

03

## Динамика присоединенного к плоскости двумерного газового пузыря в воде

© В.В. Никулин, А.П. Дрожжин, Е.А. Чашников

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия  
E-mail: adrozh@yandex.ru

Поступило в Редакцию 14 апреля 2026 г.

В окончательной редакции 14 мая 2026 г.

Принято к публикации 14 мая 2026 г.

Экспериментально получен присоединенный к стенке двумерный газовый пузырь в воде. Пузырь образуется после сжигания горючей смеси пропана с кислородом. Выполнена теневая регистрация расширения и коллапса пузыря. Исследован широкий диапазон относительных расширений его объема (от первоначального до максимального), лежащий в интервале от 3.5 до 20. Зарегистрировано опережающее схождение границ пузыря вблизи стенки в процессе коллапса. Установлено, что двумерность движения сохраняется на стадиях расширения и коллапса вплоть до схождения границ. После схождения границ происходит образование трехмерных струй, направленных от стенки.

**Ключевые слова:** двумерный газовый пузырь, коллапс пузыря, плоская стенка, струи жидкости.

DOI: 10.61011/PJTF.2026.16.63427.20730

Динамика пузырей в жидкости широко исследуется на протяжении многих лет. Фундаментальный и практический интерес к данному явлению обусловлен тем, что в результате их коллапса может происходить местная самоорганизация течения среды с образованием локальных струй. Подобные явления возникают, например, при подводных взрывах или кавитационных процессах [1]. В связи с этим установление и моделирование различных форм коллапса является важной научной задачей.

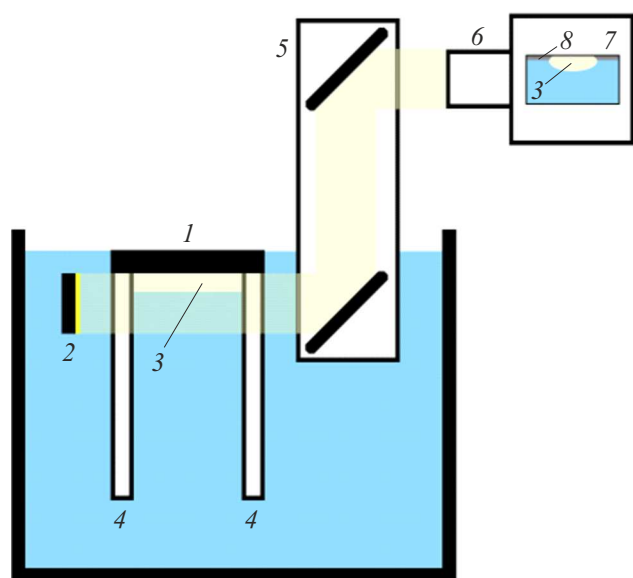
Динамика пузырей в жидкости вблизи поверхностей твердых тел исследовалась в основном в связи с кавитационной эрозией [2–6]. С развитием численных методов появились работы, в которых методом граничных элементов изучалось влияние несферических отклонений на эволюцию пузыря у жесткой стенки [3–6]. В работе [3] при численном моделировании коллапса пузыря вблизи стенки, имеющего форму эллипсоида вращения с большой полуосью параллельной стенке, обнаружено, что при схождении границ пузырь делится на две части за счет сходящейся кольцевой струи жидкости. Предполагается, что в результате такого схождения образуются две кумулятивные струи, одна из которых направлена к стенке, а другая — от нее. Похожий характер схлопывания наблюдается и в численной модели [6]. Динамика пузырей в жидкости существенно больших размеров, чем при кавитации, наблюдалась при изучении возможности создания безвинтовых водных движителей. В работах [7,8] экспериментально и численно исследована динамика газовой полости, присоединенной к плоской стенке, после сжигания в ней газового заряда. Одним из результатов является то, что вследствие схлопывания полости возникает струя, направленная от стенки.

В приведенных работах исследовались трехмерные, хотя и осесимметричные пузыри. Динамика двумерно-

го пузыря, имеющего цилиндрическую геометрию, до настоящего времени не изучена. В частности, неясно, будут ли его расширение и коллапс происходить с сохранением двумерной структуры или на пузыре будут развиваться трехмерные неустойчивости, которые приведут к разрушению двумерного характера движения. Данный вопрос представляет научный интерес. С практической точки зрения двумерные пузыри наряду с трехмерными могут быть применены, например, для создания безвинтовых водных движителей.

