

ОБРАЗОВАНИЕ ВИХРЕВОГО КОЛЬЦА ПРИ ВСПЛЫВАНИИ БОЛЬШОГО ВОЗДУШНОГО ПУЗЫРЯ В ВОДЕ

И. Г. Жидов, Е. Е. Мешков,
В. В. Попов, В. Г. Рогачев, А. И. Голимяков

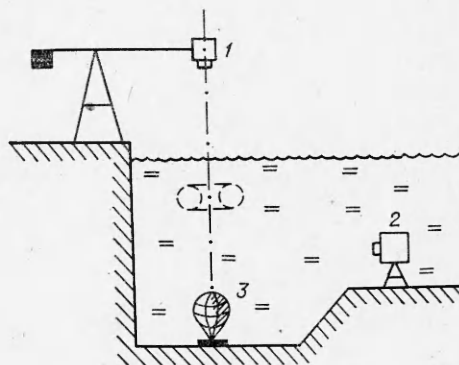
(Москва)

Всплыванию газовых пузырьков в жидкостях посвящено большое количество экспериментальных и теоретических работ. Обзор литературы по этому вопросу содержится, например, в [1, 2]. Наибольшее внимание уделялось изучению всплывания пузырьков сравнительно малых размеров ($R_0 \leq 3$ см; $V_0 \leq 100$ см³). При $R_0 \leq 0,1$ см воздушный пузырь всплывает в воде, практически не деформируясь. При $0,1 \leq R_0 \leq 2-3$ см форма пузыря меняется в процессе подъема, однако силы поверхностного натяжения препятствуют его дроблению. В работе [3], посвященной исследованию всплывания пузырей с $R_0 \approx 3$ см, основное внимание уделялось описанию формы верхней части поверхности и движению жидкости около нее. Вопрос о дроблении пузыря здесь не рассматривался. Исследование всплывания пузырька с $R_0 \approx 3$ см ($V_0 = 100$ см³) показало [4], что при $t > \sqrt{R_0/g}$ он превращается во всплывающее тороидальное кольцо. В [4] рассмотрена также эволюция пузырей с $V_0 = 100-3000$ см³ при $t < 2\sqrt{R_0/g}$. Экспериментальные возможности установки не позволили из-за влияния стенок наблюдать дальнейшую эволюцию крупных ($V_0 > 100$ см³) пузырей.

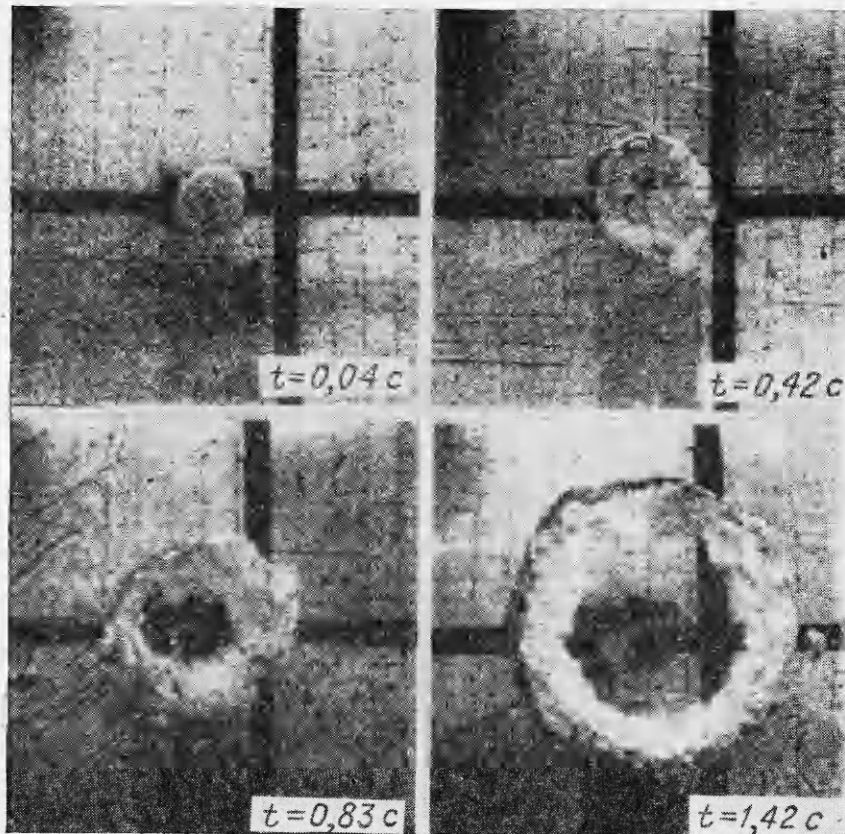
Наиболее крупные газовые пузыри сферической формы образуются при взрыве ВВ в жидкости [5]. Однако в этом случае имеют место сильные пульсации размеров пузыря, качественно меняющие картину его всплывания [6].

В данной работе приведены результаты экспериментального исследования подъема в воде большого воздушного пузыря ($R_0 = 15$ см, $V_0 = 1,4 \cdot 10^4$ см³), который в начальный момент имеет сферическую форму и покинтся.

