

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН С ПРОНИЦАЕМЫМИ ДЕФОРМИРУЕМЫМИ МНОГОСЛОЙНЫМИ ПАКЕТАМИ ПЛЕТЕННЫХ СЕТОК*

© 2016 г.

Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В.,
Турыгина И.А.

*Научно-исследовательский институт механики
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация*

kochetkov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 25.12.2015

Методами численного моделирования исследуются процессы взаимодействия ударных волн с проницаемыми однослойными и многослойными преградами. Рассматриваемые преграды представляют собой слои металлических плетеных сеток. Многослойные преграды состоят как из консолидированных плотно примыкающих слоев, так и из разнесенных на некоторое расстояние. Анализируются параметры проходящих и отраженных ударных волн в зависимости от интенсивности набегающей волны, количества слоев в пакете, расстояния между слоями пакета. Приводятся результаты расчетов параметров ударных волн при взрыве цилиндрического заряда конечной длины и волнового воздействия на проницаемый деформируемый цилиндрический пакет плетеных сеток. Численные результаты по параметрам проходящих через пакет сеток волн и остаточная форма упругопластически деформируемого пакета сеток сравниваются с известными экспериментальными данными.

Ключевые слова: численное моделирование, ударная волна, взрыв, проницаемость, многослойная преграда, газ, деформируемость, сравнение с экспериментом.

Введение

В настоящее время теоретические и экспериментальные работы, в которых исследуются процессы в защитных преградах, снижающих газодинамическую нагрузку на элементы конструкции, являются востребованными и актуальными [1]. Несмотря на наличие ряда статей [2–8], процессы в проницаемых защитных элементах конструкций остаются малоизученными. В этих работах рассмотрены консолидированные преграды, состоящие из большого количества плотно примыкающих слоев плетеных сеток. Ниже методами численного моделирования исследуются процессы взаимодействия ударных волн (УВ) с проницаемыми многослойными пре-

* Выполнено при частичном финансировании РФФИ (гранты №14-08-00197, №15-48-02333р_поволжье_a).

градами с плотно примыкающими (консолированными) и разнесенными на некоторое расстояние слоями. В качестве слоев рассматриваются металлические плетеные сетки (рис. 1). Сравнивается эффективность гашения УВ преградами с консолированными и разнесенными слоями. Также рассматривается взаимодействие УВ различной интенсивности с преградами различной проницаемости.

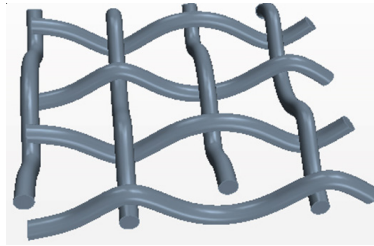


Рис. 1. Один слой металлической плетеной сетки

1. Взаимодействие ударных волн с недеформируемыми пакетами сеток

Расчеты проведены с помощью вычислительного комплекса STAR-CCM+ 10.06.010 (лицензия пользователя №654319755). В рамках комплекса использовались методики на основе неявного метода конечных объемов первого порядка точности, аппроксимирующие полные уравнения Навье – Стокса для сжимаемого вязкого теплопроводного газа. Для моделирования используются регулярные плетеные металлические сетки с размером типовой ячейки $l \times l$, диаметром проволоочки d . При консолидированных слоях в многослойном пакете сеток достаточно плотной упаковки (без деформации проволоочек) слои сдвигаются относительно друг друга на $(l + d)/2$ в плоскости пакета и по нормали на толщину одного слоя $3d$. Для пакета сеток из разнесенных слоев слои сетки сдвигаются по нормали на расстояние s , большее, чем $3d$. Проволочки в пакете сетки в рамках постановки задачи и в процессе расчета предполагаются неподвижными и недеформируемыми. Выделяется элементарный канал квадратного сечения $(l + d) \times (l + d)$ длиной $(l + d) \times 260$ в предположении симметрии по боковым плоскостям. Значения начальных параметров принимаются невозмущенными в ограниченной области пакета и за ним ($p_0 = 0,1$ МПа, $\rho_0 = 1,23$ кг/м³, $u_0 = 0$). Параметры перед пакетом ($p_{ув}$, $\rho_{ув}$, $T_{ув}$, $u_{ув}$) соответствуют параметрам за фронтом набегающей одномерной плоской УВ в направлении оси OY и задаются числом Маха ударного фронта M_0 . Согласно формулам, приведенным в [9]:

