

УДК 534.29

ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРЕЛЯЦИИ ЗВУКОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И КАВИТАЦИОННОГО ШУМА В ПОЛЕ ФОКУСИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ

А.В. Котухов, В.С. Гаврилюк, Н.А. Жарко, В.С. Минчук, Н.В. Дежкунов

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск

INVESTIGATION OF THE CORRELATION BETWEEN SOUND LUMINESCENCE AND CAVITATION NOISE IN THE FIELD OF A FOCUSING EMITTER

A.V. Kotukhov, V.S. Gavrilyuk, N.A. Zharko, V.S. Minchuk, N.V. Dezhkunov

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk

Выполнено исследование связи спектральных характеристик кавитационного шума и интенсивности звуколюминесценции (ЗЛ) в поле фокусирующего излучателя. Установлено, что наибольшая степень корреляции с интенсивностью звуколюминесценции из исследованных параметров характерна для широкополосной составляющей кавитационного шума, т. е. интенсивности полного выходного сигнала датчика за вычетом всех гармоник и субгармоник. Этот результат позволяет сделать вывод, что широкополосная составляющая кавитационного шума генерируется захлопывающимися кавитационными полостями и, следовательно, может использоваться в качестве индикатора уровня активности нестационарной кавитации.

Ключевые слова: кавитация, звуколюминесценция, захлопывание пузырьков, спектр кавитационного шума.

A study of the relationship between the spectral characteristics of cavitation noise and the intensity of sound luminescence (SL) in the field of a focusing emitter was carried out. It was found that the highest degree of correlation with the SL intensity of the parameters studied is characteristic of the broadband component of cavitation noise, i.e., the intensity of the total output signal of the sensor minus all harmonics and subharmonics. This result allows us to conclude that the wide-band component of cavitation noise is generated by collapsing cavities and, therefore, can be used as an indicator of the level of transient cavitation activity.

Keywords: cavitation, sound luminescence, collapse of bubbles, cavitation noise spectrum.

Введение

Акустическая кавитация, представляющая собой явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа в жидкости под действием переменного давления [1], [2] используется в промышленности уже несколько десятилетий. Областью наиболее широкого применения является ультразвуковая очистка твердых поверхностей, например в машиностроении [3] в микроэлектронике [4], при обработке расплавов металлов [5].

Разрабатываются новые направления применения ультразвука в кавитационном режиме: при обработке суспензий наночастиц [6], в гальванотехнике [7], пищевой промышленности и медицине [8]. Наиболее интенсивное воздействие на процессы в жидкостях оказывают нестационарные кавитационные пузырьки. При их захлопывании генерируются интенсивные ударные волны, высокие температуры, микроструи жидкости и химически активные радикалы.

К настоящему времени предложено значительное количество методов оценки уровня активности кавитации, основанных на регистрации эффектов, сопровождающих кавитацию [9]. Это такие явления как кавитационная эрозия, разрушение твердых тел под действием кавитации, генерирование свечения в видимой области

спектра – звуколюминесценция (ЗЛ), кавитационный шум (КШ), ультразвуковой капиллярный эффект, различные звукохимические реакции [1], [2], [10]. Разработка приборов для исследования кавитации и измерения ее активности с использованием кавитационного шума или спектральных составляющих КШ является одним из наиболее перспективных направлений в данной области. Обусловлено это тем, что КШ легко преобразуется в электрический сигнал и может регистрироваться относительно простыми методами, в том числе и в оптически непрозрачных жидкостях, суспензиях, эмульсиях и биологических тканях.

Однако механизмы генерирования основных спектральных компонент КШ до сих пор достоверно не установлены. Например, в работе [1] теоретически обоснована гипотеза, в соответствии с которой непрерывная составляющая КШ возникает как результат суммирования ударных волн, генерируемых при захлопывании кавитационных полостей. Действительно, ударная волна в первом приближении может быть представлена дельта-функцией, а спектр дельта-функции, как известно [11], – непрерывный. Авторы [12] выдвинули альтернативную гипотезу, согласно которой причиной генерирования непрерывной составляющей КШ являются стохастические

вариации плотности пузырьков в кавитационной области.