Схема эксперимента изображена на фиг. 1, где 1 — кинокамера «Красногорск» 16 мм, $F = 10$ мм, 2 — кинокамера «Экран» 8 мм, $F = 12,5$ мм в боксе для подводных съемок, 3 — резиновый баллон, наполненный воздухом. Воздушный пузырь образовывался при протыкании длинной иглой оболочки тонкого резинового баллона, надутого воздухом. Баллон помещался в тонкую капроновую сетку и удерживался на расстоянии 30 см от дна бассейна глубиной 2 м. Резиновая оболочка быстро стягивается, освобождая воздушный пузырь (такой способ образования исходного пузыря аналогичен использованному в [4]). Киносъемка показывает, что время стягивания оболочки меньше 0,02 с. За это время пузырь практически не сдвигается с места. Остатки оболочки и капроновая сетка слабо влияют на подъем пузыря, поскольку их суммарная поверхность значительно меньше поверхности пузыря. Это влияние сводится к начальному возмущению границы раздела вода—воздух. Когда пузырь поднимается на $H - H_0 > R_0$, влияние сетки и оболочки становится тем более несущественным, поскольку последние остаются внизу (H_0 — начальная высота центра пузыря.)



Ф и г. 1



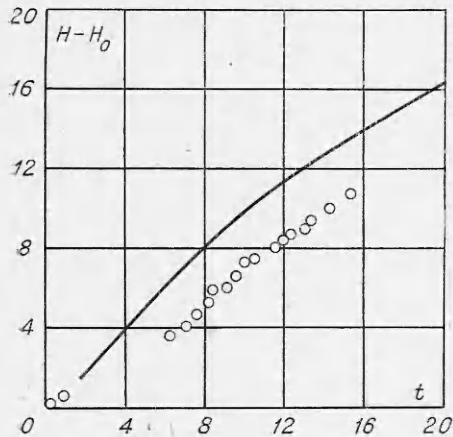
Ф и г. 2

Картина всплывания регистрировалась с помощью кинокамер «Красногорск» и «Экран» с частотой съемки 48 кадр/с. Расстояние от стенок и дна бассейна выбиралось достаточно большим, чтобы исключить их влияние на всплывание пузыря. При определении геометрических размеров учитывалось различие коэффициентов оптического преломления воды и воздуха.

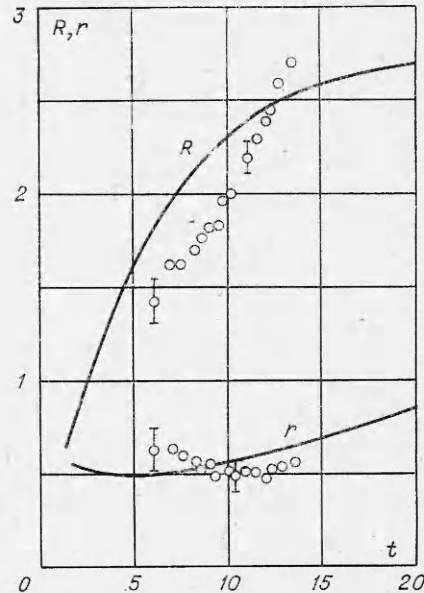
Благодаря гравитационной неустойчивости [7] границы вода—воздух, на верхнем полушарии пузыря амплитуда возмущения поверхности нарастает. С течением времени рост возмущений поверхности приводит к отрыву от нее пузырьков диаметром ~ 5 см. По мере подъема происходит дробление этих пузырьков на более мелкие и картина их распределения приобретает хаотический, турбулентный характер. При $t \approx 2\sqrt{R_0/g}$ образуется характерное тороидальное вихревое кольцо, состоящее из массы пузырьков диаметром ~ 1 см, вращающихся вокруг осевой линии тора. К моменту выхода тороидального кольца на поверхность воды диаметр пузырьков составляет $\sim 0,1-0,5$ см. Помимо визуальных наблюдений, прямым подтверждением того факта, что тороидальное кольцо состоит из отдельных пузырьков, является увеличение объема кольца в несколько раз по сравнению с исходным объемом воздушного пузыря. В момент $t = 10\sqrt{R_0/g}$ объем тороида $V = 2,4V_0$, тогда как адиабатическое увеличение газового объема из-за его всплывания не превышает 15 %.

Общую картину образования и развития вихревого кольца иллюстрирует фиг. 2 (вид сверху, съемка проводилась кинокамерой 2).

Зависимости высоты подъема $H(t)$, отсчитываемой от начального положения пузыря H_0 , большого $R(t)$ и малого $r(t)$ радиусов тора представлены на фиг. 3, 4 в безразмерном виде. Масштабом измерения линейных размеров является R_0 , времени — $t_0 = \sqrt{R_0/g}$. Погрешность в определении



Ф и г. 3



Ф и г. 4

R и r составляет в среднем $\sim 10\%$ и определяется в основном неровностями края тороидального кольца.

На фиг. 3, 4 для сравнения с экспериментом приведены результаты расчета $H(t)$, $R(t)$, $r(t)$ по феноменологической модели [8] (сплошная линия).

