

Асимметричное сжатие цилиндрических оболочек продуктами детонации

А. В. Герасимов

НИИ прикладной математики и механики, Томск, Россия

Представлены результаты численного моделирования несимметричного сжатия упруго-пластических оболочек под действием продуктов детонации. Показаны особенности влияния технологических погрешностей и физико-механических характеристик материала оболочек и взрывчатых веществ на процессы деформирования.

Ключевые слова: взрыв, детонация, упругопластическое тело, оболочка, численный метод, технологические погрешности, взрывчатое вещество.

Введение. Использование взрывчатых веществ (ВВ) для обработки металлов взрывом (сварка, прессование) и в физических исследованиях (создание сверхсильных магнитных полей, обжиг капсул с различными материалами) зачастую приводит к необходимости сохранения цилиндрической или сферической симметрии процесса в течение всего времени воздействия продуктов детонации. При производстве и сборке систем внешняя оболочка + слой ВВ + внутренняя оболочка их геометрические параметры и физико-механические характеристики отличаются от таковых для идеализированного случая. В связи с этим возникает ненулевая радиальная компонента вектора скорости центра масс поперечного сечения внутренней оболочки, что приводит к нарушению требуемых условий симметрии процесса. Методика решения, тестовые расчеты, а также результаты исследования влияния ряда технологических погрешностей на сжатие внутренней оболочки и формирование кумулятивной струи представлены ранее [1, 2].

Постановка задачи. Настоящая работа посвящена исследованию характера изменения радиальной компоненты вектора скорости центра масс поперечного сечения внутренней оболочки в зависимости от свойств ВВ и материала оболочек. Было рассмотрено влияние толщины внутренней и внешней оболочек, их плотности, прочностных характеристик и сжимаемости внешней оболочки, а также физико-механических характеристик ВВ. Исследования проводились на основе решения в плоской двухмерной постановке задачи о динамическом деформировании системы, состоящей из двух бесконечно длинных упругопластических цилиндрических оболочек, пространство между которыми заполнено продуктами детонации заряда ВВ.

Считается, что разностенность оболочек и заряда ВВ вызвана несоосностью круговых поверхностей. В этом случае процесс деформирования становится симметричным относительно плоскости $x = 0$ (рис. 1), что позволяет упростить расчеты и одновременно получить основные качественные и количественные оценки процесса динамического деформирования оболочек.

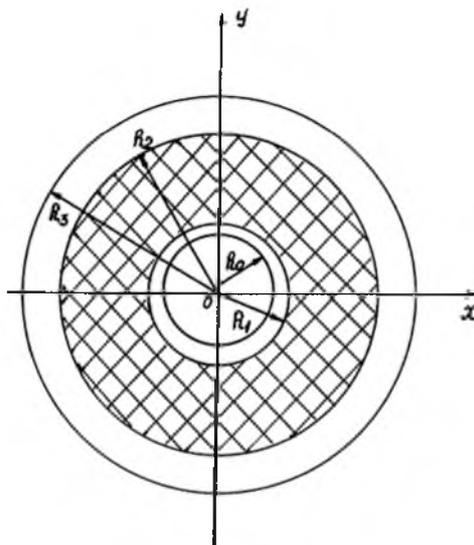


Рис. 1. Расчетная схема.

Уравнения, описывающие пространственное адиабатное движение прочной сжимаемой среды, являются дифференциальными следствиями фундаментальных законов сохранения массы, импульса и энергии и в общем случае имеют следующий вид [3, 4]:

уравнение неразрывности

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

уравнение движения

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_j}; \quad (2)$$

уравнение энергии

$$\rho \frac{dE}{dt} = S_{ij} \varepsilon_{ij} + \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt}, \quad (3)$$

где x_i – координаты; t – время; ρ – текущая плотность среды; v_i – компоненты вектора скорости; S_{ij} – компоненты девиатора напряжений; E – удельная внутренняя энергия; ε_{ij} – компоненты девиатора скоростей деформаций; P – давление.

При воздействии сил на твердое деформируемое тело его объем (плотность) и форма изменяются, причем по различным зависимостям. Поэтому тензор напряжений можно представить в виде суммы шарового тензора и девиатора тензора напряжений:

$$\sigma_{ij} = S_{ij} - P\delta_{ij} \quad (i, j = 1, 2, 3),$$

где σ_{ij} – компоненты тензора напряжений; δ_{ij} – символ Кронекера.

