

УДК 539.3 : 539.411

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА В ПОЛОСТИ

А. И. Воробьев, М. С. Гайнуллин, Г. В. Злыгостев,
А. П. Рыбаков

(Челябинск)

Исследовано движение цилиндрической оболочки под действием продуктов взрыва в полости. Рассмотрена несжимаемая, вязкая, не обладающая прочностью оболочка. С помощью метода импульсной рентгенографии и при съемке теневым методом на СФР проведены исследования движения оболочек из сплава Д16, латуни, меди и свинца при различной степени заполнения зарядом взрывчатого вещества (ВВ) полости оболочек. Проведено сравнение экспериментальных результатов с расчетами. Согласие экспериментальных результатов с расчетом удовлетворительное.

1. Для исследования поведения круговых металлических цилиндрических оболочек при импульсном нагружении, осуществляющемся подрывом внутри шнурового заряда ВВ, применялся метод импульсной рентгенографии, а также фотохронографический [1]. Последний, примененный в данной работе, позволяет с большой точностью получать непрерывную запись скорости движения наружной поверхности цилиндрической оболочки.

В опытах исследовались несколько видов круговых цилиндрических оболочек ($l \leq 3R_0$), изготовленных из алюминиевого сплава Д16, свинца, латуни и меди; R_0 — радиус внутренней поверхности оболочки.

Испытывались восемь серий цилиндрических оболочек 1—8, данные о которых приводятся ниже.

| | | | | |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|
| № серии | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Материал | сплав 16 | сплав 16 | свинец | медь |
| R_0 , мм | 3 | 8 | 8 | 2.5—6 |
| δ_0 , мм | 0.8 | 0.8—7.5 | 0.5—3.0 | 0.5—5.0 |
| R_c , мм | 3 | 8 | 8 | 2.5—6.0 |
| № серии | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Материал | латунь | латунь | латунь | латунь |
| R_0 , мм | 8 | 8 | 8 | 15 |
| δ_0 , мм | 0.4—3.75 | 0.9—3.35 | 0.9—3.35 | 0.2—6.85 |
| R_c , мм | 8 | 6 | 3 | 15 |

где δ — толщина оболочки, R_c — радиус заряда ВВ.

Импульсное нагружение осуществлялось подрывом цилиндрических зарядов из ВВ, близкого примененному в [2] с плотностью $\rho_c = 1.62 \text{ г/см}^3$ и давлением в точке Жуге $P_c = 301 \text{ кбар}$.

Скорость движения поверхности цилиндрических оболочек в зависимости от времени регистрировалась с помощью фотохронографической (в режиме СФР) и рентгенографической установок. Типичные рентгенограмма и фотохронограмма, полученные в опытах с различными оболочками, представлены на фиг. 1. На фиг. 1, а представлена рентгенограмма свинцовой оболочки ($R_0 = 8 \text{ мм}$, $\xi_0 = 0.125$, $\alpha = 12.6^\circ$, $v_p = 1.85 \text{ км/сек}$, на фиг. 1, б — фотохронограмма оболочки из алюминиевого сплава Д16 ($R_0 = 8 \text{ мм}$, $\xi_0 = 0.85$, $\alpha = 7^\circ 10'$, $v_p = 1.05 \text{ км/сек}$. Здесь $\xi_0 = \delta_0 / R_0$, v_p — скорость разлета осколков).

Расшифровка полученных экспериментальных результатов позволяет построить законы движения цилиндрической оболочки для различных соотношений масс заряда ВВ и оболочки, определить значение радиуса в момент разрушения оболочки и скорость разлета осколков. Расшифровка рентгенограмм дает зависимость изменения толщины оболочки от времени $\delta = f(t)$.

Из анализа зависимостей $\delta = f(t)$ следует, что материал оболочки в процессе движения ведет себя как несжимаемая жидкость и удовлетворяет уравнению неразрывности

