

УДК 532.528: 532.694.1

ПАРОГАЗОВАЯ КАВИТАЦИЯ И СОПУТСТВУЮЩАЯ ЕЙ ЭЛЕКТРИЗАЦИЯ ПРИ СКОЛЬЖЕНИИ ЦИЛИНДРА ПО ПОВЕРХНОСТИ

© 2020 г. А. А. Монахов^{а,*}, И. Л. Панкратьева^а, В. А. Полянский^{а,**}

^а МГУ им. М.В. Ломоносова, Научно-исследовательский институт механики, Москва, Россия

*E-mail: Monahov06@mail.ru

** E-mail: ilpan@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 01.11.2019 г.

После доработки 27.11.2019 г.

Принята к публикации 17.12.2019 г.

Экспериментально исследовано образование трехфазных кавитационных пузырьков в гидрофобной жидкости при скольжении цилиндрического тела по твердой поверхности. Определена структура кавитационных пузырьков. На границе раздела газа и гидрофобной жидкости обнаружены микрокапли из сконденсированных паров воды с положительным электрическим зарядом поверхности, при этом оболочка кавитационного пузырька имеет отрицательный заряд. Каждый такой кавитационный пузырек индуцирует свое электрическое поле за счет поверхностных зарядов границ раздела. Установлено влияние полей соседних пузырьков на перемещение микрокапли воды. Наличие электрического поля у пузырьков может приводить к их отталкиванию или объединению. Впервые зарегистрирована электролюминесценция, возникающая при объединении пузырьков.

Ключевые слова: паровая кавитация, газовая кавитация, давление растворенных газов, тонкий зазор, малые числа Рейнольдса, двойной электрический слой, электрическое поле, электролюминесценция

DOI: 10.31857/S0568528120030111

Представлены результаты экспериментального исследования пузырьковой кавитации в парогазовой области термодинамических параметров жидкости и сопровождающих этот процесс электрических явлений. В кавитационных пузырьках обнаружены микрокапли из сконденсированных паров воды. Этот факт может представлять интерес для многих технологических процессов, где используется смазка, а также для различных областей медицины и биологии.

Известно, что в жидкости практически всегда имеется растворенный газ, который характеризуется своим парциальным давлением. Еще в прошлом веке было обнаружено возникновение газовой кавитации в течениях с малыми числами Рейнольдса [1]. Примером может служить медленное движение цилиндра в жидкости вблизи твердой поверхности. В окрестности минимального зазора образуются конфузурная и диффузурная области с поджатием потока и его расширением. В диффузурной области с пониженным давлением экспериментально обнаружена [2, 3] газовая кавитация в виде цепочки дискретных пузырьков. Причину дискретности можно объяснить шероховатостями поверхностей, изменяющих случайным образом величину зазора и соответственно перепады давления. Возникающий в процессе развития течения каждый кавитационный пузырек имеет на своей границе раздела двойной электрический слой, который препятствует объединению с другими пузырьками. Для газовой кавитации было показано, что есть зависимость появления пузырьков от скорости движения цилиндра над твердой стенкой и от величины зазора. Имеется предельный (критический) зазор, при превышении которого газовая кавитация не возникает. Это связано с тем, что уменьшение зазора приводит к понижению давления в области кавитации до давления растворенных газов [4]. При этом точка минимального давления смещается к линии минимального зазора и наблюдаются возвратные течения [5]. Часто в жидкости присутствует примесь с более высоким давлением паров. Если растягивающее напряжение в жидкости превышает предел прочности на разрыв [6], то это может вызвать паровую кавитацию. Исследование паровой кавитации является непростой задачей. Если для появ-

