

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ НА ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВАТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ В КАМЕРЕ МАЛОГО ОБЪЕМА

М.С. Лебедев, А.А. Тагильцев, В.М. Чудновский

Исследованы акустические шумы, возникающие при термокавитации, инициированной в окрестности торца оптоволокну, погружённого в воду (лазерный нагревательный элемент) и зарегистрированные микрофоном, который установлен над поверхностью жидкости, заполняющей рабочую камеру малого объема. Звук, зарегистрированный микрофоном, включает цуги отдельных импульсов, идентифицированных как результат роста–схлопывания кавитационных пузырьков, возникающих в результате элементарного акта вскипания воды с недогревом. В отличие от регистрации кавитационного шума с помощью гидрофона, погруженного в экспериментальную камеру, способ контроля шума с помощью микрофона, находящегося вне области лазерного воздействия, является более простым и надежным и позволит обеспечить дистанционный контроль теплового воздействия на материал. В работе показано, что посредством микрофона, расположенного вблизи обрабатываемого торцом оптоволокну объема жидкости малого волнового размера, возможно в кавитационном шуме выделить наиболее энергонесущие импульсы и на основе их количественного анализа контролировать степень нагрева среды. Это позволит при проведении других видов лазерной обработки, например кавитационной очистки, упрочнении, закалки или санации технических поверхностей, управлять энергетическими режимами работы лазера и на основе количественных показателей автоматизировать управление длительностью воздействия излучения.

Ключевые слова: паровые пузырьки, лазерное излучение, нагрев, вскипание, звуковой импульс, акустические колебания, кавитация, камера малого объема, микрофон

Введение

Развитие современных лазерных хирургических технологий, а также технологий очистки, санации и обработки технических поверхностей с использованием термокавитации, которая обусловлена поглощением лазерного излучения в прилежащем к нагревательному элементу объеме среды, требует поиска методов инструментальной регистрации и оценки уровня энергетического воздействия, которое оказывают кавитационные пузырьки на обрабатываемую среду или поверхность. Агентом, который хорошо подходит для этой роли, является звук, который возникает при колебаниях паровых пузырьков в цикле рост – схлопывание, вторичных пузырьков – «отскоков», ударных волн при вскипании жидкости с недогревом. В работах [1–3] с использованием калиброванного гидрофона, расположенного в воде

вблизи торца оптоволокну, исследовались акустические сигналы, возникающие при вскипании воды под действием непрерывного лазерного излучения, проходящего по оптоволокну. Процессы развития и коллапса парогазовых пузырьков на оптоволокну в жидкостях активно изучаются с применением современных средств видеорегистрации [4], однако ввиду сложности механических, гидродинамических и термодинамических взаимосвязанных явлений в кавитационной области их описание и моделирование остаются неполными. Одной из причин такого положения является отсутствие сенсоров, способных работать в условиях кавитации без угрозы механического разрушения, сохраняя линейность амплитудных характеристик при прямых измерениях.

В то же время такие кавитационные явления сопровождаются звуком достаточно большой интенсивности в воздушной среде, что позволяет его ре-

гистрировать с помощью микрофонов и получать косвенную количественную оценку его спектрально-энергетических характеристик.

В немногочисленных публикациях приводятся фрагментарные сведения о применении микрофонов для наблюдения кавитационных явлений, это подтверждает необходимость более детального изучения применимости такого типа датчиков в дальнейших исследованиях.

В отличие от изучения кавитационных явлений, связанных с образованием пелены пузырьков [5], настоящая работа направлена на изучение низкоэнергетических воздействий лазера на технические поверхности и материалы, когда используется оптоволоконно и парогазовые пузырьки возникают в жидкости на его торце последовательно.

Задача состоит в обосновании возможности регистрации и подсчета количества отдельных кавитационных пузырьков, генерируемых на лазерном нагревательном элементе в рабочей камере, заполненной жидкостью, и на этой основе определения уровня энергетического воздействия на обрабатываемую лазером область.

■ Методика и результаты эксперимента

Основным подходом, направленным на изучение кавитационных процессов, инициированных лазерным нагревательным элементом в виде оптоволоконна, является сокращение подвергаемого лазерному воздействию рабочего объема до реальных его размеров. Это предполагает создание для экспериментальной установки наблюдения кавитационных процессов конструкции в виде камеры малого объема (малых волновых размеров [6]).

