

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-96-106

FILAMENTOUS CAVITATION CAVERNS AND POSSIBILITY TO REDUCE THE CAVITATION EROSION

S. P. Zubrilov, N. V. Rastrygin

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

An approach to solving the problem of reducing cavitation destruction of internal combustion engines, ship propellers, elements of hydraulic structures by using modern (Onsager, Prigogine) concepts and apparatus of nonequilibrium thermodynamics to control the cavitation process is presented. It is believed that the ideas of Rayleigh cavitation and modern modifications do not take into account the interactive, bifurcation nature of changes in the properties of substances and phenomena of the cavitation process. Visualization (holography with an exposure of 20 NS) of the cavitation region revealed threadlike, extended cavitation caverns that can be used for avalanche nucleation and cavitation control. The object of research is the cavitation region in water and its effect on the solid surface. The subject of research is the detection of bubbles in the threads form at the stage of liquid stretching and the possibility of their use to reduce the erosive effect of cavitation. The following experimental methods are used in the research: high-speed holographic imaging, interferography and acoustic cavitation. The proof of existence of cavitation bubbles in the form of filaments of different direction, type and extent in the phase of expansion of the cavitation region is given. Attention is drawn to the fact that during the experiment at the stages of compression of the cavitation region, such «bubbles» disappeared from the field of view, which confirms the fact of their existence only in the phase of the cavitation region expansion. It is recorded that the transverse size of such cavitation filaments is the same throughout the expansion phase. The processes and phenomena manifested at the stages of the cavitation region expansion are theoretically and experimentally substantiated. It is revealed that extended cavities can be used for avalanche nucleation of spherical bubbles in order to control the cavitation process. It is noted that modern optical methods of digital tracer visualization, which allow you to see in detail the stages of the cavitation process, have the great prospects. A new way to control the cavitation process on the basis of the study is an alternative to the creation of expensive cavitation-resistant materials.

Keywords: cavitation, hologram, bubble, threadlike cavities, the cavitation area, erosion, non-equilibrium thermodynamics.

For citation:

Zubrilov, Sergey P., and Nikolay V. Rastrygin. "Filamentous cavitation caverns and possibility to reduce the cavitation erosion." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala* S. O. Makarova 12.1 (2020): 96–106. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-96-106.

УДК 502.656.628

НИТЕВИДНЫЕ КАВИТАЦИОННЫЕ ПОЛОСТИ И ВОЗМОЖНОСТЬ СНИЖЕНИЯ КАВИТАЦИОННОЙ ЭРОЗИИ

С. П. Зубрилов, Н. В. Растрыгин

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

Рассмотрен подход к решению проблемы снижения кавитационного разрушения двигателей внутреннего сгорания, судовых винтов, элементов гидротехнических сооружений путем привлечения современных представлений (принципы Онсагера и Пригожина) и аппарата неравновесной термодинамики для управления кавитационным процессом. Считается, что представления о кавитации Релея и современные модификации не учитывают интерактивный, бифуркационный характер изменений свойств веществ и явлений кавитационного процесса. Визуализацией (голографией с экспозицией в 20 нс) кавитационной области обнаружены нитевидные протяженные кавитационные каверны, которые можно использовать для лавинной нуклеации и управления кавитацией. Объектом исследований является кавитационная область в воде и ее воздействие на твердую поверхность. Предметом исследований послужило обнаружение



пузырьков в виде нитей на стадии растяжения жидкости и возможность их использования для снижения эрозионного эффекта кавитации. При проведении исследований были использованы следующие экспериментальные методы: высокоскоростная голографическая визуализациия, интерферография и акустическая кавитация. Приведено доказательство существования кавитационных «пузырьков» в виде нитей различных направления, вида и протяженности в фазе расширения кавитационной области. Обращается внимание на то, что при проведении эксперимента на стадиях сжатия кавитационной области такие «пузырьки» исчезли из поля зрения, что подтверждает факт их существования только в фазе расширения кавитационной области. Зафиксировано, что поперечный размер таких кавитационных нитей одинаков во всей фазе расширения. Теоретически и экспериментально обоснованы процессы и явления, проявляющиеся на стадиях расширения кавитационной области. Выявлено, что протяженные каверны можно использовать для лавинного зародышеобразования сферических «пузырьков» в целях управления процессом кавитации. Отмечается, что большие перспективы имеют современные оптические методы цифровой трассерной визуализации, которые позволяют детально увидеть стадии кавитационного процесса. Новый способ управления кавитационным процессом на базе проведенного исследования является альтернативой созданию дорогостоящих кавитационностойких материалов.

