

03.1;03.4

Коэффициент расширения тороидального воздушного пузыря в воде

© В.В. Никулин, Е.А. Чашников

Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия

E-mail: nikulin@hydro.nsc.ru, chashnikov.e.a@gmail.com

Поступило в Редакцию 29 апреля 2022 г.

В окончательной редакции 20 мая 2022 г.

Принято к публикации 20 мая 2022 г.

Экспериментально исследован подъем тороидального пузыря в воде, получаемого путем инжекции импульсной струи воздуха в воду через сопло вертикально вверх. Установлено, что, несмотря на уменьшение сечения тороидального пузыря в процессе подъема, его радиус в зависимости от пройденного расстояния растет линейно, как и в случае автомоделных вихревых колец. Определен коэффициент расширения пузыря при различных объемах инжектируемого воздуха. Проведено сравнение с тороидальными пузырями, получаемыми при разрыве в воде воздушных шаров. Дано качественное объяснение наблюдаемых различий.

Ключевые слова: вихревое кольцо, тороидальный пузырь.

DOI: 10.21883/PJTF.2022.13.52745.19241

Тороидальные пузыри являются разновидностью плавучих вихревых колец [1] в жидкости, в которых в качестве плавучего вещества используется газ [2–6]. Их отличительной особенностью является то, что газ под действием центробежной силы концентрируется в окрестности оси ядра вихревого кольца на протяжении всего движения. Таким образом, наблюдаемый объект является двухфазным тороидальным вихрем, в ядре которого содержится газ, а в атмосфере — жидкость. В ряде работ предполагается, что ядро вихря совпадает с пузырем [3–5]. Тогда при небольшом изменении давления по сравнению с атмосферным объемом пузыря и, следовательно, ядра вихря в процессе подъема будет практически постоянным. Это в силу увеличения радиуса тороидального пузыря при всплывании приведет к уменьшению радиуса сечения пузыря, а следовательно, и ядра [3–6]. В таком случае возникает вопрос об автомоделности, поскольку при автомоделном движении радиусы тороидального ядра и его сечения должны изменяться подобно [1]. В то же время при наличии автомоделности радиус ядра должен линейно возрастать с пройденным расстоянием. Специальных исследований подобной зависимости для тороидальных пузырей не проводилось, однако экспериментальные значения радиуса пузыря на различных высотах, полученные в [4], аппроксимируются линейными зависимостями. Если эта зависимость линейна, то движение либо автомоделно, несмотря на увеличение отношения радиуса тороидального пузыря к радиусу его сечения, либо носит более сложный характер, чем для однофазных плавучих вихревых колец. Таким образом, вопрос о зависимости радиуса тороидального пузыря от высоты подъема носит принципиальный характер для построения модели его движения. Изменение радиуса тороидального пузыря R в зависимости от пройденного пути z характеризуется величиной $\alpha = dR/dz$, называемой быстротой или коэффициентом расширения [7,8].

В работе [9] для однофазных плавучих вихревых колец в воздухе, содержащих более легкий газ, установлено, что коэффициент расширения постоянен при движении. Для тороидальных пузырей измерений коэффициентов расширения не проводилось.

В настоящей работе выполнены экспериментальные измерения радиуса тороидального пузыря в зависимости от высоты подъема. Пузыри получают при инжекции импульсной струи воздуха в воду вертикально вверх через сопло. Варьируется объем инжектированного воздуха. Делается вывод о характере зависимости, вычисляются коэффициенты расширения. Результаты сравниваются с коэффициентами расширения пузырей, полученных при разрыве воздушных шаров под водой. Дается качественное объяснение наблюдаемых различий.

Эксперименты проведены в прозрачном сосуде из оргстекла поперечного сечения 20×20 мм с высотой 1200 мм, наполненном водой. Сжатый воздух через регулятор давления подводится к электромагнитному клапану. Электромагнитный клапан управляется контроллером. В течение короткого промежутка времени контроллер открывает клапан, сжатый воздух вытекает через расположенное на расстоянии 100 мм от дна камеры сопло вертикально вверх в воду, где создается тороидальный пузырь. Выходной диаметр сопла 4 мм. Сопло изготовлено из несмачиваемого материала, чтобы вода не затекала внутрь сопла. Движение пузыря регистрируется скоростной видеокамерой MotionXtraHG-100k с частотой 125 fps и выдержкой 125 μ s. Производится теневая съемка на просвет перпендикулярно направлению движения. Обработка изображений реализуется в среде Matlab с использованием Image Processing Toolbox и базовых элементов, определяется внешний поперечный размер R' теневого изображения. Для определения объема воздуха в пузыре V пузырь улавливается воронкообразным устройством, расположенным в верхней части



Рис. 1. Теневые фотографии различных стадий эволюции пузыря.