В установках с большими измерительными объемами при схлопывании кавитационных пузырьков и генерации ударных волн возникает интерференционное поле, а также происходит интенсивное возбуждение собственных частот всех элементов колебательной системы, из которых состоит установка, включая используемый зонд, что создает дополнительные помехи, искажая структуру кавитационного шума. Переход к физической модели рабочего объема как камере малых волновых размеров позволяет исключить реверберационные помехи, присущие камерам с переотражениями акустических импульсов от их границ, а также свести к минимуму количество элементов колебательной системы.

Таким образом, вследствие упомянутого подхода и применения камеры малых волновых размеров появляется возможность подсчета количества кави-

тационных пузырьков, генерируемых в ней за определенный интервал времени.

Экспериментальное исследование звуковых явлений, возникающих при термокавитации на лазерном нагревательном элементе, с использованием для этого приемников звукового давления в жидкости и в воздухе вне камеры, проводилось на экспериментальной установке (рис. 1). В экспериментах использовалось лазерное излучение с длиной волны 1,47 мкм и 0,97 мкм с различной мощностью в диапазоне 1–10 Вт.

Установка включает рабочую камеру цилиндрической формы размерами 50×25×5 мм, закрепленную на пластине из резины с герметизацией торца. Цилиндр представляет собой пьезокерамический преобразователь, внутренняя поверхность которого также герметизирована для заполнения объема по необходимости жидкостью или биоматериалом. Лазерное оптоволоконно с помощью многосвязных держателей с захватами удерживается погруженным в любой точке камеры. В сравнении с используемой ранее для наблюдения кавитации камере размерами 260×100×160 мм [2] конструкция и размеры камеры данной установки выбраны исходя из следующих представлений:

1) предполагаемые реальные габариты рабочего пространства, подвергаемые воздействию лазерного нагревательного элемента в виде оптоволоконна, не будут превышать 50×50×50 мм;

2) при снижении габаритов рабочего пространства до такого объема следует рассматривать его как камеру малых волновых размеров (другой общепринятый термин – «камера малого объема») с безэховым (неволновым) характером распределения звукового давления, а в данной конструкции – как камеру с жесткой цилиндрической стенкой (пьезоцилиндр) и акустически мягкими границами на торцах (верхняя образована поверхностью раздела «вода–воздух», нижняя образована поверхностью раздела «вода – эластичный материал – воздух»), где звуковое давление становится нулевым (рис. 1, слева);

3) пьезоцилиндр в качестве стенки рабочей камеры (рис. 1, справа) может использоваться в приемном режиме в диапазоне звуковых частот, при этом площадь его активной поверхности много больше, чем у гидрофонов, следовательно, выше чувствительность по звуковому давлению и меньше удельное давление на пьезоматериал в условиях кавитационных нагрузок.

Для регистрации кавитационного шума, возникающего в камере, над поверхностью раздела «вода–воздух» рабочей камеры установлен ½-дюймовый микрофон PCB 377B02 с предварительным усилите-

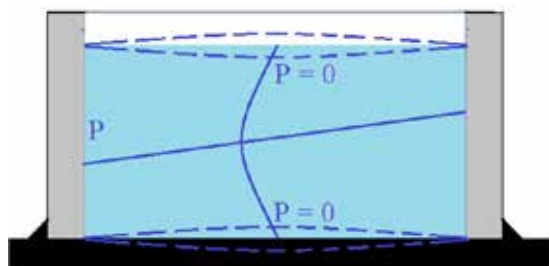


Рис. 1. Схема рабочей камеры малых волновых размеров с «жесткой» стенкой и «мягкими» торцевыми границами, распределение звукового давления в объеме (слева). Вид экспериментальной установки (справа)



лем 426E01. Чувствительность микрофона 50 мВ/Па, рабочая полоса частот 3,15 Гц – 20 кГц. Выходной сигнал пьезокольца и микрофона усиливался милливольтметром ВЗ-56, наблюдался на осциллографе и через внешнюю звуковую карту Sound Blaster X-Fi 5.0 (максимально поддерживаемая частота дискретизации 200 кГц, уровень квантования разрядностью 24 бит, полоса частот 10–50 кГц) записывался и обрабатывался на персональном компьютере.

Акустической моделью реального рабочего объема, как и имитирующей его рабочей камеры установки, является монополь, колеблющийся в воздушной среде. Подвергаясь лазерному воздействию посредством оптоволоконна, он трансформирует в воздушную среду при наличии «свободных» границ объема звук происходящих в камере кавитационных явлений, амплитуда которого достаточна для регистрации микрофоном. Диапазон частот исследуемых звуков сверху ограничивается волновым размером рабочей камеры и составляет, при заполнении камеры водой, величину ~15 кГц.

