

DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717

STUDYING THE CAVITATION PROCESS AND THE POSSIBILITY OF REDUCING EROSION WEAR

S. P. Zubrilov, N. V. Rastrygin

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

An approach to solve the problem of reducing the cavitation damage of internal combustion engines, ship propellers, and elements of hydraulic structures is presented by controlling the cavitation process for all possible spherical pulsations of cavitation bubbles and their non-spherical fragmentations based on four typical schemes of the cavitation bubble collapse near a solid surface. High-speed visualization (holography) of the cavitation area has proved the bubbles consolidation before their impact on a solid surface by jets blow. The research object is the cavitation area in the water and its impact on a hard surface, the research subject is the phenomenon of bubbles cooperation at the compression final stage and the possibility of its use to reduce the erosion effect of cavitation. At research, the following experimental methods are used: high-speed holographic visualization, interferography, acoustic cavitation. Combining the cavitation bubbles in the compression phase of the cavitation area is proved. With a single collapse of the cavitation area, two to five dynamic pressure impulses from the impact of hydrodynamic water jets arise, which are 250 times more powerful than the pressure pulses from the spherical cavitation bubble collapse. On the deep stages of compression of the cavitation region 500 bubbles have disappeared from the sight, the spherical pressure waves emanate from one or more points of a solid surface that confirms the fact of bubbles merging with their simultaneous movement to the solid surface. Their number is two orders of magnitude smaller than it was in the expansion phase.

The processes and phenomena that manifest themselves at deep stages of the cavitation area compression are theoretically and experimentally substantiated. Multiple cavities are easier to explore experimentally in order to control the cavitation process. The modern optical methods of digital tracer visualization, allowing to see the final stage of the cavitation cavity collapse have great prospects. New way to manage the cavitation process, based on four typical compression schemes of cavitation cavities to reduce the erosion intensity, is an alternative to the creation of costly cavitation-resistant materials.

Keywords: cavitation, hologram, bubble, cavitation area, erosion, pressure impulse, water, interferogram.

For citation:

Zubrilov, Sergey P., and Nikolay V. Rastrygin. "Studying the cavitation process and the possibility of reducing erosive wear." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.4 (2019): 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.

УДК 502.656.628

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА КАВИТАЦИИ И ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ ЭРОЗИОННОГО ИЗНОСА

С. П. Зубрилов, Н. В. Растрьгин

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Представлен подход к решению проблемы снижения кавитационного разрушения двигателей внутреннего сгорания, судовых винтов, элементов гидротехнических сооружений путем управления кавитационным процессом для всех возможных сферических пульсаций кавитационных пузырьков и их несферических фрагментаций на базе четырех типовых схем захлопывания кавитационных пузырьков у твердой поверхности. Высокоскоростной визуализацией (голография) кавитационной области доказано объединение пузырьков перед их воздействием на твердую поверхность ударом струй. Объектом исследований является кавитационная область в воде и ее воздействие на твердую поверхность, предметом исследований послужило явление кооперации пузырьков на заключительной стадии сжатия и возможность его использования для снижения эрозионного эффекта кавитации. При проведении исследований были использованы

следующие экспериментальные методы: высокоскоростная голографическая визуализация, интерферография и акустическая кавитация. Приведено доказательство объединения кавитационных пузырьков в фазе сжатия кавитационной области. Отмечается, что при единичном замыкании кавитационной области возникают два–пять динамических импульсов от удара гидродинамических струй воды, мощность которых в 250 раз превышает мощность импульсов от замыкания сферического кавитационного пузырька. Обращается внимание на то, что при проведении эксперимента на глубоких стадиях сжатия кавитационной области 500 пузырьков исчезли из поля зрения, а сферические волны давления исходят из одной или нескольких точек твердой поверхности, что подтверждает факт слияния пузырьков с их одновременным движением к твердой поверхности. Зафиксировано, что кавитационных пузырьков на два порядка меньше, чем было в фазе расширения. Теоретически и экспериментально обоснованы процессы и явления, проявляющиеся на глубоких стадиях сжатия кавитационной области. Выявлено, что несколько объединенных полостей легче исследовать экспериментально в целях управления процессом кавитации. Отмечается, что большие перспективы имеют современные оптические методы цифровой трассерной визуализации, которые позволяют увидеть заключительную стадию коллапса кавитационной полости. Новый способ управления кавитационным процессом на базе четырех типовых схем сжатия кавитационных полостей по снижению интенсивности эрозионного воздействия является альтернативой созданию дорогостоящих кавитационностойких материалов.

Ключевые слова: кавитация, голограмма, пузырек, кавитационная область, эрозия, импульс давления, вода, интерферограмма.

Для цитирования:

Зубрилов С. П. Исследование процесса кавитации и возможности снижения эрозионного износа / С. П. Зубрилов, Н. В. Растрегин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 4. — С. 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.

Введение (Introduction)

Резкое увеличение удельного веса переходных процессов, рост скоростей, форсированные режимы двигателей внутреннего сгорания привели к тому, что кавитация стала сдерживающим фактором развития техники. Только ежегодные убытки от ремонта дизелей оцениваются многими миллионами рублей. Кавитация в гидравлических системах приводит к ухудшению энергетических характеристик оборудования, кавитационной эрозии проточного тракта, шуму и вибрации. Однако до сих пор не создано ни общей теории возникновения, ни развития и динамического воздействия кавитации на твердую поверхность. Единый подход к изучению кавитационного процесса с неразрывной связью всех его стадий позволяет, в принципе, управлять кавитацией.

Первая работа по созданию единой типовой схемы воздействия кавитации была выполнена в Гидротехнической лаборатории им. В. Е. Тимонова в Ленинградском институте водного транспорта (ныне ФГБОУ ВО «Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова») [1], [2]. Был создан экспериментально-измерительный комплекс для высокоскоростного фотографирования и голографирования по исследованию ядер кавитации, кавитационной области и динамического воздействия кавитации на твердую поверхность. Принципиальная схема приведена на рис. 1.

