

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗРУШЕНИЯ ПЛИТ ЗАРЯДАМИ ВВ, ЗАКЛЮЧЕННЫМИ В ОБОЛОЧКУ

УДК 539.3

А. В. Герасимов

НИИ прикладной математики и механики, 634050 Томск

Проведено численное моделирование процесса взаимодействия заряда взрывчатого вещества в оболочке с упругопластической плитой. Рассмотрены варианты неподвижного заряда и заряда с оживальным нижним днищем, движущимся с заданной скоростью. Выявлены основные особенности процесса деформирования и разрушения плиты и отличие полученных результатов от случая покоящегося на плите заряда без оболочки. Для движущегося заряда показано существование оптимального, с точки зрения откольного эффекта в плите, размера контактного пятна в момент подхода детонационной волны к границе раздела между плитой и зарядом.

Исследование процесса взаимодействия заряда взрывчатого вещества (ВВ) с деформируемой преградой (плитой) представляет интерес с точки зрения совершенствования технологий обработки материалов взрывом и для оценки возможных последствий аварийных ситуаций (падение заряда ВВ, несанкционированное инициирование детонаций и т. д.). Большой объем экспериментальных данных по исследованию напряженно-деформированного состояния и разрушению металлических плит при действии накладных цилиндрических зарядов ВВ представлен в работе [1]. Теоретическое изучение деформирования плиты и разлета продуктов детонации (ПД) при подрыве заряда ВВ проведено в [2]. Процесс разрушения плит при подобном типе нагружения численно моделировался в работах [3, 4]. Во всех указанных работах заряды были без оболочек и размещались на поверхности преграды. В настоящей работе исследуется влияние оболочки заряда и скорости падения на напряженно-деформируемое состояние и разрушение толстых упругопластических плит при взрывном нагружении.

Взаимодействие с деформируемой преградой заряда ВВ, заключенного в оболочку и движущегося со скоростью V , — сложный многоступенчатый процесс. Он включает следующие этапы: падение и соударение системы (оболочка + ВВ) как инертного деформируемого тела с деформируемой преградой, инициирование детонации, распространение детонационной волны (ДВ) по заряду ВВ, взаимодействие ДВ с оболочкой, разлет и разрушение оболочки, формирование ударной волны (УВ) в плите и повреждение плиты в интенсивных волнах разгрузки. Процесс сложен с физической точки зрения и с точки зрения математической постановки задачи и ее численной реализации. Варианты неподвижного заряда в оболочке и без нее — частные случаи приведенной выше задачи.

На рис. 1 показаны три рассматриваемых типа взаимодействия зарядов ВВ с плитой. Днище движущегося заряда имеет вид сегмента эллипса. В этом случае представляет интерес оценка влияния размеров пятна контакта MD к моменту подхода ДВ на степень

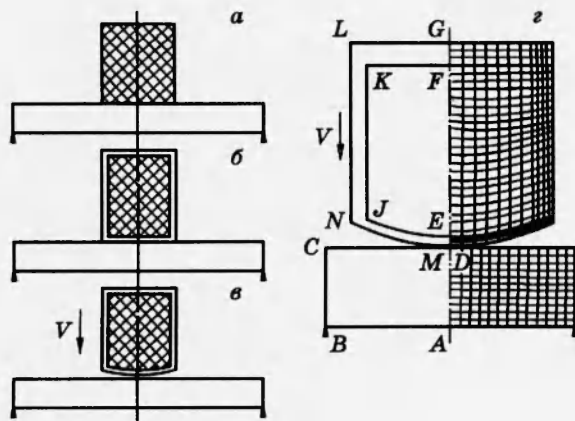


Рис. 1. Варианты взаимодействия заряда ВВ с плитой (а-в) и расчетная схема (z):

а — заряд без оболочки, б — заряд в оболочке, в — движущийся заряд в оболочке

откольного разрушения в плите. Во всех трех вариантах инициирование происходит в точке F или на поверхности верхнего торца заряда FK . Для описания разрушения оболочки и плиты используется модель повреждаемой (пористой) среды.

