавитационного шума в поле погружного ультразвукового излучателя / В.С. Минчук, В.С. Гаврилюк, Т.А. Дежкунов, А.Ю. Перхунова, Н.В. Дежкунов // Проблемы физики, математики и техники. – 2024. – № 3 (60). – С. 13–17. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_3\\_60\\_13](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_3_60_13). – EDN: YHJRPI

**Abstract.** A number of components of the cavitation noise spectrum, used to assess cavitation activity, have been studied. It is shown that the nature of the dependences of the studied parameters on the ultrasound intensity differs for small and large distances from the emitter. It has been established that the relationship between the studied parameters is characterized by a high degree of correlation for close distances from the emitter under conditions of a developed cavitation region. In the cavitation region far from the emitter, these parameters are not clearly related to each other and are characterized by a low level of correlation. Based on the data obtained, an approach to choosing the optimal method for assessing cavitation activity is proposed.

**Keywords:** cavitation, ultrasound, cavitation noise, cavitation noise spectrum.

**For citation:** Study of the spectrum of cavitation noise in the field of a submersible ultrasonic embedier / V.S. Minchuk, V.S. Gavgiluk, T.A. Dezhkunov, A.Yu. Perkhunova, N.V. Dezhkunov // Problems of Physics, Mathematics and Technics. – 2024. – № 3 (60). – P. 13–17. – DOI: [https://doi.org/10.54341/20778708\\_2024\\_3\\_60\\_13](https://doi.org/10.54341/20778708_2024_3_60_13) (in Russian). – EDN: YHJRPI

### Введение

Контроль уровня активности акустической кавитации при ультразвуковой (УЗ) интенсификации физико-химических процессов в жидкостях является актуальной задачей [1]–[5]. К настоящему времени предложено большое количество методов исследования кавитации. В последние годы наиболее пристальное внимание исследователи уделяют акустическим методам, основанным на регистрации и спектральном анализе акустического сигнала, генерируемого кавитационными пузырьками – кавитационного шума (КШ) при их пульсациях и захлопывании. Спектр КШ обычно включает пик на частоте ультразвукового поля  $f_0$ , генерирующего кавитацию, гармоники  $nf_0$ , где  $n$  – целое число, субгармонику  $f_0/2$ , частоты  $(2n+1)f_0/2$  и непрерывную составляющую (НСКШ). В качестве индикаторов состояния кавитационной области в работах [1]–[8] исследовались следующие

компоненты спектра КШ: субгармоника  $f_0/2$  [1], [3]–[5], непрерывная составляющая [2], интегральная интенсивность КШ за вычетом основной частоты [6], интегральная интенсивность КШ в диапазоне частот от 300 кГц до 10 МГц [7]. В европейском стандарте [8] предлагается оценивать интенсивность КШ по величине интеграла непрерывной составляющей спектра в диапазоне частот от  $f_0$  до 20 МГц или по величине непрерывной составляющей вблизи частоты  $2,25f_0$ . Однако информация о соотношении оценок, получаемых упомянутыми выше методами в литературе отсутствует, что затрудняет возможности стандартизации измерений и введения единицы активности кавитации.

В данной работе выполнена синхронная регистрация и анализ составляющих спектра КШ при варьировании в широком диапазоне интенсивности ультразвука и расстояния между датчиком и излучателем.

### 1 Методика и установка

Для генерирования кавитации использовался ультразвуковой генератор УЗГ-58-22(БГУИР, Минск) с погружным пьезоэлектрическим излучателем с волноводом-концентратором, диаметр излучающей поверхности 15 мм, резонансная частота  $f_0 = 21$  кГц. В качестве рабочей жидкости использовалась водопроводная вода. Возникающий кавитационный шум регистрировался при помощи кавитометра ICA-7DS (БГУИР, Минск) и пьезоэлектрического датчика кавитации. Интенсивность ультразвука варьировали изменением выходной мощности генератора.

Используя Фурье-преобразование кавитометр ежесекундно формирует 16 спектров кавитационного шума (частота дискретизации – 2 МГц, количество сэмплов в спектре – 2048). Имеется функция усреднения спектров ( $1 \div 255$ ).

