



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-4-80-88>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 534.29

КОМБИНИРОВАННЫЙ МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ

КОТУХОВ А.В., ГАВРИЛЮК В.С., МИНЧУК В.С., ДЕЖКУНОВ Н.В.

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

Поступила в редакцию 24 апреля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В настоящее время сфера применений мощного ультразвука интенсивно расширяется, продолжается совершенствование оборудования и технологических процессов. При этом ключевым фактором воздействия ультразвуковых колебаний на процессы в жидкостях и жидкообразных средах является кавитация – явление образования, пульсации и захлопывания микропузырьков газа под действием переменного давления. Широкое внедрение перспективных ультразвуковых технологий в значительной мере сдерживается тем, что закономерности генерирования кавитации изучены недостаточно, а известные в литературе данные противоречивы и характеризуются низкой воспроизводимостью. В данной работе приводится описание инновационного метода исследования ультразвуковой кавитации. С целью повышения воспроизводимости результатов и достоверности выводов о корреляции различных кавитационных эффектов предложено регистрировать одновременно параметры, характеризующие эти эффекты. Разработана и апробирована установка, предназначенная для реализации данного метода. Установка обеспечивает возможность регистрации полного выходного сигнала гидрофона, интенсивности свечения, генерируемого в кавитационной области – звуколюминесценции, спектра кавитационного шума и отдельных его составляющих. Технические характеристики установки позволяют регулировать скорость развития кавитационной области путем варьирования длительности и периода следования импульсов ультразвука и проводить измерения в низкочастотных (НЧ), высокочастотных (ВЧ) и взаимодействующих ВЧ и НЧ ультразвуковых полях. В ходе испытаний установки получены результаты, представляющие значительный интерес с точки зрения уточнения представлений о механизме генерирования кавитационных эффектов. Установлено, что предварительная обработка жидкости в ультразвуковом поле с целью ее дегазации в течение 15–20 мин обеспечивает значительное повышение воспроизводимости измерений, особенно для жидкостей с высоким газосодержанием. На основании сопоставления результатов синхронной регистрации сигналов датчика кавитации и фотоумножителя показано, что кавитационная область после включения ультразвука проходит четыре стадии развития, различающиеся динамикой изменения интенсивности звуколюминесценции и составом регистрируемых при этом спектров кавитационного шума. Сделан вывод о возможности идентификации стадий развития кавитационной области по спектрам кавитационного шума.

Ключевые слова: ультразвук, кавитация, звуколюминесценция, кавитационный шум.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. В статье представлены результаты, полученные в ходе выполнения работ по проекту «Разработать и изготовить ультразвуковой кавитационный комплекс (УЗКК)» подпрограммы «Уникальное научное оборудование» ГНТП «Эталон и научные приборы».

Для цитирования. Котухов А.В., Гаврилюк В.С., Минчук В.С., Дежкунов Н.В. Комбинированный метод исследования акустической кавитации. Доклады БГУИР. 2020; 18(4): 80-88.

COMBINED METHOD FOR ACOUSTIC CAVITATION RESEARCH

ALEKSEI V. KOTUKHOV, VITALIY S. GAVRILYUK, VIACHESLAV S. MINCHUK,
NIKOLAI V. DEZHKUNOV

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

Submitted 24 April 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. At present, the field of applications of powerful ultrasound is expanding intensively, and the improvement of equipment and technological processes continues. With that, the key factor in the effect of ultrasonic vibrations on processes in liquids and liquid-like media is cavitation, i.e. the phenomenon of formation, pulsation and collapse of gas microbubbles under the influence of variable pressure. The widespread introduction of promising ultrasound technologies is largely constrained by the fact that the patterns of cavitation generation are not well understood, and the data known in the literature are contradictory and are characterized by low reproducibility. This paper describes an innovative method for studying ultrasonic cavitation. In order to increase the reproducibility of the results and the reliability of the conclusions about the correlation of various cavitation effects, it is proposed to register simultaneously the parameters characterizing these effects. An installation designed to implement this method has been developed and tested. The installation provides the ability to register the full output signal of the hydrophone, the intensity of the glow generated in the cavitation region - sound luminescence, the cavitation noise spectrum and its individual components. Technical characteristics of the installation allow you to adjust the rate of development of the cavitation region by varying the duration and period of the ultrasound pulses. It is possible to conduct experiments both in low-frequency (LF) and high-frequency (HF) fields as well as in interacting HF and LF ultrasonic fields. During the testing of the installation, the results were obtained that are of considerable interest from the point of view of refining the ideas about the mechanism for generating cavitation effects. It was found that preliminary treatment of the liquid in an ultrasonic field with the aim of its degassing for 15–20 min provides a significant increase in the reproducibility of measurements, especially for liquids with a high gas content. Based on a comparison of the time dependences of the signals of the cavitation sensor and the photomultiplier output, the characteristic stages of the development of the cavitation region are distinguished, which differ in the dynamics of the development of the cavitation region and in the composition of the cavitation noise spectra recorded.