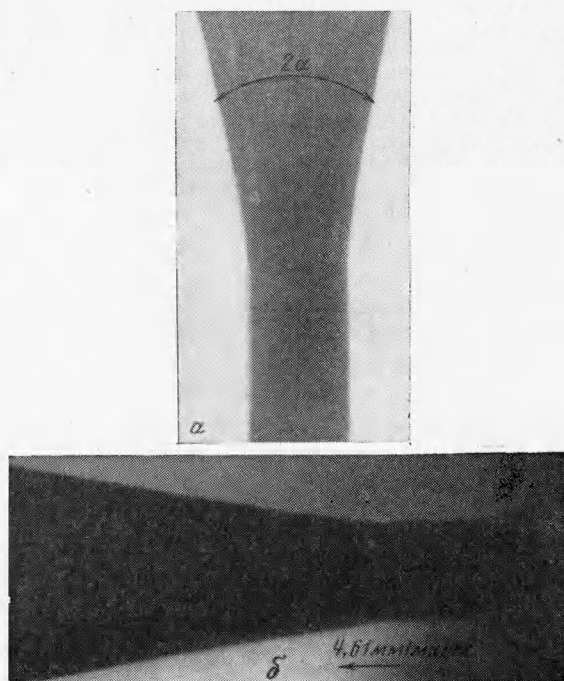
$$(1.1) \quad \delta_0 (2R_0 + \delta_0) = \delta (2R + \delta)$$

где δ и R — текущие толщина и внутренний радиус оболочки.

На фиг. 2 приведена зависимость относительного уменьшения толщины оболочки на момент разрушения $\varepsilon = 1 - \delta_0 / \delta$ от начальной относительной толщины. На фиг. 2 и последующих приняты обозначения: 1 — P_b ($R_0 = R_c = 8$ мм), 2 — сплав Д16 ($R_0 = R_c = 8$ мм), 3 — сплав Д16 ($R_0 = R_c = 3$ мм), 4 — Cu ($R_0 = R_c, 2.5 \leq R_0 \leq 6$ мм), 5 — латунь ($R_0 = R_c = 8$ мм), 6 — латунь ($R_0 = 8$ мм, $R_c = 6$ мм), 7 — латунь ($R_0 = 8$ мм, $R_c = 3$ мм), 8 — латунь ($R_0 = R_c = 15$ мм).

Как видно из графика, оболочки, изготовленные из различных металлов, образуют единую эмпирическую зависимость ε (ξ_0).

В интервале $0 \leq \xi_0 \leq 0.2$ величина ε возрастает от 0 до ~ 0.35 , а в дальнейшем при $\xi > 0.2$ значение ε возрастает слабо. Это согласуется с данными для стальных круговых цилиндрических оболочек.



Фиг. 1

С момента разрушения и далее при разлете толщина осколков не меняется. Поэтому, зная толщину оболочки в момент разрушения, можно определить радиус R_1 , при котором происходит разрушение оболочки

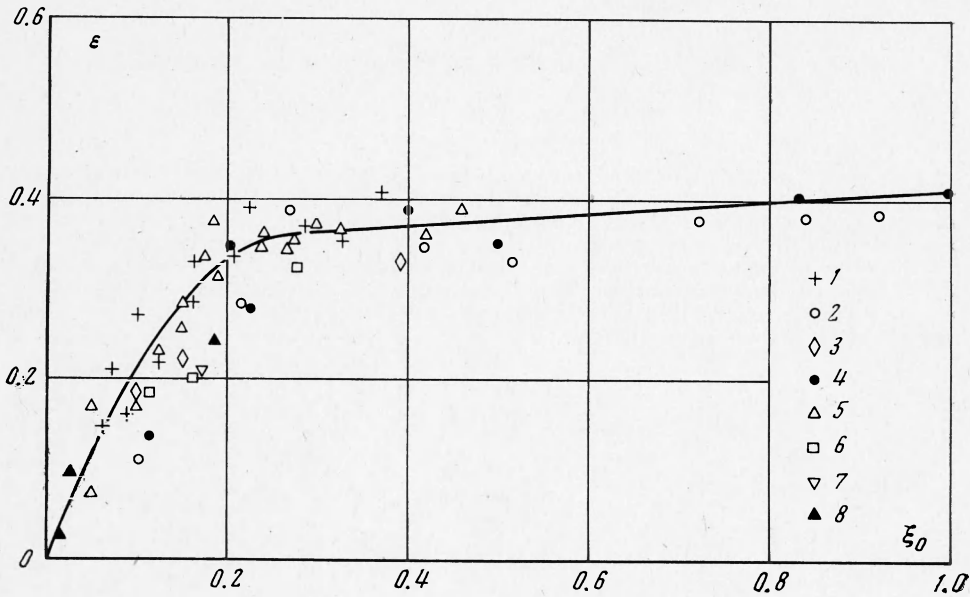
$$(1.2) \quad (R_1 / R_0)_* = 1 / (1 - \varepsilon) + \xi_0 \varepsilon (2 - \varepsilon) / 2 (1 - \varepsilon)$$

Значения $(R_1 / R_0)_*$ определялись по экспериментальным данным радиуса внешней поверхности оболочки с привлечением выражения (1.1). На фиг. 3 представлены полученные таким образом значения $(R_1 / R_0)_*$ в зависимости от начальной относительной толщины оболочки.

