

Formation of Three-Phase Cavitation Bubbles with Their Own Electric Field in a Hydrophobic Liquid

A. A. Monakhov

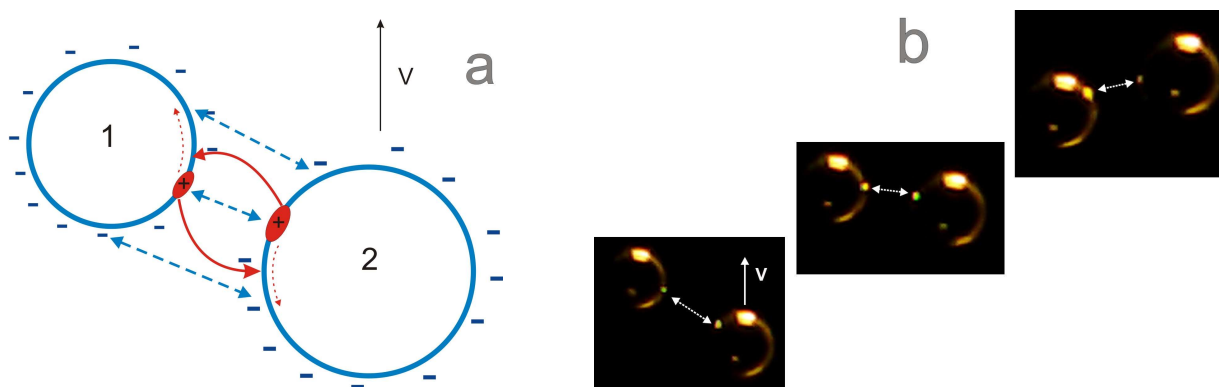
*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, 119899, Russia
monahov06@mail.ru*

Abstract

The results of an experimental study of the flow of a hydrophobic liquid between non-concentric cylinders are presented. In the area of flow expansion, depending on the size of the gap between the cylinders, both gas cavitation of the dissolved gas and steam of the natural impurity of water are observed. Suspending the flow movement, the formation of three-phase gas bubbles with microdrops of water at the gas-liquid interface was detected. It is shown that such a gas bubble design has its own electric field. When a bubble rises, its microdroplet of water moves along the gas-liquid interface, occupies the minimum distance to the surface of the neighboring bubble. In the case of several three-phase bubbles located near, the microdrops of water in them split, indicating the direction of neighboring sources of the electric field. Based on the conducted research, a patent was obtained on a method for registering sources of quasi-static electric fields.

Keywords: vapor-gas cavitation, hydrophobic liquid, electric field, charge cavitation module

During the transition from steam cavitation of water impurity to gas, a three-phase bubble with a microdroplet of water is formed in a hydrophobic liquid, which condenses at the gas-liquid interface. Such a three-phase bubble has its own electric field (a). With the mutual movement of two bubbles, microdrops of water move at the gas-liquid boundary (b).



Bubbles experience mutual repulsion of the eponymous charge of their shells, as well as attraction due to microdrops of water at their borders

УДК 53.06

Образование трехфазных кавитационных пузырьков с собственным электрическим полем в гидрофобной жидкости

А. А. Монахов

*Институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Россия, Москва, 119192, Мичуринский проспект, 1
monahov06@mail.ru*

Аннотация

Представлены результаты экспериментального исследования течения гидрофобной жидкости между неконцентрическими цилиндрами. В области расширения потока, в зависимости от величины зазора между цилиндрами, может наблюдаться газовая кавитация растворенного газа. При наличии в жидкости примеси воды может наблюдаться и паровая кавитация примеси. Паровая кавитация воды возникает при скольжении поверхностей цилиндров между собой с малым зазором. При остановки движения потока, водяной пар конденсируется в микрокапли. Происходит формирование трехфазных газовых пузырьков с микрокаплями воды на границе раздела газ-жидкость. Показано, что такая конструкция газового пузырька имеет собственное электрическое поле. При всплытии пузырька, его микрокапля воды перемещается по границе раздела газ-жидкость, занимает минимальное расстояние до поверхности соседнего пузырька. В случае расположения вблизи нескольких трехфазных пузырьков, микрокапли воды в них расщепляются, указывая направление соседних источников электрического поля. На основании проведенных исследований получен патент по способу регистрации источников квазистатических электрических полей.

