

УДК 532.5+533.6.011.72+534.122

СОЗДАНИЕ СПЕЦИАЛЬНЫХ УДАРНЫХ ТРУБ И ИССЛЕДОВАНИЯ КУМУЛЯЦИИ ЖИДКИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ВО ВРАЩАЮЩЕЙСЯ СИСТЕМЕ

В. К. Кедринский

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск, Россия
E-mail: kedr@hydro.nsc.ru

Представлены две схемы ударных труб и результаты экспериментальных исследований кумуляции жидких цилиндрических оболочек во вращающейся системе. В рамках первой схемы исследовалось одномерное сжатие (классическая кумуляция) вращающейся цилиндрической оболочки при взрывном характере нагружения кольцевым поршнем. С использованием модели динамики одномерной цилиндрической кумуляции в покоящейся безграничной жидкости дана оценка экспериментальных результатов. В рамках второй схемы на внутренней поверхности вращающейся газовой полости обнаружен скачок бора, образованный поршнем при ее ударно-волновом нагружении и распространении вниз вдоль оси симметрии.

Ключевые слова: кумуляция, схлопывание цилиндрической облицовки, вращающаяся система.

DOI: 10.15372/PMTF20220101

Введение. Задача о кумуляции цилиндрической облицовки была поставлена в 1962 г. Б. В. Войцеховским двум выпускникам, защитившим за год до этого дипломные работы в Институте гидродинамики АН СССР. Была определена цель — создать гидродинамическую ударную трубку, обеспечивающую цилиндрическую симметрию газовой полости в процессе ее схлопывания, и добиться взрыва химически активной газовой смеси, заполняющей полость. Очевидно, Б. В. Войцеховского заинтересовало открытие [1, 2], сделанное в 1960 г. одним из этих выпускников, исследовавшим схлопывание заполненного химически активной газовой смесью сферического пузырька в воде ударной волной и установившим, что в соответствии с законом адиабатического сжатия в схлопывающемся пузырьке достигается температура взрывной реакции смеси. Доказательством этого служили возникновение световой вспышки в момент максимального сжатия в отсутствие подсветки процесса и “мгновенный” излом траектории на непрерывной развертке. Спустя несколько десятилетий стало известно, что Б. В. Войцеховский с 1953 г. в течение нескольких лет занимался разработкой устройств, обеспечивавших испытания на прочность конструкции разрабатывавшегося атомного артиллерийского снаряда. Можно предположить, что постановка указанной задачи была попыткой создать простейшую модель термоядерного синтеза [3].

Системы и отдельные кластеры пузырьков с химически активным газом использованы в различных областях науки и техники, в том числе в классических, созданных более 70 лет назад моделях неограниченной кумуляции [4] и проведенных в начале XXI в. экспериментальных исследованиях и расчетах термоядерных процессов в кавитирующих сферических пузырьковых кластерах размером порядка 10^{-2} м [5–7], сформированных в дейтерированном ацетоне при резонансной частоте, приблизительно равной 20 кГц, и в стадии коллапсов при частоте порядка 2000 с^{-1} излучающих термоядерные нейтроны. В 1986 г. в Институте гидродинамики АН СССР при исследовании распространения ударных волн в пузырьковой среде, содержащей химически активные газовые смеси, обнаружен эффект формирования новой волны, получившей название волны пузырьковой детонации. Скорость и амплитуда этой волны существенно превышали скорость и амплитуду, полученные в экспериментах с пассивной газовой смесью [8].

Ударная трубка с газовой полостью во вращающейся жидкости. Результаты первых удачных экспериментов на простой установке, представлявшей собой прозрачную, заполненную водой камеру с основной рабочей частью — “вертушкой”, позволили создать две экспериментальные ударные трубки (УТ): 1) с вращающейся жидкостью при одномерном схлопывании цилиндрической полости; 2) с формированием практически двух цилиндрических симметрий.

Первая ударная трубка (УТ-1) (рис. 1) представляет собой прозрачный цилиндрический контейнер 1 диаметром 100 мм, смонтированный на оси мотора, скорость вращения которого приблизительно равна 30 об/с. Дно непрозрачного контейнера 2 со слегка закругленной кромкой зафиксировано на расстоянии 25 мм от дна контейнера 1. В верхней части расстояние между контейнерами 1 и 2 определяется размером кольцевого поршня 3. Пространство между контейнером и поршнем заполнено водой.