Ключевые слова: кавитация, голограмма, пузырек, нитевидные каверны, кавитационная область, эрозия, неравновесная термодинамика.

Для цитирования:

Зубрилов С. П. Нитевидные кавитационные полости и возможность снижения кавитационной эрозии / С. П. Зубрилов, Н. В. Растрыгин // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 96–106. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-96-106.

Введение (Introduction)

Впервые протяженные кавитационные каверны были обнаружены при голографической съемке кавитационного поля при экспозициях в 20 нс. В данной работе, являющейся логическим завершением исследования [1], предлагается новый термодинамический подход для описания кавитационной эрозии элементов судового оборудования, винтов и элементов гидротехнических сооружений. Обобщение работ, посвященных объединению кавитационных полостей у поверхности твердых тел [1]–[4] и экспериментальное голографическое исследование кавитационной области [5], позволили предположить возможность возникновения в кавитационном поле протяженных кавитационных каверн. Следует заметить, что одномерные цепочки в виде кавитационной нити типа «ожерелья» из «пузырьков» (рис. 1) [5] с разрывами между ними наблюдаются при прохождении водяной струи через сопло Лаваля, за винтами судов и т. д. Одномерные агрегаты-цепочки (рис. 2) в ультразвуковых полях детально исследованы И. Ф. Ефремовым [6]. Было доказано, что основной причиной их возникновения является поляризационное взаимодействие.



Рис. 1. Фрагмент цепочки «пузырьков»

Рассмотрим возможность объединения кавитационных «пузырьков» в одномерные агрегаты-цепочки в кавитационных полях. В источнике [5] рассмотрено движение двух одинаковых «пузырьков», приобретающих колебательную скорость поверхностей сфер в ультразвуковом поле



в направлении друг друга (рис. 3), до соприкосновения под действием сил Бьеркнеса. Были выполнены расчеты скорости движения «пузырьков» в ряде положений и установлено нелинейное (квазистационарное приближение) нарастание скорости по мере их приближения друг к другу.



Рис. 2. Одномерные агрегаты-цепочки по И. Ф. Ефремову:
 а — схема образования одномерных агрегатов из частиц канифоли (1–3) и серы (4)
 в 0,0001 М водном растворе NaCI; б — электронная микрофотография одномерных агрегатов из частиц эпоксидной смолы ЭД-5 в ацетоне (×70000)



Рис. 3. Схема цепочки из пузырьков

Существует и ряд других сил (Бернулли, Кёнега), которые могут заставить «пузырьки» двигаться в направлении друг друга (например, сила дрейфа пузырьков к центрам микровихрей, возникающих в объеме жидкости, в кавитационном поле и др.). Известно, что между «пузырьками» также действуют силы электромагнитной природы. Отклик кавитационного «пузырька» на внешние электромагнитные поля не вызывает в настоящее время сомнений [7]. Пульсирующие рядом и перемещающиеся относительно друг друга два «пузырька», являясь носителями зарядов, будут либо притягиваться, либо отталкиваться.

Энергию этого взаимодействия можно определить по теории устойчивости лиофобных дисперсных систем ДЛФО:

– при притяжении

$$U_{\rm m} = -\pi K r / 12h; \tag{1}$$

– при отталкивании

$$U_{\rm or} = \xi \psi_0^2 r / 2 \ln(1 + \exp(-kh));$$

$$k = (8\pi (ze) 2 n / \xi RT)^{1/2},$$
(2)

где r — радиус частицы («пузырька»); h — расстояние между «пузырьками» (внутренними поверхностями); ψ — потенциал поверхности; K — константа молекулярных сил; ξ — диэлектрическая проницаемость; n — счетная концентрация частиц; k — параметр Дебая – Хюккеля; z валентность противоионов; e — заряд электрона; R — константа Больцмана; T — температура по абсолютной шкале.