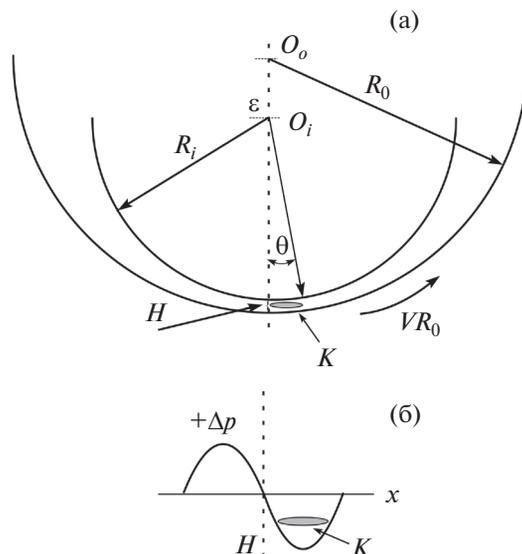


Рис. 1. Схема течения в зазоре между неподвижным внутренним и вращающимся внешним цилиндром (а) и распределение давления в окрестности кавитационного пузырька (б) : K – кавитационный пузырек, R_0 , O_o , V_{R0} – радиус, ось симметрии и скорость движения стенок внешнего цилиндра; R_i , O_i – радиус и ось симметрии внутреннего цилиндра; Δp – изменение давления жидкости, x – расстояние вдоль поверхности внешнего цилиндра от линии минимального зазора, Θ – угловая координата положения кавитационного пузырька, ϵ – расстояние между осями цилиндров.

ления газовой кавитации локальное давление в жидкости достаточно уменьшить на 1–2%, то для возникновения паровой кавитации давление в среде должно упасть на несколько порядков, достигнув давления насыщения паров самой жидкости. При этом необходимо провести тщательную дегазацию жидкости. В работе [7] исследовалась паровая кавитация на дегазированной воде при вращении цилиндра у стенки с малым зазором. В области растяжения жидкости наблюдалась белая область с парогазовой кавитацией. Представленные там фото кавитационных пузырьков очень похожи на газовую кавитацию. В работе [8] проведено исследование кавитации при кипении недогретой газированной жидкости. Рассмотрен механизм импульса сжатия парового пузырька при обратном пересечении термобарической границы. Наблюдаемый при этом процесс был назван “псевдокавитацией”. Как уже отмечалось, в жидкости на границах раздела с газом возникают двойные электрические слои. Для режима с многопузырьковой кавитацией это может привести к изменению технологического процесса, особенно в тонких диэлектрических каналах [9, 10].

1. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследовалось течение вязкой жидкости в окрестности минимального зазора между двумя, вставленными один в другой, эксцентрическими цилиндрами с параллельными осями. Течение создавалось вращением внешнего цилиндра радиусом $R_0 = 50$ мм, выполненного из прозрачного органического стекла. Внутренний цилиндр радиусом $R_1 = 25$ мм, изготовленный из эбонита, был неподвижен. Схема эксперимента представлена на рис. 1а. Скорость движения стенки внешнего цилиндра V_{R0} в экспериментах могла меняться от 1 до 50 мм/с. Величина минимального зазора H между цилиндрами варьировалась перемещением внутреннего цилиндра с помощью микровинта с шагом 0.01 мм. Процессы, происходящие в жидкости в окрестности минимального зазора, регистрировались фото- и видеокамерами. В этой области измерялось также распределение давления (рис. 1б). Подробное описание экспериментальной установки дано в [4].

Экспериментально измеренные профили давления в исследуемой области разных величин H [4] показывают, что перед линией минимального зазора образуется поджатие потока с возрастанием давления ($+\Delta p$). За линией минимального зазора поток расширяется и давление падает ($-\Delta p$). Распределение давления в областях поджатия и расширения потока при малых числах Рейнольдса теоретически исследовано в [5] на основе уравнений Навье–Стокса в стоксовом приближении. В экспериментах числа Рейнольдса, вычисленные по величине зазора, не превышали 0.1.