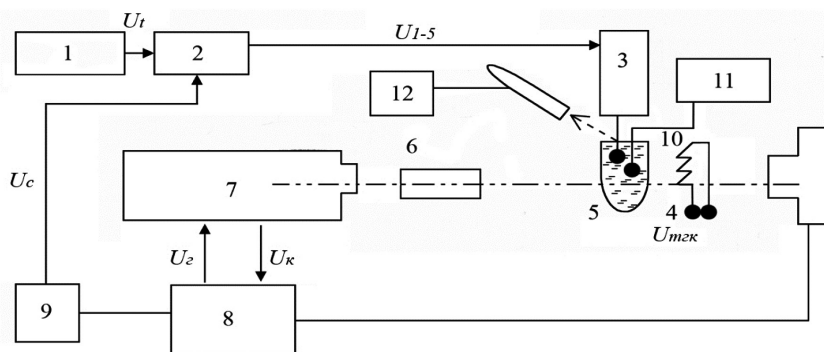


Рис. 1. Схема экспериментальной установки исследования для процесса замыкания кавитационной полости:

- 1 — УЗГ; 2 — коммутатор колебаний; 3 — вибратор; 4 — импульсная лампа; 5 — кювета;
6 — микроскоп; 7 — фоторегистратор; 8 — пульт управления; 9 — блок задержки;
10 — ТЭН; 11 — измеритель давления; 12 — ФЭУ

Съемка производилась с использованием микроскопа при кратности увеличения от 12 до 32. Для обработки отснятых материалов применялся фотоувеличитель, при этом суммарное увеличение достигало кратности от 80 до 400. В результате проведенных экспериментов было впервые доказано существование четырех типовых схем воздействия кавитационного пузырька на твердую поверхность (рис. 2, интервал между кадрами 1,66 мкс, размер кадра 0,57 мм). На нижней кинограмме рис. 2 кумулятивная струя направлена вверх от стенки, давление на стенку минимально [1], [2].

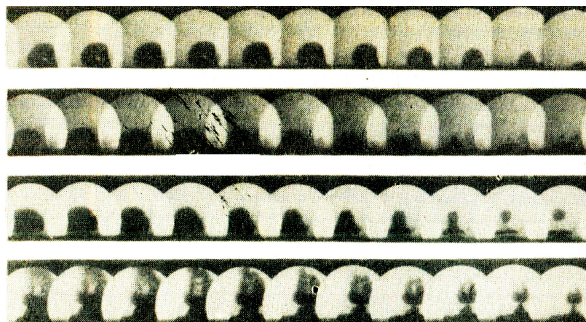


Рис. 2. Кинограммы захлопывания кавитационной полости у твердой стенки в 60 %-м растворе глицерина в воде

Детально исследована заключительная стадия захлопывания одиночного кавитационного пузырька. Безразмерные характеристики вязкости жидкости и поверхностного натяжения обобщены для всех возможных сферических пульсаций кавитационных пузырьков и их несферических фрагментаций, а также установлено, что сохранение сферической симметрии или деление пузырьков при пульсациях зависят от начальных условий, задаваемых экспериментатором. При этом создав условия для четвертой схемы, можно существенно снизить кавитационную эрозию твердой поверхности. (Следует отметить, что полное исключение кавитации влечет за собой существенное ограничение режимов работы гидросистем и увеличение их стоимости, поэтому речь идет об обеспечении наименее эрозионно-опасной формы кавитации). Динамические воздействия на полость, согласно различным схемам захлопывания, приведены на рис. 3 и 4 [2]. На рис. 3 приняты следующие обозначения: верхняя кривая — одно деление $18,3 \cdot 10^5$ Па, напряжения на обмотке — МСВ; нижняя кривая — одно деление по вертикали 50 В, развертка — одно деление 5 мкс.

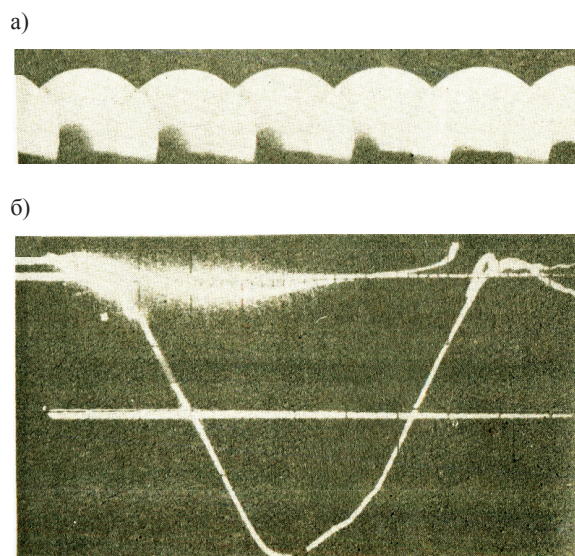


Рис. 3. Динамическое воздействие полости при первом типе ее замыкания в воде: а — кинограмма последних стадий замыкания полости (размер кадра 0,57 мм); б — осциллограммы импульса давления