Основные соотношения, описывающие пространственное осесимметричное движение пористой прочной сжимаемой упругопластической среды, базируются на законах сохранения массы, импульса и энергии и имеют вид [1, 5]

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} &= - \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right), & \rho \frac{du}{dt} &= \frac{\partial S_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial S_{rz}}{\partial r} + \frac{S_{rz}}{r} - \frac{\partial p}{\partial z}, \\ \rho \frac{dv}{dt} &= \frac{\partial S_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial S_{rz}}{\partial z} + \frac{S_{rr} - S_{\theta\theta}}{r} - \frac{\partial p}{\partial r}, \\ \frac{dE}{dt} &= \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt} + \frac{1}{\rho} \left[S_{zz} \frac{\partial u}{\partial z} + S_{rr} \frac{\partial v}{\partial r} + S_{\theta\theta} \frac{v}{r} + S_{rz} \left(\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial u}{\partial r} \right) \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Физические соотношения (уравнения Прандтля — Рейса):

$$\begin{aligned} \frac{DS_{zz}}{Dt} + \lambda S_{zz} &= 2\mu \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right), & \frac{DS_{rr}}{Dt} + \lambda S_{rr} &= 2\mu \left(\frac{\partial v}{\partial r} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right), \\ \frac{dS_{\theta\theta}}{dt} + \lambda S_{\theta\theta} &= 2\mu \left(\frac{v}{r} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} \right), & \frac{DS_{rz}}{Dt} + \lambda S_{rz} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Условие текучести Мизеса:

$$S_{rr}^2 + S_{zz}^2 + S_{rz}^2 + S_{rr}S_{zz} = \frac{1}{3} \delta^2.$$

Уравнение состояния:

$$p = p(\rho, E). \quad (3)$$

Здесь ρ — текущая плотность; r, z — радиальная и осевая координаты; u, v — осевая и радиальная компоненты вектора скорости; $S_{rr}, S_{zz}, S_{\theta\theta}, S_{rz}$ — компоненты девиатора тензора напряжения; p — давление; E — удельная внутренняя энергия; μ — модуль сдвига; δ — предел текучести; D/Dt — производная Яумана.

Все величины в (1)–(3) относятся к пористой среде. Эти соотношения дополняются

кинетическим уравнением, описывающим рост и сжатие сферических пор [6]:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{(\alpha_0 - 1)^{2/3}}{\eta} \alpha (\alpha - 1)^{1/3} \Delta p \operatorname{sign}(p), \quad \alpha = \frac{v_p + v_s}{v_s}, \quad \Delta p = |p| - \frac{d_s}{\alpha} \ln \frac{\alpha}{\alpha - 1}, \quad (4)$$

где α_0 , d_s , η — константы материала; v_s — удельный объем сплошной компоненты пористой среды; v_p — удельный объем пор.

По уравнению состояния для сплошной компоненты [6] определяется давление в пористой среде

$$p = p_s(v_s, E)/\alpha, \quad p_s = \frac{K_s(1 - (1/2)\Gamma\xi)}{(1 - c\xi)^2} + \rho_s \Gamma E,$$

где индекс s относится к материалу матрицы; Γ — коэффициент Грюнайзена; c , K_s — константы материала, $\xi = 1 - \rho_{0s}/\rho_s$; ρ_0 — начальная плотность.

Прочностные характеристики пористого материала определялись следующим образом [3, 6]:

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

где $\Phi = (\alpha - 1)/\alpha$ — пористость; K_s , μ_s — константы материала матрицы.

При предельном значении пористости $\Phi_* = 0,3$ материал в данной точке полагается разрушенным.