Keywords: ultrasound, cavitation, sonoluminescence, cavitation noise.

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

Gratitude. The article presents the results obtained in the course of the work on the project “Design and manufacture of an ultrasonic cavitation complex (UZKK)” subprogram “Unique scientific equipment” of the state scientific-technical program “Standards and scientific instruments”.

For citation. Kotukhov A.V, Gavriluk V.S., Minchuk V.S., Dezhkunov N.V. Combined method for acoustic cavitation research. Doklady BGUIR. 2020; 18(4): 80-88.

Введение

Ультразвук применяется для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях уже несколько десятилетий [1–3]. В настоящее время сфера применений мощного ультразвука интенсивно расширяется, продолжают совершенствоваться оборудование и разработка новых ультразвуковых технологий. Перспективные результаты получены при обработке суспензий наночастиц [4, 5], в пищевой промышленности [6], в звукохимии [7], медицине [8] и других областях. При этом показано, что ключевым фактором воздействия ультразвуковых колебаний на процессы в жидкостях и жидкообразных средах является кавитация – явление образования, пульсации и захлопывания микропузырьков под действием переменного давления [8]. При пульсациях и захлопывании пузырьков генерируются ударные волны, высокие температуры, давления и микроструи жидкости. Обычно выделяют два типа

кавитационных пузырьков [8, 9]: стабильно пульсирующие в течение времени, много большим периода T ультразвуковых колебаний (стационарные), и нестабильные, или нестационарные (transient), время жизни которых обычно не превышает T .

Широкое внедрение перспективных ультразвуковых технологий в значительной мере сдерживается тем, что закономерности генерирования кавитации изучены недостаточно, а известные в литературе данные часто противоречивы и характеризуются низкой воспроизводимостью.

В данной работе приводится описание инновационного метода исследования ультразвуковой кавитации. С целью повышения воспроизводимости результатов и достоверности выводов о корреляции различных кавитационных эффектов предложено регистрировать одновременно параметры, характеризующие эти эффекты.

Методика проведения эксперимента

Схема установки приведена на рис. 1. Рабочая емкость 5 в виде цилиндра диаметром 100 мм и высотой 160 мм выполнена из нержавеющей стали. Высокочастотный (ВЧ) (720 кГц) фокусирующий излучатель 4 ультразвуковых колебаний диаметром 40 мм вмонтирован в дно емкости. В боковой поверхности емкости выполнено три окна на уровне фокального пятна нижнего фокусирующего излучателя. В двух окнах оппозитно друг другу установлены два одинаковых фокусирующих пьезокерамических преобразователя 6 и 7. Один из них 6 служит излучателем, а второй 7 – приемником акустического сигнала на частоте 1,5 МГц.

Система излучатель 6 – приемник 7 предназначена для оценки поглощения ультразвука в кавитационной области, генерируемой излучателем 4. Режим работы излучателя 6 выбирается таким, чтобы интенсивность ультразвуковых колебаний в поле этого излучателя была не менее чем в 10 раз ниже порога кавитации на частоте 1,5 МГц. Датчик кавитации 8 установлен через крышку емкости таким образом, что пьезоэлемент датчика, преобразующий акустический сигнал в электрический, находится на расстоянии 25 мм от фокального пятна нижнего фокусирующего излучателя 4. Пьезоэлемент выполнен в виде диска диаметром 2 мм и толщиной 0,25 мм.

Вместо второго ВЧ излучателя 6 может быть установлен низкочастотный (НЧ) (22 кГц) излучатель. В результате появляется возможность генерировать и исследовать кавитацию в одинаковых условиях в ВЧ и НЧ ультразвуковых полях и при взаимодействии ВЧ и НЧ полей.