На рис. 2 представлены осциллограммы зарегистрированного на электродах пьезокольца, образующего стенку рабочей камеры, типичного кавитационного шума в ее рабочей области, появляющегося после включения лазера. Наблюдаются интервал разогрева и повышения давления в парогазовом пузырьке, затем фазы его быстрого роста и схлопывания, затухание импульса и периодическое возобновление кавитационного процесса с меньшими амплитудами.

Важно, что при использовании камеры малого волнового размера, моделирующей реальную рабочую область, регистрация кавитационного шума микрофоном не сопровождается переотраженными звуковыми волнами, что позволяет вести подсчет отдельных последовательно возникающих кавитационных пузырьков. В то же время зарегистрированные пьезокольцом и микрофоном

импульсы подобны, что говорит о сопоставимости амплитудно-частотных характеристик двух видов сенсоров.

На рис. 3, а показан зарегистрированный, но уже микрофоном, акустический сигнал, возникший в результате разогрева и коллапса парогазового пузырька в окрестности торца оптоволоконна после включения лазера и прошедший из камеры через поверхности раздела «вода–воздух». Импульс длительностью ~200–450 мкс, где область разряжения приблизительно в 1,7 раза интенсивнее (по амплитуде) области сжатия, демонстрирует типичный акустический звук от отдельного парового пузырька, возникающего при вскипании воды с недогревом (аналогично [1–3]).

Дальнейший анализ полученного сигнала производился с использованием вейвлет-преобразования (рис. 3, б) с целью временного и частотного разрешения структуры акустического сигнала. По результатам обработки наблюдаются две основных области частотных составляющих: вблизи частот ~3–5 кГц,

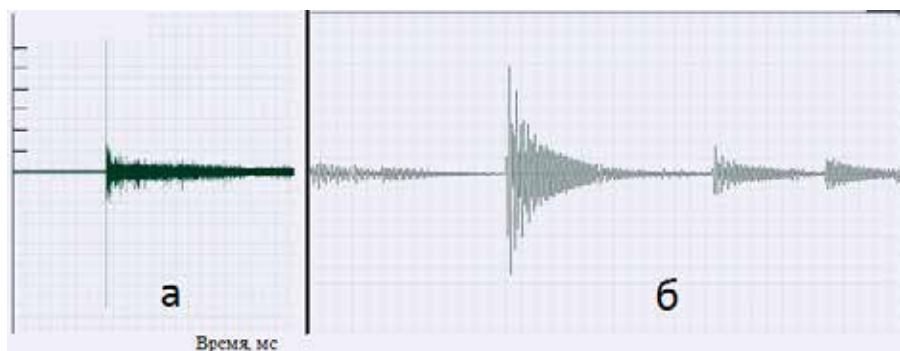


Рис. 2. Акустический шум, воспринимаемый пьезокольцом (отображение в аудиоредакторе CoolEdit): а – после включения лазера, режим работы непрерывный; б – область максимального импульса (режим «лупы»)

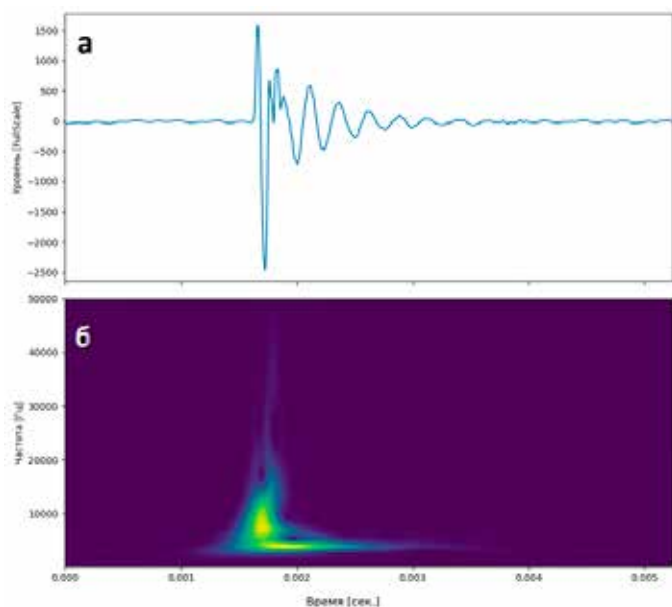


Рис. 3. Масштабированный, акустический импульс от отдельного кавитационного пузырька, зарегистрированный микрофоном вблизи рабочей камеры: а – осциллограмма; б – частотно-временное разложение

и широкополосная в диапазоне частот от ~ 5 кГц и выше. Длительность всего колебательного процесса можно оценить приблизительно в 1 мс.