Следуя данным работ [5, 6], для описания сопротивления тела сдвигу будем использовать следующие соотношения:

$$2\mu\left(e_{ij} - \frac{1}{3}e_{kk}\delta_{ij}\right) = \frac{DS_{ij}}{Dt} + \lambda S_{ij}; \quad (4)$$

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} = \frac{dS_{ij}}{dt} - S_{ik}\omega_{jk} - S_{jk}\omega_{ik}; \quad (5)$$

$$2\omega_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i}; \quad (6)$$

$$2e_{ij} = \frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i}, \quad (7)$$

а также условие пластичности

$$J_2 = \frac{1}{2}S_{ij}S_{ij} = \frac{1}{3}\sigma^2, \quad (8)$$

где e_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций; μ – модуль сдвига; σ – динамический предел текучести; D/Dt – производная Яуманна. Компоненты девиатора напряжений корректируются с учетом яуманновского характера производных от девиатора напряжений.

Множитель λ положителен при пластических деформациях сдвига и тождественно равен нулю при упругом сдвиге. В численных расчетах обычно применяется процедура приведения напряжений к кругу текучести [3].

Уравнение состояния использовалось в форме Ми–Грюнайзена [7]:

$$P = \frac{K(1 - \Gamma_0 \xi/2)}{(1 - c\xi)^2} \xi + \rho_0 \Gamma_0 E, \quad (9)$$

где ρ_0 – начальная плотность среды; Γ_0 – коэффициент Грюнайзена; K, c – константы материала; $\xi = 1 - \rho_0/\rho$.

Рассматриваются совместные контактные задачи о взаимодействии продуктов детонации с упругопластическими оболочками. Продукты детонации моделируются невязким нетеплопроводным газом. Система уравнений, описывающая движение газа, получена аналогично уравнениям для сжимаемого прочного тела из общих законов сохранения массы, количества движения, энергии и замыкается уравнением состояния, конкретизирующим рассчитываемый газ [3, 4]:

уравнение неразрывности

$$\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} + \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0; \quad (10)$$

уравнение движения

$$\rho \frac{dv_i}{dt} = -\frac{\partial P}{\partial x_i}; \quad (11)$$

уравнение энергии

$$\rho \frac{dE}{dt} = \frac{P}{\rho} \frac{d\rho}{dt}; \quad (12)$$

уравнение состояния

$$P = P(\rho, E). \quad (13)$$

Для численных расчетов использовалось уравнение состояния в форме политропы Ландау–Станюковича [4]:

$$P = A\rho^3. \quad (14)$$

Начальными условиями служили невозмущенное состояние для материала оболочки и распределение параметров при мгновенной детонации для газа [2]. На внешней поверхности системы (рис. 1) ставилось условие свободной границы, для плоскости симметрии – условие скольжения вдоль жесткой стенки, на контактных границах между продуктами детонации и оболочками – условие идеального проскальзывания по касательной и непротекания по нормали в точке контакта. Для малых значений возмущающих факторов можно пренебречь проскальзыванием газа по внутренней оболочке. Для решения поставленной задачи использовалась явная конечно-разностная схема [3].

В качестве интегральной характеристики процесса деформирования системы оболочек с начальными дефектами служила радиальная компонента вектора скорости центра масс поперечного сечения внутренней оболочки V_3 . Скорость V_3 определяли по формуле

$$V_3 = \frac{\sum_j m_j v_j}{\sum_j m_j},$$

где m_j, v_j – соответственно масса и скорость j -го узла внутренней оболочки. Счет прекращался по достижении текущим внутренним радиусом внутренней оболочки заданной достаточно малой величины (0,01 см).

Результаты расчетов. Расчеты проводили для системы, состоящей из внешней алюминиевой ($\rho_0 = 2,7 \text{ г/см}^3$, $\mu = 27,5 \text{ ГПа}$, $\sigma = 0,3 \text{ ГПа}$) и внутренней медной ($\rho_0 = 8,9 \text{ г/см}^3$, $\mu = 46 \text{ ГПа}$, $\sigma = 0,2 \text{ ГПа}$) оболочек. Использовалось ВВ со следующими параметрами: $\rho_0 = 1,72 \text{ г/см}^3$, скорость детонации $D = 8600 \text{ м/с}$. Прочностью и сжимаемостью внешней оболочки пренебрегали, учитывали только ее инерционные свойства.

Численные результаты влияния физико-механических параметров ВВ на величину V_3 получены при таких значениях радиусов внутренней: $R_0 = 2,5$ см, $R_1 = 2,7$ см и внешней: $R_2 = 3,4$ см, $R_3 = 3,6$ см оболочек. Разностенность внутренней оболочки принималась равной 0,04 см. Рассматривали зависимость величины V_3 от давления мгновенной детонации $P_M = P_{c-j}/2$ ($P_{c-j} = \rho_0 D^2/4$ – давление в точке Чепмена–Жуге) для ряда взрывчатых веществ (таблица).

Зависимость V_3 от давления P_M приведена на рис. 2. Видно, что расчетные точки хорошо аппроксимируются линейной зависимостью.