Высокий уровень однородности ультразвукового поля и отсутствие стоячих волн обеспечиваются использованием конической гофрированной крышки. Такая конструкция уменьшает площадь поверхности раздела жидкость – газ и обеспечивает постоянство уровня жидкости в реакторе. В большинстве известных в литературе исследований уровень жидкости не контролировался или контролировался с недостаточной точностью.

Для регистрации звуколюминесценции (ЗЛ) используется фотоумножитель 11 Phillips XP1110 со световодом диаметром 20 мм, установленный на уровне фокального пятна излучателя. Сигнал с фотоумножителя подается на двухканальный осциллограф 10 Hewlett Packard 54601A. На этот же осциллограф подается сигнал с датчика кавитации. Для исследования спектров кавитационного шума к осциллографу параллельно подключается анализатор спектра. В рассматриваемом случае использовался анализатор Hewlett Packard E4411B.

Для питания излучателей используется генератор УЗГ-08-01 (БГУИР). Данный генератор управляется компьютером и оснащен системой автоматического поддержания резонансной частоты (АПЧ). Также в установку входит кавитометр ICA-4D (БГУИР, г. Минск) и блок АЦП (БГУИР, Минск). На АЦП одновременно может подаваться три сигнала: выходной сигнал кавитометра, выходной сигнал фотоумножителя и напряжение на излучателе. Данные с АЦП поступают на компьютер, где обрабатываются и визуализируются в реальном масштабе времени в виде временных зависимостей.

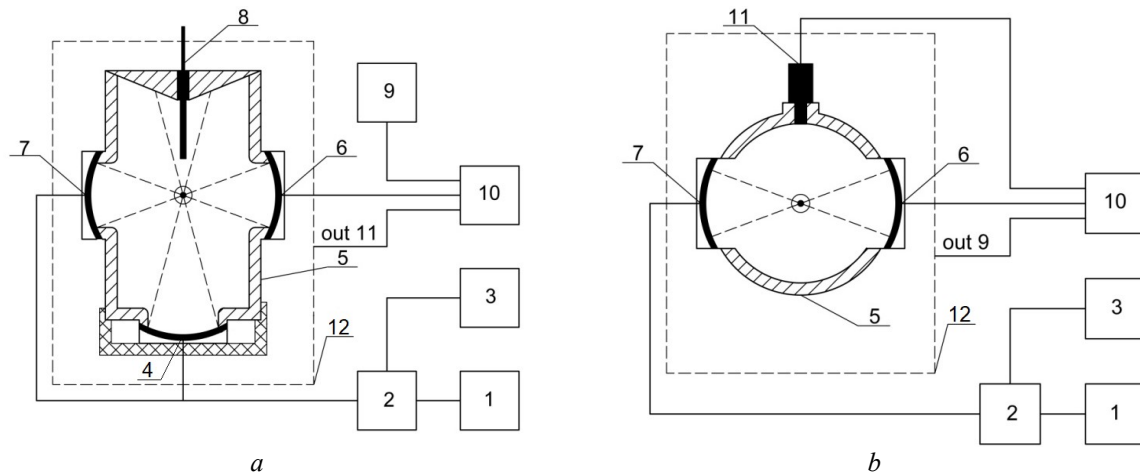


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: *a* – вид сбоку; *b* – вид сверху

1 – генератор, 2 – генератор импульсов, 3 – смеситель, 4 – излучатель ультразвука, 5 – рабочая емкость, 6 – второй излучатель, 7 – приемный пьезоэлемент, 8 – датчик кавитации, 9 – предусилитель, 10 – запоминающий осциллограф, 11 – фотомножитель, 12 – светонепроницаемый короб

Fig. 1. Experimental setup: *a* – side view; *b* – top view

1 – generator, 2 – pulse generator, 3 – mixer, 4 – ultrasound transducer, 5 – working capacity, 6 – second transducer, 7 – receiving piezoelectric element, 8 – cavitation sensor, 9 – preamplifier, 10 – storage oscilloscope, 11 – photomultiplier, 12 – light box

В ходе испытаний данного оборудования установлено, что предварительная обработка жидкости в ультразвуковом поле с целью ее дегазации в течение 15–20 мин обеспечивает значительное повышение воспроизводимости измерений, особенно для жидкостей с высоким газосодержанием.

