

ЗАЩИТА ВЗРЫВНОЙ КАМЕРЫ ОТ РАЗРУШЕНИЯ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНОЙ

УДК 539.3

А. В. Герасимов

НИИ прикладной математики и механики, 634050 Томск

Представлены результаты численного моделирования защитных свойств слоистых и пористых прокладок по снижению пиковых напряжений и предотвращению разрушений в стенках взрывных камер при нагружении их детонационной волной. Показано, что пористые прокладки обладают более высокими защитными свойствами, чем слоистые прокладки одинаковой толщины.

Проблема защиты стенок цилиндрических камер, полностью заполненных взрывчатым веществом (ВВ), от разрушительного воздействия детонационных волн актуальна для широкого круга технических устройств различного назначения. Наиболее важна задача сохранения работоспособности камеры для конечного цикла нагружений, хотя зачастую необходимо обеспечить целостность системы в течение ограниченного промежутка времени. В первом случае необходимо снижение пиковых значений напряжений в стенках до приемлемого уровня, например ниже предела текучести материала, во втором — до уровня, позволяющего сохранить целостность системы в течение заданного промежутка времени.

Снижение амплитудных значений нагрузки на контактной поверхности продукты детонации — металл приводит к уменьшению растягивающих напряжений и уровня повреждений в стенках камер [1]. Простое увеличение толщины стенки не всегда является оптимальным решением данной проблемы, поэтому необходимо определить другие более эффективные методы сохранения целостности исследуемых систем. Возможны два подхода к снижению нагрузки, действующей на внутреннюю поверхность камеры: растяжение импульса давления в слоистой прокладке за счет многократного отражения волн от слоев с различными акустическими импедансами [2] и диссипация энергии импульса давления при пластическом деформировании высокопористых прокладок [3]. Во втором случае спад давления обусловлен также заметным увеличением объема камеры и сильной зависимостью давления от плотности продуктов детонации (политропа Ландау — Станюковича).

Рассматривалась задача определения напряженно-деформированного состояния, а также проблема возникновения и роста повреждений в стенках цилиндрической камеры при действии на нее давления продуктов детонации. Между зарядом ВВ и внутренней стенкой камеры размещались демпфирующие прокладки двух типов: а) чередующиеся слои разноплотных материалов; б) слой металла различной пористости. Полученные результаты сравнивались с данными для незранированной стенки камеры с целью оценки эффективности предложенных подходов по уменьшению в ней уровней пиковых напряжений и уровней повреждений. Поперечное сечение камеры с демпфирующей прокладкой схематично представлено на рис. 1, где r_0 — радиус заряда ВВ; r_1 — внутренний радиус камеры; r_2 — ее внешний радиус.

Основные соотношения, описывающие пространственное осесимметричное движение пористой прочной сжимаемой упругопластической среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии [4, 5]. Все величины в них относятся к пористой среде. Эти соотношения дополняются кинетическим уравнением, описывающим рост и сжатие сферических пор [5, 6]. При решении одномерной задачи использовалось полное кинетическое уравнение из [6], но как указано в [5] и подтверждено численными расчетами, инерционным членом в нем можно пренебречь и использовать редуцированное соотношение [5].

Давление в пористой среде определялось по уравнению состояния для сплошной компоненты:

$$p = p_s(V_s, E)/\alpha.$$

Уравнение состояния для меди брали в форме [5], для свинца и полиэтилена (ПЭ) — из работы [4]:

$$p_s = k_1 x + k_2 x^2 + k_3 x^3 + \Gamma_0 E,$$

для стали — из [7]:

$$p_s = a_1 y + a_2 y^2 + a_3 y^3 + (a_4 + a_5 y)E/V_s.$$

Параметр $\alpha = W/W_s$ связан с пористостью Φ соотношением $\Phi = (\alpha - 1)/\alpha$. Прочностные характеристики пористого материала определялись, как в [5]:

$$\sigma = \sigma_s/\alpha, \quad \mu = \mu_s(1 - \Phi) \left(1 - \frac{6K_s + 12\mu_s}{9K_s + 8\mu_s} \Phi \right).$$

В приведенных формулах p — давление; W_s — удельный объем матрицы; W — удельный объем пористого тела; E — удельная внутренняя энергия; $k_1, k_2, k_3, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, \Gamma_0$ — коэффициенты; $x = 1 - V_s$; $y = 1/V_s - 1$; V_s — относительный объем; σ — предел текучести; μ — модуль сдвига; K_s — объемный модуль; индекс s относится к материалу матрицы.

