

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. Н. Родионов. — В сб.: Взрывное дело. № 73/30. М., «Недра», 1974.
2. В. Н. Родионов, В. В. Адушкин и др. Механический эффект подземного взрыва. М., «Недра», 1971.
3. В. В. Адушкин, В. Н. Костюченко и др. Механика подземного взрыва. Серия «Механика твердых деформируемых тел», Т. 7. М., 1974.
4. Моделирование разрушающего действия взрыва в горных породах. Под ред. Н. В. Мельникова. М., «Наука», 1973.
5. Л. В. Альтшулер. УФН, 1962, 85, 2.
6. Э. А. Кошелев, В. М. Кузнецов и др. ПМТФ, 1971, 2.
7. Б. И. Берсенев, Е. Д. Мартынов и др. Пластичность и прочность твердых тел при высоких давлениях. М., «Наука», 1969.
8. J. T. Cherry, F. L. Pettersen. Numerical simulation of stress wave propagation from underground nuclear explosions. Peaceful Nucl. Explosions. Vienna, 1970.
9. А. Н. Ставрогин. — В сб.: Некоторые прикладные задачи механики горных пород. Фрунзе, «Илим», 1971.
10. В. В. Адушкин, А. П. Сухотин. ПМТФ, 1961, 4.
11. R. N. Schock, H. C. Heard. J. Geoph. Res., 1974, 70, 11.
12. M. N. Toksöz, A. Ben-Menahem, D. G. Harkrider. J. Geoph. Res., 1961, 66, 9.
13. G. Higgins. Nuclear explosions data for underground engineering applications. Peaceful Nucl. Explosions, Vienna, 1970.

УДК 532.595.2

## РАСШИРЕНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ПУЗЫРЯ В ВОДЕ

*И. В. Яковлев, А. А. Вергасов*

Явления, сопровождающие расширение газового пузыря большого давления в воде, исследовались при взрывах в воде конденсированных взрывчатых веществ [1—4], при электрических разрядах [5], а также при фокусировке в воде лазерного луча [6].

В настоящей работе исследуется расширение в воде плазменного пузыря, создаваемого с помощью взрывного источника высокотемпературной плазмы большого давления. Параметры плазменного пузыря отличаются от параметров газового пузыря, получаемого при подводных взрывах зарядов конденсированного взрывчатого вещества (ВВ). Например, эффективный показатель адиабаты для плазмы  $\gamma \approx 1,2$  [7], а для продуктов взрыва конденсированного ВВ  $\gamma \approx 3$ . При примерно одинаковых начальных давлениях температура плазмы  $T \approx 2 \cdot 10^4 \text{ К}$ , т. е. на порядок выше температуры продуктов взрыва.

Таким образом, изучение поведения плазменного пузыря при расширении его в воде может быть использовано при моделировании сильных взрывов.

**Схема эксперимента.** Экспериментальная установка для исследования расширения плазменного пузыря в воде включает в себя взрывную камеру, источник плазмы, бассейн с водой, устройство подсветки и скоростной фоторегистратор. Процесс фотографировался непосредственно в проходящем свете. Источником плазмы служил взрывной газовый компрессор [8], представленный на рис. 1, а.

При взрыве генератора плоской волны 1, пластина 2, ускоряясь сжимает воздух, находящийся в камере сжатия 3. Сжатый и нагретый несколькими ударными волнами воздух выходит через канал 4 в виде высокотемпературной, большой плотности и давления плазмы. В экспериментах использовался компрессор следующих размеров:  $R=20$  мм,  $d=4$  мм,  $H=10$  мм, толщина пластин 2 изменялась от 1,5 до 2 мм.

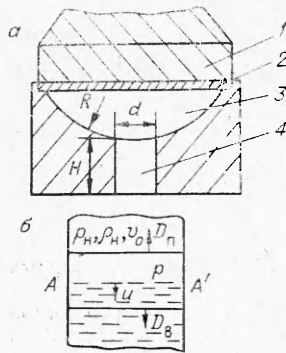


Рис. 1.