Ниже приведены результаты испытаний установки, демонстрирующие ее возможности.

Результаты и их обсуждение

На рис. 2 приведены результаты одновременной регистрации выходного сигнала датчика кавитации H и выходного сигнала фотомножителя L . Напряжение на излучателе в ходе проведения эксперимента поддерживалось постоянным. Данные, представленные в левом столбце (рис. 2, *a, b*), получены при длительности импульсов ультразвука $\tau = 5$ мс, в правом (рис. 2, *c, d*) – 1 мс. Остальные параметры одинаковы для обоих столбцов.

Ультразвуковое поле включалось на 5-й секунде после начала регистрации зависимостей. В момент включения ультразвука H увеличивается скачком, а значение L остается близким к нулевому. Последнее указывает на то, что инерционная кавитация в данном режиме возникает с некоторой задержкой по отношению к моменту включения ультразвука. На начальном этапе регистрации (первых пяти секунд после включения ультразвука на рис. 2, *a*) выходной сигнал датчика практически не меняется. Примерно на 11-й секунде (рис. 2, *a*) наблюдается снижение уровня сигнала, регистрируемого датчиком. Увеличение поглощения ультразвука, очевидно, вызвано появлением пузырьков в кавитационной области. Одновременно возникает ЗЛ (рис 2, *b*).

Задержка возникновения ЗЛ по отношению к моменту включения ультразвука связана, очевидно, с тем, что в жидкости отсутствуют пузырьки резонансного размера (примерно 3,5 мкм для частоты 720 кГц). Имеющиеся зародыши меньшего размера в результате пульсаций под действием ультразвука вырастают до резонансного размера за счет выпрямленной диффузии [9, 10] газа из жидкости в пузырек. На этой стадии пузырьки под действием переменного давления начинают пульсировать с большой амплитудой, а в фазе сжатия звуковой волны захлопываются и генерируют характерные кавитационные эффекты: ударные волны и ЗЛ, т. е. возникает нестационарная кавитация.