Система уравнений, описывающая движение продуктов детонации как невязкого нетеплопроводного газа, получается из соотношений для упругопластической среды, если параметры, определяющие прочностные свойства, положить равными нулю.

В качестве уравнения состояния продуктов детонации используется политропа Ландау — Станюковича [3]. При моделировании процесса детонации заряда ВВ применялся подход, изложенный в [8]. При сжатии ВВ в счетной ячейке до критического значения плотности ρ_* происходит смена уравнения состояния, описывающего поведение ВВ как твердого тела, уравнением состояния продуктов детонации. Для детонации основного заряда ВВ необходимо срабатывание детонатора, который моделируется несколькими ячейками с повышенной плотностью ВВ, а следовательно, и повышенным давлением продуктов детонации.

Для решения поставленной задачи использовался конечно-разностный метод [4]. Он позволяет в полной мере реализовать удобство лагранжевого подхода к описанию движения сплошной среды, а именно приемлемую точность отслеживания ударных волн (УВ), контактных и свободных границ. Для подавления нефизических осцилляций за фронтом УВ в численную схему вводится комбинированная искусственная вязкость. Тензорная вязкость, реализуемая на треугольных ячейках, прилегающих к рассчитанному узлу сетки, позволяет стабилизировать сетку от искажений типа «песочные часы».

Специальная процедура расчета перемещения контактных границ относительно друг

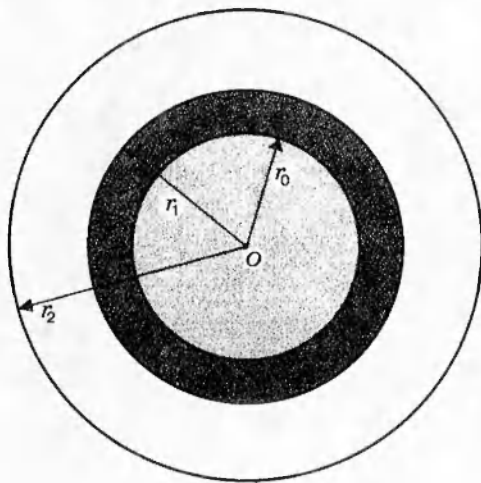


Рис. 1

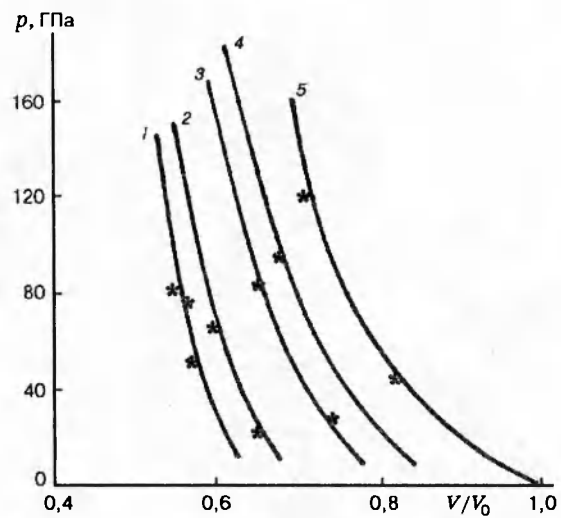


Рис. 2

Рис. 1. Расчетная схема для одномерной постановки задачи

Рис. 2. Зависимости давления от удельного объема для пористой меди: сплошные линии — эксперимент, точки — расчет; Φ : 1 — 0,64; 2 — 0,71; 3 — 0,82; 4 — 0,88; 5 — 1,00

друга базируется на условии непротекания по нормали и скольжения вдоль касательной к поверхности контакта. Здесь формируются основная и вспомогательная группы ячеек, прилегающих к контактной границе с обеих сторон, которые во время счета меняются местами на каждом шаге либо через определенное число шагов. В случае отсутствия скольжения процедура автоматически описывает условие прилипания. Алгоритм решения задачи предполагает возможность отхода (отскока) контактирующих поверхностей металл-металл при выполнении соответствующих условий.