$$\begin{aligned} \frac{p_{ув}}{p_0} &= \frac{2\gamma M_0^2 - (\gamma - 1)}{\gamma + 1}, \\ \frac{\rho_{ув}}{\rho_0} &= \frac{(\gamma + 1)M_0^2}{(\gamma - 1)M_0^2 + 2}, \\ \frac{T_{ув}}{T_0} &= \frac{(2\gamma M_0^2 - (\gamma - 1))((\gamma - 1)M_0^2 + 2)}{(\gamma + 1)^2 M_0^2}, \\ \frac{u_0 - u_{ув}}{a_0} &= \frac{2}{\gamma + 1} \left(M_0 - \frac{1}{M_0} \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где p – давление, γ – показатель адиабаты, $M_0 = u_0/a_0$, ρ – плотность, T – температура, u_0 – скорость УВ, a_0 – скорость звука перед УВ.

Размеры расчетной области выбираются так, чтобы в процессе моделирования отраженные от границ входа и выхода волны не искажали течение в окрестности пакета (рис. 2). Расчетная сетка содержит до 500 тыс. многогранных ячеек.

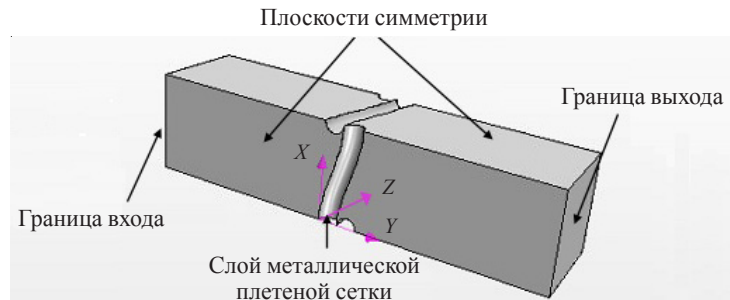


Рис. 2. Область определения задачи

1.1. Ослабление ударных волн одним слоем сетки. Для моделирования были выбраны два размера сеток: $l = 2$ мм, $d = 0,5$ мм и $l = 1,5$ мм, $d = 1$ мм, для которых коэффициенты проницаемости (отношение площади свободного сечения одного слоя сетки к общей фронтальной площади поперечного сечения преграды) имеют соответственно значения $\beta = 0,64$ и $\beta = 0,36$, а объемные концентрации металла для одного слоя – $\alpha = 0,84$ и $\alpha = 0,66$. Указанные величины рассчитаны по формулам из [10]: $\beta = l^2/(l+d)^2$, $\alpha = (V_{яч} - V_{пр})/V_{яч}$, где $V_{яч} = (l+d)^2 d$ – объем элементарной ячейки одного слоя сетки, $V_{пр} = (\pi d^2/2)\sqrt{(l+d)^2 + d^2}$ – объем проволочек в этой ячейке.

Проведены расчеты взаимодействия УВ для различных чисел Маха: $M_0 = 1,3$; 2; 3,1, согласно которым давление за фронтом $p_{ув}/p_0 = 1,8$; 4,5; 11 с одним слоем сетки. Результаты расчетов сопоставлены с экспериментальными данными [11]. На рис. 3 показаны зависимости числа Маха M_F ударного фронта проходящей УВ от числа Маха M_0 для слоев указанных проницаемостей.

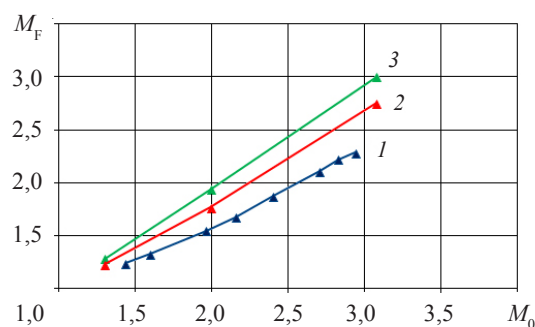


Рис. 3. Экспериментальные данные [11] для проницаемости $\beta = 0,347$ – кривая 1 (синий цвет); численные результаты для $\beta = 0,347$ – кривая 2 (красный цвет); численные результаты для $\beta = 0,64$ – кривая 3 (зеленый цвет)

Наблюдается качественное соответствие численных и экспериментальных данных. Количественное расхождение можно объяснить неопределенностью в услови-

ях постановки экспериментов [11] и тем фактом, что в [11] проницаемыми преградами являлись не сетки, а перфорированные пластины.