сосуда. Такой способ определения объема существенно точнее, чем по видеоизображениям, поскольку тороидальный пузырь имеет не строго одинаковую и круговую форму во всех сечениях. В экспериментах варьируются давление сжатого воздуха (от 2 до 6 bar) и длительность открытия электромагнитного клапана (от 10 до 25 ms). При этом объем пузыря изменяется от 12 до 43 см³. Характерный диаметр пузыря составляет 50–70 mm, а путь — 600 mm. На таком расстоянии изменение гидростатического давления мало по сравнению с атмосферным, поэтому объем пузыря постоянен во время движения. Регистрируются только те пузыри, которые проходят весь путь до улавливающего устройства. Выполнено 30 наблюдений.

На теневых фотографиях (рис. 1) показаны различные стадии эволюции пузыря, соответствующие моментам времени 34, 276, 590 ms после начала инъекции импульсной струи воздуха: отрыв пузыря от сопла, образование тороидального пузыря, увеличение радиуса при подъеме. Видно, что образование тора происходит в процессе всплывания односвязного воздушного объема, а не в результате сворачивания вихревой пелены, как для вихрей в однородной жидкости [8]. Таким образом, формирование тора происходит по бароклинному механизму, связанному с градиентом плотности. В процессе формирования вокруг тора возникает циркуляция [2]. Радиус тороидального пузыря R , равный радиусу осевой

линии тора, определяется через R' и V посредством двух уравнений:

$$2\pi^2 R a^2 = V, \quad R + a = R',$$

где a — радиус сечения тора. Из них получается кубическое уравнение относительно R , которое в физической верной области $R \in (\sqrt[3]{V/2\pi^2}, R')$ имеет только одно решение. Ошибка определения радиуса не превышает 8%. На рис. 2 точками показаны зависимости R/r_0 от z/r_0 для различных коэффициентов расширения, соответствующие объемам пузыря 26, 23.9 и 43.4 см³. Здесь r_0 — радиус сферы, объем которой равен объему пузыря. Координата $z = 0$ берется на расстоянии 150 mm от сопла, где тороидальный пузырь уже сформирован. Сплошные линии соответствуют аппроксимациям экспериментальных точек линейными регрессиями. Достоверность линейной аппроксимации оценивается с помощью коэффициента детерминации [10]. Оказалось, что для всех экспериментов коэффициент детерминации лежит в диапазоне 0.94–0.99. Отсюда следует, что отклонения от линейной зависимости, связанные с неучтенными факторами, составляют не более 6%. К неучтенным факторам относятся погрешности измерения радиуса и не строго тороидальная форма пузыря, связанная с возмущениями его поверхности. Таким образом, вывод Тернера, сделанный для плавучих однофазных вихрей, о том, что на большей части их движения справедлив линейный рост размеров вихря с пройденным путем, справедлив и для тороидальных пузырей.

Коэффициенты расширения α определяются из графиков линейных регрессий. Величины α для различных объемов инжектируемого воздуха показаны на рис. 3. Из этого рисунка следует, что заметной зависимости α от объема инжектируемого воздуха, т. е. от величины

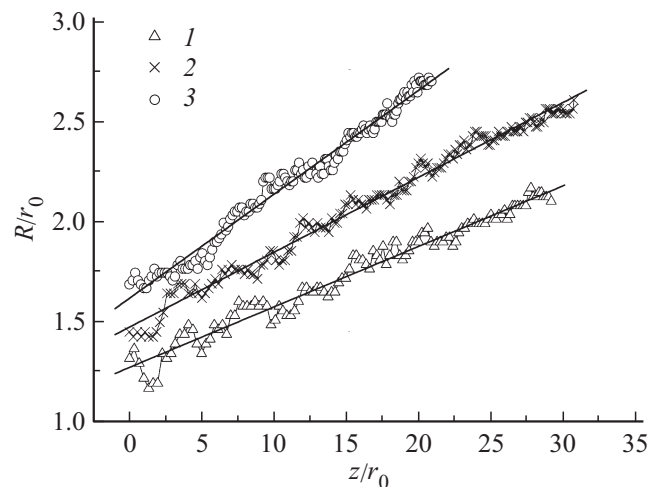


Рис. 2. Экспериментальные зависимости (точки) безразмерного радиуса тороидального пузыря от безразмерной высоты подъема, соответствующие объемам пузыря, равным 26 (1), 23.9 (2) и 43.4 см³ (3). Линии — аппроксимация точек линейными регрессиями.