Целью настоящей работы является экспериментальное получение двумерного газового пузыря в жидкости, а также установление динамики его расширения и коллапса. Пузырь, так же как в [7,8], образуется после сжигания пропан-кислородной смеси в воде на плоской стенке. Величина расширения пузыря варьируется в экспериментах.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки. В бассейн с водой погружалась П-образная конструкция, состоящая из трех пластин 1 и 4. Две идентичные оптически прозрачные пластины 4 были изготовлены из оргстекла и закреплялись параллельно друг другу под прямым углом к пластине 1. Для видеорегистрации двумерного пузыря 3 как перпендикулярно, так и вдоль его оси конструкция имела возможность разворачиваться на 90°. Размеры пластин 1 и 4 (толщина/ширина/длина) составляли 20 × 87 × 320 и 37 × 265 × 320 mm соответственно (87 mm также равно расстоянию между пластинами 4, 320 mm — размер, перпендикулярный плоскости чертежа). Газовый пузырь с горючей смесью располагался на нижней поверхности пластины 1 на глубине 20 mm, равной толщине пластины. Длина и ширина пузыря составляли 87 и 20 mm и задавались соответственно расстоянием между



**Рис. 1.** Схема экспериментальной установки. 1 — горизонтальная плоская пластина; 2 — светодиодная лампа; 3 — двумерный газовый пузырь в воде; 4 — плоские прозрачные пластины; 5 — перископ; 6 — скоростная видеокамера; 7 — изображение гидродинамического процесса, регистрируемое видеокамерой; 8 — пластинки, удерживающие пузырь.

внутренними поверхностями пластин 4 и расстоянием между двумя накладными пластинками из оргстекла 8, закрепленными на нижней поверхности пластины 1. Высота пузыря примерно равнялась 7 мм. Толщина пластинок 8 равнялась 2,5 мм, а их кромки со стороны пузыря были скошены под углом около 30°. Объем пузыря с горючей смесью  $V = 12 \text{ см}^3$ . Относительная погрешность при измерении объемов пропана и кислорода не превышала 4,4 и 1% соответственно. Расстояние от пузыря 3 до стенок бассейна превышало 320 мм. Смесь поджигалась высоковольтной искрой посередине пузыря (на рисунке не показано). Изменение соотношения компонентов пропан-кислородной смеси позволяло варьировать динамику расширения двумерного пузыря с продуктами сгорания и его геометрические размеры. Световой поток формировался светодиодной лампой 2, погруженной в воду, и при помощи перископа 5 направлялся в объектив скоростной видеокамеры 6 (MotionXtra HG-LE) для регистрации видеоизображения 7 с частотой  $10^4 \text{ fps}$ . Пластины 1 и 4 были жестко зафиксированы, что исключало их смещение при интенсивных силовых нагрузках, возникающих при горении смеси и пульсациях газовой полости.

При сжигании цилиндрического газового заряда происходило увеличение объема пузыря, достижение максимума и последующий коллапс. Объем пузыря рассчитывался в среде Matlab по теневому изображению при съемке вдоль оси пузыря в предположении его двумерности. Величина расширения пузыря варьировалась

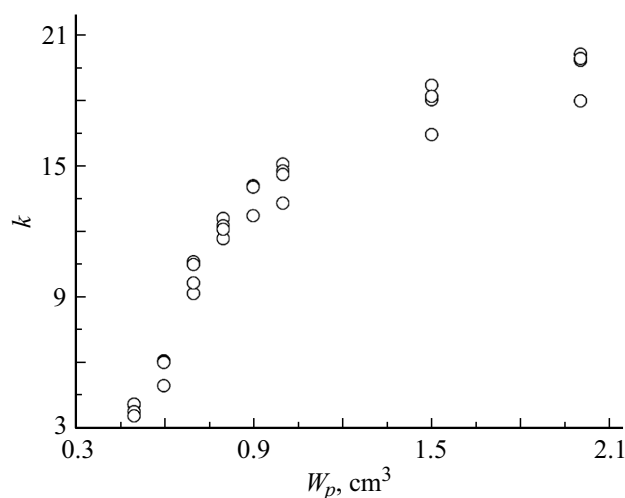
путем изменения состава смеси от максимально бедной до стехиометрии.