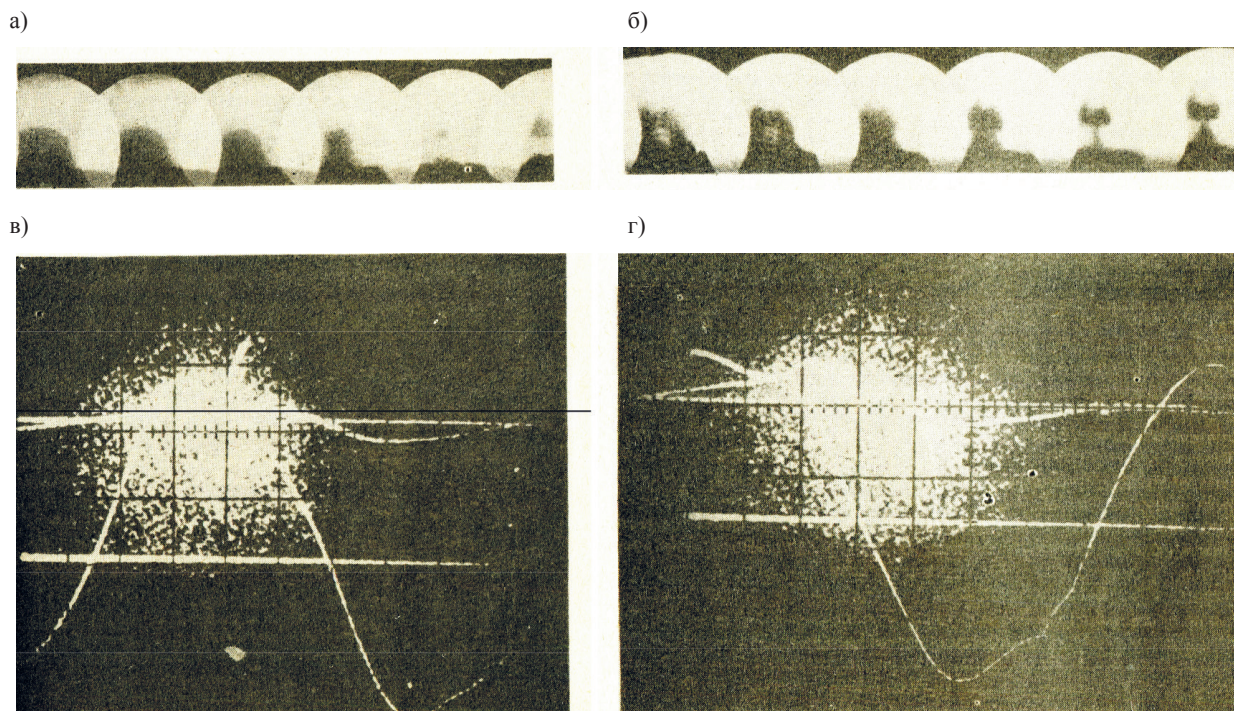


Рис. 4. Динамические воздействия полости при втором (слева) и четвертом (справа) типах ее замыкания в воде:
а, б — кинограмма последних стадий (размер кадра 0,57 мм);
в, г — осциллограммы импульса давления и напряжения на обмотке МСВ

Дальнейшие исследования в этом направлении привели к практическим предложениям по снижению кавитационного воздействия [3]–[5].

Теоретические расчеты по взаимодействию пузырьков у твердой стенки, выполненные Ю. В. Гуриковым и приведенные в работе [6], дали основание для предположения об усилении механического воздействия каверны, образовавшейся в результате согласованного замыкания большого числа пузырьков. В соответствии с этой гипотезой схлопывание начинается одновременно на внешней границе скопления пузырьков и сопровождается образованием ударной волны, энергия которой частично аккумулируется кавернами в последующих слоях, находящихся в процессе схлопывания, в результате энергия замыкания интенсифицируется. Согласно численным расчетам, основанным на такой модели, взрывные волны, образующиеся при одновременном схлопывании слоя каверн, могут привести к увеличению давления на порядок по сравнению с давлением, возникающим при схлопывании одиночной каверны. Для проверки этой гипотезы были выполнены экспериментальные исследования кавитационной области с привлечением методов высокоскоростной визуализации.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении экспериментов были использованы следующие методы и материалы:

1. Метод высокоскоростной визуализации, схема которого представлена на рис. 5 и 6.
2. Голограммы записывались на пластинках с разрешающей способностью 3000 линий на миллиметр, чувствительностью 0,5 ед. стандарта, сенсibilизированных на длину волны 0,694 мкм.
3. Пьезокерамические датчики для фиксации импульсов давления при захлопывании кавитационной области.
4. Рубиновый лазер ОГМ-20, гелий-неоновый лазер восстановления голограмм.
5. Кюветы из оптического стекла.

В ходе эксперимента использовались дистиллированная вода однократной и двукратной дистилляции, ионообменные фильтры и др.

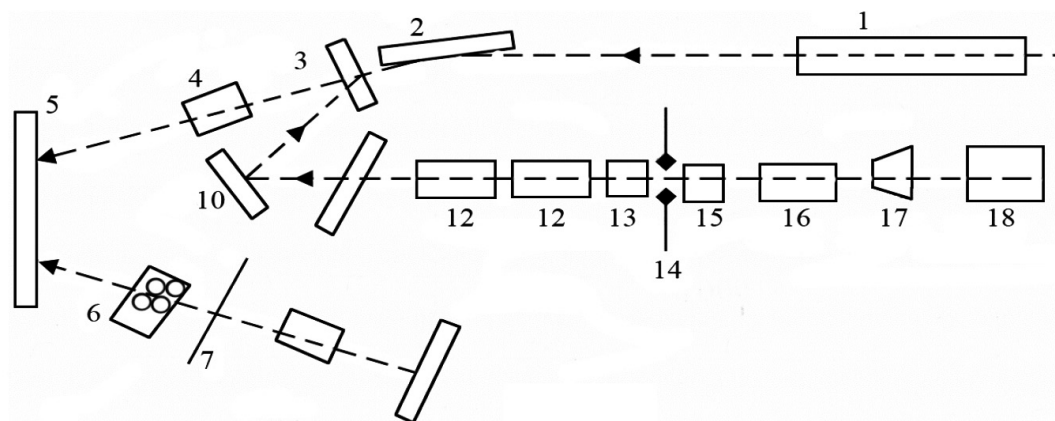


Рис. 5. Схема голографирования кавитационной каверны:

- 1 — газовый лазер; 2 — зеркало; 3 — зеркало; 4 — расширитель; 5 — фотопластинка;
6 — кавитационная кювета; 7 — матовое стекло; 8 — расширитель; 9 — зеркало;
10 — зеркало; 11 — полупрозрачное зеркало; 12 — усилители; 13 — зеркало;
14 — точечное отверстие; 15 — диафрагма; 16 — модулятор добротности;
17 — квантовый генератор; 18 — сферическое зеркало; 19 — газовый лазер

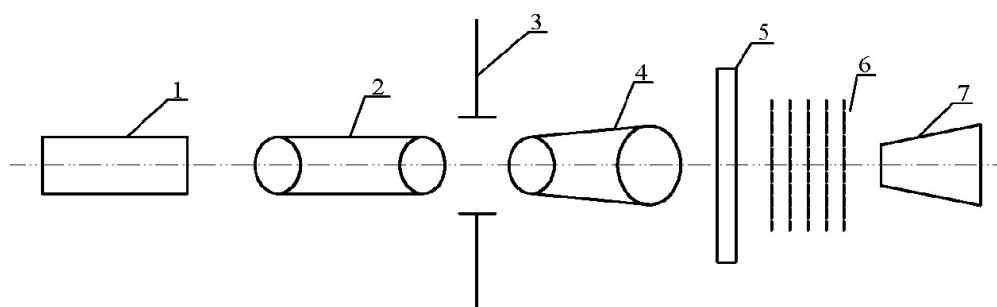


Рис. 6. Схема воспроизведения голограммы:

- 1 — одномодовый гелий — неоновый лазер; 2 — микрообъектив; 3 — точечное отверстие;
4 — расширитель пучка; 5 — голограмма на перемещающемся столике;
6 — восстановление изображения; 7 — микроскоп

Результаты (Results)

Для ансамбля пузырьков возможно только голографическое исследование, обеспечивающее объемное изображение кавитационного поля, включая размеры и взаимное распределение дисперсий двух фаз. Снимались голограммы кавитационной области у поверхности колеблющегося магнитостриктора в разных фазах (расширение, сжатие) и в разных точках каждой фазы в режиме акустической кавитации.