В качестве тестовой рассматривалась задача о распаде разрыва на контактной поверхности продукты детонации — стенка камеры (медь и гексоген) для случая скользящей детонационной волны (ДВ). Из аналитических формул [3] получены следующие значения: давление $p = 22,2$ ГПа, скорость $u = 520$ м/с. Численное решение дает $p = 22,7$ ГПа, $u = 523$ м/с. Одновременно проведено сравнение зависимости давления от удельного объема для меди разной пористости. Экспериментальные кривые взяты из работы [7]. Численно решались плоские одномерные задачи о соударении с различной скоростью двух пористых пластин. Результаты расчетов представлены на рис. 2. На основе выполненных тестов можно сделать вывод о работоспособности используемых физической и математической моделей процесса взаимодействия продуктов детонации со сплошным и пористым материалами.

В случае достаточно длинной камеры можно ограничиться рассмотрением одномерной задачи. Демпфирующая оболочка состоит из последовательности чередующихся слоев свинца и полиэтилена либо из слоя пористого алюминия. В первом случае размеры слоев взяты из работы [2], в которой исследуется процесс кумуляции УВ в слоистых средах. В данном расчете толщина слоев увеличивается в направлении движения УВ, что

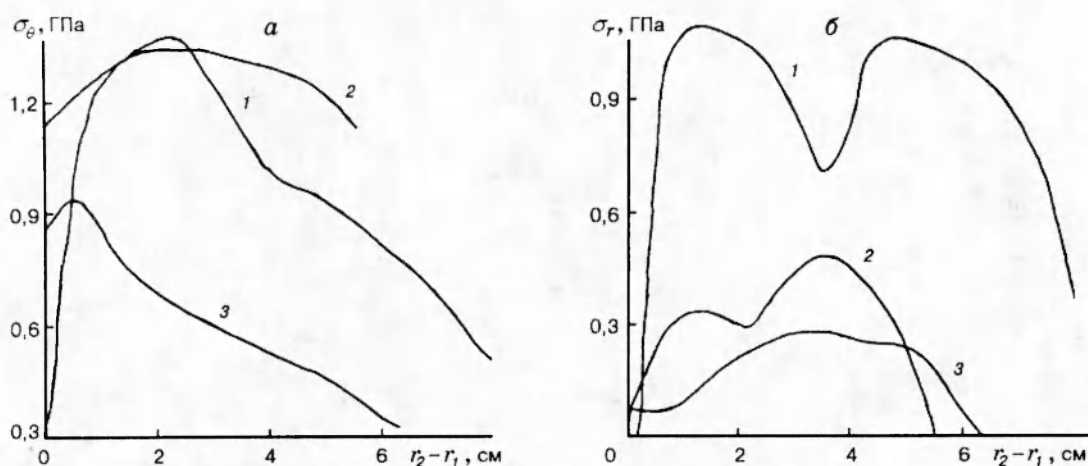


Рис. 3. Распределение окружных (а) и радиальных (б) напряжений по толщине стенки камеры:

1 — камера без защитной прокладки; 2 — слоистая прокладка из 9 слоев (ПЭ-ПЭ); 3 — пористая прокладка

приводит к растяжению импульса давления и уменьшению амплитудных значений растягивающих и сжимающих напряжений в стенках камеры. Пористостью Рв и ПЭ пренебрегаем. Толщина слоев Рв и ПЭ, используемая в расчетах, приведена в работе [2]. Для случая нормального падения ДВ на стенку многослойной конструкции в качестве начального условия для продуктов детонации берется автомодельное распределение параметров за фронтом расходящейся цилиндрической ДВ [3]. Нагрузка от скользящей ДВ на стенку многослойной оболочки воспроизводится приближенно в одномерном расчете с помощью модели [9].