Ключевые слова: паро-газовая кавитация, гидрофобная жидкость, электрическое поле, зарядовый модуль

1. Введение

В жидкости практически всегда имеется растворенный газ, который характеризуется давлением растворенного газа. При уменьшении локального давления в жидкости, происходит выделение растворенного газа. Еще в прошлом веке было обнаружено возникновение газовой кавитации в течениях с малыми числами Рейнольдса [1]. Удобным объектом исследования этого явления служит движение жидкости между неконцентрическими цилиндрами. В окрестности минимального зазора образуются конфузурная и диффузурная области с поджатием потока и его расширением. В диффузурной области, с уменьшением зазора между цилиндрами, происходит понижение давления и образование газовой кавитации в виде цепочки дискретных пузырьков при числах $Re \ll 1$ [2, 3]. 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 [4]. Было показано, что давление в кавитационном пузырьке не зависит от зазора H между цилиндрами и скоростью движения потока, а определяется давлением растворенного газа в жидкости [5]. Для больших чисел Re , эти циркуляции устанавливают режим со сменой направления вращения внутреннего свободного цилиндра [6].

Исследование паровой кавитации является более сложной задачей. Необходимо из жидкости убрать растворенный газ и присутствующие растворенные примеси. В работе [7] при

вращении цилиндра вблизи неподвижной стенки было получено понижение давления в расширяющейся области потока достаточное для кипения воды. При этом в области кавитации наблюдалось светлое, паро-газовое состояние жидкости.

2. Описание эксперимента

На рис. 1 представлена схема течения жидкости между неконцентрическими цилиндрами. Движение жидкости могло задаваться вращением как внешнего цилиндра R , так и внутренним r . Величина зазора между цилиндрами H определялась величиной эксцентриситета между осями цилиндров $H = R - r - \delta$. В качестве жидкости использовалось силиконовое масло ПМС 100.

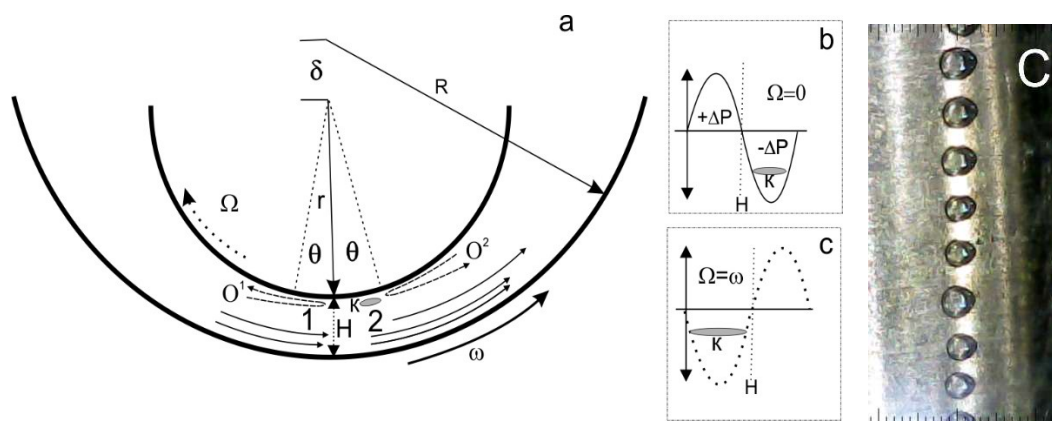


Рис. 1. а – схема течения жидкости между неконцентрическими цилиндрами R и r с минимальным зазором H между ними; б, с – давление в областях поджатия потока и расширения при вращении внешнего или внутреннего цилиндров; С – цепочка газовых кавитационных пузырьков за линией минимального зазора, вниз по потоку

Газовая кавитация возникает вдоль образующей внутреннего цилиндра, на его поверхности за линией минимального зазора H , при числах $Re \ll 1$, как при вращении только внутреннего цилиндра, так и при вращении только внешнего. Дискретность пузырьков объясняется наличием одноименного заряда на фазовом переходе газ-жидкость.