Система уравнений, описывающая движение ПД как невязкого нетеплопроводного газа, может быть получена из соотношений (1)–(3) для упругопластической среды, если положить равными нулю параметры, определяющие прочностные свойства:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dt} - \left(\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial r} + \frac{v}{r} \right), \quad \rho \frac{du}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial z}, \\ \rho \frac{dv}{dt} = - \frac{\partial p}{\partial r}, \quad \frac{dE}{dt} = \frac{p}{\rho^2} \frac{d\rho}{dt}, \quad p = p(\rho, E). \end{aligned} \quad (5)$$

При моделировании процесса детонации заряда ВВ применяется подход, предложенный в работе [7]. При сжатии ВВ в счетной ячейке до критического значения ρ_* уравнение состояния, описывающее поведение твердого тела, заменяется уравнением состояния продуктов детонации, которое при данном подходе может быть записано в виде

$$p = (1 - \beta)f_1(\rho) + \beta f_2(\rho), \quad f_1(\rho) = A[(\rho/\rho_0)^n - B], \quad f_2(\rho) = C\rho^k, \quad (6)$$

где $\beta = 0$ при $\rho < \rho_*$. Для детонации основного заряда ВВ необходимо срабатывание детонатора, которой моделируется несколькими ячейками с повышенной плотностью ВВ, а следовательно, и повышенным давлением ПД.

Уравнение Ландау — Станюковича (третье в системе (6)), удовлетворительно описывающее поведение ПД в случае высоких давлений, дает ошибочную скорость разлета газа в пустоту [5]. Поэтому это уравнение, приемлемое для зарядов с толстой оболочкой, заменяется двучленным уравнением состояния, хорошо описывающим процесс разлета ПД в вакуум [5]:

$$f_2(\rho) = F\rho^k + G\rho^{m+1}. \quad (7)$$

Оно используется для решения задачи о взаимодействии плиты с зарядом ВВ без оболочки. В формулах (6), (7) A , n , B , k , C , F , G , m — константы.

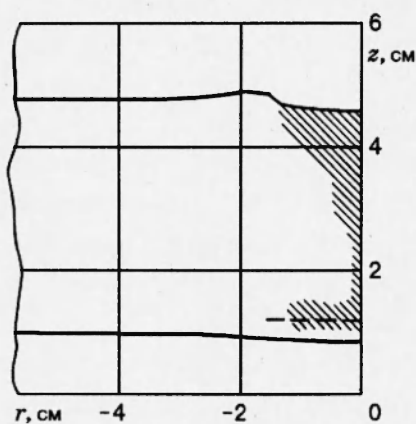


Рис. 2. Тестовый расчет

Система уравнений (1)–(6) дополняется начальными и граничными условиями. В начальный момент времени все точки оболочки и ВВ имеют осевую скорость $u = v$ с учетом ее знака, а состояние плиты полагается невозмущенным.

Граничные условия ставятся следующим образом (см. рис. 1, 2).

Граница $ABCMNLG$ предполагается свободной от напряжений: $\sigma_n = \tau_n = 0$. На оси симметрии $ADEFG$ ставится условие скольжения вдоль жесткой стенки: $\tau_n = 0, v_n = 0$.

В точке B основания (плиты) отсутствуют смещения вдоль оси z : $u = 0$.

На переменном контактном участке DM между плитой и оболочкой ставится условие идеального скольжения одного материала по другому вдоль касательной и условие непротекания по нормали к поверхности контакта: $\sigma_{n1} = \sigma_{n2}; v_{n1} = v_{n2}; \tau_{n1} = \tau_{n2} = 0$.

Так как контактное пятно DM изменяется в процессе взаимодействия заряда и преграды, необходимо определять его текущие размеры в ходе решения задачи для каждого момента времени.

