

The Movement of Three-Phase Gas Bubbles under the Influence of their Electric Field

A. A. Monakhov

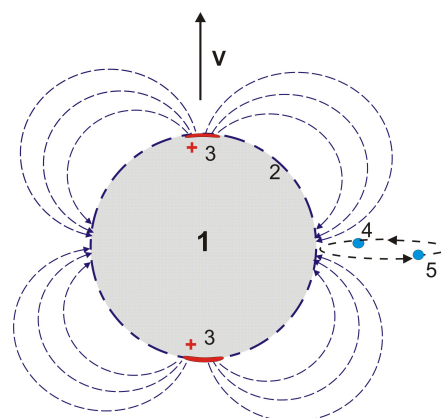
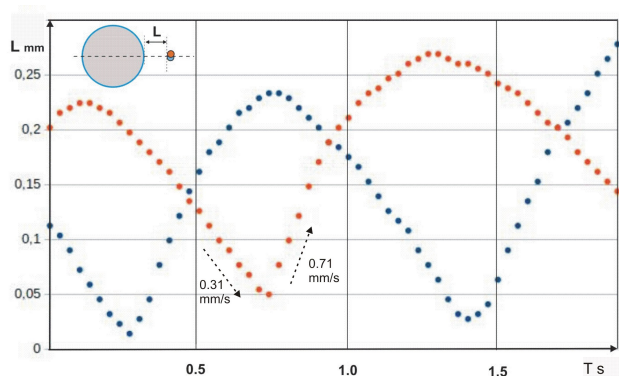
*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119899, Russia
monahov06@mail.ru*

Abstract

The results of an experimental study of the flow of a hydrophobic liquid between non-concentric cylinders are presented. It is shown that with a small gap between the cylinders and their counter rotation, in the area of flow expansion, gas cavitation of dissolved gas and steam of a small impurity of water can be observed. After suspending the flow, water vapor condenses with the formation of three-phase cavitation bubbles and microdrops of water at the gas-liquid interface. It was found that when surfaced, three-phase bubbles have their own magnetic field. The leading role of such bubbles on the behavior of smaller gas bubbles is shown. Based on the analysis of the interaction of bubbles, the magnetic field of a three-phase bubble is reconstructed.

Keywords: vapor-gas cavitation, hydrophobic liquid, three-phase bubble, double electric layer, magnetic field.

The condition for the formation of a three-phase cavitation bubble during counter-rotation of eccentric cylinders in the flow expansion region is considered. The leading role of a three-phase cavitation bubble with its own electric field on the ascent of neighboring small gas bubbles is shown. A reconstruction of the magnetic field of a three-phase gas bubble is presented. The results obtained will add clarity to the understanding of the movement of the bubbly liquid.



The movement of 2 small gas bubbles in the magnetic field of a large three-phase gas bubble when it rises. Small bubbles asynchronously approach and move away from the surface of a large three-phase bubble.

УДК 532.5

Движение трехфазных газовых пузырьков под влиянием своего электрического поля

А. А. Монахов

*НИИ Механики Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова,
Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1*

monahov06@mail.ru

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования течения гидрофобной жидкости между неконцентрическими цилиндрами. Показано, что при малом зазоре между цилиндрами и встречном их вращении, в области расширения потока, может наблюдаться газовая кавитация растворенного газа и паровая небольшой примеси воды. При остановке движения потока, водяной пар конденсируется с формированием трехфазных кавитационных пузырьков и микрокаплями воды на границе раздела газ-жидкость. Обнаружено, что при всплытии трехфазные пузырьки обладают собственным магнитным полем. Показана лидирующая роль таких пузырьков на поведение более мелких газовых пузырьков. По анализу взаимодействия пузырьков сделана реконструкция магнитного поля трехфазного пузырька.

Ключевые слова: паро-газовая кавитация, гидрофобная жидкость, трехфазный пузырек, двойной электрический слой, магнитное поле.

1. Введение

Пузырьковые среды представляют интерес ввиду их широкого распространения в природе и интенсивного использования в современной технике. В жидкости практически всегда имеется растворенный газ и при небольшом понижении давления может возникать газовая кавитация [1]. Жидкость при этом становится двухфазной и для понимания динамики движения такой среды, необходимо учитывать многие параметры, влияющие на газовые компоненты. Это силы сопротивления, плавучести, гравитации, подъемная сила [2, 3, 4]. В [5] рассматривался вопрос взаимного влияния этих параметров.