3. Результаты исследования

Полость в жидкости может также возникнуть, если напряжение растяжения превышает предел прочности жидкости [8], который существенно зависит от наличия газовых и жидких неоднородностей в ней. Было обнаружено, что при скольжении внутреннего цилиндра по поверхности внешнего, возникает падение давления достаточное для образования паровой кавитации примеси воды в силиконовом масле. По паспортным данным от производителя, в масле содержится около 0.5 % воды. На рис. 2 представлена схема изменения состояния жидкости в области кавитации от зазора H и режима движения внешнего цилиндра.

При уменьшении зазора между цилиндрами и пересечении кривой 1 в точке В, возникает газовая кавитация жидкости. Дальнейшее уменьшение зазора до режима скольжения внутреннего цилиндра, точка С, уменьшает локальное давление до кипения примеси воды в жидкости. При 20^0C давление должно быть около 17 мм Нг. Вместо дискретных кавитационных пузырьков в точке D возникает паро-газовая среда. При остановке режима скольжения, точка Е, водяной пар конденсируется в микрокапли воды, размером $10 \div 20$ мкм и располагаются в кавитационных пузырьках гидрофобной жидкости на границе раздела газ-жидкость. Микрокапли воды могут также наблюдаются и вне газовых пузырьков в гидрофобной жидкости.

Конструкция кавитационного пузырька состоит их трех фаз: газ, гидрофобная жидкость и вода, имеющая наибольшую диэлектрическую проницаемость. Под действием внешнего

поля – электрического поля Земли, трехфазный пузырек имеет области с отрицательным и положительным распределенным зарядом и обладает своим электрическим полем [9, 10]. На рис. 3, *a, b* представлена реконструкция распределения заряженных областей в трехфазном пузырьке и кадры вспышки таких пузырьков.

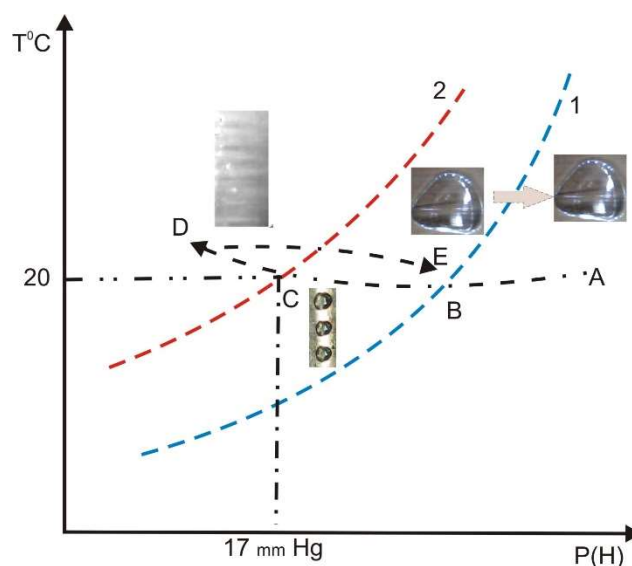


Рис. 2. Состояние жидкости в области минимального зазора H в зависимости от локального давления $P(H)$. Пунктирные кривые 1 и 2 соответствуют возникновению газовой кавитации и паровой для примеси воды в силиконовой жидкости

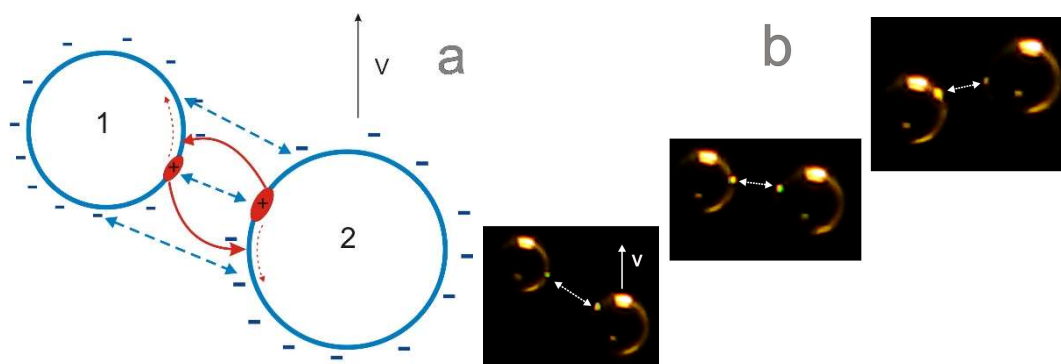


Рис. 3. Взаимодействие двух трехфазных пузырьков с собственным электрическим полем