Характеристики используемых ВВ

ВВ	Плотность ρ_0 , г/см ³	Скорость детонации D , см/мкс	Давление P_M , ГПа
Октоген	1,891	0,9110	19,60
Гексоген	1,767	0,8640	16,50
ТЭН	1,770	0,8300	15,20
Состав "В"	1,713	0,8018	13,80
RX-23-АА	1,420	0,8580	13,10
Пентолит	1,650	0,7655	12,10
Тротил	1,637	0,6942	9,86
RX-23-АС	1,130	0,7870	8,75
Нитрометан	1,128	0,6280	5,56

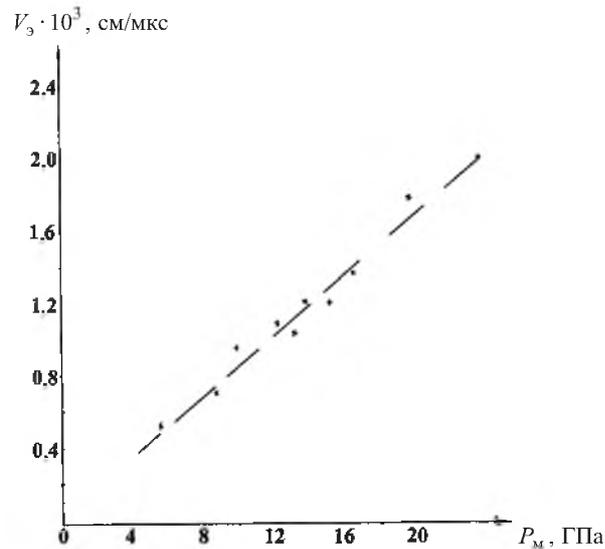


Рис. 2. Зависимость скорости V_3 от давления P_M в продуктах детонации для ряда ВВ.

Было также проведено сравнение характера изменения со временем скорости V_3 и ее максимальной величины для внутренних оболочек из меди и алюминия радиусом $R_0 = 2,3$ см, $R_1 = 2,7$ см и внешней оболочки радиусом $R_2 = 3,4$ см, $R_3 = 3,6$ см. Разностенность внутренней оболочки принималась равной 0,1 см.

Из рис. 3 видно, что разная плотность внутренних оболочек из меди и алюминия приводит к значительному качественному и количественному отличию в кинетике роста скорости V_3 и ее максимальных значений для этих двух случаев. Процесс схождения медной оболочки к центру длится по времени в 2,5 раза больше, чем алюминиевой, максимальные значения скорости отличаются более чем в пять раз.

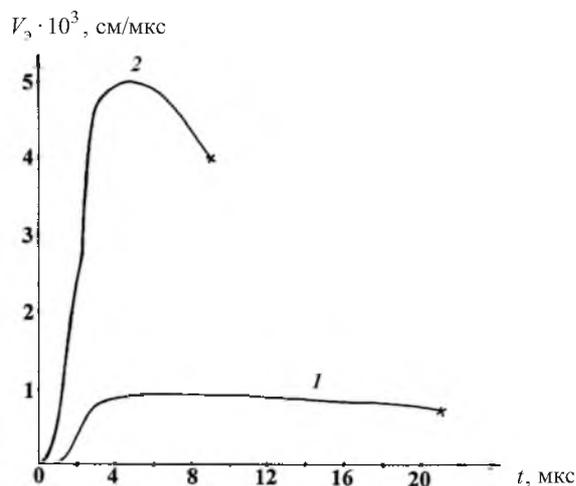


Рис. 3. Изменение скорости V_3 в зависимости от времени для внутренних оболочек из меди (1) и алюминия (2).

Как отмечалось выше, прочностными свойствами и сжимаемостью внешней оболочки из алюминия пренебрегали. Для оценки правомерности такого упрощения решение задачи проводилось с учетом ее сжимаемости и прочностных свойств. На рис. 4 представлены результаты сравнения изменения скорости V_3 в зависимости от времени при решении задачи в полной постановке и при упрощенном подходе. При этом параметры внутренней и внешней оболочек таковы соответственно: $R_0 = 2,3$ см, $R_1 = 2,7$ см; $R_2 = 3,4$ см, $R_3 = 3,6$ см. Разностенность внутренней оболочки принималась равной 0,1 см. Как видно, кривые располагаются близко друг к другу, незначительное расхождение наблюдается ближе к моменту схлопывания оболочки. С учетом этого можно использовать упрощенную модель поведения внешней оболочки.

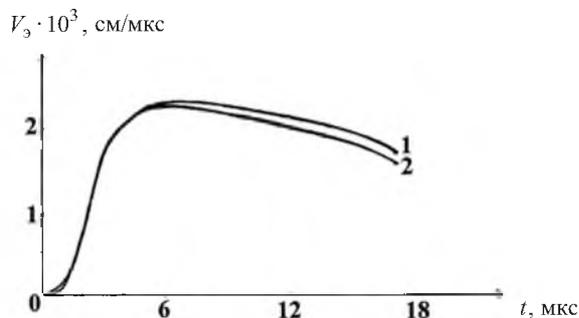


Рис. 4. Изменение скорости V_3 в зависимости от времени для внутренней оболочки из меди без учета (1) и с учетом (2) сжимаемости и прочности внешней оболочки.