Кавитация может наблюдаться и в переходных процессах при ускорении или замедлении потока, которые возникают при закрытии и открытии крана [6].

В [7, 8] рассматривалось образование кавитации при растяжении жидкости на дне цилиндрической колбы при ее резком торможении. Отмечалось, что скорость движения жидкости не влияла на режим возникновения кавитации, но образование кавитации существенно зависит от ускорения или торможения трубы с жидкостью.

В последнее время предлагается рассматривать движение двухфазного потока в виде двух-жидкостной модели с определением баланса инерционной составляющей и межфазным сопротивлением [9].

Для полного понимания движения пузырьковой среды необходимо учитывать также образование двойного электрического слоя на границе раздела газ-жидкость. Удобным объектом для исследования образования газовой кавитации при малых числах Re является движение жидкости между неконцентрическими цилиндрами. Несмотря на кажущую простоту течения, в литературе отмечается несовпадение течения в приближении Стокса и полным моделированием Навье-Стокса; согласие происходит только при больших числах Re . [10]

В [11,12] была обнаружена возможность формирования трехфазных кавитационных пузырьков в гидрофобной жидкости с вкраплениями микрокапель воды на границе раздела газ-жидкость. Установлено, что такие газовые пузырьки имеют свое электрическое поле и при движении влияют на свое окружение.

Настоящая работа является продолжением исследования [12] взаимного влияния поля трехфазного пузырька на движение соседних газовых пузырьков.

2. Описание эксперимента

Удобным объектом для исследования газовой кавитации при малых числах Re является движение жидкости между неконцентрическими цилиндрами. В такой конструкции оси цилиндров имеют эксцентриситет и движение жидкости задается вращением цилиндров. В зависимости от величины эксцентриситета возникает поджатие потока перед линией минимального зазора и его расширение за ней. Поджатие потока приводит к повышению давления, а расширение к падению давления, которое зависит от величины минимального зазора и скорости движения стенки цилиндра [13]. На рис. 1 представлена схема течения в зазоре между цилиндрами. Перед линией минимального зазора H из-за возрастания давления возникает возвратное течение и часть потока вдоль внутреннего цилиндра возвращается обратно [14]. Область расширения потока увеличивается с ростом отношения диаметров цилиндров.

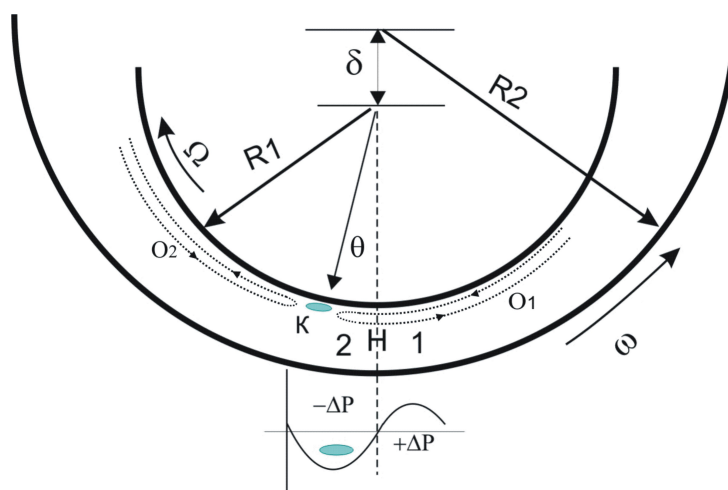


Рис. 1. Схема течения жидкости между неконцентрическими цилиндрами R_1 и R_2 с минимальным зазором H между ними. 1 – область поджатия потока, 2 – расширения. O_1 , O_2 – возвратные течения из-за падения давления ΔP в области кавитации

При падении давления ниже давления растворенного газа, возникает газовая кавитация с образованием дискретных газовых пузырьков вдоль образующей внутреннего цилиндра. Дискретность объясняется наличием двойного электрического слоя на границе газ-жидкость. Размеры кавитационных пузырьков также определяются отношением диаметров цилиндров. С увеличением этого параметра, также возрастает область понижения давления за линией H .