Взаимодействие трехфазных кавитационных пузырьков обусловлено силами отталкивания областей с одноименным зарядом, отмеченных на рис. 3, *a* синими пунктирными стрелками и притяжением между оболочкой пузырька и микрокаплей воды, отмеченные красными стрелками.

Скопление одноименных зарядов в ограниченной области впервые экспериментально наблюдалось в [11] и определялось как зарядовый кластер. Компактная область электронов возникала при автоэлектронной эмиссии между катодом и анодом и плохом вакууме. Согласно [12], зарядовый кластер представляет динамическую систему одноименных зарядов в ограниченной области, которые удерживаются силами самосогласованного поля. В [13] была показана возможность образования заряженных областей при кавитации с их разрядом в виде свечения.

На рис. 3, *b* представлены кадры взаимного перемещения двух пузырьков. Пунктирными стрелками отмечено взаимное перемещение микрокапель воды в пузырьках по границе раздела газ-жидкость. Под влиянием поля соседнего пузырька, микрокапля воды занимает минимальное расстояние до его поверхности.

При групповом расположении трехфазных кавитационных пузырьков, микрокапли воды в них расщепляются, указывая, таким образом, направление внешних источников электрического поля. На рис. 4, *a* представлена фотография группы трехфазных пузырьков с распределенными микрокаплями воды на своих границах газ-жидкость.

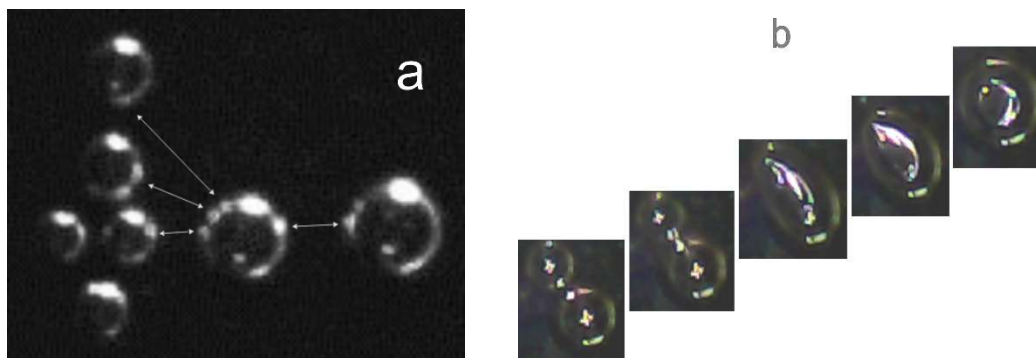


Рис. 4. *a* – группа трехфазных кавитационных пузырьков; *b* – притяжение и слияние 2 пузырьков с явлением люминесценции

Взаимодействие кавитационных пузырьков может проявляться как во взаимном отталкивании, так и притяжении до некоторого расстояния. Объединение пузырьков чаще происходит разных по размеру, в которых находятся не одинаковые микрокапли воды. При объединении происходит изменение баланса заряда в общем пузырьке с явлением люминесценции. На рис. 4, *b* представлены кадры объединения двух разных по размеру кавитационных пузырьков с микрокаплями воды. Временной интервал между кадрами 1/30 с.

4. Заключение

1. Показана возможность образования в гидрофобной жидкости, при наличии примеси воды, трехфазных кавитационных образований с распределенными областями разных знаков, которые можно классифицировать как зарядовые кластеры.
2. Установлено, что трехфазные кавитационные образования имеют собственное электрическое поле.
3. Показано, что такой зарядовый кластер может быть индикатором внешних источников квазистатических электрических полей.