На поверхности контакта ВВ с оболочкой $EJKF$ ставятся условия, аналогичные предыдущим:

$$\sigma_{n1} = -p, \quad v_{n1} = v_{n2}, \quad \tau_{n1} = \tau_{n2} = 0,$$

где σ_n, τ_n — нормальная и касательная компоненты вектора напряжений; v_n — нормальная компонента вектора скорости в точке контакта; индексы 1 и 2 относятся к контактирующим средам.

Для решения использовалась конечно-разностная схема типа «крест», подробно изложенная в работе [2]. Разбиение расчетной области на отдельные блоки позволяет избежать введения пустых, т. е. не используемых при счете ячеек, и проводить выбор необходимой расчетной сетки для каждого блока (сгущение и разрежение узлов сетки в случае необходимости). Этот метод позволяет в полной мере реализовать удобство лагранжевого способа описания движения сплошной среды, а именно, приемлемую точность отслеживания УВ, контактных и свободных границ, а также возможность варьирования геометрии расчетных областей и расчета неоднородных тел вращения. Для подавления нефизических осцилляций за фронтом УВ в численную схему вводится комбинированная (квадратичная + линейная) искусственная вязкость. Для исключения неустойчивости типа «песочные часы» введена тензорная вязкость, реализуемая на треугольных ячейках, прилегающих к

рассчитываемому узлу сетки [2].

Для расчета контактных границ используется разработанная специальная процедура, которая позволяет рассчитывать скольжение сеток различных областей (металл — металл, металл — газ) относительно друг друга при граничных условиях со скольжением. Она базируется на условиях непротекания по нормали и идеального скольжения вдоль касательной к поверхности контакта. При этом формируются основная и вспомогательная группы ячеек на контакте, которые меняются местами либо на каждом шаге, либо через определенное число шагов по времени. В случае отсутствия скольжения процедура автоматически описывает условие прилипания.

В качестве тестовых рассматривались задачи о распаде разрыва на контактной поверхности [5] и о разрушении толстой плиты [1]. Расчет распада разрыва на контактной поверхности плита — продукты детонации для меди и ТГ 36/64 дал следующие значения давления и массовой скорости: $p = 42,01$ ГПа, $u = 920$ м/с (аналитическое решение [5] $p = 44,9$ ГПа, $u = 933$ м/с). Для задачи о подрыве заряда ВВ без оболочки на поверхности толстой плиты имеются обширные экспериментальные данные в работе [1]. Сравнение расчета с экспериментом проводилось для систем со следующими геометрическими размерами: толщина медной плиты — 3,8 см, диаметр 15,2 см, высота заряда — 5,1 см, диаметр — 2,54 см. Картина разрушения плиты в конце процесса взаимодействия, приведенная на рис. 2, хорошо согласуется с экспериментальными данными работы [1]. Заштрихованные области в плите характеризуются предельным значением пористости $\Phi_* = 0,3$. Материал этих участков полагается полностью разрушенным. Как видно из рис. 2, разрушение произошло в районе контакта заряда ВВ с плитой, вблизи оси симметрии, и сформировалась откольная трещина у тыльной поверхности плиты. Толщина откольной пластины в работе [1] 0,33 см. На рис. 2 она выделена штриховой линией.

На рис. 3 для трех моментов времени приведены текущие конфигурации систем металл — продукты детонации, а также зоны поврежденности (штриховка) и разрушения преграды (темные области). Размеры плиты: толщина 3 см, радиус 12 см; заряда ВВ: высота 4,4 см, радиус 3 см. Материал плиты — медь ($\rho_0 = 8,9$ г/см³, $\mu = 46$ ГПа, $\sigma = 0,2$ ГПа). Параметры для уравнения (4) брались, как в работе [6]. Заряд ВВ (ТГ 36/64) имеет плотность $\rho_0 = 1,717$ г/см³, скорость детонации $D = 8000$ м/с. Уравнение состояния (7) бралось в форме, предложенной в [5]. В случае заряда с оболочкой размеры плиты и заряда ВВ те же самые. Толщина стенок медной оболочки: нижнее дно — 0,5 см, верхнее — 0,6 см, боковая стенка — 0,5 см. Медная оболочка позволяет вести расчеты без учета нарушения сплошности последней при растяжении ее до относительного радиуса 3–4 [8]. Инициирование ВВ осуществлялось по плоскости FK .