В данном эксперименте отношение радиусов цилиндров R_1/R_2 составляло 0.82. Использовалась силиконовая жидкость ПМС с вязкостью 200 сСт. По паспортным данным изготовителя, в жидкости может находиться 0.5% примеси воды. При малых зазорах H давление в расширяемой области может опуститься ниже кипения воды. Увеличить растяжение жидкости можно также подкручиванием внешнего цилиндра в противоположную сторону по отношению к внутреннему. В закритической области кавитации при вращении внутреннего цилиндра, поверхность внешнего цилиндра двигалась со скоростью 0.7 см/с. На рис. 2 представлен график состояния жидкости с уменьшением зазора H .

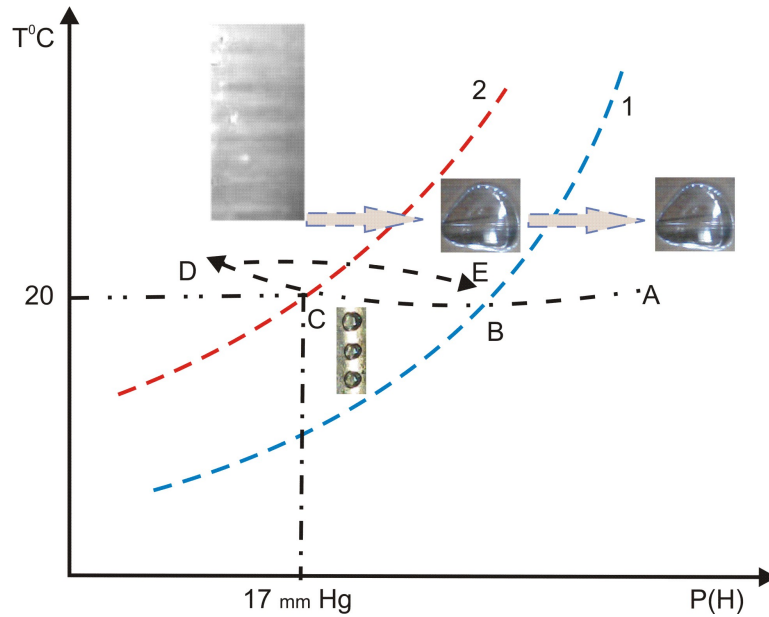


Рис. 2. Состояние жидкости в области расширения потока в зависимости от падения давления. Кривая 1 – граница возникновения газовой кавитации в силиконовой жидкости, 2 – граница возникновения паровой кавитации примеси воды в жидкости

При уменьшении давления в расширяющейся области по кривой А, В, С, D последовательно возникают газовая кавитация, область Е и паровая D примеси воды. При остановке движения внутреннего цилиндра, кривая D-E, происходит возрастание давления с конденсацией водяного пара размером около 10 микрон на оболочке пузырька. При окончательной остановке движения внутреннего цилиндра, газовые пузырьки кроме границы раздела газ-жидкость, имеют еще 2 фазы раздела: вода-жидкость и газ-вода. В таких трехфазных газовых пузырьках под действием электрического поля Земли происходит поляризация зарядов. По правилу Кена [15], ввиду большой диэлектрической проницаемости, вода приобретает положительный потенциал, а газовая оболочка пузырька отрицательный.

После остановки движения обоих цилиндров, в области расширения потока, кавитационные пузырьки приобретают сферическую форму порядка 0.3 мм.

За счет пульсаций давления возникают также и малые пузырьки около 30 микрон. Было обнаружено, что 2 малых пузырька около большого образуют ансамбль при всплывании. На рис. 3 представлены кадры всплывания трехфазного большого пузырька размером 0.3 мм и двух сателлитов «а» и «б».

Несмотря на большую разницу в размерах, пузырьки всплывают, как единый ансамбль. Кроме вертикально всплывания, 2 малых пузырька совершают в противофазе периодическое движение к пузырьку и обратно со скоростью большей скорости всплывания.