Вращающаяся система помещена в контейнер 4, заполненный водой и оснащенный оптическими стеклами для наблюдений. Специальная втулка 5 стабилизирует вращение рабочего цилиндра. В верхней части контейнера расположена секция высокого давления 6,

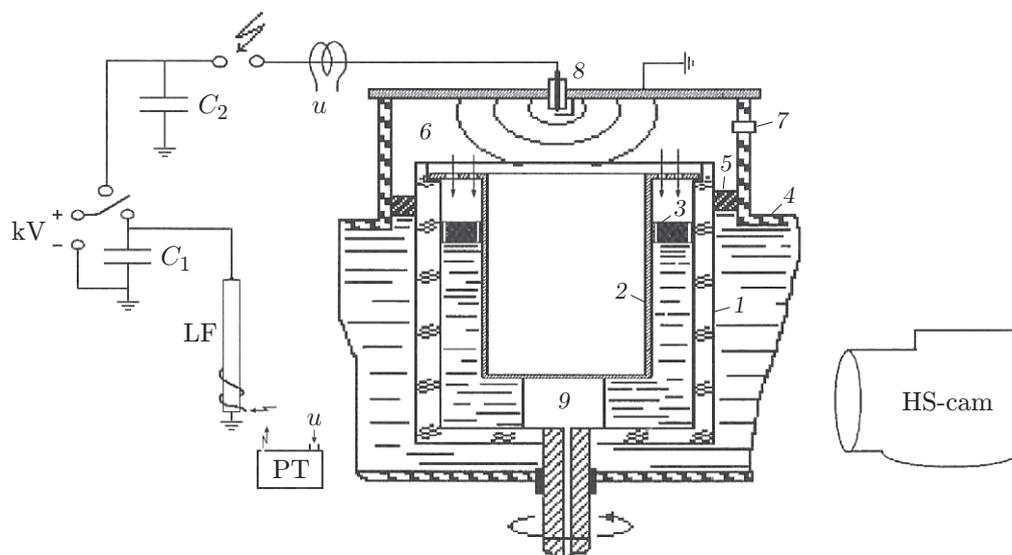


Рис. 1. Схема УТ-1 для исследования динамики одномерной цилиндрической газовой полости во вращающейся жидкости:

1 — прозрачный цилиндрический контейнер, 2 — непрозрачный контейнер, 3 — кольцевой поршень, 4 — контейнер с водой, 5 — втулка, 6 — секция высокого давления, 7 — отверстие, 8 — разрядник, 9 — газовая полость