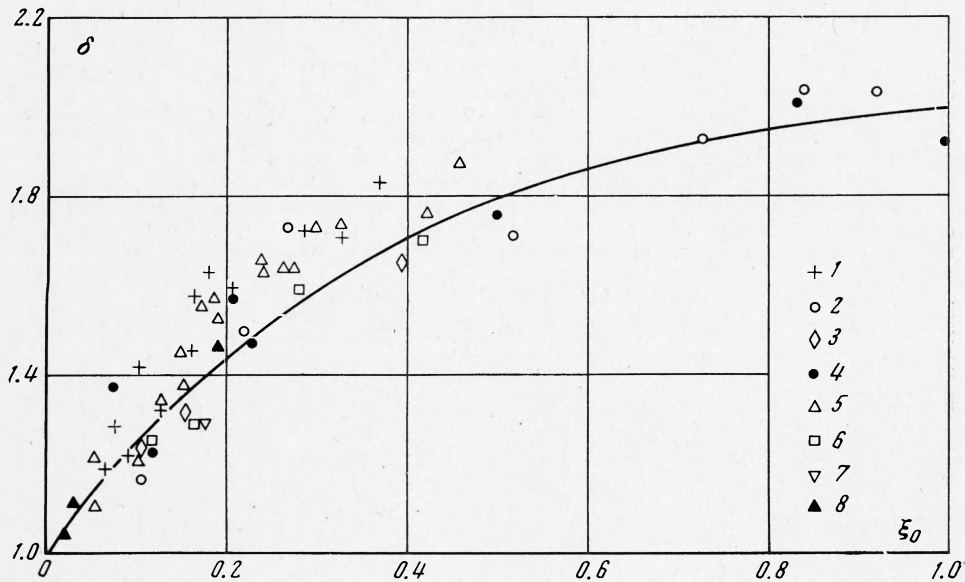
Экспериментальные результаты по измерению скорости оболочки в момент разрушения (скорости осколков) помещены на графике фиг. 4. По оси ординат отложены значения v_p , а по оси абсцисс — параметр $\kappa = \xi_0 \rho / \rho_0$, представляющий собой безразмерную массу оболочки. Величина скорости при $\kappa = 0$, т. е. для цилиндрического заряда ВВ без оболочки, получена в эксперименте при покадровой съемке на фотохронографе процесса разлета продуктов взрыва при детонации цилиндрического заряда ВВ ($R_c = 8$ мм). При этом получено $\alpha = 23^\circ$, что соответствует $v_p = 3.57$ км/сек.

2. При рассмотрении деформации металлических цилиндрических оболочек под действием давления продуктов взрыва (ПВ) на внутреннюю поверхность считаем материал оболочек несжимаемым. Погрешность такого предположения невелика в диапазоне давлений, реализующихся в металлах при подрыве в контакте с ними взрывчатого вещества. Предположение о несжимаемости соответствует пренебрежению волновыми процессами и рассмотрению инерционного движения.

Взрывчатое вещество детонирует до прихода оболочек в движение. Это означает, что к началу движения оболочки пространство внутри нее заполнено газом, находящимся под высоким давлением. Продукты детонации представляют собой политронный газ с показателем γ .



Фиг. 2



Фиг. 3

Считаем цилиндрические оболочки бесконечно длинными, все движения осесимметричными и одинаковыми для всех ортогональных поперечных сечений оболочек. Это предположение сводит рассматриваемую задачу к задаче одномерного движения несжимаемой цилиндрической оболочки.