Поставленную задачу решали при следующих физико-механических характеристиках материалов:

для свинца: $\rho_0 = 11,35 \text{ г/см}^3$; $\Gamma_0 = 2,77$; $k_1 = 47,74 \text{ ГПа}$; $k_2 = 73,29 \text{ ГПа}$; $k_3 = 11,22 \text{ ГПа}$; $\sigma = 0$;

для полиэтилена: $\rho_0 = 0,91 \text{ г/см}^3$; $\Gamma_0 = 1,64$; $k_1 = 0,7653 \text{ ГПа}$; $k_2 = 16,38 \text{ ГПа}$; $k_3 = 31,71 \text{ ГПа}$; $\mu = 0,9 \text{ ГПа}$; $\sigma = 0,057 \text{ ГПа}$;

для стали: $\rho_0 = 7,86 \text{ г/см}^3$; $a_1 = 153 \text{ ГПа}$; $a_2 = 174 \text{ ГПа}$; $a_3 = 53,2 \text{ ГПа}$; $a_4 = 191,2$; $a_5 = -38,6$; $\mu = 81,4 \text{ ГПа}$; $\sigma = 1 \text{ ГПа}$.

Характеристики ВВ: $\rho_0 = 1,4 \text{ г/см}^3$; $D = 0,3 \text{ см/мкс}$, где ρ_0 — начальная плотность, D — скорость детонации ВВ. В качестве пористой прокладки использовали пористый алюминий. Физико-механические характеристики материала матрицы: $\rho_0 = 2,7 \text{ г/см}^3$; $\mu = 24,8 \text{ ГПа}$; $\sigma = 0,3 \text{ ГПа}$; $\alpha = 1,8$. Размеры r_0 и r_2 фиксированы, толщины защитной оболочки и стенки могут изменяться в различных вариантах расчетов. Суммарная толщина стенки камеры и демпфирующей прокладки оставалась в расчетах постоянной и равной толщине исходной незащищенной стенки камеры.

На первом этапе решалась задача о скользящей детонации. Рассматривались максимальные за все время процесса нагружения значения радиальных σ_r и окружных σ_θ растягивающих напряжений по толщине, защищаемой слоистыми и пористыми оболочками стальной стенки камеры. Эти распределения напряжений сравнивались с подобными для сплошной стальной стенки камеры без защитных оболочек. Для 10 слоев (Рв-ПЭ).



Рис. 4. Зоны повреждений для сплошной (а) и пористой прокладок (б): 1 — камера; 2 — прокладка; 3 — продукты детонации ВВ

начинающихся со свинца и заканчивающихся полиэтиленом (слой из таблицы работы [2]), наблюдалось ослабление σ_r , но значение σ_θ несколько больше, чем для сплошной стальной стенки камеры. Поэтому были проведены расчеты для различных комбинаций материалов начального и конечного слоев защитной слоистой оболочки и для различного числа самих слоев. Начальный слой контактирует с продуктами детонации, конечный — со стенкой камеры. Слои чередуются последовательно: свинец — полиэтилен и т. д.

Расчеты показали, что наиболее удачная комбинация состоит из 9 слоев (ПЭ–ПЭ), затем идет восьмислойная система (ПЭ–Рв). Первое сочетание использовалось далее в расчетах при более интенсивном нагружении нормально падающей ДВ. Полученные результаты сравнивались с результатами для неэкранированной стенки и стенки, экранированной пористой прокладкой. Как видно из рис. 3, наиболее эффективным способом защиты, аналогично случаю скользящей детонации, оказалось использование пористой прокладки. Она позволила заметно снизить уровень пиковых растягивающих напряжений в стенках защищаемых камер. Как отмечалось выше, суммарная толщина защищаемой стенки камеры и демпфирующей прокладки равна толщине стенки исходной незащищенной камеры.