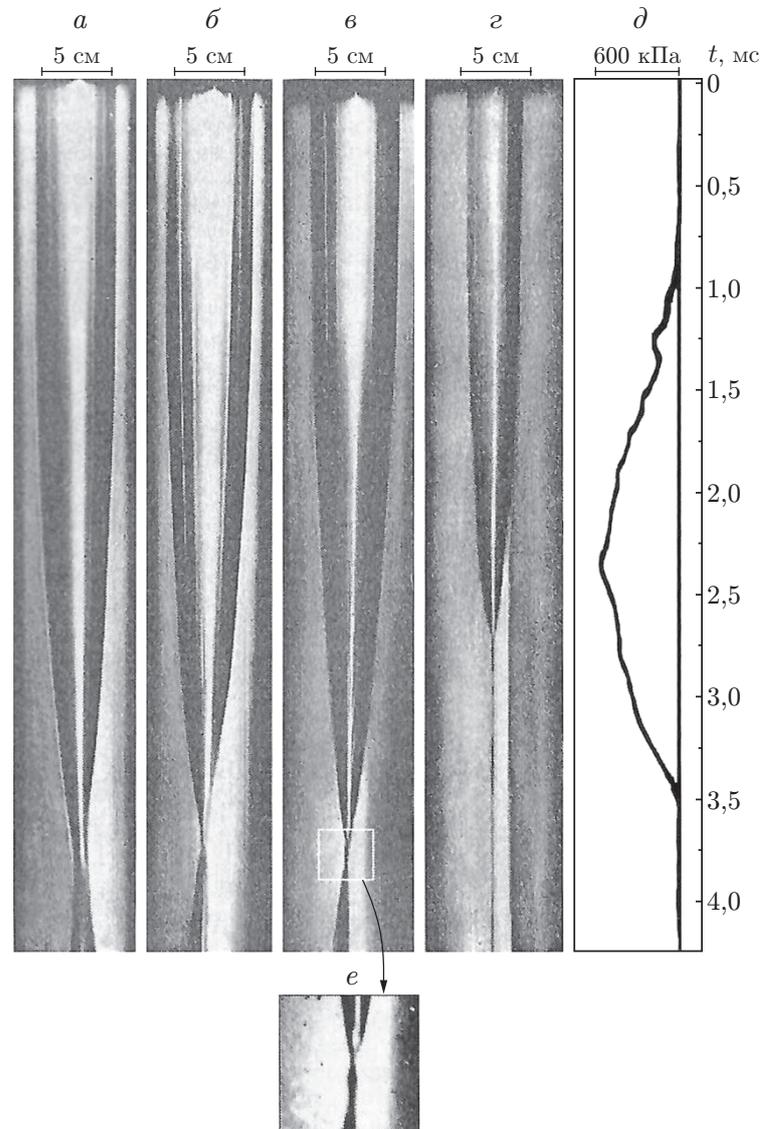


Рис. 2. Зависимости от времени радиуса вращающейся цилиндрической полости при различных значениях начального давления (*a–г*), осциллограмма давления (*д*), а также участок оболочки, на котором происходит излом (*е*):
a — $p = 60$ кПа, *б* — $p = 20$ кПа, *в* — $p = 10$ кПа, *г* — $p = 6$ кПа

заполняемая через отверстие 7 50 %-й смесью ацетилена и кислорода. Пространство секции снизу ограничено кольцевым поршнем, в верхней части секции расположен разрядник 8. Профиль волны является симметричным (см. рис. 1), в его центре амплитуда давления максимальна (600 кПа), продолжительность волны равна 2 мс, начальное давление смеси газа в полости $p = 60, 20, 10, 6$ кПа. Полость сохраняет цилиндрическую симметрию в течение всего процесса схлопывания. Имеется участок с начальным внутренним давлением газа $p = 10$ кПа (рис. 2), на котором наблюдается излом траектории в конце процесса схлопывания, свидетельствующий о наличии взрывного процесса.

Математическая модель пульсации цилиндрической полости. Законы сохранения неразрывности и импульса для сжимаемой жидкости в акустическом приближении при преобразовании через потенциал скорости (согласно приближенной теории распро-

странения Кирквуда — Бете) в общем случае для трех значений n принимают следующий вид:

$$c_0^{-2}\Phi_{tt} - \Phi_{rr} - \frac{n(2-n)}{4r^2}\Phi = 0; \quad (1)$$

$$\Phi = r^{n/2}\varphi. \quad (2)$$

Заметим, что в уравнении (1) для симметрий $n = 0$ и $n = 2$ точно, а для цилиндрической симметрии при $n = 1$ (с учетом асимптотики $\Phi/(4r^2)$) приближенно [9] третье слагаемое исчезает и уравнение (1) принимает простую форму

$$c_0^{-2}\Phi_{tt} - \Phi_{rr} = 0. \quad (3)$$

Обозначим правую часть закона сохранения импульса функцией G , решение находим в виде функции $\Phi = \Phi(t - r/c_0)$, вторые производные которой имеют вид $\Phi_{tt} = G_t$ и $\Phi_{rr} = -G_r/c_0$. Тогда уравнение (3) принимает окончательный вид

$$G_t + c_0 G_r = 0$$

(функция G — инвариант на характеристике c_0). Кирквуд и Бете обобщили этот результат, предположив, что G — инвариант на характеристике $c + v$. Обратный переход к стандартным функциям позволяет записать это обобщение следующим образом:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + (c + v)\frac{\partial}{\partial r}\right)\left[r^{n/2}\left(h + \frac{v^2}{2}\right)\right] = 0. \quad (4)$$

Преобразуя (4), заменяем частные производные h_r и v_t на полные. Получаем общее уравнение, которое при замене $r = R$, $v = dR/dt$, $h = H$ преобразуется в уравнение динамики полости для плоской ($n = 0$), цилиндрической ($n = 1$) и сферической ($n = 2$) симметрий в обобщенном виде [10]:

$$R\left(1 - \frac{\dot{R}}{c}\right)\ddot{R} + \frac{3}{4}n\dot{R}^2\left(1 - \frac{\dot{R}}{3c}\right) = \frac{n}{2}\left(1 + \frac{\dot{R}}{c}\right)H + \frac{R}{c}\left(1 - \frac{\dot{R}}{c}\right)\frac{dH}{dt}. \quad (5)$$