Наиболее перспективной является однолучевая схема при использовании импульсного рубинового лазера с модулированной добротностью и длительностью импульсов излучения $2 \cdot 10^{-8}$ с. Объектом голографирования служит кювета из оптического стекла размерами $2 \times 3 \times 4$ см с исследуемой жидкостью, в которой с помощью магнитострикционного излучателя, работающего от генератора УЗДН-2Т, создается кавитационная область. Был изготовлен специальный блок синхронизации, импульс лазерного излучения привязан к определенной фазе УЗДН-2Т. В результате было четко определено, в какой фазе процесса развития кавитационной области производится съемка голограммы.

Голограммы снимались как в фазе отрицательного давления в жидкости (расширение области), так и в фазе положительного давления (сжатие области). На рис. 7 показаны период изменения давления в жидкости и точки (1–6), в которых проводилась съемка голограммы.

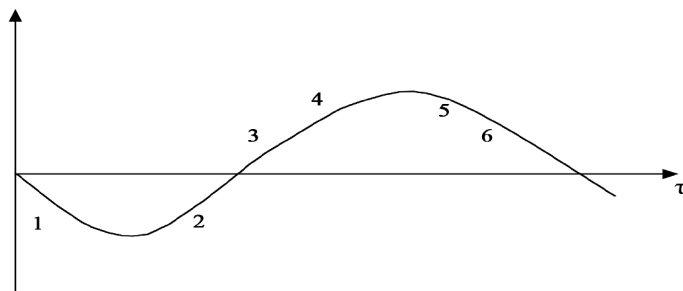


Рис. 7. Изменение давления в жидкости в течение периода колебания излучателя:
1–6 — точки фазы колебаний давления, в которых сняты голограммы

На основе анализа голограмм, снятых в разных фазах периода колебаний кавитационной области на концентраторе большого диаметра ($d = 5 \text{ мм}$), можно сделать вывод о том, что динамический импульс индуцирует несколько полостей, находящихся в разных точках поверхности (рис. 8).

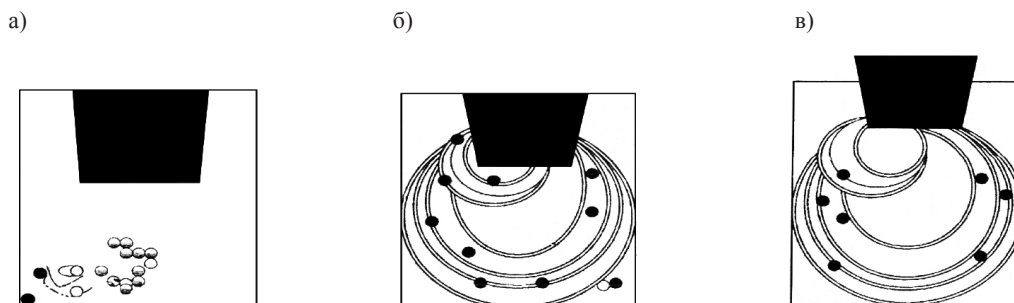


Рис. 8. Изображения, полученные с голограмм на концентраторе диаметром 5 мм:
а — в точке 2; б — в точке 4; в — в точке 5 периода колебаний излучателя

Динамический импульс фиксируется на голограмме в виде волны давления — расходящихся темных полос. Эти импульсы при замыкании полостей возникают на последних стадиях действия положительного давления ($\sim 1/4$ полупериода). Анализ голограмм кавитационной области, снятых на концентраторе малого диаметра ($d = 2,36 \text{ мм}$), показывает, что динамический импульс индуцирует полости, находящиеся в центральной области концентратора (рис. 9).

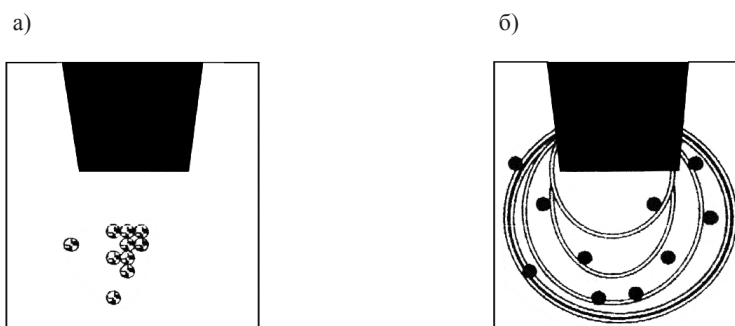


Рис. 9. Изображения, полученные с голограмм на концентраторе диаметром 2,36 мм:
а — в точке 2; б — в точке 5 периода колебаний излучателя

Измерения отдельных пузырьков в кавитационной области в стадии максимального роста показали, что средний диаметр отдельного пузырька составляет $d_{\text{ср}} = 79,85 \pm 10,5 \text{ мкм}$ ($d_{\text{max}} = 121 \text{ мкм}$, $d_{\text{min}} = 47 \text{ мкм}$). Средний объем кавитационной области в период ее максимального развития составляет $V_{\text{max}} = 0,1153 \text{ мм}^3$ (диаметр основания — $0,730\text{--}0,866 \text{ мм}$, высота — $0,436\text{--}0,860 \text{ мм}$), минимальный объем кавитационной области в стадии замыкания $V_{\text{max}} = 0,00218,1 \text{ мм}^3$ (диаметр осно-

вания — 0,244 мм, высота — 0,140 мм). Таким образом, объем кавитационной области уменьшается в стадии сжатия в 53 раза. Сопоставление объемов области и отдельной полости показывает, что область может содержать более 500 отдельных кавитационных пузырьков. В таблице представлены результаты обработки интерферограммы, зафиксированной при замыкании области.

Результаты обработки интерферограммы

Расстояние между волнами давления, мкм	Время прохождения волны давления, 10^{-8} с
535	35,7
507	33,8 (наиболее интенсивные волны давления)
188	12,53
256	17,07
154	10,27
157	10,47
106	7,07
107	7,13
81	5,4
82	5,46
74	4,93
66	4,4
64	4,27
66	4,4

Временные интервалы Δt между отдельными полосами определяли по расстоянию между ними Δl при допущении, что ударные волны распространяются со скоростью, близкой к скорости звука в жидкости ~ 1500 м/с. Следует отметить, что временной интервал между наиболее интенсивными волнами давления составляет $\sim 0,7$ мкс.