Регистрировались следующие компоненты спектра: амплитуда основной гармоники  $A_0$  на частоте ультразвукового поля  $f_0$ , амплитуда субгармоники  $A_s$  на частоте  $f_s = f_0 / 2$ , амплитуда непрерывной составляющей спектра  $A_{WBN}$  на частоте  $2,25f_0$ , суммарная амплитуда  $S$  всех составляющих спектра в диапазоне от 100 до 1000 кГц.

Пьезоэлектрический датчик кавитации фиксировался на оси излучателя под ним на расстояниях от излучателя  $L = 3, 7$  и 15 мм. Схема установки представлена на рисунке 1.1. Проводились измерения при различной выходной мощности генератора  $P = 5 \div 100$  Вт. Время измерения для

каждого значения  $P$  составляло 45 секунд (3 круга по 15 секунд), за это время кавитометр производит усреднение 720 спектров.

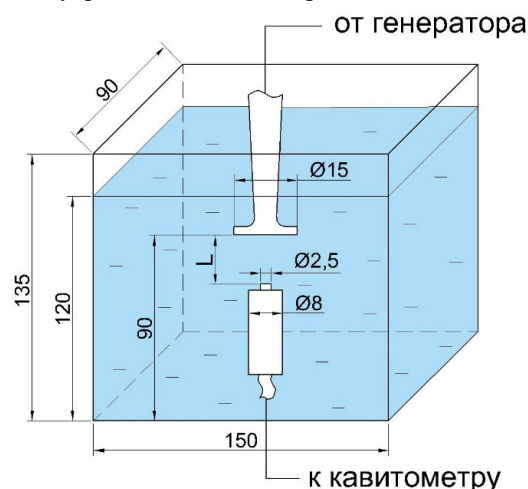
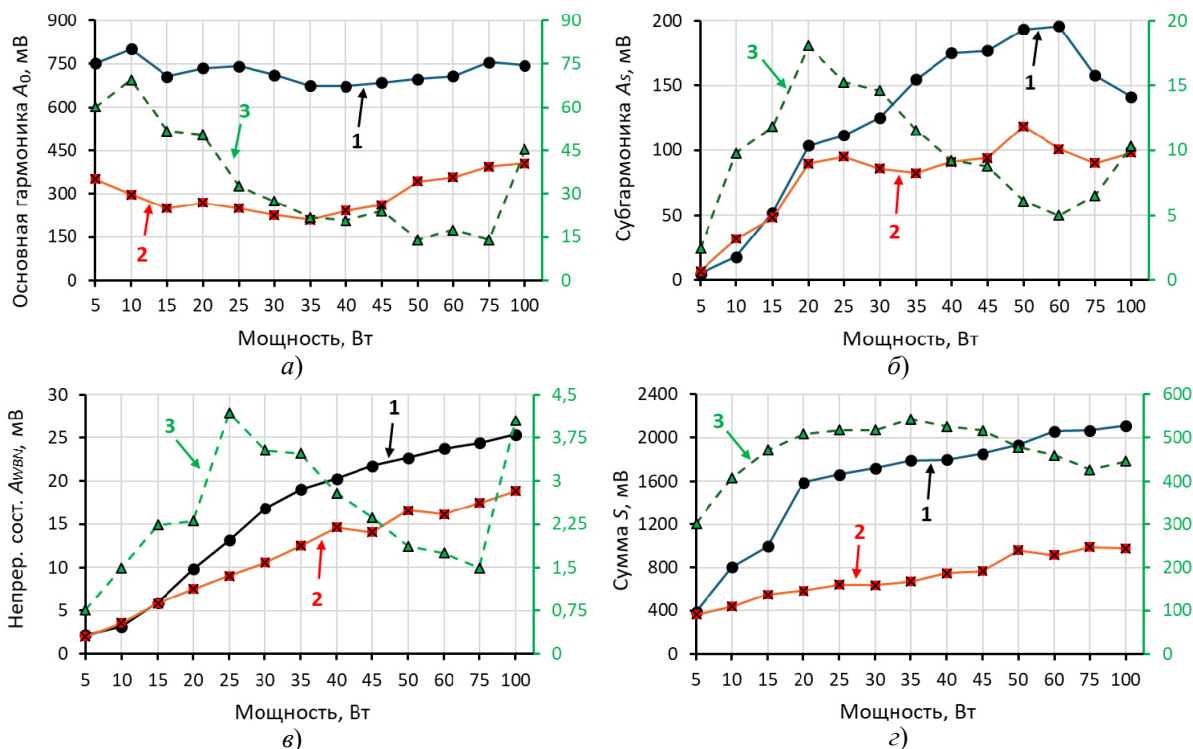