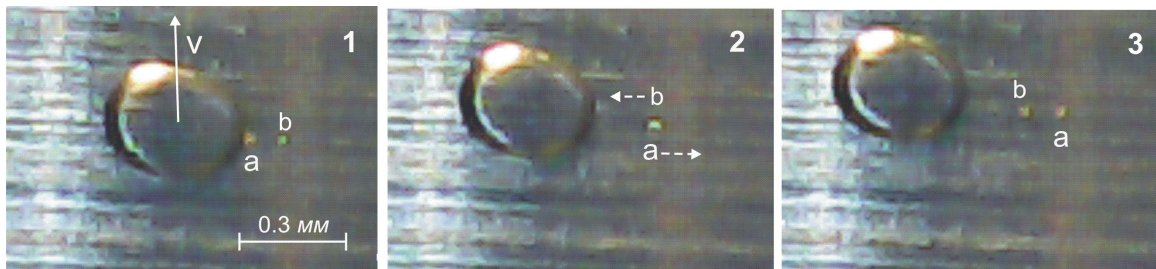


Рис. 3. Кадры синхронного всплывания трехфазных большого и 2 малых а, б газовых пузырьков. Интервал между кадрами 1/8 с. Малые пузырьки совершают около большого пузырька периодические в противофазе движения к пузырьку и обратно

На кадре 2 они встречаются, двигаясь в противоположные направления. Скорость всплытия большого пузырька с двумя малыми 0.29 мм/с. Максимальная скорость движения малого пузырька 0.71 мм/с. Такую взаимосвязь пузырьков не удастся объяснить без привлечения магнитной гидродинамики.

На рис. 4. представлено взаимное положение двух малых газовых пузырьков на расстоянии L от поверхности большого трехфазного пузырька. Скорость всплытия Φ 0.3 мм ÷ 0.29 мм/с, вертикальная скорость всплытия Φ 30 микрон – 0.29 мм/с и горизонтальная скорость – 0.49 мм/с, результирующая скорость движения малого пузырька – 0.54 мм/с. Временной интервал между треками 1/6 с. Наибольшая скорость у малых пузырьков наблюдается при удалении от большого пузырька за счет отталкивания одноименных зарядов и составляет 0.75 мм/с, интервал между кадрами 1/8 с

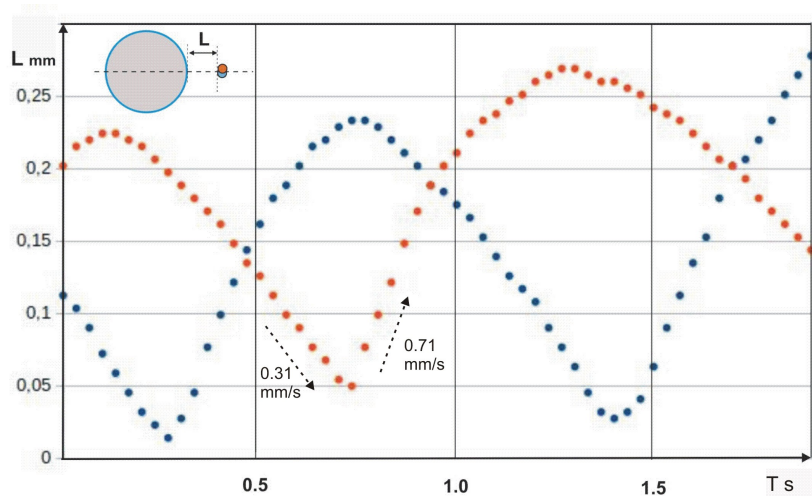


Рис. 4. Временное положение 2 малых пузырьков при всплытии на расстоянии L от поверхности большого трехфазного газового пузырька. Временной интервал между положениями составляет 1/30 с

Газовые пузырьки всплывают синхронно вместе с большим пузырьком. При этом периодически приближаются к нему и отдаляются между собой в противофазе. Скорость приближения малого пузырька меньше, чем его отдаление от поверхности большого. Это объясняется наличием своего магнитного поля у большого трехфазного пузырька при его всплытии. При этом малые пузырьки имеют только отрицательный заряд на своей поверхности. При приближении к поверхности большого пузырька за счет силы Лоренца на пузырьки действует также сила отталкивания одноименных зарядов их поверхностей и принцип «магнитного зеркала» при сгущении магнитных силовых линий [15].

На рис. 5. представлена реконструкция магнитного поля трехфазного газового пузырька 1. При всплытии поле большого трехфазного пузырька захватывает два малых газовых пузырька 4 и 5.

Малые газовые пузырьки 4 и 5, под действием силы Лоренца асинхронно движутся к полюсу трехфазного пузырька. Асинхронное движение газовых пузырьков связано с одноименными зарядом их поверхностей. Ввиду ограничения длины цилиндров, малые пузырьки со временем все больше отдаляются от большого пузырька и через 7, 8 периодов приближения и удаления, связь между пузырьками нарушится, и они всплывают независимо. Такая схема магнитного поля трехфазного пузырька позволяет объяснить взаимосвязь трех газовых пузырьков при их всплытии.