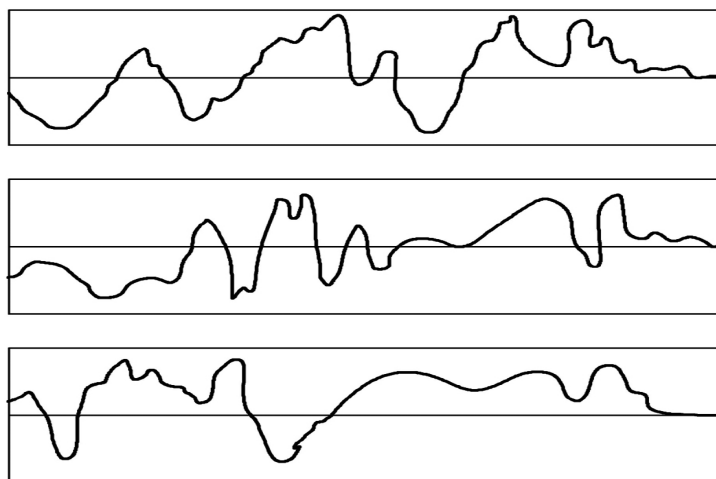


Рис. 10. Осциллограммы импульсов давления при замыкании кавитационной области (время развертки 2,5 мкс/деление)

С помощью пьезокерамического датчика были проведены исследования замыкания кавитационной области, создаваемой на концентраторе с диаметром 2,33 мм. Анализ осциллограммы импульсов давления (рис. 10, на котором по горизонтали указано время в мкс, по вертикали — давление в Па), зафиксированных гидрофоном, установленным на расстоянии ~ 1 мм (вне кавитационной области) от торца концентратора, показывает, что при единичном замыкании кавитационной области возникают два–пять динамических импульсов во временном диапазоне ~ 5 мкс. Отдельные импульсы отстают друг от друга во времени на 0,5–1,5 мкс, время нарастания отдельного динамического давления составляет около 0,7–1,5 мкс.

На осциллограммах импульсов давления, записанных с гидрофона при замыкании кавитационной области, видно, что полное замыкание области происходит не в каждом периоде изменения давления. Это явление теоретически описано в работах [7]–[9], где показано, что с ростом амплитуды акустического давления кавитационный пузырек не успевает захлопнуться в течение одного периода. Согласно данным, полученным на основе проведенных в исследовании опытов, амплитуда изменения давления составляет $\sim 0,5 \times 10^5$ Па, захлопывание происходит в каждом периоде.

На основании полученных результатов сделаны некоторые расчетные оценки. Оценка времени замыкания кавитационной полости при данных условиях опыта ($r_{\max} = 40 \cdot 10^{-6}$ м, $P_{\text{зам}} = 10^6$ Па) по формуле Рэлея $t_{\text{зам}} = 0,915 \cdot \tau_{\max} \sqrt{P/P_{\text{зам}}}$ составляет $\sim 0,5$ мкс. Эта величина приблизительно на порядок больше интервала Δt между отдельными интерференционными полосами на голограмме.

Исходя из того, что отношение максимального и минимального объемов кавитационной области $V_{\max}/V_{\min} = 53$, можно оценить степень уменьшения линейного размера $r_{\max}/r_{\min} = 3,8$. Таким образом, минимальный радиус пузырька соответствует $\sim 10,7$ мкм. Отсюда средняя скорость движения границы области за время, равное четверти периода: $V_{\text{ср}} = 4\Delta r/T \cong 10$ м/с, на последних стадиях замыкания $V_{\max} \cong 60$ м/с. Сопоставление уровней давления, возникающих при замыкании кавитационной полости, дает следующую картину.

В случае сферического замыкания

$$P_{\max} = P_0 \left(\frac{V_{\max}}{V_{\min}} \right)^\gamma.$$

Здесь P_0 — начальное давление газа в полости (принято $P_0 = 2 \cdot 10^3$ Па), показатель адиабаты принят равным $4/3$, $P_{\max} = 4 \cdot 10^5$ Па.

В случае удара струи:

$$P_{\text{уд. ср}} = \rho c V_{\text{ср}} = 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^3 \cdot 1 = 150 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$P_{\text{уд. max}} = \rho c V_{\max} = 900 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

Таким образом, наиболее вероятным механизмом динамического воздействия является удар струи, возникающей при потере устойчивости, замыкающейся полостью.

Сравним полученные результаты с расчетом. Как известно, для сил Бьеркнеса (F_B) между двумя подобными пузырьками, имеющими колебательную скорость поверхностей сфер (V_0),

$$F_B = \frac{4}{3} \pi \rho r_0^3 r_0^2 = \frac{V_0 V_1}{(2h)^2} \cos \varphi.$$

Определим V_0 при $h = 10^3 \cdot 10^{-6}$ и $\cos \varphi \approx 1$ при условии равновесия пузырька $F_B = F_{\text{всп}} = (4/3) \pi r_0^3 \rho q$.

$$\text{Тогда } V_0 = 2h \sqrt{\frac{q}{3r_0}} = 2 \cdot 10^{-3} \sqrt{\frac{10}{3 \cdot 5 \cdot 10^{-5}}} \cong 0,5 \text{ м/с}.$$

Скорость движения пузырька в ряде положений (квазистационарное приближение): $\bar{n} = \frac{n}{r_0} = 18, 17, 16 \dots 2, 1$; $V_1 = \frac{r_0 V_0^2}{6Vn^2} - 2q \frac{r_0^2}{9V}$, имеет значения: $V_{10} = 0,0145$, $V_5 = 0,0745$, $V_4 = 0,12$, $V_2 = 0,5$ м/с, т. е. имеет место ускорение движения пузырька к стенке и друг к другу.

Напрашивается вывод о том, что примерно 500 пузырьков, занимающих объем $0,00218$ мм³ (в стадии сжатия), двигаясь друг к другу и одновременно к твердой поверхности, на последней стадии объединяются в два–пять объединенных пузырьков и захлопываются на поверхности концентратора, видимо, по кумулятивному механизму (возможно, и по другим, еще не исследованным механизмам), что видно по двум–пяти волнам давления, фиксируемым на голограммах. Как видно из голограмм, на глубоких стадиях сжатия (точки 5, 6) кавитационной области (как отмечалось ранее, поиск самых глубоких стадий сжатия еще необходимо продолжить) исследуемые в работе 500 пузырьков исчезли из поля зрения, а сферические волны давления исходят из одной или нескольких точек поверхности концентратора, что подтверждает факт слияния

пузырьков с одновременным их движением к твердой поверхности. Их на два порядка меньше, чем было в фазе расширения. Факт взаимодействия и усиления коллапса микропузырьков подтвержден в работах [10]. На фотографиях (рис. 11) зарегистрирована вторичная волна сжатия и видны волны давления при захлопывании малого пузырька [10]. В жидкости с пузырьками разного диаметра происходит перераспределение энергии. Малые пузырьки схлопываются под воздействием волн давления от больших пузырьков.