Рисунок 1.1 – Схема установки для исследований

### 2 Результаты и их анализ

На рисунке 2.1 приведены зависимости амплитуды исследуемых компонент спектра от выходной мощности генератора  $P$  при различных зазорах  $L$  между излучателем и датчиком. Зависимостям при  $L = 3$  и 7 мм (кривые 1 и 2) соответствует шкала слева, зависимостям при  $L = 15$  мм (кривая 3) – справа. Каждая точка на графике получена в результате усреднения 720 спектров.



кривая 1 –  $L = 3$  мм; кривая 2 –  $L = 7$  мм; кривая 3 –  $L = 15$  мм

Рисунок 2.1 – Зависимость амплитуды компонент спектра кавитационного шума от мощности: а) основная гармоника; б) субгармоника, в) непрерывная составляющая на частоте  $2,25f_0$ ; г) суммарная амплитуда в диапазоне  $100 \div 1000$  кГц

Рассмотрим вначале данные, представленные на рисунках 2.1 б)-з). Характерной чертой представленных здесь результатов при малых расстояниях от излучателя (кривые 1 и 2) является увеличение регистрируемых параметров при увеличении мощности генератора. При этом субгармоника (рисунок 2.1 б, кривые 1 и 2) при  $P$  больше 50 Вт начинает уменьшаться.

Если же датчик находится на расстоянии 15 мм от излучателя зависимости имеют вид кривых с максимумом. Сигнал на частотах  $f_0/2$  и  $2,25f_0$  (рисунок 2.1 б и 2.1 в, кривая 3) достигает максимального значения при  $P$  в диапазоне 20...25 Вт, затем начинается быстрое уменьшение величин. Суммарная амплитуда  $S$  (рисунок 2.1 з, кривая 3) также достигает относительного максимума при  $P \sim 20$  Вт, однако затем мало меняется с ростом  $P$ .

Отметим, что амплитуда  $A_0$  на основной частоте (рисунок 2.1 а) для малых  $L$  (3 и 7 мм, кривые 1 и 2) мало меняется с ростом  $P$ . При больших  $L$  (кривая 3)  $A_0$  в целом уменьшается с ростом  $P$  за исключением «краевых» областей, т. е. при  $P < 10$  Вт и  $P > 75$  Вт.

Из сравнения кривых 1, 2 и 3 следует, что при увеличении расстояния  $L$  до излучателя интенсивность исследовавшихся величин быстро уменьшается. Например, наблюдается кратное уменьшение амплитуды основной гармоники при увеличении расстояния с 3 до 15 мм, что говорит о сильном поглощении и рассеивании звуковой волны при удалении от излучателя. И это падение в абсолютных величинах растет по мере увеличения интенсивности ультразвука. С ростом излучаемой мощности увеличивается и концентрация пузырьков в кавитационной области, как следствие растет и поглощение.

Поглощением объясняется и различный характер зависимостей исследовавшихся величин от мощности  $P$  при малых и больших расстояниях  $L$  до излучателя. Для малых  $L$  полное затухание УЗ относительно невелико, поэтому с ростом излучаемой мощности концентрация пузырьков и интенсивность их пульсаций и захлопывания увеличиваются, что и приводит к увеличению интенсивности составляющих спектра КШ во всем исследовавшемся диапазоне  $P$ . Для больших  $L$  (15 мм и больше) суммарное ослабление УЗ становится настолько сильным, что, начиная с некоторых значений  $P_{\max}$ , начинается уменьшение  $A_0$ ,  $A_S$ ,  $A_{WBN}$  и  $S$  и полученные зависимости данных параметров от  $P$  имеют вид кривых с максимумом.