1.2. Взаимодействие ударных волн с пакетом из нескольких слоев. Постановка задачи подобна описанной выше. Результаты взаимодействия УВ при $M_0 = 3,1$ с пакетом сеток проницаемостью $\beta = 0,64$, состоящим из трех слоев (консолидированных или отстоящих друг от друга на расстоянии $s = 20$ мм), представлены на рис. 4.

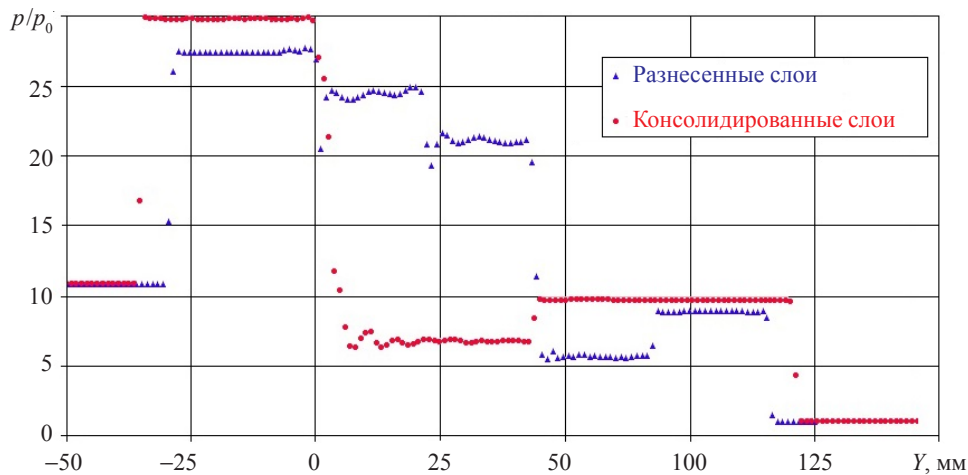


Рис. 4. Зависимости полного давления от координаты: консолидированная преграда – красные точки, разнесенные слои – синие треугольники

Показана зависимость полного давления от координаты вдоль линии, проходящей сквозь всю расчетную область параллельно оси OY , перпендикулярной слоям сетки в пакете, в момент времени $0,2$ мс, когда формируется квазиодномерное течение на некотором удалении от преграды. Интенсивность как отраженной, так и проходящей УВ для разнесенных слоев меньше, чем для консолидированных. Это объясняется большими потерями энергии в процессе взаимодействия проходящих волн с разнесенными преградами.

Аналогичные расчеты для пакета, состоящего из восьми слоев, как консолидированных, так и разнесенных, показали те же закономерности, что и для трехслойной преграды. Установлено, что с увеличением количества слоев в преграде с трех до восьми (разнесенных и консолидированных) амплитуда давления в отраженной УВ увеличивается на 9%, а амплитуда проходящей УВ уменьшается на 4%.

Для оценки влияния расстояния между разнесенными слоями пакета на газодинамическое течение проводилась дополнительная серия расчетов с межслойными расстояниями $s = 35$ и 60 мм. Установлено, что амплитуды проходящих и отраженных УВ различаются слабо для рассматриваемого диапазона расстояний. Вслед за проходящей УВ во всех рассмотренных вариантах движется волна разрежения, то есть формируется многоволновая конфигурация в проходящем потоке. Амплитуда отраженной УВ от проницаемого пакета, состоящего из трех консолидированных слоев, имеет значение $p_{отр}/p_0 = 30$, что составляет 60% от амплитуды отраженной от жесткой непроницаемой стенки ($p_{отр}/p_0 = 50$). Проведены расчеты для большого количества консолидированных слоев с тем же $\beta = 0,64$. На рис. 5 представлены зависимости амплитуд проходящих и отраженных УВ $M_0 = 1,3$ от

количества консолидированных слоев N в преграде. С увеличением количества слоев в преграде наблюдается увеличение амплитуды отраженной УВ и уменьшение амплитуды проходящей волны. Расчеты многослойного пакета с $N = 18$ проведены с учетом конвективного теплообмена между газом и металлом.