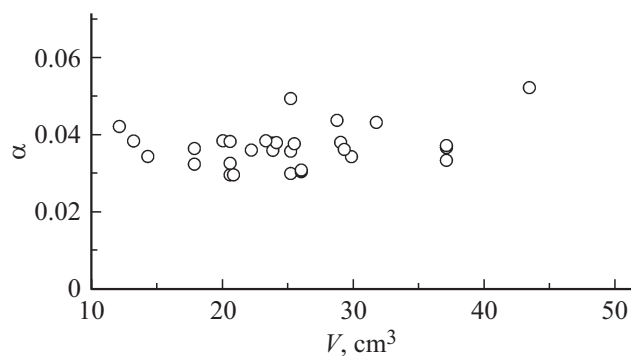


Рис. 3. Значения коэффициента расширения тороидального пузыря α для различных объемов инжектируемого воздуха.

выталкивающей силы, нет. Такая же ситуация наблюдается и для вихрей, получаемых при разрыве мыльных пузырей, наполненных легким газом, в воздухе [9]. Среднее значение и дисперсия равны $\alpha = 0.037 \pm 0.005$. Из линейных регрессий, представленных на рис. 9 работы [4], следует $\alpha = 0.07, 0.09, 0.1, 0.11$. В работе [9] получено $\alpha = 0.09 \pm 0.02$. Отметим, что в эту зависимость укладываются и данные [4]. Таким образом, коэффициенты расширения тороидальных пузырей, получаемых при разрыве воздушных шаров под водой или мыльных пузырей в воздухе, оказываются больше, чем при инъекции струи воздуха в воду. Этому различию можно дать следующее качественное объяснение. При разрыве воздушных шаров и мыльных пузырей циркуляция вырабатывается за счет бароклинических моментов сил, действующих на пузырь, образовавшийся после разрыва. Обозначим ее через Γ_0 . При инъекции струи воздуха в воду к Γ_0 еще добавится циркуляция Γ_1 , вырабатываемая за счет сдвигового слоя на границе воздушной струи и воды. Поэтому в данном случае полную циркуляцию подобно [7] можно представить в виде суммы: $\Gamma = \Gamma_0 + \Gamma_1$. Поскольку увеличение радиусов тороидальных пузырей происходит линейно с высотой, т. е. коэффициенты расширения постоянны, для их аналитического выражения можно воспользоваться формулой Тернера [1]: $\alpha = F/(2\pi c\Gamma^2)$, где F — выталкивающая сила на единицу массы, c — постоянная. Тогда при разрыве пузырей $\alpha = \alpha_0 = F/(2\pi c\Gamma_0^2)$, причем величина Γ_0^2 пропорциональна F [7]. В случае инъекции струи в воду $\alpha = F/(2\pi c(\Gamma_1 + \Gamma_0)^2) = \alpha_0/(1 + \Gamma_1/\Gamma_0)^2$. Отсюда следует, что $\alpha < \alpha_0$.

Таким образом, установлено, что, несмотря на отсутствие автомодельной зависимости между радиусами тороидального пузыря и его сечения, тороидальные пузыри при всплывании расширяются линейно с высотой подъема. Показано, что тороидальные пузыри, получаемые при инъекции импульсной струи воздуха в воду, имеют меньший коэффициент расширения, чем при разрыве воздушных шаров. Это связано с дополнительной циркуляцией, возникающей при инъекции воздуха.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J.S. Turner, Proc. Roy. Soc. A, **239**, 61 (1957). DOI: 10.1098/rspa.1957.0022
- [2] J.K. Walters, J.F. Davidson, J. Fluid Mech., **17**, 321 (1963). DOI: 10.1017/S0022112063001373
- [3] T. Pedley, J. Fluid Mech., **32**, 97 (1968). DOI: 10.1017/S0022112068000601
- [4] A.R. Vassel-Be-Hagh, R. Carriveau, D.S.-K. Ting, J. Fluid Mech., **769**, 522 (2015). DOI: 10.1017/jfm.2015.126
- [5] A.R. Vassel-Be-Hagh, R. Carriveau, D.S.-K. Ting, J.S. Turner, Phys. Rev. E, **92**, 043024 (2015). DOI: 10.1103/PhysRevE.92.043024
- [6] X. Yan, R. Carriveau, D.S.-K. Ting, J. Fluids Eng., **140**, 054502 (2018). DOI: 10.1115/1.4038661
- [7] D. Bond, H. Johari, Exp. Fluids, **48**, 737 (2010). DOI: 10.1007/s00348-009-0761-z
- [8] Д.Г. Ахметов, *Вихревые кольца* (ГЕО, Новосибирск, 2007), с. 112–115.
- [9] Б.И. Заславский, И.М. Сотников, ПМТФ, № 1, 20 (1983). [B.I. Zaslavskii, L.M. Sotnikov, J. Appl. Mech. Tech. Phys., **24**, 16 (1983). DOI: 10.1007/bf00914471].
- [10] Э. Ферстер, Б. Ренц, *Методы корреляционного и регрессионного анализа* (Финансы и статистика, М., 1983), с. 102.