На расстоянии  $L = 15$  мм при  $P$  в диапазоне 75–100 Вт происходит скачок амплитуды  $A_0$  и  $A_{WBN}$  (опыты повторили несколько раз, данный вид зависимости сохранялся).  $A_S$  начинает увеличиваться при  $P = 60$  Вт. Скачкообразный рост  $A_S$ ,  $A_{WBN}$  и  $A_0$  при превышении мощности в 75 Вт

может быть связан с удалением больших неэффективных пузырей из зоны кавитации акустическими течениями. Действительно, при таких мощностях в кавитационной области визуально наблюдаются интенсивные потоки жидкости, с которыми пузыри с размерами порядка 1 мм и больше перемещаются из кавитационной области.

На рисунке 2.2 изображены попарные зависимости величин  $A_S$ ,  $A_{WBN}$  и  $S$  при различных расстояниях до излучателя  $L$ . Размер каждой точки зависит от соответствующей мощности  $W$ . В левом углу каждой зависимости приведен рассчитанный коэффициент корреляции Пирсона.

Увеличение расстояния до излучателя приводит к ослаблению линейной взаимосвязи между рассматриваемыми оценками активности кавитации. Например, при  $L = 3$  мм коэффициент корреляции находился в диапазоне 0,93–0,95, а при  $L = 15$  мм в диапазоне 0,66–0,68.

Таким образом, из представленных результатов следует, что оценки активности кавитации, основанные на регистрации субгармоники, непрерывной составляющей или интеграла, будут давать схожий результат при исследовании кавитации в кавитационной области вблизи излучателя, в данном случае, на расстояниях до 7 мм. На расстоянии  $L = 15$  мм связь между исследовавшимися величинами не является однозначной как при большой интенсивности ультразвука, так и при интенсивности ультразвука порядка порога кавитации. Поэтому выбор оптимального варианта оценки активности кавитации должен производиться именно в таких условиях. Одним из подходов может быть сравнение получаемых зависимостей параметров спектра КШ с интенсивностью звуколюминесценции (ЗЛ) или скоростью кавитационной эрозии, т. к. к настоящему времени общепризнано, что эти эффекты обусловлены захлопыванием кавитационных полостей.

На рисунке 2.3 представлена эволюция спектра кавитационного шума при увеличении мощности на генераторе. Отметим, что амплитуда составляющих данных спектров может незначительно отличаться от результатов на рисунке 2.1, так как существует временной лаг между измерениями, а также тем, что измерения кавитации характеризуются невысокой воспроизводимостью.

Видна существенная разница между уровнем гармонических составляющих (обусловлены периодическими колебаниями кавитационных пузырей) и уровнем непрерывной составляющей (считается, что данная составляющая обусловлена асинхронным схлопыванием пузырей). Развитие кавитационной области при увеличении мощности на генераторе сопровождается увеличением уровня как гармоник (за исключением  $A_0$ ), так и непрерывной составляющей.