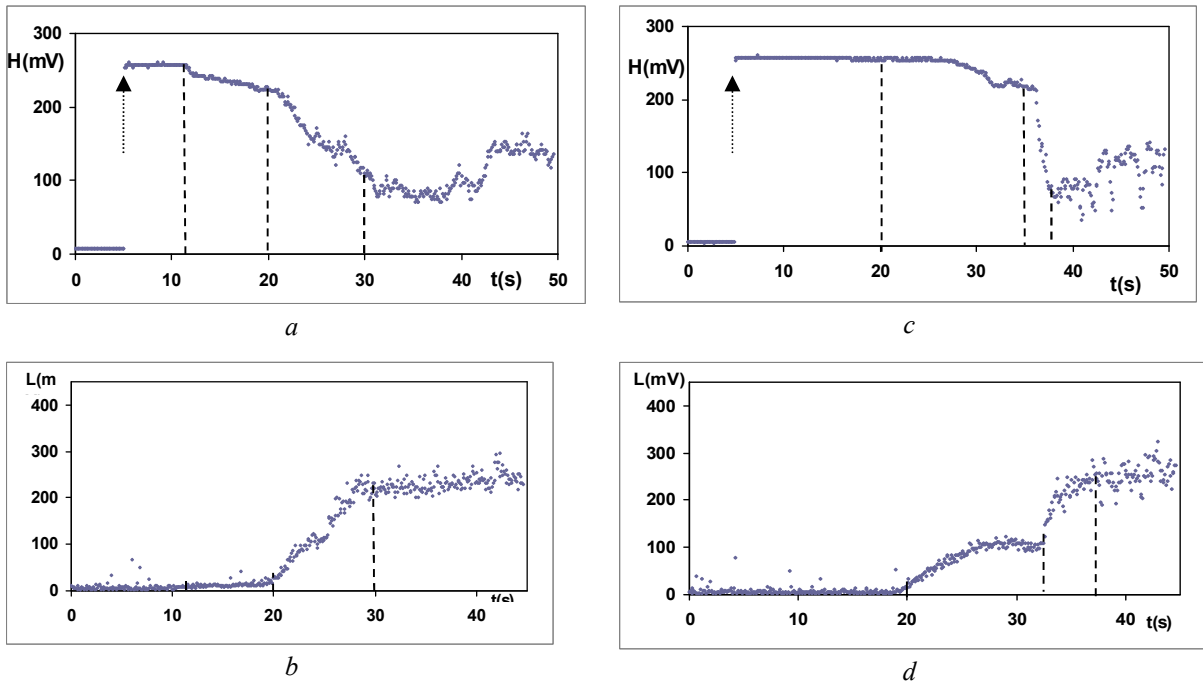


Рис. 2. Динамика развития кавитационной области в импульсном ультразвуковом поле: a, c – выходной сигнал датчика H ; b, d – выходной сигнал фотомножителя L . Частота ультразвука $f_0 = 720$ кГц, излучаемая мощность 1,7 Вт, период следования импульсов ультразвука 75 мс, длительность импульсов ультразвука $\tau = 5$ мс (a, b) и 1 мс (c, d). Стрелкой вверх отмечен момент включения ультразвука, вертикальными штриховыми линиями отделены стадии развития кавитационной области

Fig. 2. The dynamics of the development of the cavitation region in a pulsed ultrasonic field: a, c – the output signals of the sensor H ; b, d – the output signals of the photomultiplier L . The frequency of ultrasound is $f_0 = 720$ kHz, the radiated power is 1.7 W, the repetition period of ultrasound pulses is 75 ms, the duration of ultrasound pulses is $\tau = 5$ ms (a, b) and 1 ms (c, d). The arrow marks the moment the ultrasound is turned on, the stages of development of the cavitation zone are separated by vertical dashed lines

На второй стадии, в промежутке времени примерно от 11-й до 20-й секунды (рис. 2, b), интенсивность ЗЛ растет относительно медленно. Также медленно увеличивается и поглощение ультразвука, что следует из соответствующего уменьшения выходного сигнала датчика H (рис. 2, a). На третьей стадии (от 20-й до 28-й секунды, рис. 2, b) наблюдается существенное увеличение интенсивности ЗЛ, а наклон зависимости $L(t)$ меняется скачком. Одновременно меняется также и характер зависимости $H(t)$, что вызвано быстрым увеличением поглощения ультразвука в кавитационной области. Из сопоставления двух зависимостей на рисунках 2, a, b можно сделать вывод, что увеличение активности кавитации связано с увеличением числа кавитационных пузырьков в фокальной области излучателя на первых двух стадиях развития кавитационной области.

Зависимости, зарегистрированные во втором эксперименте (рис. 2, c, d), получены при меньшей длительности импульсов УЗ. Отличаются они от представленных выше, во-первых, тем, что время задержки Δt появления ЗЛ по отношению к моменту включения ультразвука существенно больше, а именно – ЗЛ появляется на 20-й секунде озвучивания (рис. 2 d). До этого момента величина H остается постоянной. Далее, скорость роста интенсивности ЗЛ после возникновения кавитации существенно выше, а скорость уменьшения H – ниже, чем при $\tau = 5$ мс. Последнее указывает на то, что общая плотность кавитационных полостей на первых двух стадиях существенно ниже, чем при $\tau = 5$ мс. Однако интенсивность ЗЛ при этом не ниже. Из этого можно сделать вывод, что при $\tau = 1$ мс эффективность преобразования и концентрации энергии ультразвука кавитационными пузырьками выше при $\tau = 1$ мс, чем при $\tau = 5$ мс.

Увеличение времени задержки Δt при уменьшении длительности импульсов ультразвукового поля τ и постоянном периоде следования импульсов T обусловлено закономерностями генерирования кавитации в таких полях. Уменьшение τ при постоянном T означает увеличение длительности промежутка времени между двумя последовательными

импульсами. В этом промежутке времени размеры зародышей кавитации уменьшаются за счет диффузии газа из пузырька в жидкость под действием поверхностного натяжения [10]. В результате при уменьшении τ развитие кавитационной области затормаживается, и время задержки увеличивается. Следовательно, варьируя параметры импульсов T и τ , можно управлять динамикой развития кавитационной области.

На четвертой стадии развития кавитационной области интенсивность ЗЛ выходит на плато (при $t > 28$ с на рис. 2, б и при $t > 35$ с на рис. 2, д) и мало меняется с течением времени. Поглощение ультразвука при этом несколько уменьшается, на что указывает увеличение интенсивности выходного сигнала датчика.