Многочисленными экспериментами и теоретическими расчетами [13]–[15] установлено, что звуколюминесценция возникает вследствие захлопывания кавитационных полостей и поэтому является надежным индикатором нестационарной кавитации.

Учитывая изложенное, поиск спектральных характеристик КШ, коррелирующих с интенсивностью ЗЛ, представляет значительный интерес с двух точек зрения: для уточнения представлений о механизме генерирования соответствующих спектральных составляющих КШ и для оценки возможности использования параметров, коррелирующих с интенсивностью ЗЛ, в качестве индикаторов активности нестационарной кавитации.

1 Установка и методика исследований

Подробное описание использовавшейся установки (рисунок 1.1 представлено в работах [16], [17]). Пьезокерамический излучатель установлен в нижней части рабочей емкости, которая выполнена в виде цилиндра из нержавеющей стали высотой 160 мм и диаметром 100 мм. Излучатель – фокусирующий, его резонансная частота $f_0 = 720$ кГц. Датчик акустического сигнала (гидрофон) вмонтирован через крышку ёмкости и установлен за фокальным пятном излучателя на расстоянии 25 мм от него. В боковой стенке емкости на уровне фокального пятна установлен фотоумножитель Phillips XP1110 со световодом, использовавшийся для регистрации ЗЛ.

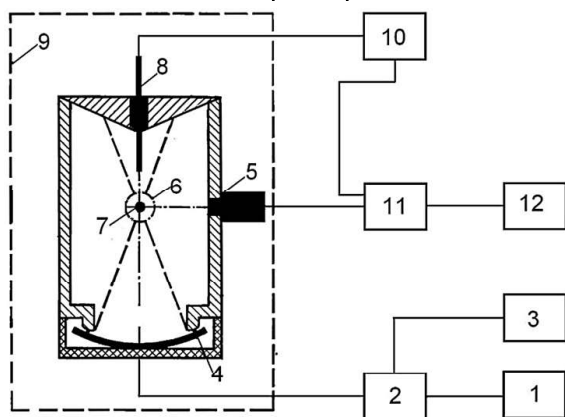


Рисунок 1.1 – Схема экспериментальной установки

- 1 – генератор переменного напряжения 720 кГц,
- 2 – смеситель,
- 3 – генератор импульсов,
- 4 – фокусирующий преобразователь (излучатель),
- 5 – фотоумножитель,
- 6 – кавитационная область,
- 7 – фокальное пятно,
- 8 – датчик,
- 9 – светонепроницаемый короб,
- 10 – предусилитель,
- 11 – осциллограф,
- 12 – анализатор спектра

Сигналы с фотоумножителя и датчика подаются на двухканальный осциллограф Hewlett Packard 54601A. Для исследования спектров кавитационного шума к осциллографу параллельно подключался анализатор спектра Hewlett Packard E4411B. Для питания излучателя используется генератор УЗГ-08-01 (БГУИР, Минск).

Методика состояла в следующем. Варьируя интенсивность ультразвука (путем изменения напряжения на излучателе), измеряли интенсивность ЗЛ и одновременно регистрировали спектры КШ. Сравнение зависимостей спектральных характеристик КШ с интенсивностью ЗЛ позволяет оценить степень корреляции исследуемых параметров с активностью кавитации.

2 Результаты и их обсуждение

На рисунке 2.1 представлены спектры кавитационного шума, полученные при различных напряжениях U на излучателе: а) $U = 25$ В, б) 105 В, в) 125 В, г) 170 В. При проведении исследования, температура жидкости поддерживалась в пределах $21 \pm 2,5^\circ \text{C}$, длительность импульсов ультразвука $\tau = 3$ мс, период следования $T = 30$ мс.

Данные спектры характерны для следующих основных состояний кавитационной области [16]: при интенсивности ультразвука ниже порога кавитации (2.1, а), порядка порога кавитации (2.1, б), развитая кавитационная область (2.1, в) и кавитационная область в состоянии насыщения кавитационными пузырьками (2.1, г). Основная частота f_0 , т. е. частота ультразвукового поля, отмечена на рисунке 2.1 маркером. Штриховой линией показана непрерывная составляющая кавитационного шума (2.1, в).