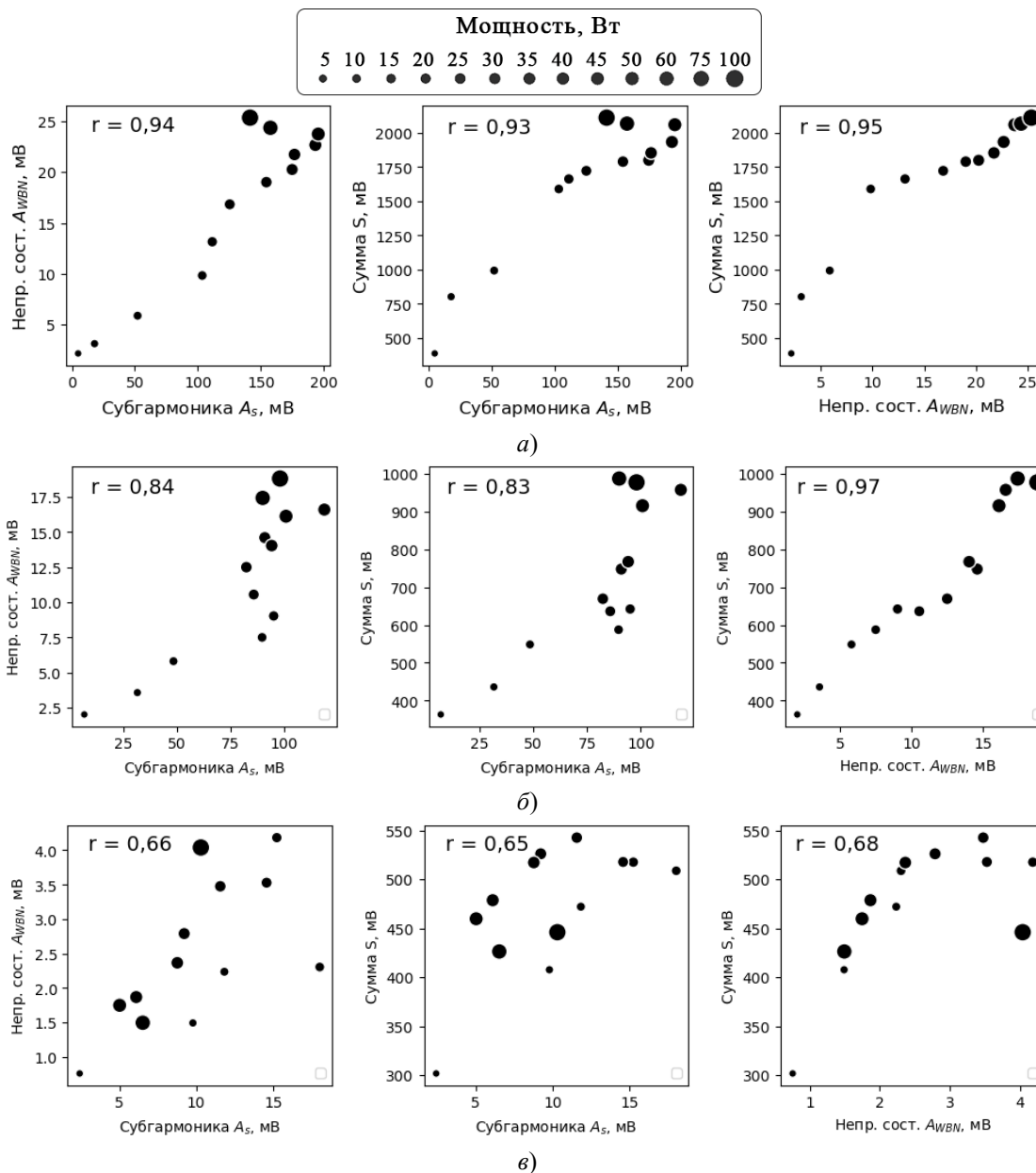


Рисунок 2.2 – Связь между оценками активности кавитации при различном зазоре между излучателем и датчиком: а – 3 мм; б – 7 мм; в – 15 мм