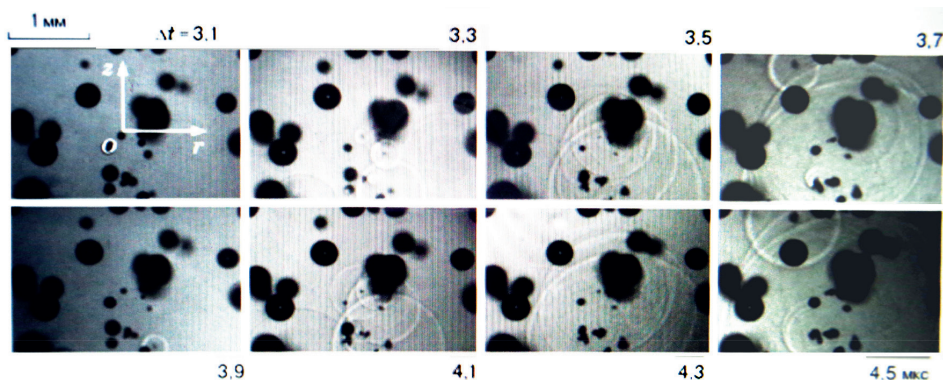


Рис. 11. Кадры высокоскоростной микроскопической киносъемки взаимодействия большого и малого кавитационных пузырьков

С помощью скоростной голографической киносъемки [11] получена серия последовательных по времени голограмм (рис. 12), причем фокус каждого кадра смещается на 0,4 мм [11]. В процессе анализа объемного изображения кавитационного поля В. Эбелинг [11] построил траектории кавитационных пузырьков в пространстве, длину пробега пары пузырьков друг к другу, их слияние и коллапс, что также подтверждают проведенные в данной работе голографические исследования.

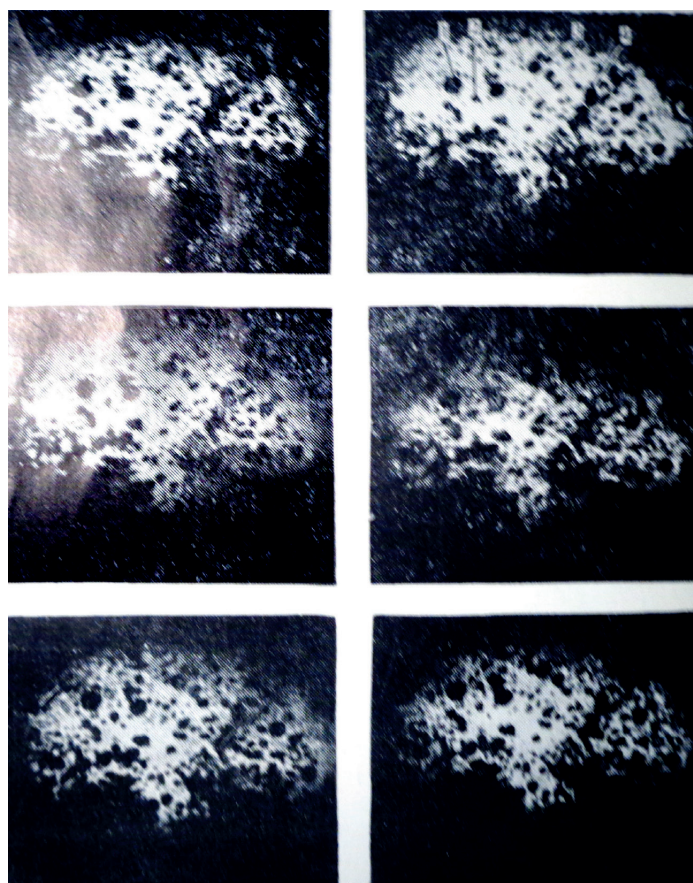


Рис. 12. Кадры голографической киносъемки объема кавитационного поля

Обсуждение (Discussion)

Выполненное исследование подтвердило предположение, сделанное в работе [6] — доказан факт слияния пузырьков с одновременным их движением к твердой поверхности. Предпочтительной причиной кавитационного разрушения твердой поверхности является гидродинамический удар струи жидкости, который примерно в 250 раз сильнее удара в случае сферического замыкания кавитационной полости. Однако, на наш взгляд, заключительная стадия захлопывания полости фиксируется с недостаточной точностью и процессы, происходящие при коллапсе пузырька, пока неизвестны [12]–[14]. Во многих последних исследованиях утверждается, что при сжатии пузырька происходит формирование ударной волны в газе [15]–[17], которая фокусируется в малой области у центра пузырька, создавая при этом температуру в миллионы градусов [18]. Представляет интерес работа [19], в которой с помощью мощного компьютера моделируется движение каждой из 106 частиц газа в сжимающемся сферическом пузырьке. В этом случае число априорных допущений сводится к минимуму, что должно увеличить точность расчетов.

Результаты моделирования показали, что в газе действительно образуется ударная волна, а максимальные температуры достигают 50 000 К для аргона и 500 000 К для ксенона. Авторы указанных ранее работ отмечают, что для стандартного термодинамического анализа число частиц недостаточно, однако мощность современных компьютеров не позволяет увеличить их число хотя бы на порядок. С другой стороны, результаты многих работ не подтверждают образования ударной волны в пузырьке. Например, в статье [20] показано, что ударная волна формируется лишь в некоторых специально созданных условиях, обеспечивающих очень высокие ускорения стенки пузырька, для этой цели предлагается использовать дополнительный высокочастотный импульс давления, прикладываемый в момент, близкий к моменту максимального сжатия пузырька. Таким образом, вопрос об ударно-волновой природе эффектов кавитации в настоящее время продолжает оставаться открытым. Как видно из выполненного краткого анализа теоретических работ, только эксперимент может дать окончательный ответ. Большие возможности открывают последние достижения в области высокоскоростной визуализации, которые дают возможность увидеть заключительную стадию коллапса кавитационной полости, в частности, оптические методы цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry — PIV), разрабатываемые в Институте теплотехники им. С. С. Кутателадзе СО РАН [21].