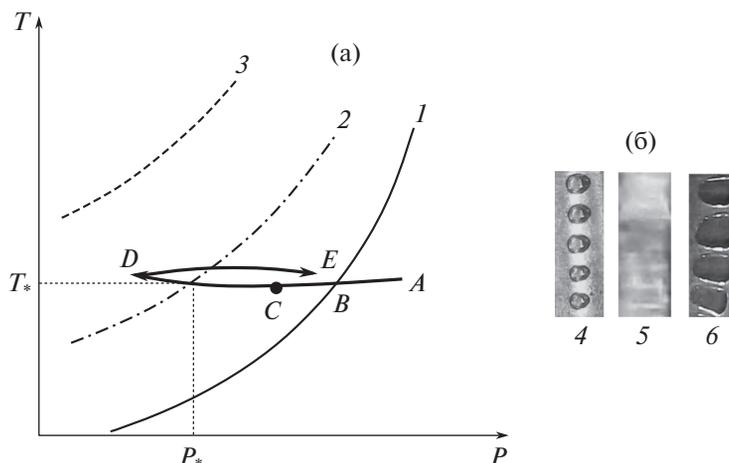


Рис. 2. Диаграмма состояния жидкости в области падения давления за линией минимального зазора (а) и ее фотоизображения (б): 1 – граница возникновения газовой кавитации, 2 – паровая кавитация для воды, 3 – паровая кавитация силиконовой жидкости; А – режим течения без кавитации, В – газовая кавитация, С – паровая кавитация воды, D – закритический режим парогазовой кавитации, E – область газовой кавитации силиконового масла и конденсации паров воды; 4 – цепочка газовых пузырьков, 5 – пелена, соответствующая закритическому режиму, 6 – газовый пузырек с микрокаплями воды; $P^* = 17$ мм рт. ст., $T^* = 20^\circ\text{C}$.

Уменьшение давления зависит от величины зазора между цилиндрами и от скорости вращения. Когда давление в области за линией минимального зазора уменьшается вследствие сближения стенок цилиндров до давления растворенных газов, наблюдается появление газовых кавитационных пузырьков.

В экспериментах в качестве жидкости использовалось гидрофобное силиконовое масло ПМС100, с вязкостью $100 \text{ мм}^2/\text{с}$ и давлением упругости паров 10^{-5} мм рт. ст. По паспортным данным в масле присутствует растворенная вода в объеме 0.5%.

Для экспериментального исследования парогазовой кавитации зазор между цилиндрами уменьшался еще больше, до величины, соответствующей скольжению внутреннего цилиндра по поверхности движущейся стенки внешнего цилиндра. В условиях скольжения при установлении стационарного кавитационного течения за линией минимального зазора происходило падение давления, достаточное для испарения имеющейся в силиконовом масле примеси – воды.

В некоторый момент вращения внешнего цилиндра прекращалось и в жидкости в окрестности минимального зазора начиналось выравнивание давлений. При этом через стенку внешнего цилиндра с помощью микроскопа проводились кино- и фоторегистрация состояния жидкости и поведения кавитационных парогазовых пузырьков. Использование в эксперименте гидрофобной жидкости позволило исключить, несмотря на повышение давления в пузырьках, обратное растворение водяных паровых образований в несущей среде.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В начале эксперимента устанавливался стационарный режим течения жидкости без кавитации, с зазором между цилиндрами больше критического. Затем начиналось постепенное сближение цилиндров. Происходящее при этом изменение состояния среды в области за линией минимального зазора, где происходит падение давления, удобно описывать при помощи термодинамической диаграммы в плоскости параметров давление-температура (P, T), представленной на рис. 2а. Линии 1–3 разделяют области параметров, соответствующих различным состояниям жидкости.

Исходная точка А (начало эксперимента) соответствует докавитационному режиму. При уменьшении зазора Н происходит уменьшение давления и при пересечении на диаграмме границы 1 в жидкости наблюдается газовая кавитация в виде цепочки дискретных кавитационных пузырьков малого размера, расположенных вдоль образующей внутреннего цилиндра. Диаметр пузырьков и расстояние между ними порядка 0.2 мм. Дальнейшее уменьшение зазора Н до режима скольжения внутреннего цилиндра по поверхности внешнего приводит к падению давле-

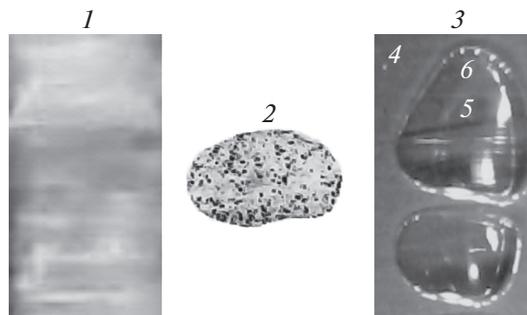


Рис. 3. Динамика развития кавитационных пузырьков из парогазовой области (кадр 1) после остановки движения (кадр 3) через промежуточное состояние водомасляной эмульсии (кадр 2). Размеры газовых пузырьков 0,2 мм.