Учитывая приближенный характер уравнения (5) для цилиндрической симметрии ($n = 1$), в левой части обобщенного уравнения вместо коэффициента $3/4$ перед квадратом скорости введем коэффициент β и исследуем его влияние на динамику цилиндрической полости при $\beta = 3/4; 1,00; 1,25$. В качестве критерия использовались экспериментальные данные о взрыве шнуровых зарядов из гексогена с медной облицовкой (диаметр облицовки $d = 0,65; 1,65$ мм, плотность заряда $\rho = 1,55$ г/см³, скорость детонации $7,7$ км/с, дискретный спектр состояния продуктов детонации, изменяющийся по показателю плотности в диапазоне от $-2,79$ до $-1,26$). Данные о времени расширения и максимальном значении радиуса совпали только для случая $\beta = 1,0$. Таким образом, уравнение пульсации цилиндрической взрывной полости принимает следующий вид:

$$R\left(1 - \frac{\dot{R}}{c}\right)\ddot{R} + \dot{R}^2\left(1 - \frac{\dot{R}}{3c}\right) = \frac{1}{2}\left(1 + \frac{\dot{R}}{c}\right)H + \frac{R}{c}\left(1 - \frac{\dot{R}}{c}\right)\frac{dH}{dt}. \quad (6)$$

Ограничимся случаем несжимаемой жидкости. Из уравнения (6) получаем первый интеграл, представляющий собой закон сохранения энергии

$$\frac{p(0)R_0^2}{\gamma - 1}\left[1 - \left(\frac{R_0}{R}\right)^{2\gamma-2}\right] = 2\rho R^2\dot{R}^2 + p_\infty(R^2 - R_0^2), \quad (7)$$

согласно которому изменение внутренней энергии продуктов детонации с точностью до π равно сумме кинетической энергии на единицу длины $T = 2\rho R^2\dot{R}^2$ и потенциальной энергии $p_\infty(R^2 - R_0^2)$.

Для пустой полости первый интеграл (7) запишем в безразмерном виде

$$2y^2y_\tau^2 = 1 - y^2 \quad (8)$$

($y = R/R_0$; $\tau = t/R_0(\rho/p)^{1/2}$). Это позволяет получить точное аналитическое решение

$$y = (1 - \tau^2/2)^{1/2},$$

которое удовлетворительно описывает динамику полости (см. рис. 2) радиусом около 3 см для первых трех разверток и радиусом около 2 см для четвертой развертки. Данное решение соответствует начальному условию $y = 1$ при $\tau = 0$ и конечному условию $y = 0$ при $\tau_{\max} = 2^{1/2}$ (τ_{\max} — время схлопывания пустой цилиндрической полости).

Схема ударной трубки УТ-2 с формированием бора. Инициирование взрыва в камере *б* (рис. 3) создает ударно-волновую нагрузку на поршень 2, который начинает движение со скоростью u и под которым практически мгновенно происходит схлопывание полости в ее верхней части и формируется бор. Бор с относительно большей скоростью w_1 движется вертикально вниз, одновременно непосредственно за фронтом сжимает полость до минимального радиуса (рис. 4). Происходит одновременное формирование вертикаль-