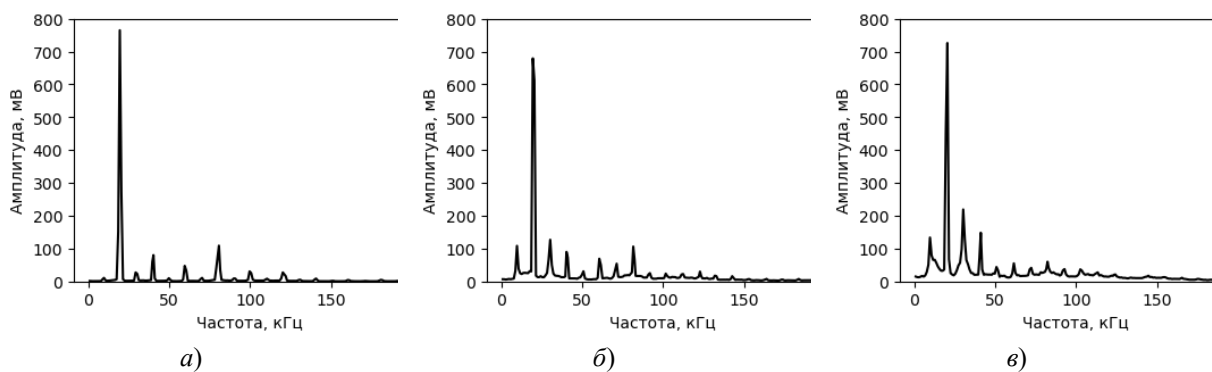


Рисунок 2.3 – Эволюция спектра кавитационного шума при увеличении мощности генератора на расстоянии 3 мм от излучателя: а) 10 Вт; б) 25 Вт; в) 80 Вт

### Заключение

Исследован ряд составляющих спектра кавитационного шума, используемых для оценки активности кавитации. Спектры регистрировались при варьировании выходной мощности ультразвукового генератора и расстояния от датчика кавитации до излучателя ультразвуковых колебаний. Показано, что характер зависимостей исследованных параметров от интенсивности ультразвука различается для малых и больших расстояний от излучателя, что связано в основном с увеличением поглощения и рассеяния ультразвука в кавитационной области по мере удаления от излучателя и увеличением концентрации пузырьков в кавитационной области при увеличении интенсивности ультразвука.

Установлено, что связь исследованных параметров между собой характеризуется высокой степенью корреляции для близких расстояний от излучателя (в данном случае – до 7 мм) в условиях развитой кавитационной области, т. е. при интенсивности ультразвука намного выше порога кавитации. В кавитационной области вдали от излучателя эти параметры не связаны однозначно между собой и характеризуются низким уровнем корреляции. На основании полученных данных предложен подход к выбору оптимального метода оценки активности кавитации.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Сковцов, С.П. Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации / С.П. Сковцов // Наука и Образование. – 2015. – Т. 2. – С. 83–100. – DOI: 10.7463/0215.0759806.
2. *Acoustic characterization of cavitation intensity: A review* / W. Pengfei [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2022. – Vol. 82. – P. 105878. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2021.105878>
3. Свиридов, А.П. Кавитационная активность водных суспензий пористых кремниевых наночастиц с различной степенью гидрофобности поверхности / А.П. Свиридов, Л.А. Осминкина, В.Г. Андреев // *Акустический журнал*. – 2023. – Т. 69, № 1. – С. 92–100. – DOI: 10.31857/S032079192260038X.
4. Smith, R. Comparing Phantom and Animal Metrics Applied in the Determination of Focused Ultrasound Stable and Inertial Cavitation Levels / R. Smith, S. Khan, L. Curiel // *Ultrasound in Medicine & Biology*. – 2023. – № 49. – P. 1118–1128.
5. *Evaluation of correlation between chemical dosimetry and subharmonic spectrum analysis to examine the acoustic cavitation* / H. Hasanzadeh [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2010. – Vol. 17, № 5. – P. 863–869.
6. *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.
7. *Characterization of transient cavitation activity during sonochemical modification of magnesium particles* / N. Brezhneva [et al.] // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2020. – Vol. 70, № 3–4. – P. 105315–105327.
8. *Measurement of cavitation noise in ultrasonic baths and ultrasonic reactors*. IEC TS 63001: 2024 RLV Standard. – 2024. – 85 p.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований, проекты № Т23М-026 и № Т24МП-056.

Поступила в редакцию 17.07.2024.

### Информация об авторах

Минчук Вячеслав Сергеевич – м.н. сотрудник  
Гаврилюк Виталий Степанович – инженер-программист  
Дежкунов Тимофей Александрович – оператор ПЭВМ  
Перхунова Александра Юрьевна – стажер м.н. сотрудника  
Дежкунов Николай Васильевич – к.т.н., доцент