При уравнении состояния ПВ $p = A\rho_g\gamma$, где $A = \text{const}$, давление ПВ внутри оболочки изменяется по закону ($p = p_0v^{-2\gamma}$) и уравнение движения цилиндрической

оболочки принимает вид

$$(2.1) \quad \ddot{v} = \frac{M}{R_0^2} v^{-(2\gamma-1)}$$

$$M = Rp_0 / \rho \xi_0 (\xi_0 + 2); p_0 = p v^{2\gamma}, \dot{v} = dv / dt$$

Интегрируя уравнение (2.1), получаем закон одномерного движения оболочки

$$(2.2) \quad v^2 = N [1 - v^{-2(\gamma-1)}], \quad N = \frac{2p_0}{\gamma-1} [\rho \xi_0 (\xi_0 + 2)]^{-1}$$

Выражение (2.2) справедливо, если в процессе расширения ПВ γ остается постоянной. В действительности адиабатический процесс расширения ПВ можно разбить на две фазы. Согласно [3] давление в точке перехода равно $p = p_1 = 2 \text{ кбар}$. При $p_c > p > p_1$ будем обозначать $\gamma = \gamma_1$, а при $p < p_1$ $\gamma = \gamma_2$.

В случае неполного заполнения полости оболочки зарядом ВВ ($R_c < R_0$, R_c — радиус ВВ) могут реализоваться два случая. Давление в начале движения оболочки $p_c > p_0 > p_1$ либо $p_0 < p_1$. При $p_0 \leq p_1$ в выражении (2.2) надо положить $\gamma = \gamma_2$. Величина p_0 в этом случае определяется как

$$(2.3) \quad p_0 = \left(\frac{R_c}{R_0}\right)^{2\gamma_2} p_c^{\gamma_2/\gamma_1} p_1^{(1-\gamma_2/\gamma_1)}$$

При $p_c > p_0 > p_1$

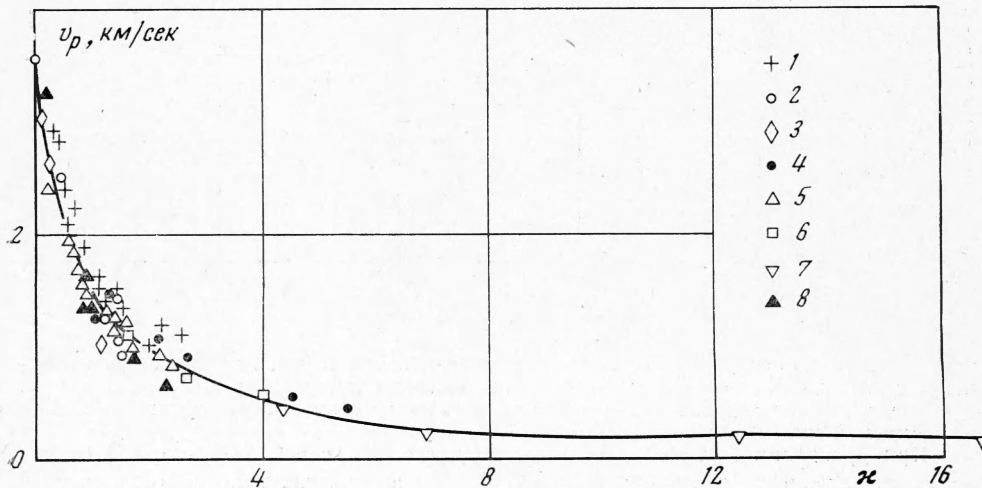
$$(2.4) \quad v^2 = K \left[1 - \left(\frac{p_c}{p_1}\right)^{(\gamma_2-1)/\gamma_1} \left(\frac{R_c}{R_0}\right)^{2(\gamma_2-1)} \right] + v_*^2$$

$$K = \frac{2p_1}{\gamma_2-1} \left(\frac{p_c}{p_1}\right)^{1/\gamma_1} \left(\frac{R_c}{R_0}\right)^2 \frac{1}{\rho \xi_0 (\xi_0 + 2)}$$

$$v_*^2 = \frac{2p_c}{\gamma_1-1} \left(\frac{R_c}{R_0}\right)^{2\gamma_1} \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_c}\right)^{(\gamma_1-1)/\gamma_1} \left(\frac{R_0}{R_c}\right)^{2(\gamma_1-1)} \right] \frac{1}{\rho \xi_0 (\xi_0 + 2)}$$

В случае полного заполнения полости оболочки ВВ будут справедливы формулы (2.4) при подстановке в них $R_c = R_0$ и p_0 вместо p_c .