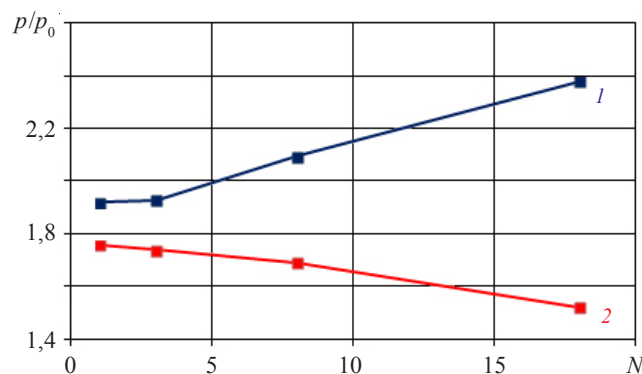


Рис. 5. Зависимости амплитуд ударных волн от количества слоев в преграде: отраженная УВ – кривая 1 (синий цвет), проходящая УВ – кривая 2 (красный цвет)

Эффекты теплообмена не существенны в данной задаче в связи с относительно малой площадью поверхности проволочек и малой интенсивностью набегающей УВ.

2. Взаимодействие ударных волн с деформируемым цилиндрическим пакетом сеток

Поскольку вычислительный комплекс STAR-CCM+ ориентирован на решение только газодинамических задач и не позволяет учитывать деформации преград, моделирование процессов взаимодействия УВ с деформируемыми преградами проводилось с помощью разработанного в НИИ механики ННГУ им. Н.И. Лобачевского пакета прикладных программ UPSGOD 2D [12]. С целью оценки достоверности получаемых численных результатов решена двумерная осесимметричная задача о взрыве цилиндрического заряда конечной длины, помещенного внутри цилиндрического пакета, состоящего из консолидированных деформируемых слоев металлической плетеной сетки. По этой задаче имеются экспериментальные данные, схема эксперимента, описанного в [6, 7], представлена на рис. 6.

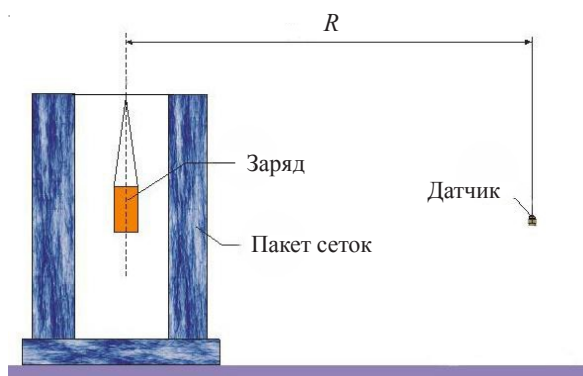


Рис. 6. Схема эксперимента

Ось заряда совпадает с осью симметрии цилиндрического пакета. Масса тротилового заряда 200 г, диаметр 4 см, высота 10 см. На расстоянии $R = 90$ см от центра заряда расположен датчик для измерения давления после взрыва. Размеры сетки: $d = 1,5$, $l = 25$ мм. Внутренний диаметр цилиндрического пакета составил 108 см, внешний – 118 см. Цилиндрический пакет, состоящий из 21 слоя, высотой 180 см расположен на плоском пакете сеток.

Численное моделирование проводится на основе математической модели [5, 8]. В неподвижной декартовой ($v = 0$) или цилиндрической системе координат ($v = 1$, Oz – ось вращения) уравнения динамики порового газа в форме законов сохранения массы, импульса и энергии имеют вид:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial(\rho_1^0 \alpha_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_1^0 \beta_r u_1) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_1^0 \beta_z u_1) = -v \frac{\rho_1^0 \beta_r u_1}{r}, \\
& \frac{\partial(\rho_1^0 \alpha_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\beta_r p_1 + \beta_r \rho_1^0 u_1^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\beta_z \rho_1^0 u_1 v_1) = -v \frac{\beta_r \rho_1^0 u_1^2}{r} - n f_r, \\
& \frac{\partial(\rho_1^0 \alpha_1 v_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\beta_r \rho_1^0 u_1 v_1) + \frac{\partial}{\partial z}(\beta_z p_1 + \beta_z \rho_1^0 v_1^2) = -v \frac{\beta_r \rho_1^0 u_1 v_1}{r} - n f_z, \quad (2) \\
& \frac{\partial}{\partial t} \left(\alpha_1 \rho_1^0 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\beta_r \left[\rho_1^0 u_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) + p_1 u_1 \right] \right) + \\
& + \frac{\partial}{\partial z} \left(\beta_z \left[\rho_1^0 v_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) + p_1 v_1 \right] \right) = -v \frac{\beta_r v_1 \left[\rho_1^0 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) + p_1 \right]}{r} - n q, \\
& p_1 = (\gamma - 1) \rho_1^0 e_1, \quad T_1 = (e_1 / c_{v_1}) T_1,
\end{aligned}$$

здесь и далее нижний индекс 1 относится к газу, 2 – к твердому компоненту; t – время; r, z – координаты; ρ_1^0 – истинная плотность газа; u, v – радиальная и осевая компоненты скорости; e – внутренняя энергия; c_v – удельная теплоемкость; f_r, f_z, q – межфазные силы, действующие на «элементарный узел» твердого компонента со стороны порового газа, и тепловой поток; n – количество таких узлов в единице объема смеси; α_i – объемные концентрации компонентов; β_r, β_z – коэффициенты проходных сечений вдоль соответствующих направлений.