Важным параметром, влияющим на процесс схождения внутренней оболочки к центру и на характер изменения радиальной составляющей вектора скорости центра масс V_3 , является толщина внутренней и внешней оболочек рассматриваемой системы (рис. 1). Изменение толщины приводит к изменению массы, приходящейся на единицу длины окружности оболочки, и к повышению ее инерционных свойств.

На рис. 5 представлены результаты расчетов влияния толщины внутренней оболочки на изменение скорости V_3 .

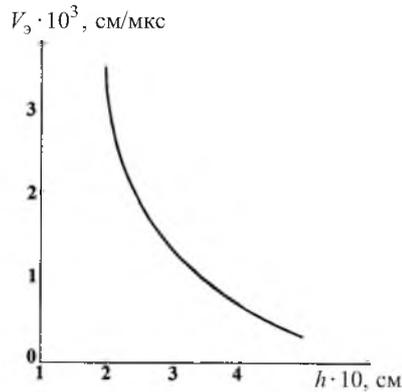


Рис. 5. Изменение скорости V_3 в зависимости от толщины внутренней оболочки из меди.

Геометрические характеристики внешней оболочки следующие: $R_2 = 3,4$ см, $R_3 = 3,6$ см. Разностенность внутренней оболочки принималась равной 0,1 см, ее толщина изменялась за счет уменьшения радиуса R_0 , параметр R_1 считался постоянным и равным 2,7 см. Как видно, характер зависимости скорости V_3 от толщины оболочки нелинейный. С увеличением толщины внутренней оболочки резко понижается скорость смещения ее центра масс.

В отличие от рассмотренного варианта, зависимость скорости V_3 от толщины внешней оболочки линейная (рис. 6), и влияние толщины выражено менее заметно. При увеличении толщины оболочки в пять раз скорость V_3 повышалась на 60%. Использовали внутреннюю оболочку радиусом $R_0 = 2,5$ см, $R_1 = 2,7$ см; для внешней оболочки радиус R_2 был фиксирован и равен 3,4 см, в то время как радиус R_3 варьировался. Разностенность внутренней оболочки принималась равной 0,04 см.

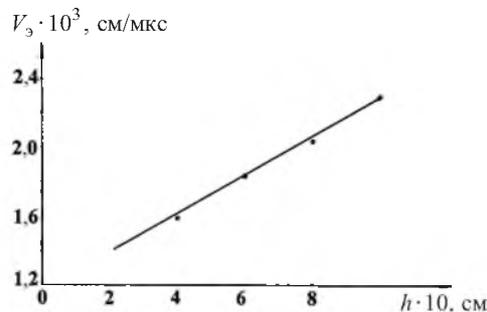


Рис. 6. Изменение скорости V_3 в зависимости от толщины внешней оболочки из алюминия.

Заключение. Асимметрия процесса сжатия внутренних оболочек рассматриваемых систем обусловлена технологическими погрешностями изготовления и сборки. Для того чтобы снизить уровень асимметрии процесса схождения оболочек к центру, необходимо оценить степень влияния различных геометрических параметров и физико-механических характеристик элементов системы на скорость V_3 . Влияние физико-механических свойств оболочек и взрывчатых веществ на процессы асимметричного сжатия исследуемых систем носит различный качественный и количественный характер.

Резюме

Наведено результати числового моделювання несиметричного стиску пружнопластичних оболонок під впливом продуктів детонації. Показано особливості впливу технологічних похибок та фізико-механічних характеристик матеріалу оболонок і вибухової речовини на процеси деформування.

1. Герасимов А. В. Несимметричное сжатие, расширение и разрушение оболочек при взрывном нагружении // Пробл. прочности. – 1998. – № 5. – С. 111 – 125.
2. Герасимов А. В. Формирование кумулятивной струи при несимметричном сжатии оболочки // Физика горения и взрыва. – 1997. – 33, № 6. – С. 121 – 126.
3. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212 – 263.
4. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. – М.: Наука, 1975. – 704 с.
5. Григорян С. С. Об основных представлениях динамики грунтов // Прикл. математика и механика. – 1960. – 24, вып. 6. – С. 1057 – 1072.
6. Новацкий В. К. Волновые задачи теории пластичности. – М.: Мир, 1978. – 312 с.
7. Высокоскоростные ударные явления / Под ред. Р. Кинслоу. – М.: Мир, 1973. – 535 с.

Поступила 03. 07. 2002