**Параметры плазмы** оценивались в соответствии с работой [9]. Предполагая, что воздух в камере был сжат тремя ударными волнами (скорость первой определяется скоростью движения пластины, а третьей — скоростью точки соприкосновения пластины со стенкой камеры), получим следующую оценку параметров плазмы на входе в канал: давление  $p \sim 2,3 \cdot 10^5$  атм, плотность  $\rho \sim 500 \rho_0 = 0,65 \text{ г/см}^3$  ( $\rho_0$  — начальная плотность в камере), удельная внутренняя энергия  $\varepsilon \sim 100 \text{ кДж/г}$ . Плотность плазмы на выходе из канала можно оценить, полагая, что воздух в камере сжимается тремя ударными волнами до тех пор, пока пластина не достигнет канала. Масса воздуха, превращенного в плазму,  $m_n = 0,02 \text{ г}$ . Предполагая в даль-

нейшем простое расширение, получаем, что плотность плазмы на выходе из канала порядка  $\rho_n = 200\rho_0$ . Регистрация течения плазмы в канале свидетельствует о том, что скорость плазмы на выходе из канала 4 порядка  $10 \text{ км/с}$ .

При взаимодействии высокоскоростной плазменной струи с водой возникает картина ударных волн, показанная на рис. 1, б, где  $AA'$  — контактная граница,  $D_в$  — ударная волна в воде,  $D_п$  — ударная волна в плазме,  $p_n, \rho_n, v_0$  — давление, плотность и скорость плазмы на выходе из канала,  $u$  — скорость контактной границы.

Из эксперимента определяются  $D_в, p, u$ . Для определения  $p_n$  имеем соотношение Ренкина — Гюгонио (для сильной ударной волны)

$$p = p_n + [\rho_n(\gamma + 1)/2](v_0 + u). \quad (1)$$

Как будет далее показано, в нашем случае  $p = 2,3 \cdot 10^5$  атм (давление, возникающее в начальный момент в воде),  $u = 3,3 \text{ км/с}$ ,  $\rho_n = 200\rho_0 = 0,26 \text{ г/см}^3$ ,  $v_0 = 10 \text{ км/с}$ ,  $\gamma = 1,2$ . Подставляя эти значения в (1), получаем  $p_n = 10^5$  атм.

Интересно оценить параметры ударной волны в воде при  $v_0 = 0$ , т. е. плазма давления  $p_n$  и плотности  $\rho_n$  покоится. В этом случае

$$u = [2\gamma p_n / \rho_n(\gamma - 1)] [1 - (p/p_n)^{(\gamma-1)/2\gamma}]. \quad (2)$$

С другой стороны, полагая что уравнение состояния воды можно записать в виде

$$p = A[(\rho/\rho_0)^n - 1] \quad (3)$$

( $A = 3940 \text{ атм}$ ,  $n = 8$  [10]), получим из соотношений на фронте ударной волны

$$\rho_0 u^2 = p[1 - (1 + p/A)^{-1/n}]. \quad (4)$$

Из (4) и (2) следует, что давление в воде при  $v_0 = 0$  равно  $0,77 \cdot 10^5 \text{ атм}$ ,  $u = 1,66 \text{ км/с}$ ,  $D_в = 5 \text{ км/с}$ .

**Результаты экспериментов.** На рис. 2 приведена фотография процесса расширения плазменного пузыря в воде. Отчетливо видна сферическая ударная волна (из-за значительной скорости фронт ее несколько размыт). Фоторегистрация процесса в режиме непрерывной развертки позволила получить зависимость положения фронта ударной волны от времени  $R(t)$ . Численно дифференцируя  $R(t)$ , получаем зависимость скорости фронта от времени  $D(t)$ . Обе зависимости представлены на рис. 3. Используя уравнение состояния для воды [11], получим зависимость давления за фронтом ударной волны от положения фронта  $p(R)$  — (рис. 4). Кроме этого на рис. 3 и 4 приведены кривые