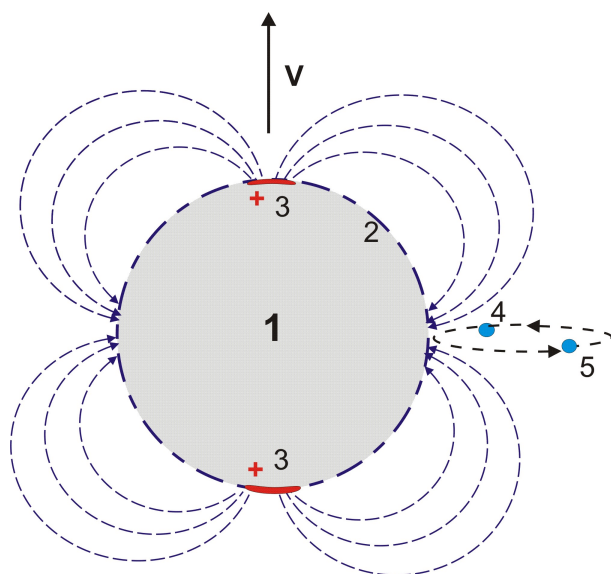


Рис. 5. Схема магнитного поля трехфазного кавитационного пузырька с двумя сателлитами при всплытии в гидрофобной жидкости. 1 – трехфазный пузырек диаметром 0.3 мм с границей 2. 3 – микрокапли воды, создающие магнитное поле пузырьку при его всплытии

3. Заключение

Рассмотрено условие образования трехфазного кавитационного пузырька при встречном вращении эксцентричных цилиндров в области расширения потока. Показана лидирующая роль трехфазного кавитационного пузырька, обладающего собственным электрическим полем, на всплытие соседних малых газовых пузырьков. Представлена реконструкция магнитного поля трехфазного газового пузырька. Полученные результаты добавят ясность в понимании движения пузырьковой жидкости.

4. Благодарности и ссылки на гранты

Выражаю благодарность академику РАН И.Г. Горячевой за интерес к работе и обсуждение результатов.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ, грант № 19-01-00056.

Литература

1. Dowson D. Cavitation in lubricating films supporting small loads // Proc. Inst. Mech. Eng. Conf. Lubr. Wear. 1957. Pp. 93–99.
2. Saffman P. G. The lift on a small sphere in a slow shear flow // J. Fluid Mech. 1965. Vol. 22. Pp. 385–400.
3. Magnaudet J. and Legendre D. The viscous drag force on a spherical bubble with a time-dependent radius // Phys. Fluids. 1998. Vol. 10. Pp. 550–554.
4. Legendre D. and Magnaudet J. The lift force on a spherical bubble in a viscous linear shear flow // J. Fluid Mech. 1998. Vol. 368. Pp. 81–126.
5. Tetsuya Kanagawa. How do various forces affect pressure waves in bubbly flows? // Phys. Fluids. 2024. Vol. 36. 033352; DOI: 10.1063/5.0187533
6. Sharp B.B. Cavity formation in simple pipes due to rupture of the water column // Nature. 1960. Vol. 185. Pp. 302–303. <https://doi.org/10.1038/185302b0>
7. Zhao Pan. Cavitation onset caused by acceleration // PNAS. 2017. Vol. 114. No. 32 www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1702502114