Литература

1. Dowson D. Cavitation in lubricating films supporting small loads. Proc. Inst. Mech. Eng. Conf. Lubr. Wear. 1957. Pp. 93–99.
2. 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. 093102.
3. Монахов А.А. Исследование кавитации при движении цилиндрического тела вдоль стенки. //Изв. РАН МЖГ. 2015. № 3. С.134-139.
4. Merlen A., Frankiewicz C., Cylinder rolling on a wall at low Reynolds numbers // J. Fluid Mech. 2011, vol. 685, pp. 461–494.
5. Monakhov A., Bukharin N. Experimental Study of Cavitation Development and Secondary Circulation Flow between Two Eccentric Cylinders // Fluids, 2022, 7, 357.

6. Sun C., Mullin T., van Wijngaarden L., and Lohse D. Drag and lift forces on a counter-rotating cylinder in rotating flow // *J. Fluid Mech.* 2010, vol. 664, pp. 150–173.
7. Ouibrahim A., Fruman D.H., Gaudemer R. Vapour cavitation in very confined spaces for Newtonian and non Newtonian fluids // *Phys. Fluids*. 1996. No. 8. P. 1964.
8. Joseph D.D. Cavitation in a flowing liquid // *Phys. Rev. E*. 1995. V. 51. R1649.
9. Монахов А. А. Парогазовая кавитация в гидрофобной жидкости. // Сборник «Современные проблемы аэрогидродинамики», МГУ 2019, стр. 77
10. Монахов А.А., Полянский В.А. Патент №2740451. Кавитационный дегазатор жидкости. 2021.
11. Ken R. Shoulders: Energy conversion using high charge density. U.S. Patent 5,018,180 (May 21, 1991).
12. Sapogin V.G. Mechanisms of substance retention by a self-consistent field. Monograph. Taganrog: Publishing House of TRTU, 2000. 254 p.
13. Герценштейн С.Я., Монахов А.А. Свечение жидкости в тонких диэлектрических каналах // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. 2007. Т. 5. <http://chemphys.edu.ru/issues/2007-5/articles/36/>.

References

1. Dowson D., Cavitation in lubricating films supporting small loads., *Proc. Inst. Mech. Eng. Conf. Lubr. Wear*, 1957, pp. 93–99.
2. 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>
3. Monakhov A.A., Investigation of cavitation during the movement of a cylindrical body along the wall, *Izv. RAS MZG*, 2015, no. 3. pp.134–139. [in Russian].
4. 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
5. 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>
6. Sun C., Mullin T., van Wijngaarden L., and Lohse D., Drag and lift forces on a counter-rotating cylinder in rotating flow., *J. Fluid Mech.*, 2010, vol. 664. DOI:10.1017/S0022112010003666
7. Ouibrahim A., Fruman D.H., Gaudemer R., Vapour cavitation in very confined spaces for Newtonian and non Newtonian fluids, *Phys. Fluids*, 1996, no 8. DOI:10.1063/1.868975
8. Joseph D.D., Cavitation in a flowing liquid., *Phys. Rev. E*, 1995, vol. 51. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.51.R1649>
9. Monakhov A.A., *Vapor-gas cavitation in a hydrophobic liquid. Collection "Modern problems of aerohydrodynamics"*, MSU 2019, p. 77. [in Russian].
10. Monakhov A.A., Polyansky V.A., Patent No. 2740451. *Cavitation liquid degasser*, 2021. [in Russian].
11. Ken. R. Shoulders: Energy conversion using high charge density. U.S. Patent 5,018,180, (May 21,1991).
12. Sapogin V.G., *Mechanisms of substance retention by a self-consistent field*, Monograph. Taganrog: Publishing House of TRTU, 2000. 254 p.
13. Herzenstein S.Ya., Monakhov A.A. Liquid glow in thin dielectric channels. Electronic magazine, *Physical-chemical kinetics in gas dynamics*, 2007, vol. 5. <http://chemphys.edu.ru/issues/2007-5/articles/36/>. [in Russian].

Статья поступила в редакцию 20 июля 2023 г.