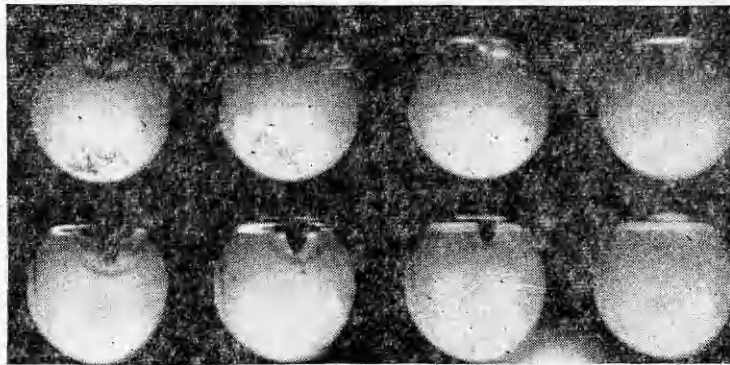


Рис. 2.

для взрыва в воде 1 г тэна [2], энергия которого примерно равна энергии плазмы в экспериментах. Зависимость положения границы плазменного пузыря от времени рассчитывалась по методу Кирквуда — Бете [12].

**Расчет движения границы пузыря.** В теории Кирквуда — Бете получено аналитическое решение задачи о распространении ударной волны в воде и движении границы газовой сферы. Было предположено, что, как в случае плоских течений, постоянные значения давления и скорости распространяются с некоторой скоростью  $\bar{c}$ , так и при сферическом подводном взрыве удельная энтальпия  $G(r, t)$ , являющаяся основной переменной, перемещается с такой скоростью, что

$$(\partial G/\partial t) + \bar{c}(\partial G/\partial r) = 0. \quad (5)$$

При этом

$$G(r, t) = r(\omega + u^2/2), \quad (6)$$

где  $\omega$  — энтальпия ( $d\omega = dp/\rho$  для изэнтропических течений).

Функция  $G(r, t)$  может быть выражена в виде функции от одной переменной  $\tau(r, t)$

$$G(r, t) = G_a(\tau). \quad (7)$$

Функция  $\tau(r, t)$  должна быть однозначной функцией  $G(r, t)$ , при этом условии можно записать

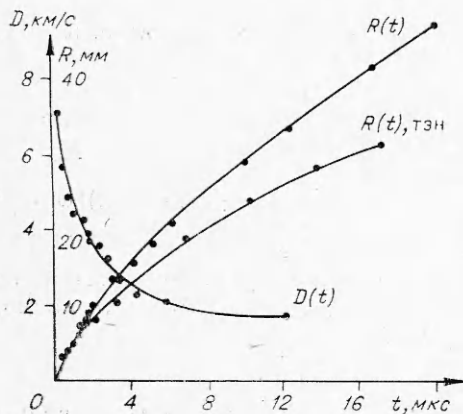


Рис. 3.

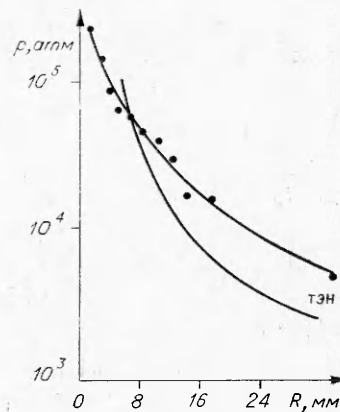


Рис. 4.

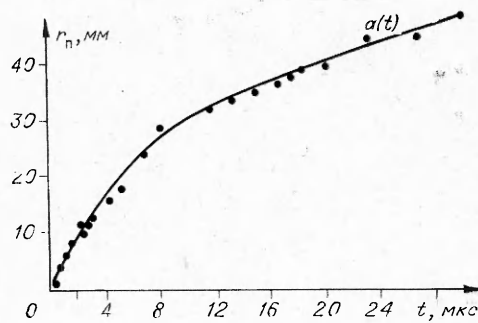


Рис. 5.

$$(\partial r / \partial t)_{\tau} = \bar{c}(r, \tau).$$

Если в момент времени  $t'$  на поверхности газовой сферы, для которой  $r = a(t')$ , функция  $G(r, t)$  имеет величину  $G[a(t'), t']$ , то время, необходимое для перемещения  $G$  в точку  $(r, t)$ ,

$$t - t' = \int_{a(t')}^r \frac{dr}{\bar{c}(r, \tau)}.$$

Приравнявая  $\tau$  и  $t'$ , получим

$$\tau = t - \int_{a(\tau)}^r \frac{dr}{\bar{c}(r, \tau)}.$$

Для значений  $\tau = t$ ,  $r = a(t)$  уравнение (7) дает

$$G_a(t) = G[a(t), t],$$

где  $a(t)$  — положение границы газовой сферы в момент времени  $t$ .