В докавитационном режиме (2.1, а) спектр акустического сигнала включает только основную частоту f_0 . С возникновением кавитации в спектре появляются гармоники nf_0 , субгармоника $f_0/2$ и частоты $(n + 1/2)f_0$, где n – целое число. Одновременно регистрируется возникновение ЗЛ. С ростом интенсивности ультразвука растет интенсивность гармоник и других спектральных компонент КШ, появляется также непрерывная составляющая. При этом увеличивается также и интенсивность ЗЛ.

В таблице 2.1 представлен перечень параметров, по которым проводилось исследование их корреляции с активностью кавитации, оцениваемой по интенсивности звуколюминесценции.

На рисунке 2.2 приведены результаты сопоставления выходного сигнала фотоумножителя и параметров спектра КШ, наиболее близко коррелирующих с интенсивностью ЗЛ. Здесь спектральный акустический параметр (H) представлен в линейном масштабе, а выходной сигнал фотоумножителя (L) – в логарифмическом.

Из представленных графиков видно, что в диапазоне интенсивностей, соответствующих первой стадии развития кавитационной области

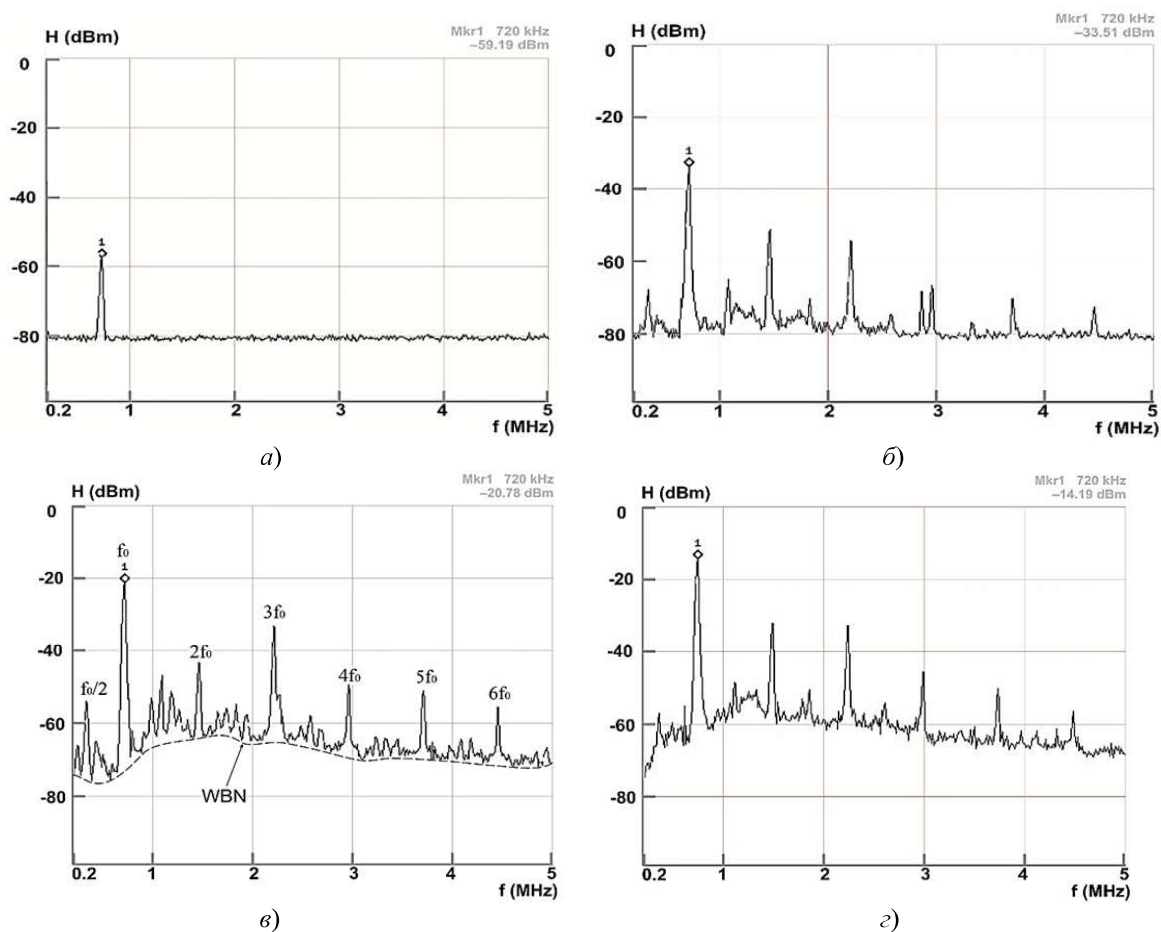


Рисунок 2.1 – Спектры кавитационного шума для разных стадий развития кавитационной области