Заключение (Conclusion)

На основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что новый способ управления кавитационным процессом на базе открытых ранее четырех типовых схем сжатия кавитационных полостей по снижению интенсивности эрозионного воздействия является альтернативой созданию дорогостоящих кавитационностойких материалов. Достаточно привести некоторые примеры удачного осуществления этого принципа: аэрация кавитационной каверны, суперкавитация, воздействие на структуру кавитационной области с помощью электромагнитных и магнитных полей, охлаждение твердой поверхности, изменение ее шероховатости и смачиваемости, изменение физико-химических свойств рабочих жидкостей, конструктивные мероприятия и т. д. [22]–[24].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гривнин Ю. А. Экспериментальное исследование динамики одиночной кавитационной полости / Ю. А. Гривнин, С. П. Зубрилов, В. А. Ларин // Труды ЛИВТ. — 1979. — № 166. — С. 25–34.
2. Grivnin U. A. The investigation of the collapse mechanism of the non-spheric cavitation recesses in liquids with different physical properties / U. A. Grivnin, S. P. Zubrilov, V. A. Larin // Proceedings of sixth conference on fluid machinery. — Budapest, 1979. — Vol. 1. — Pp. 457–466.
3. Зубрилов С. П. Физико-химические свойства воды и прикладные аспекты гидродинамической кавитации / С. П. Зубрилов. — СПб.: СПГУВК, 2010. — 120 с.
4. Зубрилов С. П. Микрозагрязнители в питьевой воде городов. Безреагентная очистка воды / С. П. Зубрилов. — СПб.: ГУМРФ имени адмирала С. О. Макарова, 2018. — 154 с.

5. Зубрилов С. П. Исследование структуры воды и ее стабилизация кислородом / С.П. Зубрилов / С. П. Зубрилов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2018. — Т. 10. — № 6. — С. 1234–1243. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1234-1243.
6. Зубрилов С.П. Гидромеханика быстротекущих процессов / С. П. Зубрилов. — Л.: ЛИВТ, 1991. — 60 с.
7. Прис К. Эрозия / К. Прис. — М.: Мир, 1982. — 465 с.
8. Акуличев В. А. Кавитация в криогенных кипящих жидкостях / В. А. Акуличев. — М.: Наука, 1978. — 278 с.
9. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация / М. Г. Сиротюк. — Наука, 2008. — 271 с.
10. Воронин Д. В. Вторичные акустические волны в полидисперсной пузырьковой среде / Д. В. Воронин, Г.Н. Санкин, В.С. Тесленко, Р. Меттин, В. Лаутерборн // Прикладная механика и техническая физика. — 2003. — Т. 44. — № 1 (257). — С. 22–32.
11. Ebeling K. K. Holographic cavitation research / K. K. Ebeling // Proc. Soc. Photo-Optic. Instrum. Engin. — 1977. — Vol. 136. — Pp. 348.
12. Padilla-Martinez J. P. Optic cavitation with CW lasers: A review / J. P. Padilla-Martinez, C. Berrospe-Rodriguez, G. Aguilar, J. C. Ramirez-San-Juan, R. Ramos-Garcia // Physics of Fluids. — 2014. — Vol. 26. — Is. 12. — Pp. 122007. DOI: 10.1063/1.4904718.
13. Garen W. Experimental Investigation of Shock-Bubble Properties at the Liquid–Air Phase Boundary / W. Garen, B. Meyerer, Y. Kai, W. Neu, S. Koch, U. Teubner // 30th International Symposium on Shock Waves 2. — Springer, Cham, 2017. — Pp. 1153–1157. DOI: 10.1007/978-3-319-44866-4_63.
14. Wang Q. Multi-oscillations of a bubble in a compressible liquid near a rigid boundary / Q. Wang // Journal of Fluid Mechanics. — 2014. — Vol. 745. — Pp. 509–536. DOI: 10.1017/jfm.2014.105.
15. Потемкин Ф. В. Динамика распространения ударных волн и кавитационных пузырей в зависимости от энергии падающего остророфокусированного фемтосекундного лазерного излучения / Ф. В. Потемкин, Е. И. Мареев // Ученые записки физического факультета Московского университета. — 2013. — № 4. — С. 46–54.
16. Жаров А. Н. О влиянии движения газа внутри заряженного пузырька в жидкости на параметры его осцилляций / А.Н. Жаров, А.И. Григорьев // Журнал технической физики. — 2004. — Т. 74. — № 11. — С. 13–21.
17. Жаров А. Н. Нелинейные капиллярные колебания заряженного пузырька в идеальной диэлектрической жидкости / А. Н. Жаров, А. И. Григорьев, И. Г. Жарова // Журнал технической физики. — 2006. — Т. 76. — № 10. — С. 41–50.
18. Nigmatulin R. I. Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion / R. I. Nigmatulin, I. S. Akhatov, A. S. Topolnikov, R. K. Bolotnova, N. K. Vakhitova, R. T. Lahey Jr, R. P. Taleyarkhan // Physics of fluids. — 2005. — Vol. 17. — Is. 10. — Pp. 107106. DOI: 10.1063/1.2104556.
19. Ruuth S. J. Molecular dynamics simulation of the response of a gas to a spherical piston: Implications for sonoluminescence / S. J. Ruuth, S. Putterman, B. Merriman // Physical Review E. — 2002. — Vol. 66. — Is. 3. — Pp. 036310. DOI: 10.1103/PhysRevE.66.036310.
20. Thomas J. L. Inhomogeneous pressure field inside a collapsing bubble accelerated by an acoustic pulse / J. L. Thomas // Physical Review E. — 2004. — Vol. 70. — Is. 1. — Pp. 016305. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.016305.
21. Кравцова А. Ю. Экспериментальное исследование кавитационного обтекания двумерных гидрокрыльев: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук: 01.02.05 / А. Ю. Кравцова. — Новосибирск: ФГБОУН Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе (Сибирское отд. РАН), 2018. — 22 с.
22. Гривнин Ю. А. Кавитация на поверхности твердых тел / Ю.А. Гривнин, С.П. Зубрилов. — Л.: Судостроение, 1985. — 121 с.
23. Кравцова А. Ю. Кавитация на пластине с закругленной носовой частью и гидрокрыле НАСА0015: визуализация и измерение скорости / А.Ю. Кравцова, Д.М. Маркович, К.С. Первунин, М.В. Тимошевский, К. Ханьялич // Известия Российской академии наук. Энергетика. — 2014. — № 4. — С. 96–106.
24. Reuter F. Bubble size measurements in different acoustic cavitation structures: filaments, clusters, and the acoustically cavitiated jet / F. Reuter, S. Lesnik, K. Ayaz-Bustami, G. Brenner, R. Mettin // Ultrasonics sonochemistry. — 2019. — Vol. 55. — Pp. 383–394. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.003.