ния в рассматриваемой области до величины P^* , соответствующей возникновению паровой кавитации для примеси воды в силиконовом масле (точка С на диаграмме). Для температуры $T^* = 20^\circ\text{C}$ значение давления $P^* = 17$ мм рт. ст. При таком падении давления одновременно существуют газовая кавитация для силиконового масла и паровая для примеси воды (линия С–D) и вместо четкой цепочки пузырьков вдоль образующей цилиндров наблюдается неоднородная паро-газо-масляная пелена без четких границ, имеющая серо-белый цвет.

После остановки вращения внешнего цилиндра и соответственно прекращения скольжения внутреннего цилиндра по поверхности внешнего, течение жидкости останавливается, в исследуемой области происходит повышение давления до атмосферного (переход в точку Е на диаграмме). При этом из парогазовой пелены формируются газовые пузырьки со сконденсированными на границе раздела газ–жидкость микрокаплями воды. Отметим, что это явление, а именно, образование капель воды внутри газовых кавитационных пузырей в углеводородной жидкости, экспериментально обнаружено впервые. На рис. 2б представлены фотографии режимов в точках В, D и Е.

На рис. 3 на последовательных фотокадрах представлена наблюдаемая динамика развития кавитационных пузырьков из парогазовой области (кадр 1, точка D на диаграмме). Вместе с паром здесь присутствует и газ, изначально растворенный в масле. Однако резкой границы, как в случае газовой кавитации, не наблюдается. После остановки движения цилиндра происходит повышение давления в области кавитации до атмосферного, с конденсацией водяных паров в микрокапли воды. Переход происходит через кратковременную фазу водомасляной эмульсии (кадр 2, область между линиями 2 и 1 на диаграмме). В отличие от газовой кавитации, где контактируют только две фазы (газ и жидкость), в рассматриваемом случае (кадр 3) в окрестности границы раздела газ–жидкость находятся микрокапли сконденсированных паров воды (на фото: 4 – масло, 5 – газовый пузырек, 6 – микрокапли воды). Временной интервал между кадрами 1 и 3 составляет 1,33 с.

Фотография трехфазного кавитационного пузырька представлена на рис. 4а и его реконструкция на рис. 4б. Газовый пузырек 1 в гидрофобном силиконовом масле 3 с границей раздела 2 содержит включения 4 из капель сконденсированных паров воды.

В кавитационном пузырьке на границах раздела формируются двойные электрические слои. Один из них (внутренний) – на поверхности микрокапли сконденсированной воды, еще один (внешний) – на границе газ–силиконовое масло. Согласно известному эмпирическому правилу Кена, вода с большим по сравнению с маслом значением диэлектрической проницаемости приобретает положительный заряд, а граница с силиконовым маслом – отрицательный. В результате трехфазный кавитационный пузырек индуцирует в среде электрическое поле своей отрицательно заряженной оболочкой и положительно заряженными микрокаплями воды. Возможно, что дополнительный вклад в электрическое состояние среды в окрестности минимального зазора могут вносить отрицательно заряженные тонкие дебаевские слои в жидкости вблизи стенок цилиндров [10, 11]. Эти слои, через возвратное течение у поверхности внутреннего цилиндра [5], сносятся в исследуемую область вниз по потоку. Для жидкостей с проводимостью порядка 10^{-12} См/м толщина дебаевских слоев на границах раздела масла с твердыми диэлектрическими поверхностями составляет порядка 10^{-2} мм.