($U < 150$ В, рисунок 2.2, а) интенсивность звуколюминесценции коррелирует с интенсивностью субгармоники основного сигнала, т. е. сигнала на частоте $f_0 / 2$. При более высоких интенсивностях ультразвука зависимости $L(U)$ и $H(U)$ различаются кардинально, а именно: интенсивность ЗЛ растет с ростом интенсивности ультразвука, а H уменьшается. Примерно также зависит от U и параметр, полученный суммированием всех субгармоник (2.2, б). Отметим, что при интенсивности ультразвука порядка порога кавитации субгармоника коррелирует со звуколюминесценцией лучше остальных исследованных параметров (2.2, а). Поэтому порог возникновения кавитации может определяться по появлению субгармоники в спектре КШ.

В работах [18], [19] предлагалось оценивать активность кавитации по интенсивности субгармоники в спектре КШ. Однако, как видно из представленных выше данных, этот метод может применяться только при относительно невысоких интенсивностях ультразвука, т. е. имеет существенные ограничения.

Параметры, представленные на рисунках 2.2, в и 2.2, г отклоняются от хода зависимости $L(U)$ при средних интенсивностях ультразвука.

Таблица 2.1 – Параметры спектра кавитационного шума

Параметр Н	Алгоритм вычисления параметра Н
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 (гармоника 1) 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 $(n + 1/2)f_0$
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)
Pharm0.5	Мощность 0.5-й гармоники (субгармоника, частота в 2 раза меньше, чем частота основного сигнала f_0)
Psumhalfharm	Мощность всех субгармоник $(n + 1/2)f_0$