На рис. 4 показан зарегистрированный микрофоном фрагмент шума длительностью ~ 8 мс. В амплитудно-временном представлении отчетливо наблюдается до 8 отдельных, возникающих в рабочей камере кавитационных пузырьков. Для их детектирования и подсчета предлагается использование амплитудной огибающей соответственно генерируемых звуковых колебаний. Методы цифровой обработки в стандартных программных пакетах позволяют вычислить модуль аналитического сигнала (комплексного сигнала, состоящего из реального, зарегистрированного и сопряженного ему, по Гильберту, квадратурного). Этот простой способ дает возможность выделить

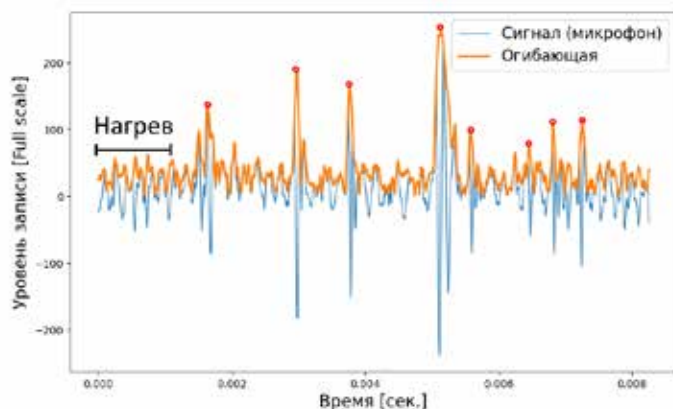


Рис. 4. Амплитудно-временная структура группы пузырьков, зарегистрированных микрофоном вблизи рабочей камеры

огибающую процесса во времени роста и схлопывания отдельного пузырька на основе последовательно чередующихся фаз положительного, отрицательного и снова положительного изменения давления с характерными амплитудами. При этом область разрежения в импульсах отчетливо превалирует. Также значащим фактором является то, что длительность пауз между возникновением новых пузырьков больше или приблизительно равна времени их жизни (экспериментально установленная частота генерации кавитационных пузырьков $\sim 3\text{--}5$ кГц). Это позволяет осуществлять «пик-трекинг» воспринимаемого микрофоном шума с выделением максимальных значений относительно его фонового уровня в среде (пороговое детектирование), связанного, в первую очередь, с процессом нагрева области среды у торца оптоволоконна.

Каждый пузырёк в группе генерирует кумулятивную струю и ударные волны, которые производят существенный энергетический вклад в процесс перехода энергии излучения лазера в тепло (что подтверждено исследованиями на количественном уровне с использованием высокоскоростных камер [4]). Суммарное воздействие на среду определяется количеством пузырьков, что удобно использовать для формирования обратной связи на основе акустического сигнала. Обратная связь, например, может быть включена в контур управления работой лазерного генератора при проведении очистки и санации технических поверхностей. Особенно отметим то, что счёт пузырьков можно производить дистанционно с помощью микрофона, находящегося вне области лазерного воздействия.

На спектрограмме (рис. 5) отдельные пузырьки также отчетливо проявляются, что позволяет определять их количество и по результатам спектрального разложения, подобного представленному на рис. 3, б. Этот подход дает возможность иметь разное раз-

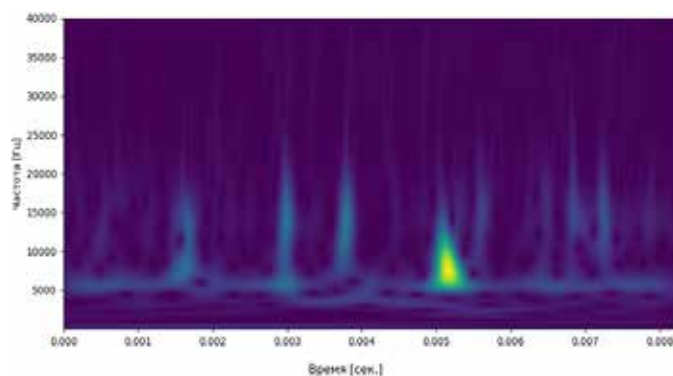


Рис. 5. Спектрально-временная структура (при обработке в качестве материнского выбран вейвлет Морле) последовательности импульсов, представленных на рис. 4