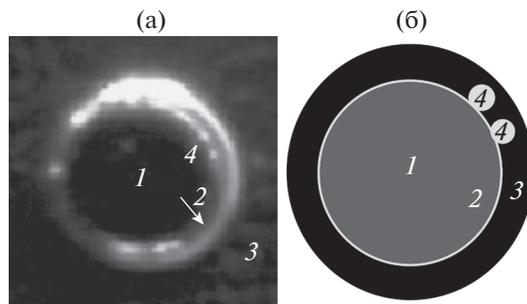


Рис. 4. Фотография трехфазного кавитационного пузырька размером 0.31 мм (а) и его реконструкция (б): 1 – кавитационный газ, 2 – граница раздела газ–силиконовое масло, 3 – силиконовое масло, 4 – микрокапли сконденсированного пара воды.

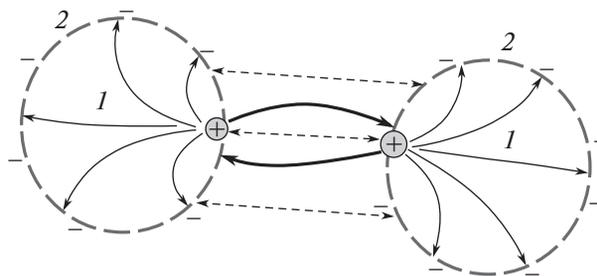


Рис. 5. Взаимное влияние электрических полей пузырьков на водяные микрокапли воды газового пузырька. Заряженные микрокапли воды располагаются на линии минимального расстояния между пузырьками, которая отмечена стрелками.

В экспериментах обычно наблюдается появление нескольких кавитационных пузырьков, взаимодействующих один с другим. Взаимное влияние через кулоновские силы двух трехфазных кавитационных пузырьков схематически представлено на рис. 5. Здесь пунктирные окружности 2 – границы газовых пузырьков в гидрофобной жидкости, имеющие отрицательный поверхностный заряд. Внутри газовых пузырьков 1, на границе раздела с гидрофобной жидкостью, находятся отмеченные знаком “+” микрокапли сконденсированной воды с положительным поверхностным зарядом. На кавитационные пузырьки действуют как силы отталкивания одноименных зарядов их оболочек, показанные пунктирными стрелками, так и силы взаимного притяжения (сплошные стрелки) между разноименно заряженными микрокаплями и оболочками соседних пузырьков. Наблюдения показывают, что такие зарядовые модули могут как притягиваться и объединяться, так и отталкиваться. Это зависит от размеров кавитационных пузырьков и от величины положительного заряда микрокапли. Можно видеть, что при взаимном перемещении двух и более кавитационных пузырьков происходит передвижение по внутренней оболочке пузырька положительно заряженной микрокапли воды под действием поля отрицательного заряда поверхности соседнего пузырька.

Деформация оболочки пузырька и микрокапли приводит к изменению величины напряженности электрического поля между пузырьками и к их слиянию. На рис. 6 представлены фотографии двух пузырьков перед слиянием и после. Временной интервал между кадрами 0.033 с. Перед слиянием происходит вытягивание положительно заряженной микрокапли воды под действием поля отрицательного заряда оболочки сблизившегося соседнего пузырька. На первом кадре стрелками отмечены деформирующиеся капли воды. На втором кадре происходит слияние пузырьков с заряженными областями, при этом наблюдается электролюминесценция, отмеченная на рисунке пунктирными стрелками. Это явление может быть связано с воздействием на среду сильных электрических полей при сближении заряженных поверхностей. На третьем кадре можно видеть образовавшийся после слияния общий пузырек.