На характер движения металлических цилиндрических оболочек под действием взрыва заряда ВВ в полости влияют вязкость и прочность. Учет упругопластического поведения металлической оболочки в таких условиях приводит к необходимости численного решения дифференциальных уравнений. Уравнения (2.2) и (2.4) показывают, как изменяется скорость оболочки по мере ее движения, но не определяют момента прекращения действия такого механизма движения. Существование конечной прочности на разрыв у реальных оболочек ограничивает действие этих уравнений.



Фиг. 4

Движение оболочки под действием ПВ происходит до тех пор, пока не произойдет нарушение ее сплошности вследствие прохождения трещины по толщине оболочки. После разрушения оболочки осколки разлетаются с постоянной скоростью, которую имела оболочка в момент разрушения. В остальных случаях во всем диапазоне от начала движения и до разрыва оболочки $\gamma = 3$.

По значениям радиуса внутренней поверхности в момент разрушения R_1 с помощью (2.2) и (2.4) можно определить расчетные значения скорости. Эти значения относятся к внутренней поверхности. В экспериментах получены скорости, соответствующие внешней поверхности в момент разрушения оболочки. Из уравнения неразрывности (1.1) следует, что

$$(2.5) \quad v_+ R_+ = v R$$

Здесь плюс означает принадлежность к внешней поверхности. Величины без индекса относятся к внутренней поверхности. Поэтому сравнивать с экспериментальными результатами будем значения, полученные с помощью (2.2) и (2.4) с учетом (2.5). Сравнение расчетных и экспериментальных значений показывает, что модель несжимаемой, невязкой, не обладающей прочностью жидкости дает для свинца и алюминиевого сплава Д16 среднее отклонение в большую сторону 8%, в меньшую — 1%. Для латуни и меди эта модель дает систематическое завышение в среднем на 30%.

В случае полного заполнения зарядом ВВ полости оболочки происходит касательное падение фронта детонации на контактную границу ВВ — оболочка. В [4] указывается, что при этом давления, возникающие на контактной границе, значительно снижаются до величины, меньшей p_c . Проведенные оценки показали, что давление в рассматриваемом случае будет иметь следующие значения: для сплава Д16 $p_0 = 160$ кбар, для свинца $p_0 = 175$ кбар, для латуни $p_0 = 190$ кбар, для меди $p_0 = 200$ кбар.

При распаде разрыва на контактной границе ВВ — оболочка в материал оболочки идет коническая ударная волна, которая в силу характера цилиндрического движения имеет уменьшающееся со временем давление на фронте и спадающий профиль давления за фронтом. Поэтому скоростью, сообщаемой ударной волной при выходе на внешнюю поверхность оболочки, можно пренебречь.

В случае неполного заполнения зарядом ВВ полости оболочки после прохождения детонационного фронта происходит разлет ПВ и их торможение на стенке оболочки. К моменту заполнения расширяющимися ПВ полости оболочки их можно охарактеризовать средними значениями плотности и давления. Значения p_0 , оцененные по имеющимся значениям начального радиуса внутренней поверхности R и радиуса заряда ВВ R_c , оказываются равными 50 кбар и 1.6 кбар соответственно для $R_c = 6$ и 3 мм и $R_0 = 8$ мм. Формирующаяся в оболочке при торможении ПВ на стенке ударная волна будет слабой.

В случае латунных оболочек с $R_0 = 8$ мм, $R_c = 3$ мм $p_0 < p_1$ и с начала движения оболочки $\gamma = \gamma_2 = 1.3$. Следует учесть, что в расчетных значениях заключена экспериментальная ошибка в определении v . Систематическое завышение расчетных значений скорости для латуни и меди, возможно, связано с завышенной оценкой p_0 .

Авторы благодарны И. В. Санину за постановку задачи.

Поступила 25 II 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. Дубовик А. С. Фотографическая регистрация быстропротекающих процессов. М., «Наука», 1964.
2. Ментшов Е. В., Ратников В. П., Рыбаков А. П., Ткаченко А. Н., Шавков В. П. Действие взрыва листового заряда ВВ на алюминиевую пластину. Физика горения и взрыва, 1967, т. 3, № 2.
3. Баум Ф. А., Державец А. С., Санасарян Н. С., Шипицын Л. А., Дуванов А. М., Григорян Н. Г., Чигладзе Н. С. Термостойкие взрывчатые вещества и их действие в глубоких скважинах. М., «Недра», 1969.
4. Райнхарт Дж. С., Пирсон Дж. Взрывная обработка металлов. М., «Мир», 1966.