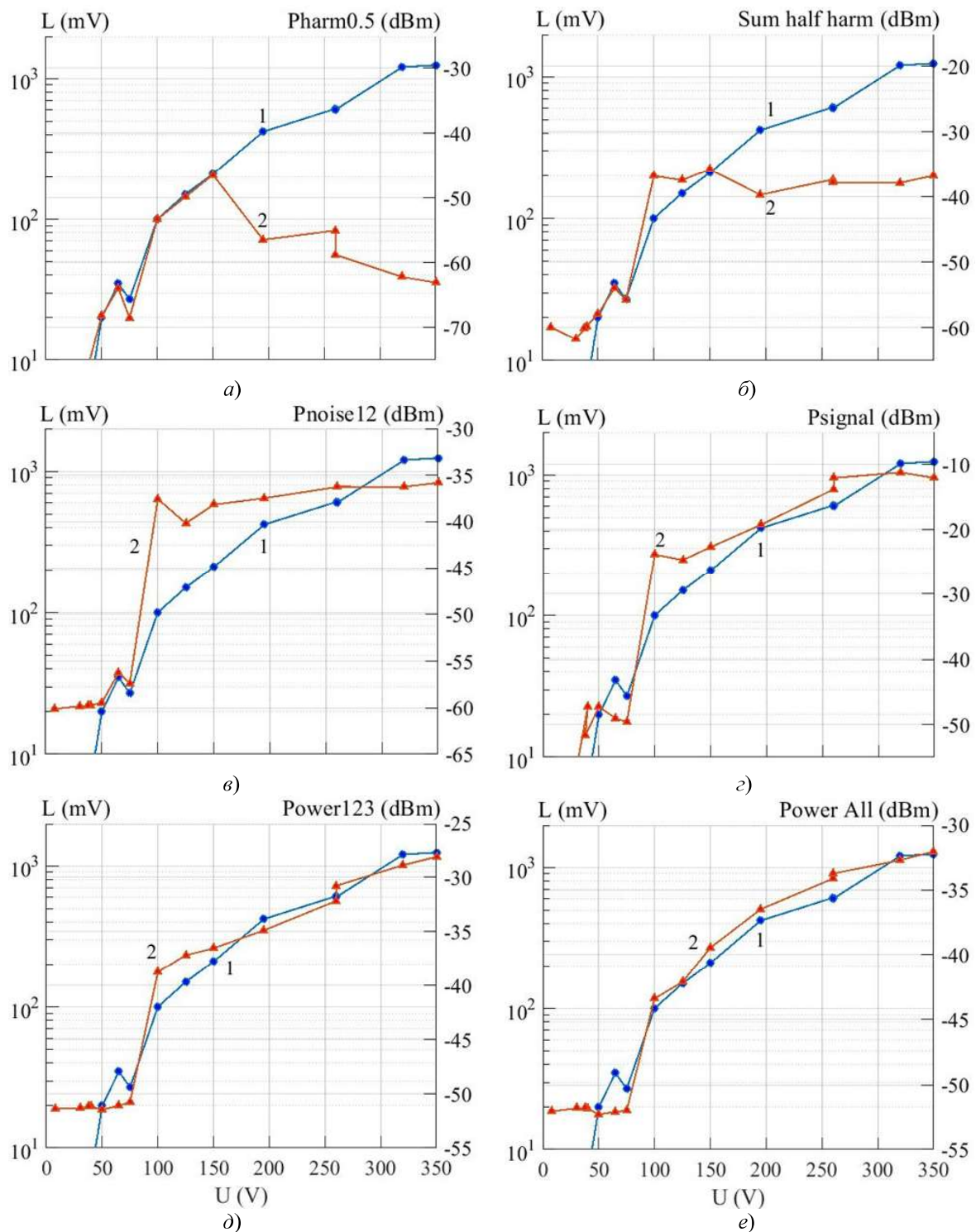


Рисунок 2.2 – Корреляция интенсивности звуколюминесценции и характерных параметров спектра кавитационного шума
 1 – интенсивность ЗЛ,
 2 – исследуемый параметр кавитационного шума; параметры шума:
 а) интенсивность первой субгармоники,
 б) суммарная интенсивность всех субгармоник;
 в) интенсивность КШ между первой и второй гармониками;
 г) интенсивность основного сигнала;
 д) интенсивность КШ без трех первых гармоник;
 е) интенсивность КШ без всех гармоник и субгармоник

Наибольшая степень корреляции с интенсивностью звуколюминесценции из исследованных параметров наблюдается для широкополосной составляющей кавитационного шума, т. е. интенсивности полного выходного сигнала датчика за вычетом всех гармоник и субгармоник (2.2, е). Незначительные расхождения имеют место только при низких интенсивностях ультразвука, порядка порога возникновения ЗЛ. Этот результат позволяет сделать вывод, что широкополосная составляющая кавитационного шума генерируется захлопывающимися кавитационными полостями.

Заключение

Исследовалась связь звуколюминесценции (ЗЛ) и ряда спектральных составляющих кавитационного шума (КШ). Показано, что наибольшая степень корреляции с интенсивностью звуколюминесценции характерна для широкополосной составляющей КШ, т. е. интенсивности полного выходного сигнала датчика за вычетом всех гармоник и субгармоник. Поскольку общепризнано, что звуколюминесценция возникает вследствие захлопывания пузырьков, данный результат позволяет сделать вывод, что широкополосная составляющая также генерируется захлопывающимися кавитационными полостями и, следовательно, может использоваться в качестве индикатора активности нестационарной кавитации.