Опуская промежуточные вычисления и принимая некоторые допущения, получим энергию взаимодействия между «пузырьками», находящимися на расстоянии $h \cong 400$ Å при $r \cong 1000$ Å в пределах 10^{-17} – 10^{-14} эрг. Среднее значение мощности ультразвуковых колебаний при частоте 22 кГц на концентраторе диаметром 5 мм в данных опытах составляет ~15 Вт/см², амплитуда изменения давления — ~50 × 10⁵ Па. Выполненные в настоящем исследовании оценки показывают, что энергия ультразвукового взаимодействия двух «пузырьков», находящихся на расстоянии $h \cong 400$ Å, имеет порядок 10^{-16} эрг.

Таким образом, энергия ультразвукового взаимодействия по порядку величины близка к энергии взаимодействия, рассчитанной по теории устойчивости лиофобных дисперсных систем ДЛФО. На основании ранее изложенного можно сделать вывод о том, что цепочки могут возникать под действием сил электромагнитной природы, усиливающих притяжение пузырьков. Для подтверждения возможности существования в кавитационном поле протяженных каверн было выполнено экспериментальное исследование.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При проведении экспериментов были использованы следующие методы и материалы:

- метод высокоскоростного голографирования, схема которого приведена на рис. 4 и 5;

– голограммы записывались на пластинках с разрешающей способностью 3000 линий на миллиметр чувствительностью 0,5 ед. стандарта, сенсибилизированных на длину волны 0,694 мкм;

– пьезокерамические датчики для фиксации импульсов давления при захлопывании кавитационной области;

– рубиновый лазер ОГМ-20, гелий-неоновый лазер восстановления голограмм;

- кюветы из оптического стекла;
- дистиллированная вода однократной и двукратной дистилляции;
- ионообменные фильтры.



Рис. 4. Схема голографирования кавитационной каверны: 1 — газовый лазер; 2, 3 — зеркало;
4 — расширитель; 5 — фотопластинка; 6 — кавитационная кювета; 7 — матовое стекло;
8 — расширитель; 9, 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. 5. 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



Исследование «ансамбля» пузырьков возможно только методом голографирования, обеспечивающим 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 2–10⁻⁸ с. Объек-



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

том голографирования служит кювета из оптического стекла размером 2 × 3 × 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. При этом точно известно, в какой фазе процесса развития кавитационной области производится съемка голограммы. Голограммы записывались на пластинках с разрешающей способностью 3000 линий на миллиметр чувствительностью 0,5 ед. стандарта, сенсибилизированных на длину вол-

ны 0,694 мкм. Голограммы снимались как в фазе отрицательного давления в жидкости (расширение области), так и в фазе положительного давления (сжатие области). На рис. 6 показан период изменения давления в жидкости и точки *1*–*6*, в которых проводилась съемка голограммы.

Результаты (Results)

На основе анализа голограмм, снятых в разных фазах периода колебаний кавитационной области на концентраторе большого диаметра (*d* = 5мм), можно сделать следующие выводы.

Интересным результатом голографических исследований является обнаружение в ультразвуковых кавитационных полях наряду со сферическими кавитационными пузырьками протяженных кавитационных каверн (в виде агрегатов-цепочек и т. д.), полученных в стадии расширения жидкости (в точки 1 и 2 на рис. 6). Эти протяженные неоднородности толщиной примерно 40 мкм



Рис. 7. Протяженности (агрегаты-цепочки) в кавитационном поле в фазе разрежения, полученные над концентратором диаметром 5 мм

(рис. 7) воспроизводятся постоянно в кавитационных полях, зависят от мощности ультразвука и не являются посторонними включениями, так как фиксируются только во второй половине стадии разрежения. В стадии сжатия таких протяженных неоднородностей на голограммах не наблюдается. Если бы это были какие-либо волокна, то они могли быть обнаружены на всех голограммах как в стадии сжатия, так и в стадии расширения. Таким образом, предположение об объединении нескольких сферических кавитационных пузырьков в искривленную (под действием внешних гидродинамических сил) цепочку экспериментально подтверждается.

Авторами работ [8]–[10] экспериментально подтверждено, что в фазе разряжения в кавитационном

поле возникают в кратковременные интервалы каверны в виде одномерных агрегатов-цепочек (на рис. 8, a, δ и ∂ видны нити из кавитационных «пузырьков», на рис. 9 приведена «акустическая фигура Лихтенберга»), наличие которых теоретически обосновано в работах [11]–[13].