решение по времени и по частоте в различных частотных диапазонах (обеспечивается оптимальный компромисс между временным и пространственным разрешениями), что особенно полезно при разложении нестационарных сигналов. Анализ на основе непрерывного вейвлет-преобразования с мультимасштабным разложением по частоте и времени позволяет проследивать структуру всего акустического процесса. Для наиболее интенсивных сигналов наблюдаемая структура коллапсирующих пузырьков в частотно-временной области аналогична изображенной на рис. 3, б (полоса частот 2–25 кГц).

Заключение

Выполнением экспериментов на установке, включающей рабочую камеру малого объема, показана возможность регистрации и подсчета количества отдельных кавитационных пузырьков, возникающих на лазерном нагревательном элементе. Обоснованы и апробированы подходы для дистанционной регистрации кавитационных явлений в жидкости посредством микрофона, находящегося вне рабочей камеры. Даны предложения по вариантам обработки полученных с помощью микрофона кавитационных шумов в целях подсчета количества генерируемых на интервале времени пузырьков как основы оценки энергетического воздействия лазера на среду, заполняющую рабочую камеру. Использование микрофона для количественной оценки энергетического воздействия (дозирования) на обрабатываемые объемы и поверхности применимо к различному оборудованию (в устройствах кавитационной очистки, упрочнения, закалки или санации технических поверхностей).

Работа выполнена в рамках госбюджетной темы «Разработка методологии исследования сложных акустических систем и сред», регистрационный номер: 124022100075-6.



Для цитирования:

Лебедев М.С., Тагильцев А.А., Чудновский В.М. КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА КАВИТАЦИОННЫХ ПУЗЫРЬКОВ НА ЛАЗЕРНОМ НАГРЕВАТЕЛЬНОМ ЭЛЕМЕНТЕ В КАМЕРЕ МАЛОГО ОБЪЕМА // ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2025. № 2 (52). С. 53–58. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_52_02_05. EDN: RANCUB.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Дорофеев Б.М., Волкова В.И. Акустический метод исследования роста и схлопывания пузырька пара при кипении // Акуст. журн. 2003. Т. 49, № 6. С. 794–798.
2. Лебедев М.С., Тагильцев А.А., Кулик А.В., Чудновский В.М. Акустика кипения с недогревом на лазерном нагревательном элементе // Подводные исследования и робототехника. 2024. № 2 (48). С. 16–28. DOI: 10.37102/1992-4429-2024-48-02-03
3. Зубрилов С. П. Исследование процесса кавитации и возможности снижения эрозионного износа / С.П. Зубрилов, Н.В. Растрегин // Вестн. Гос. ун-та морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2019. Т. 11, № 4. С. 705–717. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11- 4-705-717
4. Chudnovskii V.M., Levin A.A., Yusupov V.I., Guzev M.A., Chernov A.A. The formation of a cumulative jet during the collapse of a vapor bubble in a subcooled liquid formed as a result of laser heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 150. P. 119286. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119286>.
5. Несис Е.И. Кипение жидкостей. М.: Наука, 1973. 280 с.
6. Боббер Р. Гидроакустические измерения. М.: Мир, 1974. 364 с.

Справка об авторах

ЛЕБЕДЕВ Михаил Сергеевич, к.т.н., старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: гидроакустика, корреляционный и спектральный анализ

E-mail: lebedevms@poi.dvo.ru

Тел.: +7(423) 231-14-00

ORCID: 0000-0002-6859-2001

ТАГИЛЬЦЕВ Александр Анатольевич, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: гидроакустические антенны и преобразователи, акустические измерения

E-mail: atagiltsev@poi.dvo.ru

Тел.: +7(423) 231-14-00

ORCID: 0000-0001-9207-4418

ЧУДНОВСКИЙ Владимир Михайлович, д.б.н., главный научный сотрудник

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева Дальневосточного отделения Российской академии наук

Адрес места работы: 690041, г. Владивосток, ул. Балтийская, 43

Область научных интересов: лазерная биофизика, кавитация, гидродинамика

E-mail: vm53@mail.ru

Тел.: +7 (924) 434-79-80

ORCID: 0000-0003-2000-4810

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF CAVITATION BUBBLES ON A LASER HEATING ELEMENT IN A SMALL VOLUME CHAMBER