На рис. 2 показано относительное максимальное расширение пузыря  $k = (W_m - W_0)/W_0$  ( $W_m, W_0$  — максимальный и начальный объемы) в зависимости от объема пропана ( $W_p$ ). Объем  $W_p = 2 \text{ см}^3$  соответствует стехиометрии. Из рис. 2 следует, что относительные расширения лежат в широком диапазоне (от 3,5 до 20 раз).

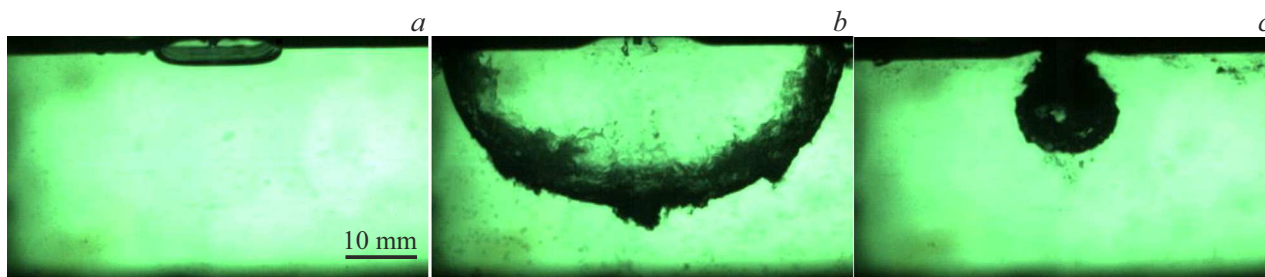
На рис. 3 показана динамика пузыря при съемках вдоль его оси. Горючая смесь стехиометрическая. Согласно данным рис. 3, расширение и коллапс пузыря происходят по сценарию, аналогичному сценарию для осесимметричных пузырей, присоединенных к стенке [8]. На стадии коллапса происходит опережающее сближение его границ вблизи стенки (рис. 3, c). Значительных нарушений двумерности пузыря не наблюдается, поскольку теневые изображения четкие и не замазываются. Максимальная скорость движения границы вблизи стенки на расстоянии 0,75 мм достигает 15 м/с на стадии расширения и 10 м/с на стадии коллапса. Поскольку сценарий коллапса аналогичен сценарию для осесимметричных пузырей, можно предполагать, что причины более быстрого схождения пристеночных течений по сравнению со схождением объемных те же, что и обсуждавшиеся в [8].

Для подтверждения двумерности формы пузыря были проведены съемки перпендикулярно его оси вдоль поверхности пластины 1. На рис. 4 показана динамика пузыря при съемках с такого ракурса. Пузырь получен в тех же условиях, что и на рис. 3.

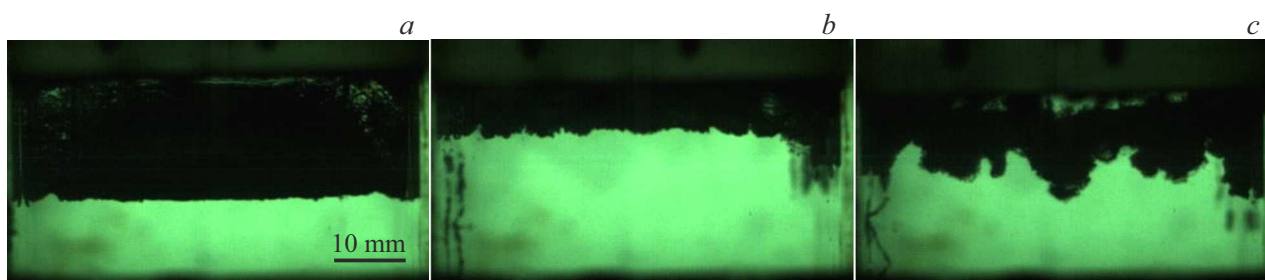
Темная область на правой стенке (рис. 4, b и c) связана с содержимым пузыря, оставшимся на стенке после максимального расширения. Данная область неподвижна в отличие от поверхности пузыря. Таким образом, форма пузыря вплоть до завершения коллапса не имеет существенных нарушений двумерности. Сохранение двумерности формы пузыря указывает на то, что течение



**Рис. 2.** Относительное максимальное расширение пузыря в зависимости от объема пропана.



**Рис. 3.** Теневые изображения пузыря при съемках вдоль его оси. *a* — начало,  $t = 0$ ; *b* — максимальное расширение,  $t = 6.8$  ms; *c* — завершение коллапса,  $t = 13.2$  ms.