Из системы (2) при $\alpha_1 = \beta_r = \beta_z = 1$ и $n = 0$ следуют уравнения газовой динамики для однородной среды. Уравнения динамического деформирования пакета сеток как скелета двухфазной среды имеют вид:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_2 u_2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 v_2) = -v \frac{\rho_2 u_2}{r}, \\
& \frac{\partial}{\partial t}(\rho_2 u_2) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_2 u_2^2 - \sigma_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 u_2 v_2 - \sigma_{rz}) = \frac{v}{r}(\sigma_{\theta\theta} - \sigma_{rr} - \rho_2 u_2^2) + n f_r, \\
& \frac{\partial}{\partial t}(\rho_2 v_2) + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_2 u_2 v_2 - \sigma_{rz}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 v_2^2 - \sigma_{zz}) = \frac{v}{r}(\sigma_{rz} - \rho_2 u_2 v_2) + n f_z, \\
& \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial z} - \varepsilon_{rz} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} - \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) = \frac{\partial u_2}{\partial r}, \\
& \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial z} - \varepsilon_{rz} \left(\frac{\partial v_2}{\partial r} - \frac{\partial u_2}{\partial z} \right) = \frac{\partial v_2}{\partial z},
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial z} &= \frac{u_2}{r}, \\ \frac{\partial \varepsilon_{rz}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{rz}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{rz}}{\partial z} - (\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{zz}) \frac{\partial u_2 / \partial z - \partial v_2 / \partial r}{2} &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} + \frac{\partial v_2}{\partial r} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

здесь σ_{ij} , ε_{ij} – компоненты тензоров напряжений и деформаций ($i, j = r, z, \theta$), ρ_2 – приведенная плотность пакета сеток ($\rho_2 = \alpha_2 \rho_2^0$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$).

Законы связи между компонентами напряжений и деформаций строятся в направлениях осей ортотропии. По нормали к слоям сетки считаем напряжения зависящими от деформации $\sigma_{rr} = f_n(\sigma_{rr}^*, \sigma_{rr}^*)$, по оси ортотропии вдоль проволок сетки на плоскости rz $\sigma_{zz} = f_\tau(\varepsilon_{zz}, \sigma_{zz}^*)$. При $\nu = 1$ по окружному направлению $\sigma_{\theta\theta} = f_\tau(\varepsilon_{\theta\theta}, \sigma_{\theta\theta}^*)$. Сдвиговые компоненты тензора напряжений в системе координат, связанной с этими осями, полагаем равными нулю. Параметры, отмеченные верхним индексом *, представляют собой максимальные значения, достигнутые частицей при нагружении в соответствующем направлении, они необходимы для описания разгрузки частиц среды, испытывающей необратимые деформации. Функция f_n (сжатие по нормали) принимается в виде [5]:

$$f_n(\rho_2, \rho_2^*) = \begin{cases} \frac{\rho_{20} C_{20}^2}{m} \left[1 - \left(\frac{\rho_2}{\rho_{20}} \right)^m \right], & \rho_2 \geq \rho_2^*, \\ \sigma_{nm}^* + C_R^2 (\rho_2^* - \rho_2), & \rho_2 < \rho_2^*. \end{cases} \quad (4)$$

Функция f_τ (растяжение вдоль нитей) принимается в виде [5]:

$$f_\tau(\varepsilon_{\theta\theta}, \varepsilon_{\theta\theta}^*) = \begin{cases} E_e \varepsilon_{\theta\theta}, & \varepsilon_{\theta\theta} \leq \varepsilon_e, \\ E_e \varepsilon_e + E(\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_e), & \varepsilon_e < \varepsilon_{\theta\theta} < \varepsilon_p, \\ E_e \varepsilon_e + E(\varepsilon_p - \varepsilon_e) + E_p(\varepsilon_{\theta\theta} - \varepsilon_p), & \varepsilon_{\theta\theta} > \varepsilon_p, \quad \varepsilon_{\theta\theta} \geq \varepsilon_{\theta\theta}^*, \\ \sigma_{\theta\theta}^* - E(\varepsilon_{\theta\theta}^* - \varepsilon_{\theta\theta}), & \varepsilon_{\theta\theta} > \varepsilon_p, \quad \varepsilon_{\theta\theta} < \varepsilon_{\theta\theta}^*. \end{cases} \quad (5)$$

Модули деформации E_e , E , E_p являются приведенными. Они связаны с реальными модулями на растяжение отдельной металлической проволоки соотношениями вида $E = E^0 \gamma_2$, где γ_2 – отношение площади поперечного сечения, занятого металлом, к общей площади поперечного сечения пакета сеток.