REFERENCES

1. Grivnin, Yu. A., S. P. Zubrilov, and V. A. Larin. “Eksperimental’noe issledovanie dinamiki odinochnoi kavitatsionnoi polosti.” *Trudy LITV* 166 (1979): 25–34.

2. Grivnin, U. A., S. P. Zubrilov, and V. A. Larin. "The investigation of the collapse mechanism of the non-spheric cavitation recesses in liquids with different physical properties." *Proceedings of sixth conference on fluid machinery*. Vol. 1. Budapest, 1979. 457–466.
3. Zubrilov, S. P. *Fiziko-khimicheskie svoistva vody i prikladnye aspekty gidrodinamicheskoi kavitatsii*. SPb.: SPGUVK, 2010.
4. Zubrilov, S. P. *Mikrozagryazniteli v pit'evoi vode gorodov. Bezreagentnaya ochestka vody*. SPb.: GUMRF imeni admirala S. O. Makarova, 2018.
5. Zubrilov, Sergey P. "Investigation of water structure and its oxygen stabilization." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 10.6 (2018): 1234–1243. DOI: 10.21821/2309-5180-2018-10-6-1234-1243.
6. Zubrilov, S. P. *Gidromekhanika bystroprotekayushchikh protsessov*. L.: LIVT, 1991.
7. Pris, K. *Eroziya*. M.: Mir, 1982.
8. Akulichev, V. A. *Kavitatsiya v kriogennykh kipyashchikh zhidkostyakh*. M.: Nauka, 1978.
9. Sirotyuk, M. G. *Akusticheskaya kavitatsiya*. Nauka, 2008.
10. Voronin, D. V., G.N. Sankin, V. S. Teslenko, R. Mettin, and V. Lauterborn. "Vtorichnye akusticheskie volny v polidispersnoi puzyr'kovoi srede." *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika* 44.1(257) (2003): 22–32.
11. Ebeling, K. K. "Holographic cavitation research." *Proc. Soc. Photo-Optic. Instrum. Engin* 136 (1977): 348.
12. Padilla-Martinez, J. P., C. Berrospe-Rodriguez, G. Aguilar, J.C. Ramirez-San-Juan, and R. Ramos-Garcia. "Optic cavitation with CW lasers: A review." *Physics of Fluids* 26.12 (2014): 122007. DOI: 10.1063/1.4904718.
13. Garen, W., B. Meyerer, Y. Kai, W. Neu, S. Koch, and U. Teubner. "Experimental Investigation of Shock-Bubble Properties at the Liquid–Air Phase Boundary." *30th International Symposium on Shock Waves 2*. Springer, Cham, 2017. 1153–1157. DOI: 10.1007/978-3-319-44866-4_63.
14. Wang, Qianxi. "Multi-oscillations of a bubble in a compressible liquid near a rigid boundary." *Journal of Fluid Mechanics* 745 (2014): 509–536. DOI: 10.1017/jfm.2014.105.
15. Potemkin, F. V., and E. I. Mareev. "Shock waves and cavitation bubbles dynamics as a function of the tightly focused femtosecond laser energy in distilled water and acetone." *Uchenye zapiski fizicheskogo fakul'teta Moskovskogo universiteta* 4 (2013): 46–54.
16. Zharov, A. N., and A. I. Grigor'ev. "Influence of gas motion inside a charged bubble in a liquid on the parameters of bubble oscillations." *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 49.11 (2004): 1404–1414. DOI: 10.1134/1.1826183.
17. Zharov, A. N., A. I. Grigor'ev, and I. G. Zharova. "Nonlinear capillary vibration of a charged bubble in an ideal dielectric liquid." *Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics* 51.10 (2006): 1293–1303.
18. Nigmatulin, Robert I., Iskander Sh. Akhatov, Andrey S. Topolnikov, Raisa Kh. Bolotnova, and Nailya K. Vakhitova. "Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion." *Physics of fluids* 17.10 (2005): 107106. DOI: 10.1063/1.2104556.
19. Ruuth, Steven J., Seth Putterman, and Barry Merriman. "Molecular dynamics simulation of the response of a gas to a spherical piston: Implications for sonoluminescence." *Physical Review E* 66.3 (2002): 036310. DOI: 10.1103/PhysRevE.66.036310.
20. Thomas, Jean-Louis. "Inhomogeneous pressure field inside a collapsing bubble accelerated by an acoustic pulse." *Physical Review E* 70.1 (2004): 016305. DOI: 10.1103/PhysRevE.70.016305.
21. Kravtsova, A. Yu. Eksperimental'noe issledovanie kavitatsionnogo obtekaniya dvumernykh gidrokryl'ev. Abstract of PhD diss. Novosibirsk: FGBOUN Institut teplofiziki im. S.S. Kutateladze, Sibirskoe otdelenie RAN, 2018.
22. Grivnin, Yu. A., and S. P. Zubrilov. *Kavitatsiya na poverkhnosti tverdykh tel*. L.: Sudostroenie, 1985.
23. Kravtsova, A. Yu., D. M. Markovici, K. S. Pervunin, M. V. Timoshevskiy, and K. Hanjalic. "Cavitation on a semi-circular leading-edge flat plate and NACA0015 hydrofoil: visualization and velocity measurements." 4 (2014): 96–106.
24. Reuter, Fabian, Sergey Lesnik, Khadija Ayaz-Bustami, Gunther Brenner, and Robert Mettin. "Bubble size measurements in different acoustic cavitation structures: filaments, clusters, and the acoustically cavitated jet." *Ultrasonics sonochemistry* 55 (2019): 383–394. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.003.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Зубрилов Сергей Павлович —

доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: zubrilovsergei@yandex.ru,
kaf_ovrb@gumrf.ru

Растрыгин Николай Васильевич —

кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»

198035, Россия, г. Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7

e-mail: rastryginnv@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Zubrilov, Sergey P. —

Dr. of Technical Sciences, professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation

e-mail: zubrilovsergei@yandex.ru,
kaf_ovrb@gumrf.ru

Rastrygin, Nikolay V. —

PhD, associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping

5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
Russian Federation

e-mail: rastryginnv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 26 июня 2019 г.

Received: June 26, 2019.