8. Zhichao Wang. Dynamics of cavitation bubbles in viscous liquids in a tube during a transient process // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2024. Vol. 104. 106840. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106840>
9. Alejandro Clause. The importance of the inertial coupling in the two-fluid model of two-phase flow // *Physics of Fluids*. 2024. DOI: 10.1063/5.0185880
10. Merlen A., Frankiewicz C. Cylinder rolling on a wall at low Reynolds numbers // *J. Fluid Mech.* 2011. Vol. 685. Pp. 461–494. DOI:10.1017/jfm.2011.331
11. Монахов А. А. Парогазовая кавитация в гидрофобной жидкости. Тезисы докладов XIX Всероссийской школы-семинара «Современные проблемы аэрогидродинамики». Изд-во: МГУ. 2019. С. 77.
12. Монахов А. А. Образование трехфазных кавитационных пузырьков с собственным электрическим полем в гидрофобной жидкости // *Физико-химическая кинетика в газовой динамике*. 2023. Т.24, вып. 4. <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-4/articles/1061/>
13. Monakhov A.A., Chernyavski V.M., Shtemler Yu. Bounds of cavitation inception in a creeping flow between eccentric cylinders rotating with a small minimum gap // *Phys. Fluids*. 2013. Vol. 25, iss. 9. <https://doi.org/10.1063/1.4820482>
14. Monakhov A., Bukharin N. Experimental Study of Cavitation Development and Secondary Circulation Flow between Two Eccentric Cylinders // *Fluids*. 2022. Vol. 7. No. 11. <https://doi.org/10.3390/fluids7110357>
15. Ken R. Shoulders: Energy conversion using high charge density. U.S. Patent 5,018,180, (May 21, 1991).
16. Rosser W. G. V. The Van Allen radiation zones // *Contemporary Physics*. 1964. Vol. 5. No. 4. Pp. 255–269. <https://doi.org/10.1080/00107516408203083>

References

1. Dowson D., Cavitation in lubricating films supporting small loads., *Proc. Inst. Mech. Eng. Conf. Lubr. Wear*, 1957, pp. 93–99.
2. Saffman P. G., The lift on a small sphere in a slow shear flow, *J. Fluid Mech.*, 1965, vol. 22, pp. 385–400.
3. Magnaudet J. and Legendre D., The viscous drag force on a spherical bubble with a time-dependent radius, *Phys. Fluids*, 1998, vol. 10, pp. 550–554.
4. Legendre D. and Magnaudet J., The lift force on a spherical bubble in a viscous linear shear flow, *J. Fluid Mech.*, 1998, vol. 368, pp. 81–126.
5. Tetsuya Kanagawa, How do various forces affect pressure waves in bubbly flows? *Phys. Fluids*, 2024, vol. 36, 033352. DOI: 10.1063/5.0187533
6. Sharp B.B., Cavity formation in simple pipes due to rupture of the water column, *Nature*, 1960, vol. 185, pp. 302–303. <https://doi.org/10.1038/185302b0>
7. Zhao Pan, Cavitation onset caused by acceleration, *PNAS*, 2017, vol. 114, No. 32 www.pnas.org/cgi/doi/10.1073/pnas.1702502114
8. Zhichao Wang, Dynamics of cavitation bubbles in viscous liquids in a tube during a transient process, *Ultrasonics Sonochemistry*, 2024, vol. 104, 106840. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106840>
9. Alejandro Clause, The importance of the inertial coupling in the two-fluid model of two-phase flow, *Physics of Fluids*, 2024, vol. 36, 033354. DOI: 10.1063/5.0185880
10. Merlen A., Frankiewicz C., Cylinder rolling on a wall at low Reynolds numbers, *J. Fluid Mech.*, 2011, vol. 685, pp. 461–494. DOI:10.1017/jfm.2011.331
11. Monakhov A. A., *Vapor-gas cavitation in a hydrophobic liquid*. Collection "Modern problems of aerohydrodynamics", MSU, 2019, p. 77 [in Russian].

12. Monakhov A. A., Formation of Three-Phase Cavitation Bubbles with Their Own Electric Field in a Hydrophobic Liquid, *Physical-Chemical Kinetics in Gas Dynamics*, 2023, vol. 24, iss. 4 [in Russian] <http://chemphys.edu.ru/issues/2023-24-4/articles/1061>
13. Monakhov A. A., Chernyavski V. M., Shtemler Yu., Bounds of cavitation inception in a creeping flow between eccentric cylinders rotating with a small minimum gap, *Phys. Fluids*, 2013, vol. 25, iss. 9. <https://doi.org/10.1063/1.4820482>
14. Monakhov A., Bukharin N., Experimental Study of Cavitation Development and Secondary Circulation Flow between Two Eccentric Cylinders., *Fluids*, 2022, vol. 7, no. 11. <https://doi.org/10.3390/fluids7110357>
15. Ken R. Shoulders, *Energy conversion using high charge density*, U.S. Patent 5,018,180, 1991.
16. Rosser W. G. V. (1964). The Van Allen radiation zones. *Contemporary Physics*, 1964, vol. 5, no. 4, pp. 255–269. <https://doi.org/10.1080/00107516408203083>

Статья поступила в редакцию 23 апреля 2024 г.