Более интенсивная разгрузка материала плиты в варианте заряда без оболочки (см. рис. 3,а) приводит к образованию меньшего по размерам кратера, более раннему формированию откольной трещины и большей по объему зоны разрушения по сравнению с воздействием заряда в оболочке (см. рис. 3,б). В последнем случае наличие оболочки приводит к менее резкому спаду давления в продуктах детонации вдоль радиуса заряда и, как следствие, к формированию зон поврежденностей, захватывающих больший объем материала плиты, чем в первом случае. Однако следует отметить, что величина этих дополнительных поврежденностей незначительна. Особенности процесса деформирования оболочки проявляются в формировании двух участков интенсивного пластического течения материала и относительно менее деформированных элементов верхнего и нижнего днищ, а также боковой стенки (см. рис. 3,б).

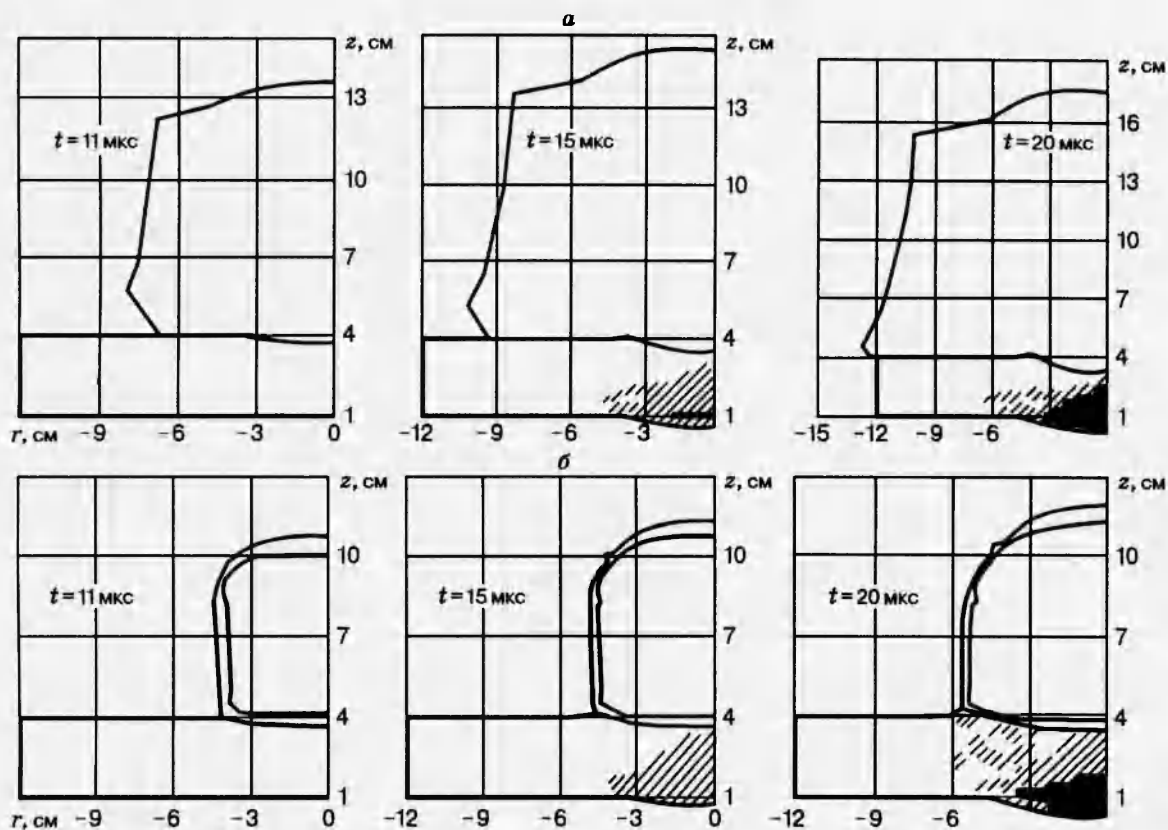


Рис. 3. Взрыв заряда без оболочки (а) и в оболочке (б)