Рис. 8. Микрофотографии кавитационного поля



Рис. 9. Фотография агрегатов-цепочек

На основании фоторегистрации и голографирования завершающей стадии сжатия отдельного кавитационного пузырька и кавитационного поля в целом доказано существование радиальных кумулятивных струй, спиралевидных струй пережатия пузырька, неровностей на его поверхности самого разного вида («вмятины» обратной кривизны, «протуберанцы», «ежи» и т. д.) [5], [14]–[16].

Закручивающаяся (предположительно двойной спиралью) струя делит кавитационный пузырек на две неравные части, расположенные друг над другом у твердой поверхности, а затем радиальная кумулятивная струя может при определенных условиях направляться не к твердой поверхности, а, наоборот, в сторону жидкости, что снижает эффект кавитационной эрозии [2]. Поведение



кавитационного пузырька во взаимодействии с соседними по кавитационному полю при сжатии его с «развалом» и последующим сжатием «осколков» по разному механизму и т. д., из-за бифуркаций, непредсказуемо [5], [17]. Сжимающаяся кавитационная область является областью «обвальных» химических реакций, возмущенных и ионизированных молекул, их радикалов, элементарных частиц, взаимодействия между которыми наблюдаются в условиях нарушения распределения частиц Максвелла – Больцмана и приближенно оцениваются, по Пригожину, как область неравновесных быстрых химических реакций при высоких температурах, а содержимое пузырька является высокотемпературной нейтральной парогазовой плазмой.

Неравновесные быстрые физико-химические процессы в такой плазме, обусловленные как ударами электронов отдельных молекул воды, так и ударами Франка – Герца и их комбинацией, приводят к возбуждению и ионизации молекул воды и примесей, а взаимодействия между их радикалами, элементарными частицами протекают в условиях нарушения распределения



Рис. 10. Схема потоков в кавитационной области

Максвелла – Больцмана. Представляется, что сжатие кавитационной области у твердой стенки с разрушением сжатой плазмы радиальной кумулятивной струей можно описать в терминах термодинамики неравновесных процессов, рассматривая кавитационное поле по нескольким последовательным слоям, в которых преобладают определенные термодинамические потоки и вызывающие их силы (рис. 10). Если в слое *I* находится невозмущенная жидкость, то в слое *II* под действием, например, ультразвука имеют место акустические течения, пульсации и весь этот слой может быть описан достаточно корректно блоком уравнений классической гидромеханики.

Силы в слое *II* достаточно известны, их можно оценить. К ним относятся электроповерхностные неравновесные силы взаимодействия, обладающие постоянным электрическим дипольным моментом, молекуляр-

ные силы Ван-дер-Ваальса – Лондона, силы сопротивления жидких слоев между «пузырьками»: капиллярные, гравитационные и центробежные силы, силы броуновского движения и т. д.

Слой *III* является предметом исследования гидродинамики быстропротекающих процессов (коллапс отдельных кавитационных «пузырьков» и кооперативное их взаимодействие, слияние в цепочки, фрагментация и т. д.).

Слой IV — это «слой взрыва», «обвальных» химических реакций, возмущенных и ионизированных молекул, их радикалов и элементарных частиц. В этих условиях скорости частиц не подчиняются распределению Максвелла – Больцмана и могут быть приближенно оценены по Пригожину – Куртису, а потоки характеризуются, соответственно, кинетическими коэффициентами, пропорциональными коэффициентам теплопроводности, диффузии, вязкости, электропроводности с учетом загрязнения воды ксенобиотиками и коэффициенты Онсагера следует рассчитывать с учетом этих условий [17].

Как известно, потоки L_i связаны с термодинамическими силами X_i:

$$I_{ij} = \sum L_{ij} X_{ij}, \tag{3}$$

где L_{ij} — феноменологические коэффициенты, или коэффициенты Онсагера (в рассматриваемом случае они определяются опытным путем или частично могут быть рассчитаны).

В качестве основы для последующих расчетов принимаем соотношение

$$dS = d_s S + d_s S, \, d_s S \ge 0,\tag{4}$$

где *d*₂*S* — обмен энтропией между системой и средой;

*d*_i*S* — производство энтропии непосредственно в самой системе.