В расчете, соответствующем случаю внешней среды постоянной плотности, взят набор безразмерных параметров, близкий к использованному в [8]: $t'_0 = 0,12$; $\xi = 1,29 \cdot 10^{-3}$; $\gamma_0 = 0,2$; $R'_0 - r'_0 = 0,596$; $H'_0 = 0,0076$; $V'_0 = 0,128$; $v'_0 = 0$; $\alpha = 0,055$; $\beta = 0,5$; $C_x = 0,4$; $\theta = \text{const}$; $\rho_1 = \text{const}$ (обозначения те же, что и в [8]). Удовлетворительное согласие расчетных и экспериментальных данных указывает на разумный выбор эмпирических констант в модели.

Тенденция к расхождению расчетной и экспериментальной зависимостей $R(t)$ заметно проявляется при $t/t_0 \geq 12$, когда на подъем кольца влияет поверхность воды. Это влияние приводит к более медленному всплыванию и более быстрому расширению вихревого кольца, нежели в случае неограниченной среды, для которого применима модель [8].

Устойчивость полученных результатов по отношению к вариации начальных условий проверялась экспериментально. В частности, варьировалось место повреждения резиновой оболочки (на верхнем полюсе и на экваторе), варьировался размер ячейки капроновой сетки (3×3 см, 6×6 см). Качественное и количественное совпадение результатов этих экспериментов при $t > t_0$ указывает на слабую зависимость картины всплывания вихревого кольца от начальных условий.

Поступила 11 V 1976

ЛИТЕРАТУРА

1. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. М., Физматгиз, 1959.
2. Бэтчелор Дж. К. Введение в динамику жидкости. М., «Мир», 1973.
3. Davies R. M., Taylor G. I. The mechanics of large bubbles rising through extended liquids and through liquids in tubes.— «Proc. Roy. Soc.», ser. A, 1950, vol. 200, N 1062, p. 375.
4. Walters J. K., Davidson J. F. The initial motion of a gas bubble formed in an inviscid liquid.— «J. Fluid Mech.», 1963, vol. 17, pt 3, p. 321.
5. Христофоров Б. Д. Параметры ударной волны и газового пузыря при подводном взрыве зарядов разной плотности из тэна и азида свинца.— ПМТФ, 1961, № 4, с. 118.
6. Подводные и подземные взрывы. М., «Мир», 1974.
7. Taylor J. The instability of liquid surfaces when accelerated in a direction perpendicular to their planes.— «Proc. Roy. Soc.», ser. A, 1950, vol. 201, N 1065, p. 192.
8. Онуфриев А. Т. Теория движения вихревого кольца под действием силы тяжести, подъем облака атомного взрыва.— ПМТФ, 1967, № 2.

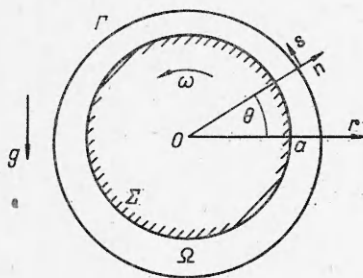
УДК 532.516

ДВИЖЕНИЕ ЖИДКОЙ ПЛЕНКИ НА ПОВЕРХНОСТИ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ ЦИЛИНДРА В ПОЛЕ ТЯЖЕСТИ

В. В. Пухначев

(Новосибирск)

1. **Постановка задачи.** Рассматривается плоское движение жидкой пленки на поверхности вращающегося цилиндра в поле тяжести (см. фигуру). Примем обозначения: a — радиус цилиндра; ω — постоянная угловая скорость его вращения вокруг своей



оси; g — ускорение силы тяжести; ν — кинематическая вязкость жидкости; ρ — ее плотность; σ — коэффициент поверхностного натяжения. Из этих величин можно составить три независимых безразмерных комбинации: число Рейнольдса $Re = a^2\omega/\nu$, число Галилея $\gamma = g/a\omega^2$ и обратное число Вебера $\beta = \sigma/\rho a^3\omega^2$.

Задача состоит в определении положительной при $t \in [0, T]$ и всех θ функции $h(\theta, t)$ и решения u, v, p системы

уравнений Навье—Стокса

$$(1.1) \quad \begin{aligned} u_t + uu_r + \frac{v}{r} u_\theta - \frac{v^2}{r} &= -p_r + Re^{-1}(u_{rr} + \\ &+ \frac{1}{r} u_r + \frac{1}{r^2} u_{\theta\theta} - \frac{2}{r^2} v_\theta - \frac{u}{r^2}) - \gamma \sin \theta, \\ v_t + uv_r + \frac{v}{r} v_\theta + \frac{uv}{r} &= -\frac{1}{r} p_\theta + Re^{-1}(v_{rr} + \\ &+ \frac{1}{r} v_r + \frac{1}{r^2} v_{\theta\theta} + \frac{2}{r^2} u_\theta - \frac{v}{r^2}) - \gamma \cos \theta, \\ (ru)_r + v_\theta &= 0, \end{aligned}$$