При учете влияния днищ на процесс деформирования стенок камеры необходимо проводить расчеты в пространственной осесимметричной постановке. Основные результаты получены для замкнутых толстостенных медных оболочек со следующими физико-механическими и геометрическими параметрами:

медь: $\rho_0 = 8,9 \text{ г/см}^3$; $\mu = 46 \text{ ГПа}$; $\sigma = 0,255 \text{ ГПа}$;

взрывчатое вещество (пентолит): $\rho_0 = 1,65 \text{ г/см}^3$; $D = 7655 \text{ м/с}$;

длина камеры 8 см, внутренний радиус стенки камеры 2 см; толщина левого и правого днищ 0,5 и 1 см соответственно, внешний радиус оболочки 3 см. Толщина защитной медной оболочки 1 см, ее внутренний радиус 1 см, пористость $\Phi = 0,5$. В этом случае днища не защищались пористыми прокладками. Заряд ВВ покрывался пористой или сплошной оболочкой, а затем помещался в камеру. Между оболочкой заряда и стенкой камеры ставилось условие идеального проскальзывания, в ходе силового взаимодействия был возможен отскок их друг от друга.

На рис. 4,а приведены текущие конфигурации и зоны роста повреждений для незащищенной стенки камеры. Заштрихованы области, где происходит рост уровня повреждений. Сплошным черным цветом выделены ячейки с максимальным значением параметра α в данном сечении стенки камеры. Предельный уровень α в этой полосе достигает значения 1,212, а в зоне, прилегающей к внутренней поверхности оболочки, $\alpha \leq 1,021$. Максимальное отклонение внешней и внутренней поверхностей по отношению к исходной конфигурации равно 0,15 и 0,21 см соответственно. Максимальное значение массовой скорости, достигаемой в стенке камеры для рассматриваемого момента времени (12 мкс),

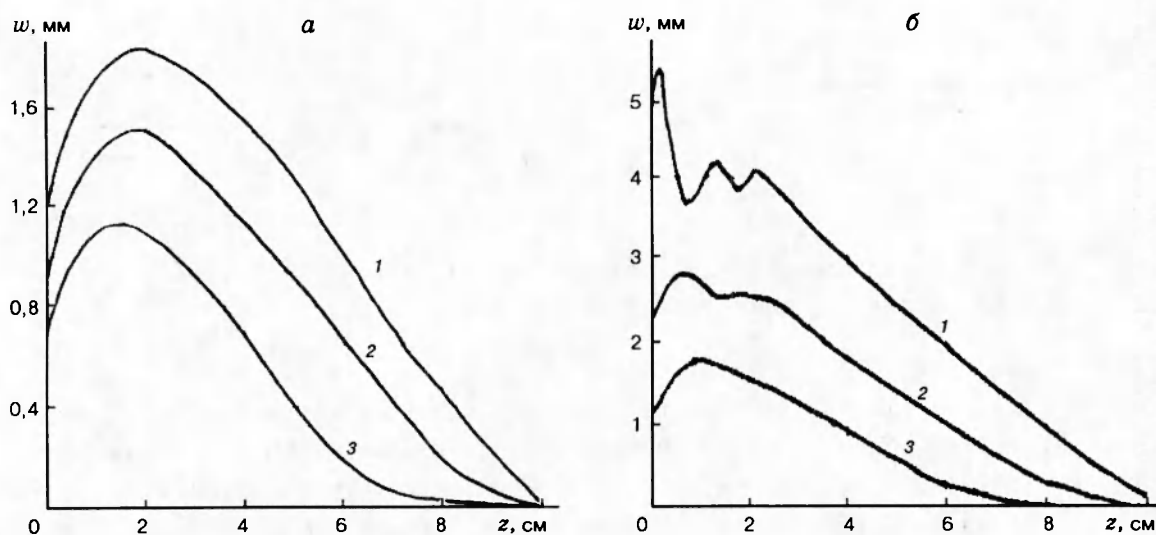


Рис. 5. Радиальные перемещения внешней (а) и внутренней (б) поверхностей камеры при толщине пористого слоя 0,5 (2) и 1 см (3) (1 — сплошная стенка камеры)