При перекрестных процессах

$$L_{ij} = L_{ji}.$$
 (5)

Локальное производство энтропии в этих случаях

$$\delta = \sum_{ij} X_i L_{ij} X_j.$$
 (6)

По теореме Пригожина $\sigma = \sigma_{min}$ (в стационарном состоянии при заданных внешних условиях, препятствующих достижению равновесия). При отсутствии таких препятствий в состоянии термодинамического равновесия $\sigma = 0$. Следовательно, можно предположить, что сферическая форма пузырьков ($\sigma = \sigma_{min}$) в пульсирующих гидродинамических акустических полях короткие интервалы времени будет не единственная [15], [16].

Основная сложность предлагаемого подхода заключается в определении коэффициентов Онсагера, особенно для зоны IV (см. рис. 10) [14], [18], которые вычисляют на базе экспериментальных данных. Изложенный ранее термодинамический подход получил свое подтверждение в докладе С. Радельбаума (Штутгартский университет) на X Международном кавитационном конгрессе в 2018 г. [19]. Большие перспективы для получения экспериментальных данных имеют современные оптические методы цифровой трассерной визуализации (Particle Image Velocimetry — PIV), разрабатываемые в Институте теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН [15], которые позволят детально увидеть динамику сжатия кавитационного «пузырька» и области, а также динамику разряжения области, включая зарождение, развитие и исчезновение одномерных агрегатов — цепочек «пузырьков» на стадии расширения кавитационной области [16], [17].

В последнее время появились экспериментальные методики (рис. 11) [20], позволяющие осуществлять лазерный пробой жидкости у поверхности раздела «газ – жидкость» и осуществлять съемку ударных волн разного происхождения двумя камерами одновременно, выполняя исследование взаимодействия лазерного «пузырька» с частицей в зависимости от их размеров и расстояния между ними с фиксацией кумулятивных струй [21], что можно использовать для изучения заключительной стадии сжатия кавитационного облака.



Рис. 11. Примеры экспериментальных методик: *а* — схема и вид установки; *б* — скоростная визуализация лазерных пузырьков на границе «газ – жидкость»



Заключение (Conclusion)

Таким образом, на основе проведенного исследования можно сделать вывод о том, что описать кавитацию и кавитационную эрозию невозможно без привлечения термодинамики неравновесных процессов, последовательного решения уравнений потоков. Экспериментально доказано и подтверждено другими авторами в [8]–[10], что в фазе разряжения в кавитационном поле возникают в кратковременные интервалы каверны в виде одномерных нитевидных агрегатов-цепочек, а их наличие обосновано теоретически в [11]–[13]. Поведение таких агрегатов, а тем более их влияние на процессы кавитационной эрозии не изучено и требует соответствующих исследований. Бесспорно, что цепочки в стадии сжатия будут распадаться на множество «пузырьков» (лавинное зародышеобразование исказит структуру кавитационного поля), а эрозия твердой поверхности будет изменяться.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зубрилов С. П. Исследование процесса кавитации и возможности снижения эрозионного износа / С. П. Зубрилов, Н. В. Растрыгин // Вестник Государственного университета 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.

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, K. K. Shalnev // 6th Conference on Fluid Machinery. — Budapest: Akademiai Kiado, 1979. — Vol. 1. — Pp. 457–466.

3. Сиротюк М. Г. Акустическая кавитация / М. Г. Сиротюк. — Наука, 2008. — 271 с.

4. *Акуличев В. А.* Кавитация в криогенных кипящих жидкостях / В. А. Акуличев. — М.: Наука, 1978. — 278 с.

5. *Зубрилов С. П.* Физико-химические свойства воды и прикладные аспекты гидродинамической кавитации / С. П. Зубрилов. — СПб.: СПГУВК, 2010. — 120 с.

6. *Ефремов И.* Ф. Периодические коллоидные структуры / И.Ф.Ефремов. — Л.: Химия, 1971. — 190 с.

7. Безюков О. К. Влияние электрического, магнитного и тепловых полей на кавитацию и кавитационную эрозию / О. К. Безюков, Ю. А. Гривнин, С. П. Зубрилов, В. А. Лаврин // Охрана окружающей среды: сб. науч. тр. — СПб.: Изд-во СПбГУВК, 1993. — С. 15–46.

8. *Reuter F.* Bubble size measurements in different acoustic cavitation structures: filaments, clusters, and the acoustically cavitated jet / F. Reuter, S. Lesnik, K. Ayaz-Bustami, G. Brenner, R. Mettin // Ultrasonics sono-chemistry. — 2019. — Vol. 55. — Pp. 383–394. DOI: 10.1016/j.ultsonch.2018.05.003.