На рис. 3 представлена эволюция спектров кавитационного шума. Спектры на рис 3, а, б, соответствующие первой и второй стадиям эволюции кавитационной области, характеризуются низкой интенсивностью гармоник в НЧ области ($< 5f_0$), полным их отсутствием в ВЧ области ($> 5f_0$), а также отсутствием непрерывной составляющей кавитационного шума. Исходя из этого, можно сделать вывод о незначительной концентрации пузырьков в кавитационной области, а также о линейном характере их пульсаций. Спектр на рис 3, с, соответствующий третьей стадии эволюции кавитационной области, характеризуется появлением значительной непрерывной составляющей кавитационного шума, а также наличием гармоник в ВЧ части спектра. При дальнейшем развитии кавитационной области (рис. 3, д) достигается максимум непрерывной составляющей кавитационного шума.

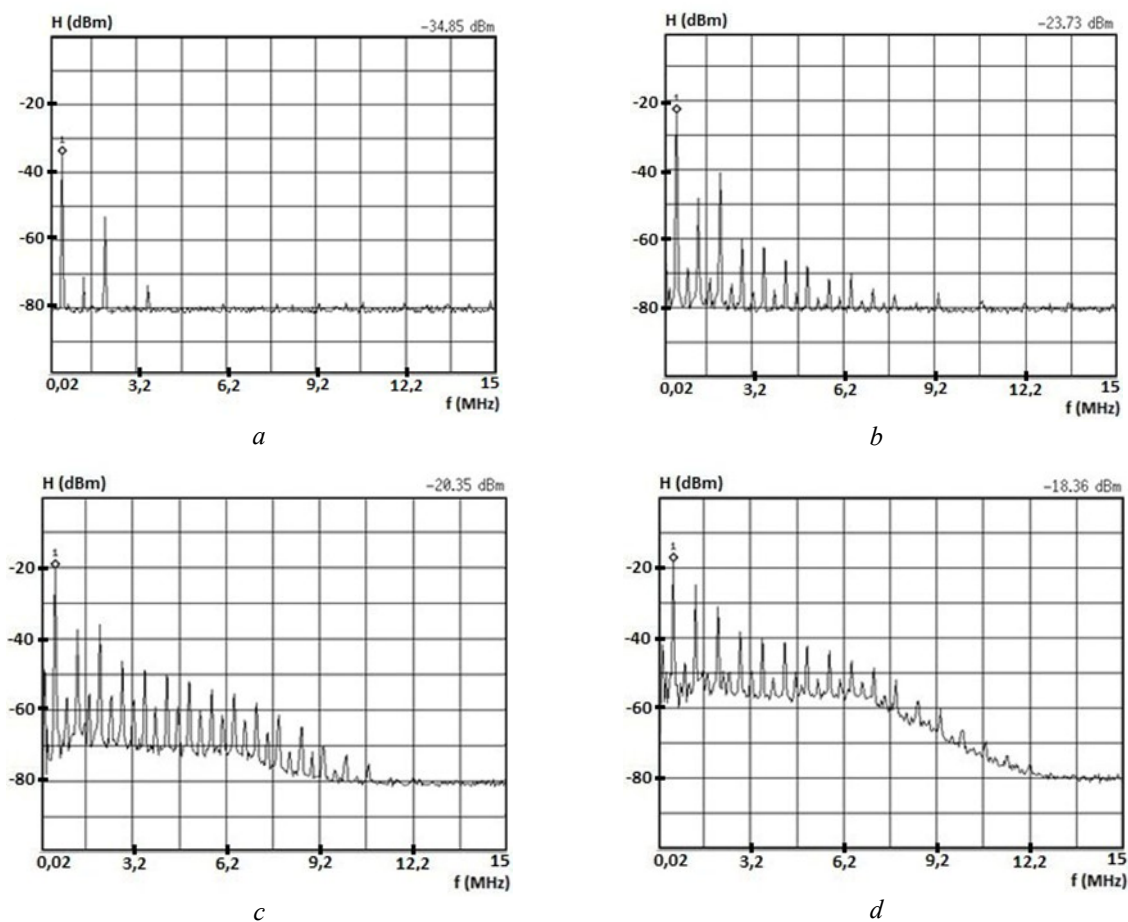


Рис. 3. Эволюция спектров кавитационного шума по мере развития кавитационной области: а – первая стадия; б – вторая стадия; с – третья стадия; д – четвертая стадия. Частота ультразвука $f_0 = 720$ кГц, излучаемая мощность 1,7 Вт, период следования импульсов ультразвука 75 мс, длительность импульсов ультразвука $\tau = 5$ мс