равнялось 430 м/с. Введение пористой прокладки (рис. 4, б) привело к заметному увеличению внутреннего объема камеры и резкому снижению уровня повреждений в ее стенках по сравнению со случаем, когда стенки камеры не защищены пористой прокладкой (см. рис. 4, а). При введении пористой прокладки $\alpha \leq 1,004$ (начальное значение $\alpha = 1,0003$), что значительно меньше уровня повреждений в незащищенной камере (см. рис. 4, а). Максимальные смещения внешней и внутренней поверхностей стенки камеры в этом варианте расчета составили 0,052 и 0,102 см соответственно. Максимальная массовая скорость в стенке камеры достигала 263 м/с, что значительно меньше, чем в случае сплошной медной прокладки. Сравнение двух вариантов прокладок (пористой и сплошной) подтверждает выводы одномерного расчета о явно выраженных защитных свойствах первой из них.

Рассмотренная выше замкнутая толстостенная оболочка нагружалась мощным ВВ с высокими значениями параметров на фронте ДВ. Использование демпфирующих прокладок позволяет избежать откольных эффектов и снизить скорость расширения оболочек взрывных камер в течение необходимого промежутка времени, но в дальнейшем не исключает разрушения оболочки по другим механизмам.

Результаты для камеры, нагружаемой продуктами детонации флегматизированного ВВ ($\rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$, $D = 5000 \text{ м/с}$), менее мощного и с пониженными параметрами в точке Чепмена — Жуге по сравнению с вышерассмотренным ВВ, приведены на рис. 5. Длина оболочки равнялась 10 см, толщина днищ — 1 см, внешний радиус — 4 см, внутренний — 2 см. В данном варианте задачи пористая прокладка прочно скреп. на со стенкой камеры и имела толщину 0,5 и 1 см.

Рост уровня поврежденности не наблюдался ни для незащищенной стенки камеры, ни для защищенной пористыми прокладками различной толщины. Демпфирующие свойства прокладок проявились во влиянии на кинематические характеристики процесса взаимодействия камеры с продуктами детонации. Все результаты, представленные на рис. 5, даны для момента времени $t = 22 \text{ мкс}$. Максимальное значение массовой скорости в стенке камеры в этот же момент времени и для той же последовательности изменения пористого слоя

равны соответственно 318, 220, 199 м/с. Наблюдается резкое уменьшение этих величин по мере роста толщины прокладки, что говорит о ее высоких защитных свойствах.

Итак, в работе показано, что слоистые и пористые прокладки могут служить эффективным средством снижения пиковых напряжений в стенках взрывных камер, подверженных действию детонационных волн мощных и флегматизированных ВВ. Отмечены более высокие защитные свойства пористых прокладок по сравнению со слоистыми оболочками той же толщины. Защитные свойства прокладок проявляются в снижении откольных эффектов и уменьшении кинематических характеристик процесса разрушения стенок камеры (скорости, перемещений).

ЛИТЕРАТУРА

1. Грязнов Е. Ф., Карманов Е. В., Селиванов В. В., Хахалин С. В. Морфология разрушения цилиндрических оболочек на волновой стадии // Проблемы прочности. 1984. № 8. С. 89–92.
2. Козырев А. С., Костылева В. Г., Рязанов В. Т. Кумуляция ударных волн в слоистых средах // ЖЭТФ. 1969. Т. 56, вып. 2. С. 427–429.
3. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
4. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
5. Johnson J. N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids // J. Appl. Phys. 1981. V. 52, № 4. P. 2812–2825.
6. Carroll M. M., Holt A. C. Static and dynamic pore-collapse relations for ductile porous materials // J. Appl. Phys. 1972. V. 43, № 4. P. 1626–1636.
7. Высокоскоростные ударные явления / Под ред. Р. Кинслоу. М.: Мир, 1973.
8. Гольдин В. Я., Калиткин Н. Н., Левитан Ю. Л., Рождественский Б. Л. Расчет двумерных течений с детонацией // ЖВМиМФ. 1972. Т. 12, № 6. С. 1606–1611.
9. Одинцов В. А., Стаценко Т. Г. Разрушение цилиндров на волновой стадии // Изв. АН СССР. МТТ. 1980. № 2. С. 113–119.

*Поступила в редакцию 17/І 1996 г.,
в окончательном варианте — 1/IV 1996 г.*