M.S. Lebedev, A.A. Tagil'cev, V.M. Chudnovskij

Acoustic noises arising from thermal cavitation initiated in the vicinity of the end of an optical fiber immersed in water (a laser heating element) and recorded by a microphone mounted above the surface of a liquid filling a small-volume working chamber are studied. The sound recorded by the microphone includes a series of individual pulses identified as the result of the growth-collapse of cavitation bubbles resulting from the elementary act of boiling water with underfloor heating. In contrast to recording cavitation noise using a hydrophone immersed in an experimental chamber, the method of noise control using a microphone located outside the area of laser exposure is simpler and more reliable and will allow remote monitoring of thermal effects on the material. The paper shows that by means of a microphone located near the volume of short-wave liquid processed by the end of the optical fiber, it is possible to isolate the most energy-carrying pulses in cavitation noise and, based on their quantitative analysis, control the degree of heating of the medium. This will make it possible to control the energy modes of laser operation during other types of laser treatment, for example, cavitation cleaning, hardening, quenching or sanitation of technical surfaces, and automate the management of the duration of radiation exposure based on quantitative indicators.

Keywords: steam bubbles, laser radiation, heating, boiling, sound pulse, acoustic vibrations, cavitation, small volume chamber, microphone

References

1. Dorofeev B.M., Volkova V.I. Akusticheskiy metod issledovaniya rosta i shlopyvaniya puzyr'ka para pri kipenii. Akust. zhurn. 2003. Vol. 49, No. 6. P. 794–798. [In Russ.]
2. Lebedev M.S., Tagil'cev A.A., Kulik A.V., Chudnovskij V.M. Akustika kipenija s nedogrevom na lazernom nagrevatel'nom jelemente. Podvodnye issledovaniya i robototekhnika. 2024. No. 2 (48). P. 16–28. DOI: 10.37102/1992-4429-2024-48-02-03. [In Russ.]
3. Zubrilov S.P. Issledovanie processa kavitacii i vozmozhnosti snizhenija jerozionnogo iznosa / S.P. Zubrilov, N.V. Rastrygin // Vestn. Gos. un-ta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova. 2019. Vol. 11, No. 4. P. 705–717. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717. [In Russ.]
4. Chudnovskij V.M., Levin A.A., Yusupov V.I., Guzev M.A., Chernov A.A. The formation of a cumulative jet during the collapse of a vapor bubble in a subcooled liquid formed as a result of laser heating // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020. Vol. 150. P. 119286. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119286>.
5. Nesis E.I. Kipenie zhidkostej. M.: Nauka, 1973. 280 p. [In Russ.]
6. Bobber R. Gidroakusticheskie izmereniya. M.: Mir, 1974. 364 p. [In Russ.]

Recommended citation:

Lebedev M.S., Tagil'cev A.A., Chudnovskij V.M. QUANTITATIVE ASSESSMENT OF CAVITATION BUBBLES ON A LASER HEATING ELEMENT IN A SMALL VOLUME CHAMBER. UNDERWATER INVESTIGATIONS AND ROBOTICS. 2025. No. 2 (52). P. 53–58. DOI: 10.37102/1992-4429_2025_51_01_05. EDN: RANCUB.

Information about the authors

LEBEDEV Mihail Sergeevich, Ph.D., senior researcher
Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Work address: 690041, Vladivostok, Baltiiskaya st., 43

Research Interests: hydroacoustics, correlation and spectral analysis

E-mail: lebedevms@poi.dvo.ru. **Phone:** +7(423) 231-14-00

ORCID: 0000-0002-6859-2001

TAGIL'CEV Aleksandr Anatol'evich, candidate of technical sciences, associate professor, senior researcher
Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Work address: 690041, Vladivostok, Baltiiskaya st., 43

Research Interests: hydroacoustic antennas and transducers, acoustic measurements

E-mail: atagitsev@poi.dvo.ru. **Phone:** +7(423) 231-14-00

ORCID: 0000-0001-9207-4418

CHUDNOVSKIY Vladimir Mihajlovich, Doctor of Biological Sciences, Chief Researcher
Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences

Work address: 690041, Vladivostok, Baltiiskaya st., 43

Research Interests: laser biophysics, cavitation, hydrodynamics

E-mail: vm53@mail.ru. **Phone:** +7 (924) 434-79-80

ORCID: 0000-0003-2000-4810