Численное решение уравнений (2)–(5) производится по схеме С.К. Годунова в эйлерово-лагранжевых подвижных разностных сетках с помощью ППП UPSGOD 2D [12]. Условия на поверхности контакта пакета сеток с газом ставятся, как на комбинированном разрыве [13]. Для определения констант в соотношениях (4), (5) необходимы экспериментальные исследования динамических деформационных свойств пакетов сеток, использованных в эксперименте. Ввиду отсутствия этих экспериментальных данных использовались экспериментальные данные для другого вида сеток: $l = 2$ мм, $d = 0,5$ мм. Поэтому полученные численные результаты можно оценивать лишь качественно. В расчетах принимались следующие параметры пакета сеток: $\alpha_{20} = 0,055$, $n_0 = 0,72$ см⁻³, $\beta_{r_0} = 0,865$, $\beta_{z_0} = 0,473$, $\rho_{20} = 0,43$ г/см³, $\varepsilon_e = 0,02$, $E_e = 5$ кг/см², $\varepsilon_p = 0,03$, $E = 100$ кг/см², $\varepsilon_r = 0,52$, $E_p = 140$ кг/см², $T_{20} = T_{10} = 293$ К, $c_{v_1} = 0,65 + 0,0002 T_1$ Дж/(г·К), $m = 3,3$, $C_{20} = 40$ м/с. При $t = 0$ сетка и окружающий воздух покоятся, $p_0 = 0,1$ МПа.

Движение детонационной волны по заряду описывается моделью лучевой детонации [13]. На рис. 7 изолинии давления представляют эволюцию распространения через сетку волн сжатия от центра взрыва к периферии. Отсчет времени (мс) ведется от момента подрыва заряда взрывчатого вещества, который осуществляется в центре его верхнего сечения. Видны сложные процессы волнообразования во внутреннем и внешнем газе и в поровом газе в пакете сеток. Происходят многочисленные отражения волн давления от нижней и боковых границ пакета сеток.

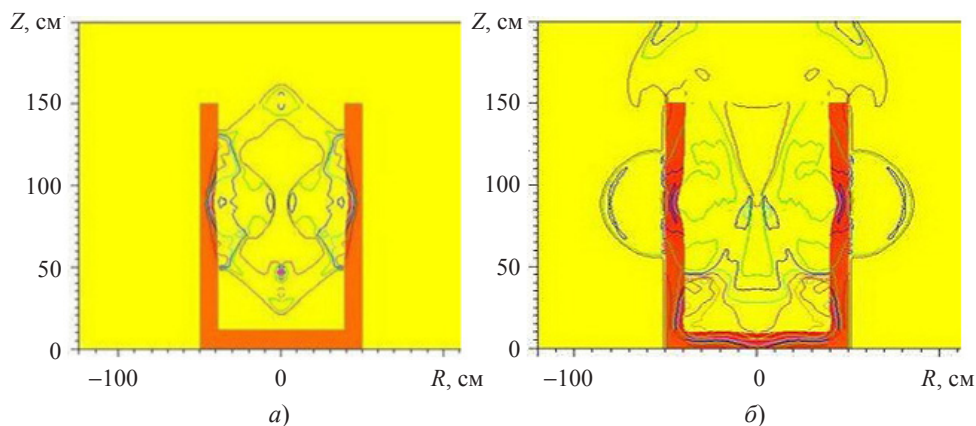


Рис. 7. Эволюция распространения волн сжатия: *a* – время 0,34 мс, *б* – время 1,2 мс

Пакет сеток под действием динамических нагрузок деформируется упругопластически и приобретает колоколообразную форму, которая качественно соответствует остаточной форме пакета в эксперименте (рис. 8).