Fig. 3. The evolution of cavitation noise spectra as the cavitation field develops: а – first stage; б – second stage; с – third stage; д – fourth stage. The frequency of ultrasound is $f_0 = 720$ kHz, the radiated power is 1.7 W, the repetition period of ultrasound pulses is 75 ms, the duration of ultrasound pulses is $\tau = 5$ ms

Таким образом, анализируя результаты, представленные на рис. 2 и 3, можно выделить четыре стадии эволюции кавитации: первая – возникновение и пульсации пузырьков при отсутствии ЗЛ; вторая – возникновение ЗЛ и последующий ее рост при незначительном увеличении поглощения ультразвука; третья – быстрый рост ЗЛ при практически скачкообразном увеличении поглощения ультразвука; четвертая – стадия равновесия, т. е. насыщение кавитационной области пузырьками. На четвертой стадии интенсивность ЗЛ меняется незначительно, а поглощение ультразвука может несколько уменьшаться. Переход от одной стадии развития кавитационной области к другой сопровождается существенным изменением состава регистрируемых спектров. Это открывает возможность определять стадии развития кавитации, используя спектральный анализ кавитационного шума.

Заключение

Предложен новый метод исследования акустической кавитации. Сущность метода – в синхронной регистрации нескольких кавитационных эффектов одновременно.

Разработана и апробирована установка, предназначенная для реализации данного метода. Установка обеспечивает возможность регистрации полного выходного сигнала гидрофона, интенсивности свечения, генерируемого в кавитационной области – ЗЛ, спектра кавитационного шума, отдельных его составляющих, а также поглощения ультразвука. Технические характеристики установки позволяют регулировать скорость развития кавитационной области путем варьирования длительности и периода следования импульсов ультразвука и проводить измерения в одинаковых НЧ, ВЧ и взаимодействующих ВЧ и НЧ ультразвуковых полях.

В ходе испытаний установки получены результаты, представляющие значительный интерес с точки зрения уточнения представлений о механизме генерирования кавитационных эффектов. Установлено, что предварительная обработка жидкости в ультразвуковом поле с целью ее дегазации в течение 15–20 мин обеспечивает значительное повышение воспроизводимости измерений, особенно для жидкостей с высоким газосодержанием.

На основании сопоставления результатов синхронной регистрации сигналов датчика кавитации и фотоумножителя показано, что кавитационная область после включения ультразвука проходит четыре стадии развития кавитационной области, различающихся динамикой изменения интенсивности звуколюминесценции и составом регистрируемых при этом спектров кавитационного шума. Сделан вывод о возможности идентификации стадий развития кавитационной области по спектрам кавитационного шума.

Список литературы

1. Голямина И.П. *Ультразвук: маленькая энциклопедия*. Москва: Советская энциклопедия; 1979.
2. Новицкий Б.Г. *Применение акустических колебаний в химико-технологических процессах*. Москва: Химия; 1983.
3. Абрамов В.О., Приходько М.В. *Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении*. Москва: Русавиа; 2006.
4. Guimarães J.T., Balthazar C.F., Scudino H., Cruz A.G. High-intensity ultrasound: A novel technology for the development of probiotic and prebiotic dairy products. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019;57:12-21. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.05.004.
5. Кушнер Л.К., Кузьмар И.И., Хмыль А.А., Дежкунов Н.В. Электроосаждение нанокomпозиционных никелевых покрытий при воздействии интенсифицирующих факторов. *Международный журнал. Специальный выпуск: фуллерены и наноструктуры в конденсированных средах*. 2019;10:355-363.
6. Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.G, Meullemiestre A., Fabiano-Tixier A.S., Abert-Vian M. Ultrasound assisted extraction of food and natural products Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;34:540-556. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.06.035.
7. Жулай Ю.А., Скосарь В.Ю. Кавитация как средство интенсификации технологических процессов. Опыт применения и перспективы (обзор). *Авиационно-космическая техника и технология*. 2013;8/105:7-15.
8. Mason T.J. Therapeutic ultrasound an overview. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2011;18:847-852. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2011.01.004.