На границе газ — вода равны давления и массовые скорости, или

$$dp/dt = dp_g/dt; \quad du/dt = du_g/dt, \quad (8)$$

где величины с индексом  $g$  относятся к газу, а без индекса — к воде.

Подставляя (6) в (5) и исключая частные производные, получим следующую систему уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{du}{dt} (\bar{c} - 2u) + \frac{3}{2} \frac{u^2}{r} \left( \bar{c} - \frac{4}{3} u \right) &= \frac{\bar{c}\omega}{r} + \frac{d\omega}{dt} \left( 1 + \frac{u^2}{c^2} + \frac{\bar{c}u}{c^2} \right), \\ \frac{du}{dt} (\bar{c}_g + 2u) + \frac{3}{2} \frac{u^2}{r} \left( \bar{c}_g + \frac{4}{3} u \right) &= \frac{\bar{c}_g\omega_g}{r} - \frac{d\omega_g}{dt} \left( 1 + \frac{u^2}{c_g^2} + \frac{\bar{c}_g u}{c_g^2} \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где  $\bar{c} = c + u$ ,  $\bar{c}_g = -(c_g - u)$ . Система (9) решается в предположении, что  $\omega(r, t)$  на сфере имеет вид

$$\omega(a, t) = \omega_a(t) = \omega(0) \exp(-t/\theta_1),$$

где  $a(t)$  — радиус сферы;

$$\theta_1 = \rho(0)\omega(0)(dp/dt)_{t=0}^{-1}.$$

Начальное значение производной определяется из системы (9), выражение для  $\theta_1$ :

$$\theta_1 = \frac{\omega(0) a_0}{c(0)} \left( \frac{1 + \frac{\rho(0) c(0)}{\rho_g(0) c_g(0)}}{I_g(0) + I(0)} \right),$$

где  $I_g = -[(c_g - u)/(c_g + u)] \omega_g - u^3/(c_g + u)$ ;  $I = [(c + u)/(c - u)] \omega + u^3/(c - u)$ ;  $a_0$  — начальное значение радиуса сферы.

Для определения зависимости положения границы пузыря от времени  $a(t)$  первое уравнение системы (9) решалось численно. Скорость звука в воде принималась равной

$$c(r, t) = c_0 [1 + (n-1)/2c_0] u(r, t),$$

где  $n=8$ ,  $c_0 = 1,5 \cdot 10^5$  см/с. Полученные результаты представлены на рис. 5.

ИГ СО АН СССР

Поступила в редакцию  
15/1 1975

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Д. Христофоров. ПМТФ, 1960, 2.
  2. Б. Д. Христофоров. ПМТФ, 1961, 4.
  3. В. Н. Костюченко. ПМТФ, 1961, 2.
  4. Л. В. Альшулер и др. Докл. АН СССР, 1970, 193, 6.
  5. К. А. Наугольных, Н. А. Рой. Электрические разряды в воде. М., «Наука», 1971.
  6. А. Н. Бузуков и др. ПМТФ, 1969, 5.
  7. Я. Б. Зельдович, Ю. П. Райзер. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М., Физматгиз, 1963.
  8. А. Е. Войтенко. Докл. АН СССР, 1964, 158, 6.
  9. А. Е. Войтенко. ПМТФ, 1966, 4.
  10. Ф. А. Баум, К. П. Станюкевич, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
  11. H. Rice, H. Wals. J. Chem. Phys., 1957, 26, 4.
  12. Р. Коул. Подводные взрывы. М., ИЛ, 1950.
-