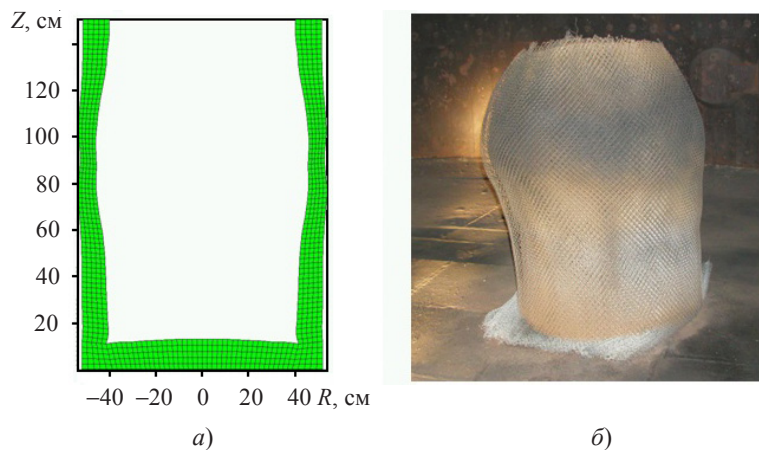


Рис. 8. Деформация пакета сеток:

a – результаты численных расчетов, *б* – результаты эксперимента

Проведены расчеты процессов взрыва цилиндрического заряда в воздухе без сетки. На рис. 9 показано сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей избыточного давления от времени в проходящей УВ в датчике на расстоянии 90 см от центра заряда без преграды и с пакетом сеток соответственно. Красной линией показаны экспериментальные кривые, синей – численные результаты.

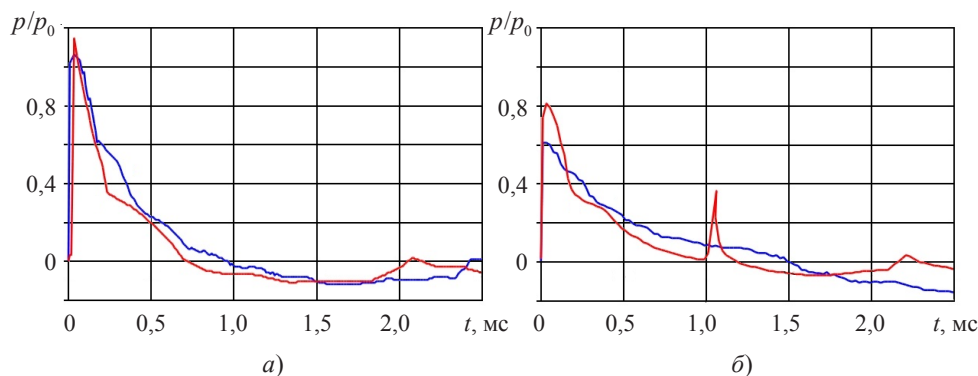


Рис. 9. Сравнение зависимостей избыточного давления от времени:
 a – без преграды, b – с пакетом сеток

Применяемая разностная схема приводит к некоторому сглаживанию пиковых значений давления и соответствующему размазыванию волновых профилей как при наличии, так и при отсутствии пакета сеток. Тем не менее, относительный эффект снижения давления газа в проходящей ударной волне соответствует эффекту, наблюдаемому в экспериментах.

Выводы

1. Показаны особенности процессов взаимодействия ударных волн с однослойными и многослойными пакетами газопроницаемых металлических плетеных сеток. Наличие сеточных преград даже с высокой газопроницаемостью отдельных слоев заметно снижает амплитуду проходящих волн и, соответственно, увеличивает амплитуду отраженных волн.

2. Установлено, что с увеличением количества слоев эффективность гашения УВ выше для преграды с разнесенными слоями по сравнению с преградой с консолидированными слоями.

3. Решена задача взрывного воздействия цилиндрического заряда на рулонированный деформируемый пакет плетеных сеток. Наличие многослойной сетчатой преграды, окружающей заряд взрывчатого вещества, существенно ослабляет параметры проходящих взрывных волн. Численные результаты согласуются с экспериментальными данными.

Список литературы

1. Гельфанд Б.Е., Сильников М.В. *Фугасные эффекты взрывов*. СПб.: ООО «Издательство «Полигон», 2002. 272 с.
2. Кочетков А.В., Романов В.И., Ходыкина И.А. Моделирование взаимодействия ударных волн с пористыми газопроницаемыми пакетами металлических сеток. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. № 4 (4). С. 1546–1548.
3. Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Турыгина И.А. Численное моделирование пространственного взаимодействия ударной волны с проницаемой преградой. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2014. Вып. 1(1). С. 180–185.
4. Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Турыгина И.А. Численное моделирование ослабления ударных волн проницаемыми преградами. *Актуальные проблемы современной механики сплошных сред и небесной механики: Матер. конф.* Под ред. М.Ю. Орлова. Томск, 2014. Ч. 1. С. 101–103.