В начальной стадии развития кавитационной области интенсивность ЗЛ коррелирует с интенсивностью субгармоники (СГ) основного сигнала f_0 , т. е. сигнала на частоте $f_0/2$, а именно: пороги их возникновения совпадают. Поэтому порог возникновения кавитации может определяться по появлению субгармоники в спектре КШ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сиротюк, М.Г. Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк // М.: Наука, 2008. – 271 с.
2. Leighton, T.G. Acoustic Bubble / T.G. Leighton // Pergamon Press. – London, 1995. – 650 p.
3. Келлер, О.К. Ультразвуковая очистка / О.К. Келлер, Г.С. Кратыш, Г.Д. Лубяницкий. – Л.: Машиностроение, 1977. – 183 с.
4. Cleaning and Damage Performance of Single Wafer Cleaning Tools using Physical Removal Forces / A. Racco, S. Halder, K. Kenis, T. Bearda, P. Mertens // ECS Transactions. – 2009. – Vol. 25 (5). – P. 311–317.
5. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении / В.О. Абрамов [и др.]; под общ. ред. О.В. Абрамова и В.М. Приходько. – Москва. – Русавиа. – 2006. – 687 с.
6. Evolution of cavitation activity during the ultrasonic magnesium nanostructuring. *International Journal of nanoscience* / N. Brezhneva, N.V. Dezhkunov, S.O. Mazheika, A. Nenashkina, E.V. Skorb. – Vol. 18. – № 3/4. – 2019. – P. 1940071–1940073.

7. Recent developments in the sonochemical synthesis of nanomaterials / M.H. Islam, M.T.Y. Paul, O.S. Burheim, B.G. Pollet // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2019. – Vol. 59. – P. 104711.

8. Nanoparticle-assisted ultrasound: A special focus on sonodynamic therapy against cancer / G. Canavese, A. Ancona, L. Racca, M. Canta, B. Dumontel, F. Barbaresco, T. Limongi, V. Cauda // *Chemical Engineering Journal*. – 2018. – Vol. 340. – P. 155–172.

9. Скворцов, С.П. Методы контроля параметров ультразвуковой кавитации / С.П. Скворцов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. – 2015. – № 2. – С. 83–100.

10. Dezhkunov, N.V. The use of a capillary as a sensor of cavitation / N.V. Dezhkunov, T.G. Leighton // *Nonlinear acoustics at the beginning of 21st century*; edited by O. Rudenko and O. Sapozhnikov. – Moscow. – 2003. – Vol. 2. – P. 1163–1166.

11. Кудрявцев, Л.Д. Краткий курс математического анализа / Л.Д. Кудрявцев. – М.: Физматлит. – 2005. – Т. 2. – С. 400–424.

12. Numerical simulations of acoustic cavitation noise with the temporal fluctuation in the number of bubbles / K. Yasui, T. Tuziuti, J. Lee, T. Kozuka, A. Towata, Y. Iida // *Ultrason. Sonochem.* – 2010. – Vol. 17. – P. 460–472.

13. Sostaric, J. Sodium Atom Emission from Aqueous Surfactant Solutions Exposed to Ultrasound / J. Sostaric, M. Ashokkumar, F. Grieser // *Langmuir*. – 2016. – Vol. 32. – P. 12387–12393.

14. Гордейчук, Т.В. Атомная эмиссия Na при сонолюминесценции водных растворов поверхностно-активных веществ различного типа / Т.В. Гордейчук, М.В. Казачек // Техническая акустика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ejta.org>. – Дата доступа: 04.11.2017.

15. Brenner, M.P. Single-bubble sonoluminescence / M.P. Brenner, S. Hilgenfeldt, D. Lohse // *Rev. Mod. Phys.* – 2002. – Vol. 74. – P. 425–484.

16. 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. – P. 104–109.

17. Эволюция кавитационной области в фокусированном ультразвуковом поле / Н.В. Дежкуннов, А. Francescutto, F. Calligaris, А.Л. Николаев // Письма в журнал технической физики. – 2014. – Т. 40, № 16. – С. 73–79.

18. Evaluation of correlation between chemical dosimetry and subharmonic spectrum analysis to examine the acoustic cavitation / H. Hasanzadeh, M. Mokhtari-Dizaji, S.Z. Bathaie, Z.M. Hassan // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2010. – Vol. 17. – P. 863–869.

19. Krishna, D. Subharmonic generation from ultrasonic contrast agents / D. Krishna, P.M. Shankar, V.L. Newhouse // *Phys. Med. Biol.* – 1990. – Vol. 44. – P. 681–694.

Поступила в редакцию 06.07.2020.