9. *Mettin R.* Acoustic cavitation structures and simulations by a particle model / R. Mettin, S. Luther, C.-D. Ohl, W. Lauterborn // Ultrasonics Sonochemistry. — 1999. — Vol. 6. — Is. 1. — Pp. 25–29. DOI: 10.1016/S1350-4177(98)00025-X.

10. *Аганин А. А.* Динамика расположенных в линию кавитационных пузырьков / А. А. Аганин, А. И. Давлетшин, Д. Ю. Топорков // Вычислительная техника. — 2014. — Т. 19. — № 1. — С. 3–19.

11. *Каратанасис И. К.* Высокоскоростная визуализация вихревой кавитации с использованием синхротронного излучения / И. К. Каратанасис [и др.] // Журнал механики жидкости. — 2018. — Т. 838. — С. 148–164.

12. *Ohl S. W.* Bubble Dynamics and High Intensity Focused Ultrasound: Experimental Observations and Numerical Simulations using Boundary Element Method / S. W. Ohl, E. Klaseboer, B. C. Khoo // Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018). — ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch29.

13. *Beig S. A.* Bubble-Bubble Interactions and Wall Pressures Produced by the Collapse of a Bubble Pair near a Rigid Surface / S. A. Beig, E. Johnsen // Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018). — ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch30.

14. *Зубрилов С.П.* Эффекты, сопровождающие сжатие кавитационных пузырьков / С. П. Зубрилов, А. С. Зубрилов // Журнал физической химии. — 1998. —Т. 72. — № 11. — С. 2066–2068.

15. *Кравцова А. Ю.* Экспериментальное исследование кавитационного обтекания двумерных гидрокрыльев: дис. ... канд. физ.-мат. наук; спец.: 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» / А. Ю. Кравцова. — Новосибирск: Ин-т теплофизики им. С. С. Кутателадзе СО РАН, 2018. — 139 с.



16. *Зубрилов А. С.* Кавитационные каверны в виде одномерных агрегатов-цепочек / А. С. Зубрилов, С. П. Зубрилов // Журнал физической химии. —1997. — Т. 71. — № 7. — С. 1336–1338.

17. *Пригожин И*. От существующего к возникающему: время и сложность в физических науках / И. Пригожин; пер. с англ. — 3-е изд.— М.: Комкнига, 2006. — 296 с.

18. *Зубрилов С. П.* Сопоставление различных механизмов кавитации / Краткие сообщения / С. П. Зубрилов // Журнал физической химии. — 2000. — Т. 74. — № 9. — С. 1700–1701.

19. Vanovskiy V. The Numerical Scheme for the History Force Integrals in Hydrodynamics / V. Vanovskiy // Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018). — ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch196.

20. *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.

21. Lv L. Experimental investigations of the particle motions induced by a laser-generated cavitation bubble / L. Lv, Y. Zhang, Y. Zhang // Ultrasonics sonochemistry. — 2019. — Vol. 56. — Pp. 63–76. DOI: 10.1016/ j.ultsonch.2019.03.019.

REFERENCES

1. 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): 705–717. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-4-705-717.

2. Grivnin, U. A., S. P. Zubrilov, and V. A. Larin. "The investigation of the collapse mechanism of the nonspheric cavitation recesses in liquids with different physical properties." *Proceedings of sixth conference on fluid machinery*. Vol. 1. Budapest: Akademiai Kiado, 1979. 457–466.

3. Sirotyuk, M. G. Akusticheskaya kavitatsiya. Nauka, 2008.

4. Akulichev, V. A. Kavitatsiya v kriogennykh kipyashchikh zhidkostyakh. M.: Nauka, 1978.

5. Zubrilov, S. P. *Fiziko-khimicheskie svoistva vody i prikladnye aspekty gidrodinamicheskoi kavitatsii*. SPb.: SPGUVK, 2010.

6. Efremov, I. F. Periodicheskie kolloidnye struktury. L.: Khimiya, 1971.

7. Bezyukov, O.K., Yu.A. Grivnin, S.P. Zubrilov, and V.A. Lavrin. "Vliyanie elektricheskogo, magnitnogo i teplovykh polei na kavitatsiyu i kavitatsionnuyu eroziyu." *Okhrana okruzhayushchei sredy: sb. nauch. tr.* SPb.: Izd-vo SPbGUVK, 1993. 15–46.