Полученная в расчетах картина разрушения плиты зарядом ВВ без оболочки хорошо согласуется с экспериментальными данными, приведенными в работе [4]. Здесь также наблюдаются кратер и воронкообразная форма разрушенного и отколовшегося материала, что обусловлено относительно небольшой толщиной плиты и большим радиусом заряда ВВ по сравнению с приведенными на рис. 2.

Проведенное исследование подтверждает работоспособность предложенной методики к моделированию процесса взаимодействия плит с зарядами ВВ, неподвижно размещенными на лицевой стороне преград. Представляет интерес расширить предложенный подход на процесс взаимодействия плиты с зарядом в оболочке, движущимся со скоростью $V = 200$ м/с. Нижнее днище представляет собой сегмент эллипсоидов, и при соударении с плитой размер контактного пятна растет с течением времени. Результаты расчетов откольных эффектов при различных размерах области контакта к моменту выхода ДВ на нижнее днище оболочки приведены на рис. 4. Размеры плиты: радиус 11 см, толщина 2 см, материал — сталь со следующими физико-механическими характеристиками: $\rho_0 = 7,86$ г/см³, $\mu = 81,4$ ГПа, $\sigma = 0,64$ ГПа. Параметры для уравнения (4) брались из работы [3]. Материал оболочки — медь с характеристиками, приведенными выше. Заряд ВВ характеризуется следующими параметрами: $\rho_0 = 1,6$ г/см³, $D = 6000$ м/с. Длина оболочки 14 см, внешний радиус 3,5 см, внутренний радиус 2,5 см, длина заряда 11,6 см, толщина нижнего днища 0,4 см, верхнего днища 2 см.

На рис. 4,а приведены зоны повреждения и разрушения материала плиты в случае, когда время подхода ДВ к нижнему днищу оболочки совпадает со временем касания оболоч-