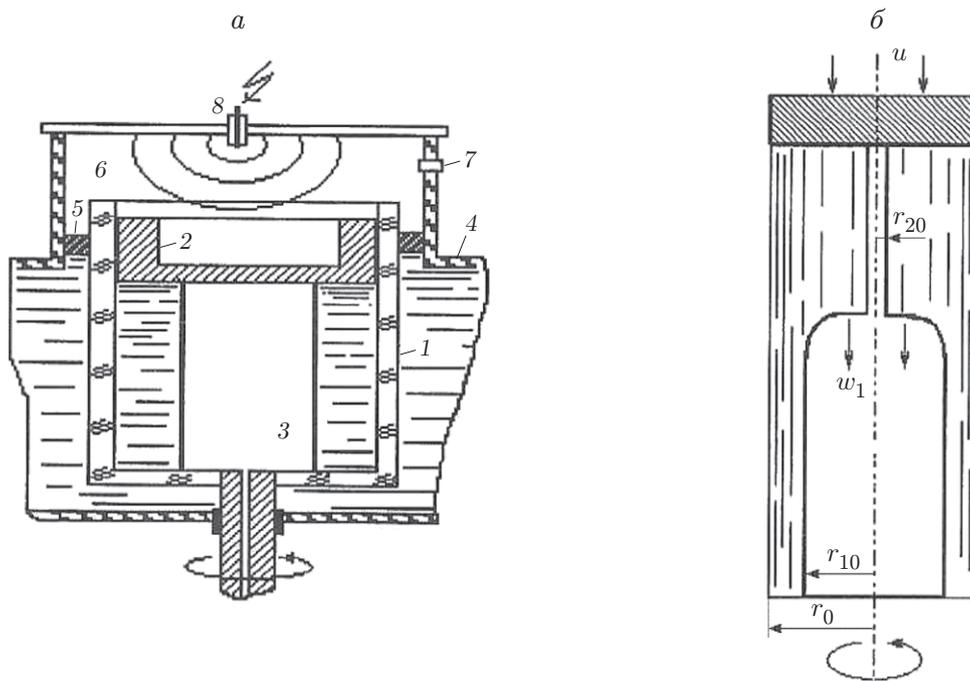


Рис. 3. Схема УТ-2 (*а*) и схема формирования бора во вращающейся полости (*б*): 1 — прозрачная камера, 2 — поршень, 3 — газовая полость, 4 — контейнер с водой, 5 — втулка, 6 — секция высокого давления, 7 — отверстие, 8 — разрядник

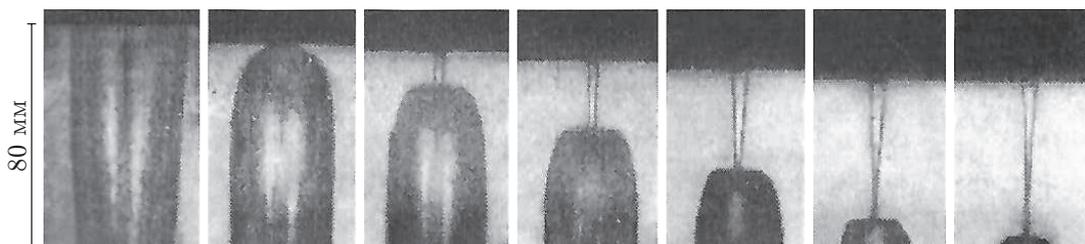


Рис. 4. Формирование бора, его последовательное движение вдоль оси и удар о дно

ной и горизонтальной кумуляции. Удар фронта бора по дну камеры приводит к вспышке, которая свидетельствует о взрывной реакции химически активной смеси.

Заключение. Созданы две универсальные ударные трубки, на одной из которых реализованы условия генерации и проведены экспериментальные исследования кумулятивного одномерного схлопывания цилиндрической облицовки во вращающейся жидкости с химически активной газовой смесью. Получено точное решение уравнения закона сохранения энергии схлопывающейся пустой цилиндрической полости в несжимаемой жидкости. Решение $y(\tau)$ удовлетворительно описывает данные эксперимента. На второй ударной трубке проведены эксперименты по формированию на внутренней поверхности вращающейся цилиндрической оболочки бора, движущегося вдоль оси при одновременном схлопывании полости за его фронтом и генерации вспышки при ударе бора о дно.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кедринский В. К.** Сжатие газовой полости в воде ударной волной: Диплом. работа. Л., 1961.
2. **Кедринский В. К., Солоухин Р. И.** Сжатие сферической газовой полости в воде ударной волной // ПМТФ. 1961. № 1. С. 27–29.
3. **Кедринский В. К., Пиголкин Г. М.** Об устойчивости схлопывающейся газовой полости во вращающейся жидкости // ПМТФ. 1964. № 3. С. 113–117.
4. **Забабахин Е. И.** Явления неограниченной кумуляции / Е. И. Забабахин, И. Е. Забабахин. М.: Наука, 1988.
5. **Taleyarkhan R. P., West C. D., Cho J. S.** Evidence for nuclear emissions during acoustic cavitation // Science. 2002. V. 295. 1868.
6. **Taleyarkhan R. P., Cho J. S., West C. D.** Additional evidence of nuclear emissions during acoustic cavitation // Phys. Rev. E. 2004. V. 69. 036109.
7. **Nigmatulin R. I., Akhatov I. Sh., Topolnikov A. S.** Theory of supercompression of vapor bubbles and nanoscale thermonuclear fusion // Phys. Fluids. 2005. V. 17. 107106.
8. **Пинаев А. В., Сычев А. И.** Обнаружение и исследование самоподдерживающихся режимов детонации в системах жидкое горючее — пузырьки окислителя // Докл. АН СССР. 1986. Т. 290, № 3. С. 611–615.
9. **Рич О. К., Гинелл Р.** Итоговый отчет о теории распространения в случае цилиндрической симметрии / OSRD. N 3950. Б. м., 1944.
10. **Кедринский В. К., Кузавов В. Т.** Динамика цилиндрической полости в сжимаемой жидкости // ПМТФ. 1977. № 4. С. 102–106.

*Поступила в редакцию 24/1 2022 г.,
после доработки — 24/1 2022 г.
Принята к публикации 31/1 2022 г.*