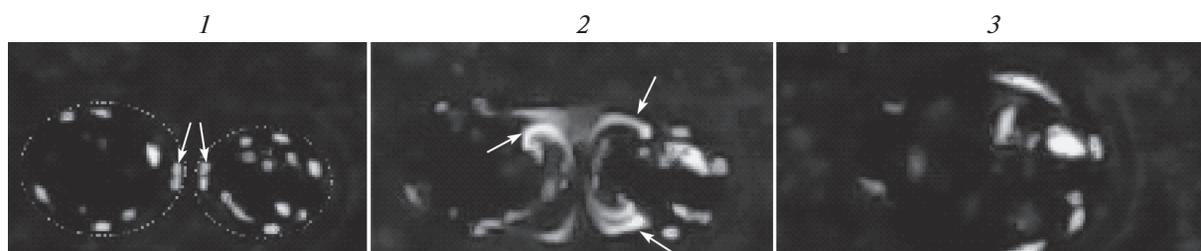


Рис. 6. Слияние двух кавитационных пузырьков, сопровождающееся электролюминесценцией. Размеры пузырьков на первом кадре около 0.2 мм. Стрелками отмечены микрокапли воды. На втором кадре стрелками показана люминесценция разряда заряженных областей при слиянии двух пузырьков в один общий пузырь (третий кадр). Временной интервал между кадрами 0.033 с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально исследован процесс формирования парогазовых кавитационных пузырьков в условиях скольжения цилиндрического тела вдоль твердой поверхности в гидрофобной вязкой жидкости с последующей его остановкой. При скольжении в области течения за линией минимального зазора достигались параметры, соответствующие парогазовой кавитации. После остановки скольжения среда переходит в докавитационную область параметров. На основе кино- и фоторегистрации переходного процесса впервые обнаружено, что кавитационный пузырек в парогазовой области параметров гидрофобной жидкости является трехфазным и имеет сложную структуру, состоящую из газовой фазы, микрокапель сконденсированных на границе газовой фазы паров воды и окружающей жидкости (в отличие от чисто газовой, двухфазной кавитации). Каждая из фаз имеет разную диэлектрическую проницаемость. Вследствие этого на границах раздела образуются поверхностные электрические заряды разных знаков, индуцирующие электрические поля. Установлено влияние электрических полей соседних пузырьков на перемещение микрокапель воды внутри пузырька по границе раздела газ–жидкость. Это может приводить к слиянию кавитационных пузырьков, которое иногда сопровождается электролюминесценцией (вспышками видимого света) из-за действия сильных электрических полей, возникающих при сближении разноименно заряженных областей.

Авторы благодарны академику РАН И.Г. Горячевой за интерес к работе и обсуждение результатов.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Dowson D. Cavitation in lubricating films supporting small loads // Proc. Inst. Mech. Eng. Conf. Lubr. Wear. 1957. P. 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. V. 25. 093102.
3. Монахов А.А., Полянский В.А. Исследование кавитации при малых числах Рейнольдса в узком зазоре // Тез. докл. XVII школы-семинара “Современные проблемы аэродинамики”. Сочи. 2014. М.: Изд. Моск. ун-та. 118 с.
4. Монахов А.А. Исследование кавитации при движении цилиндрического тела вдоль стенки // Изв. РАН МЖГ. 2015. № 3. С. 134–139.
5. Монахов А.А., Котелкин В.Д. Гидродинамика течения жидкости в зазоре между цилиндром и движущейся стенкой // Изв. РАН МЖГ. 2017. № 3. С. 81–87.
6. Joseph D.D. Cavitation in a flowing liquid // Phys. Rev. E. 1995. V. 51. R1649.
7. Ouibrahim A., Fruman D.H., Gaudemer R. Vapour cavitation in very confined spaces for Newtonian and non Newtonian fluids // Phys. Fluids. 1996. № 8. P. 1964.
8. Дорофеев Б.М. Псевдокавитация при кипении недогретой газированной жидкости // ТВТ. 1991. Т. 29. № 3. С. 564–569.
9. Монахов А.А. Гидродинамический источник рентгеновского излучения // ДАН. 2013. Т. 450. № 6. С. 662–664.
10. Polyanskii V.A., Monakhov A.A., Pankrat'eva I.L. On Electromagnetic Phenomena Arising During the Cavitation Motion of a Liquid in a Coaxial Dielectric Channel // Surf. Eng. Appl. Elect. 2017. V. 53. № 5. P. 456–462.
11. Панкратьева И.Л., Полянский В.А. Электризация слабопроводящих жидкостей вблизи стенки // Изв. РАН МЖГ. 2006. № 2. С. 3–16.