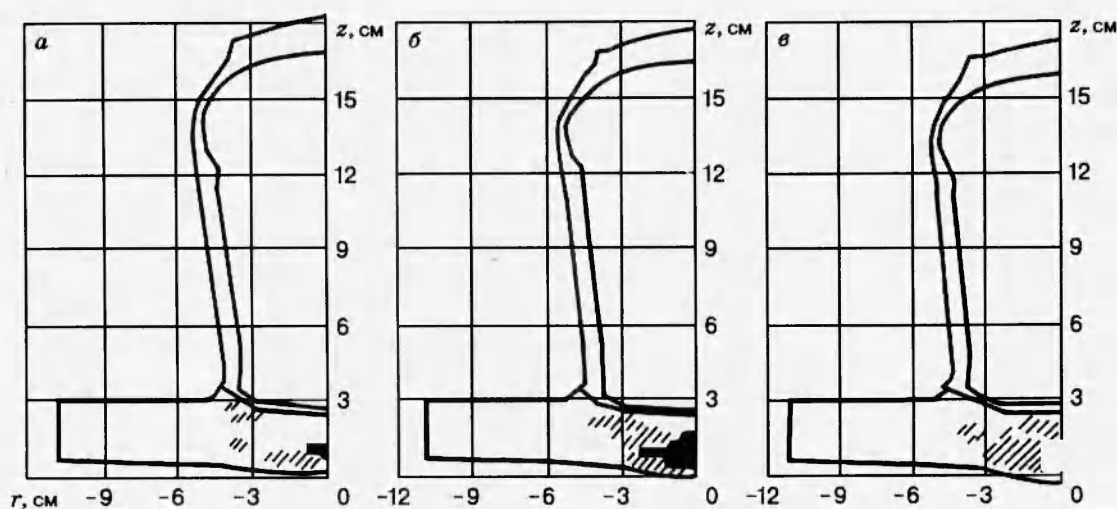


Рис. 4. Взаимодействие движущегося заряда в оболочке с плитой

кой поверхности плиты. Результаты расчетов приведены для момента времени $t = 32$ мкс от начала процесса инициирования ВВ на верхнем торце FK . Для рис. 4, б расплющивание нижнего дна длится 10 мкс до момента подхода ДВ, вывод данных также осуществлен для времени, равного 32 мкс от начала процесса. Наиболее длительный процесс взаимодействия оболочки с зарядом ВВ и плиты как инертных тел (27 мкс) и влияние его на откольные эффекты представлен на рис. 4, в. Данные выводились в момент времени 40 мкс. Во всех трех случаях время взаимодействия ДВ с плитой равнялось приблизительно 14 мкс. Как видно из рис. 4, существует оптимальный размер пятна контакта между оболочкой и плитой к моменту подхода ДВ, который дает наибольший откольный эффект в материале плиты.

Формирование зоны откольных разрушений, зависящей от размеров начального контактного пятна системы оболочка — плита, обусловлено сложным характером взаимодействия волн разрежения от лицевой и тыльной поверхностей плиты. На характер изменения давления на лицевой поверхности, кроме прочего, также оказывает влияние дальнейшее радиальное течение материала системы заряд — оболочка после полного сплющивания нижнего дна.

Полученные результаты показывают существенное влияние оболочки заряда на процесс деформирования и разрушения плиты по сравнению с вариантом заряда без оболочки. Это отличие носит как качественный, так и количественный характер. Наблюдается запаздывание в формировании откольной трещины, увеличение ее размеров в радиальном направлении и рост зоны поврежденностей. Расширение оболочки характеризуется наличием участков интенсивного пластического течения в районах стыка дна и стенок и участков значительно менее деформированных.

Наиболее интересным результатом является существование оптимального, с точки зрения максимального откольного эффекта в плите, размера контактного пятна для движущегося заряда с оживальным дном. Размер пятна больше или меньше этого оптимума в момент выхода детонационной волны к границе раздела преграды и заряда приводит к снижению откольного эффекта. Связь уровня поврежденностей с размером контактного пятна позволяет варьированием скорости соударения, физико-механических характери-

стик и геометрических размеров усиливать или снижать эффективность воздействия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Райнхарт Дж., Пирсон Дж. Поведение материалов при импульсивных нагрузках. М.: Изд-во иностр. лит., 1958.
2. Уилкинс М. Л. Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
3. Белов Н. Н., Корнеев А. И., Николаев А. П. Численный анализ разрушения в плитах при действии импульсных нагрузок // ПМТФ. 1985. № 3. С. 132–136.
4. Сугак С. Г., Канель Г. И., Фортгов В. Е. и др. Численное моделирование действия взрыва на железную плиту // Физика горения и взрыва. 1983. Т. 19, № 2. С. 121–128.
5. Физика взрыва / Под ред. К. П. Станюковича. М.: Наука, 1975.
6. Johnson J. N. Dynamic fracture and spallation in ductile solids // J. Appl. Phys. 1981. V. 52, N 4. P. 2812–2825.
7. Гольдин В. Я., Калиткин Н. Н., Левитан Ю. Л., Рождественский Б. Л. Расчет двумерных течений с детонацией // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1972. Т. 12, № 6. С. 1606–1611.
8. Грязнов Е. Ф., Одинцов В. А., Селиванов В. В. Гладкие кольцевые отколы // Изв. АН СССР. МТТ. 1976. № 6. С. 148–153.

Поступила в редакцию 30/VIII 1995 г.