8. 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.

9. Mettin, R., S. Luther, C.-D. Ohl, and W. Lauterborn. "Acoustic cavitation structures and simulations by a particle model." *Ultrasonics Sonochemistry* 6.1-2 (1999): 25–29. DOI: 10.1016/S1350-4177(98)00025-X.

10. Aganin, Alexandr Alexeevich, Anas Ilgizovich Davletshin, and Dmitriy Yurievich Toporkov. "Dynamics of a line of cavitation bubbles in an intense acoustic wave." *Computational Technologies* 19.1 (2014): 3–19.

11. Karatanasis, I.K., P. Kukuvinis, E. Kontolatis, Z. Li, Dzh. Van, N. Mitroglu, and M. Gavaizes. "Vysokoskorostnaya vizualizatsiya vikhrevoi kavitatsii s ispol'zovaniem sinkhrotronnogo izlucheniya." *Zhurnal mekhaniki zhidkosti* 838 (2018): 148–164.

12. Ohl, Siew-Wan, Evert Klaseboer, and Boo Cheong Khoo. "Bubble Dynamics and High Intensity Focused Ultrasound: Experimental Observations and Numerical Simulations using Boundary Element Method." *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018)*. ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch29.

13. Beig, Shahaboddin A., and Eric Johnsen. "Bubble-Bubble Interactions and Wall Pressures Produced by the Collapse of a Bubble Pair near a Rigid Surface." *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018).* ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch30.

14. Zubrilov, S. P., and A. S. Zubrilov. "Effekty, soprovozhdayushchie szhatie kavitatsionnykh puzyr'kov." *Zhurn fizich. khimii* 72.11 (1998): 2066–2068.

15. Kravtsova, A. Yu. Eksperimental'noe issledovanie kavitatsionnogo obtekaniya dvumernykh gidrokryl'ev. PhD Dis. Novosibirsk: In-t teplofiziki im. S.S. Kutateladze SO RAN, 2018.

16. Zubrilov, A. S., and S. P. Zubrilov. "Kavitatsionnye kaverny v vide odnomernykh agregatov-tsepochek." *Zhurnal fizicheskoi khimii* 71.7 (1997): 1336–1338.



17. Prigozhin, I. Ot sushchestvuyushchego k voznikayushchemu: Vremya i slozhnosť v fizicheskikh naukakh. 3-d ed. M.: Komkniga, 2006.

18. Zubrilov, S. P. "Sopostavlenie razlichnykh mekhanizmov kavitatsii / Kratkie soobshcheniya." *Zhurnal fizicheskoi khimii* 74.9 (2000): 1700–1701.

19. Vanovskiy, Vladimir. "The Numerical Scheme for the History Force Integrals in Hydrodynamics." *Proceedings of the 10th International Symposium on Cavitation (CAV2018).* ASME Press, 2018. DOI: 10.1115/1.861851_ch196.

20. 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

21. Lv, Liang, Yongxue Zhang, and Yuning Zhang. "Experimental investigations of the particle motions induced by a laser-generated cavitation bubble." *Ultrasonics sonochemistry* 56 (2019): 63–76. DOI: 10.1016/j.ult-sonch.2019.03.019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Зубрилов Сергей Павлович —	Zubrilov, Sergey P. —
доктор технических наук, профессор	Dr. of Technical Sciences, professor
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала	Admiral Makarov State University of Maritime
С.О. Макарова»	and Inland Shipping
198035, Россия, г. Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation
e-mail: zubrilovsergei@yandex.ru,	e-mail: zubrilovsergei@yandex.ru,
kaf ovrb@gumrf.ru	kaf_ovrb@gumrf.ru
Растрыгин Николай Васильевич —	Rastrygin, Nikolay V. —
кандидат технических наук, доцент	PhD, associate professor
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала	Admiral Makarov State University of Maritime
С.О. Макарова»	and Inland Shipping
198035, Россия, г. Санкт-Петербург,	5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg 198035,
ул. Двинская, 5/7	Russian Federation
e-mail: rastryginnv@gumrf.ru	e-mail: rastryginnv@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 19 декабря 2019 г. Received: December 19, 2019.