9. Сиротюк М. Г. *Акустическая кавитация*. Москва: Наука; 2008.
10. Leighton T.G. *Acoustic Bubble*. London: Pergamon Press; 1995.
11. Dezhkunov N.V., Francescutto A., Serpe L., Canaparo R., Cravotto G. Sonoluminescence and acoustic emission spectra at different stages of cavitation zone development. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;40:104-109 DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.004.

References

1. Goljamina I.P. [*Ultrasound: a small encyclopedia*]. Moscow: Soviet Encyclopedia; 1979. (in Russ.)
2. Novitsky B.G. [*The use of acoustic vibrations in chemical-technological processes*]. Moscow: Chemistry; 1983. (in Russ.)
3. Abramov O.V., Prikhodko V.M. [*Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering*]. Moscow: Rusavia; 2006. (in Russ.)
4. Guimarães J.T., Balthazar C.F., Scudino H., Cruz A.G. High-intensity ultrasound: A novel technology for the development of probiotic and prebiotic dairy products. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2019; 57:12-21. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2019.05.004.
5. Kushner L.K., Kuz'mar I.I., Khmyl A.A., Dezhkunov N.V. Electrodeposition of nanocomposite nickel coatings under the influence of intensifying factors. *Mezhdunarodnyj zhurnal. Specialnyj vypusk: fullereny i nanostruktury v kondensirovannyh sredah = Nanoscience and Technology: An International Journal. Special Issue: Fullerenes and Nanostructures in Condensed Matter*. 2019;10:355-363. (in Russ.)
6. Chemat F., Rombaut N., Sicaire A.G, Meullemiestre A., Fabiano-Tixier A.S., Abert-Vian M. Ultrasound assisted extraction of food and natural products Mechanisms, techniques, combinations, protocols and applications. A review. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2017;34:540-556. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2016.06.035.
7. Zhulay Yu.A., Skosar V.Yu. Cavitation as a means of intensification of technological processes. Application experience and prospects (review). *Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya = Aerospace engineering and technology*. 2013;8/105:7-15. (in Russ.)
8. Mason T.J. Therapeutic ultrasound an overview. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2011;18:847-852. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2011.01.004.
9. Sirotyuk M.G. [*Acoustic cavitation*]. Moscow: Nauka; 2008. (in Russ.)
10. Leighton T.G. *Acoustic Bubble*. London: Pergamon Press; 1995.
11. Dezhkunov N.V., Francescutto A., Serpe L., Canaparo R., Cravotto G. Sonoluminescence and acoustic emission spectra at different stages of cavitation zone development. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2018;40:104-109. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2017.04.004.

Вклад авторов

Котухов А.В. разработал метод проведения экспериментов, регистрации спектров, проанализировал результаты, оформил статью.

Гаврилюк В.С. разработал и испытал приборы, ПО для проведения экспериментов.

Минчук В.С. провел экспериментальные исследования, оформил статью.

Дежкунов Н.В. выполнил постановку задачи, разработал метод проведения экспериментов, интерпретировал результаты экспериментов.

Authors' contribution

Kotukhov A.V. developed the method of experimental research, registration of spectra, analysed the results, designed paper.

Gavrilyuk V.S. developed and tested instruments, software for experiments.

Minchuk V.S. conducted experimental studies, designed paper.

Dezhkunov N.V. stated the problem, developed the the method of experimental research, interpreted the results of experiments.

Сведения об авторах

Котухов А.В., заместитель декана факультета компьютерного проектирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гаврилюк В.С., инженер-программист лаборатории 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Минчук В.С., инженер-электроник лаборатории 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дежкунов Н.В., к.т.н., доцент, заведующий лабораторией 5.2 «Ультразвуковые технологии и оборудование» Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-222-28-64;
e-mail: kavax@bsuir.by
Котухов Алексей Валерьевич

Information about the authors

Kotukhov A.V., Vice Dean of the faculty of Computer-aided Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Gavrilyuk V.S., Software Engineer at the R&D Lab 5.2 "Ultrasonic technologies and facilities" of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Minchuk V.S., Electronic Engineer at the R&D Lab 5.2 "Ultrasonic technologies and facilities" of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dezhkunov N.V., PhD, Associate Professor, Head of the R&D Lab 5.2 "Ultrasonic technologies and facilities" of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-222-28-64;
e-mail: kavax@bsuir.by
Kotukhov Aleksei Valerievich