**Рис. 4.** Теневые изображения пузыря при съемках перпендикулярно его оси вдоль плоскости. *a* — максимальное расширение,  $t = 6.8$  ms; *b* — завершение коллапса,  $t = 13.2$  ms; *c* — через 2.2 ms после завершения коллапса,  $t = 15.4$  ms.

жидкости также остается двумерным. После схождения двумерный характер течения нарушается, образуется несколько отдельных струй на протяжении оси пузыря (рис. 4, *c*). Скорости струй близки по величине, их максимальное значение примерно равно 6 м/с. Образование струй может быть связано с нарушением двумерности схождения границы пузыря вблизи стенки. В результате границы сходятся не одновременно, в месте более раннего схождения происходит опережающее соударение пристеночных течений воды и соответственно более раннее образование струй, направленных от стенки.

Отметим, что подобный сценарий динамики пузыря наблюдался при всех относительных расширениях. Исключением был эксперимент с сильно обедненной смесью, когда  $W_p = 0.5 \text{ cm}^3$ . В этом случае пузырь прекращал коллапсировать еще до схождения границ вблизи стенки. При этом двумерность сохранялась до остановки движения. Таким образом, присоединенные к стенке двумерные пузыри в воде при сжигании в них горючих смесей сохраняют двумерный характер движения в процессах расширения и коллапса вплоть до схождения границ пузыря вблизи поверхности. После схождения границ наблюдается образование трехмерных струй, направленных от стенки, что может быть связано с неодновременным схождением границ пузыря вблизи нее.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

### Список литературы

- [1] М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат, *Проблемы гидродинамики и их математические модели* (Наука, М., 1977). <https://djvu.online/file/icS39AkxZol4Q>
- [2] J.W. Strutt (Lord Rayleigh), *Phil. Mag.*, **34**, 94 (1917). DOI: 10.1080/14786440808635681
- [3] О.В. Воинов, В.В. Воинов, *ДАН СССР*, **227** (1), 63 (1976). <https://www.mathnet.ru/rus/dan/v227/i1/p63>
- [4] D.C. Gibson, J.R. Blake, *Appl. Sci. Res.*, **38**, 215 (1982). <https://www.sci-hub.ru/10.1007/bf00385951>
- [5] J.R. Blake, D.C. Gibson, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **19**, 99 (1987). <https://www.sci-hub.ru/10.1146/annurev.fl.19.010187.000531>
- [6] А.А. Аганин, М.А. Ильгамов, Л.А. Косолапова, В.Г. Малахов, *Теплофизика и аэромеханика*, **23** (2), 219 (2016). [А.А. Aganin, M.A. Ilgamov, L.A. Kosolapova, V.G. Malakhov, *Thermophys. Aeromech.*, **23** (2), 211 (2016). DOI: 10.1134/S0869864316020074].
- [7] В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Р.Н. Медведев, *Теплофизика и аэромеханика*, **26** (4), 655 (2019). [V.S. Teslenko, A.P. Drozhzhin, R.N. Medvedev, *Thermophys. Aeromech.*, **26** (4), 611 (2019). DOI: 10.1134/S0869864319040127].
- [8] В.В. Никулин, М.С. Котельникова, В.С. Тесленко, А.П. Дрожжин, Е.А. Чашников, *Письма в ЖТФ*, **50** (21), 36 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2024.21.58957.19993 [V.V. Nikulin, M.S. Kotelnikova, V.S. Teslenko, A.P. Drozhzhin, E.A. Chashnikov, *Tech. Phys. Lett.*, **50** (11), 33 (2024). DOI: 10.61011/PJTF.2026.16.63427.20730].