5. Абузяров М.Х., Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В., Романов В.И., Сырунин М.А. Моделирование взаимодействия ударных волн с деформируемыми газопроницаемыми преградами. *Проблемы прочности и пластичности*. 2010. Вып. 72. С. 120–129.
6. Осавчук А.Н., Глазова Е.Г., Митрофанов С.С., Дикий А.А., Куликов В.Н. Экспериментально-расчетные исследования процесса распространения ударной волны через цилиндрический пакет из металлической сетки. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. Вып. 4(4). С. 1436–1438.
7. Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Крылов С.В., Митрофанов С.С., Осавчук А.Н., Дикий А.А., Куликов В.Н. Численно-экспериментальное исследование распространения ударных волн через цилиндрические пакеты металлических сеток. *Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского*. 2011. Вып. 5(1). С. 122–129.
8. Глазова Е.Г., Кочетков А.В. Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами. *Прикладная механика и техническая физика*. 2012. №3. С. 11–19.
9. Баженова Т.В., Гвоздева Л.Г. *Нестационарные взаимодействия ударных волн*. М.: Наука, 1977. 204 с.
10. Мельцас В.Ю., Портнягина Г.Ф., Соловьев В.П. Численное моделирование прохождения ударных волн через экранирующие решетки. *Вопросы атомной науки и техники*. 1993. Вып. 3. С. 26–31.
11. Гельфанд Б.Е., Фролов С.М. Приближенный расчет ослабления ударных волн пропускаемыми преградами. *Прикладная механика и техническая физика*. 1990. №4. С. 42–46.
12. Абузяров М.Х., Крылов С.В., Цветкова Е.В. Моделирование упругопластического взаимодействия с помощью программного комплекса UPSGOD. *Проблемы прочности и пластичности*. 2013. Вып. 75. Ч. 1. С. 25–32.
13. Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Турыгина И.А. Исследование различных алгоритмов определения динамических контактных параметров на деформируемых газопроницаемых элементах конструкций. *Проблемы прочности и пластичности*. 2015. Т. 77, №3. С. 301–308.

References

1. Gel'fand B.E., Sil'nikov M.V. *Fugasnye efekty vzryvov*. SPb.: OOO "Izdatel'stvo "Poligon", 2002. 272 s.
2. Kochetkov A.V., Romanov V.I., Khodykina I.A. Modelirovanie vzaimodeystviya udarnykh voln s poristymi gazopronitsaemyimi paketami metallicheskih setok. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. № 4 (4). S. 1546–1548.
3. Glazova E.G., Kochetkov A.V., Turygina I.A. Chislennoe modelirovanie prostranstvennogo vzaimodeystviya udarnoy volny s pronitsaemoy pregradoy. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2014. Vyp. 1(1). S. 180–185.
4. Glazova E.G., Kochetkov A.V., Turygina I.A. Chislennoe modelirovanie oslableniya udarnykh voln pronitsaemyimi pregradami. *Aktual'nye problemy sovremennoy mekhaniki sploshnykh sred i nebesnoy mekhaniki: Mater. konf.* Pod red. M.Yu. Orlova. Tomsk, 2014. Ch. 1. S. 101–103.
5. Abuzyarov M.Kh., Glazova E.G., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Romanov V.I., Syrunin M.A. Modelirovanie vzaimodeystviya udarnykh voln s deformiruemyimi gazopronitsaemyimi pregradami. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2010. Vyp.72. S. 120–129.
6. Osavchuk A.N., Glazova E.G., Mitrofanov S.S., Dikiy A.A., Kulikov V.N. Eksperimental'no-raschetnye issledovaniya protsessa rasprostraneniya udarnoy volny cherez tsilindricheskiy paket iz metallicheskoj setki. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. Vyp. 4(4). S. 1436–1438.
7. Glazova E.G., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Mitrofanov S.S., Osavchuk A.N., Dikiy A.A., Kulikov V.N. Chislenno-eksperimental'noe issledovanie rasprostraneniya udarnykh voln cherez tsilindricheskie pakety metallicheskih setok. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Lobachevskogo*. 2011. Vyp. 5(1). S. 122–129.
8. Glazova E.G., Kochetkov A.V. Chislennoe modelirovanie vzaimodeystviya deformiruemykh gazopronitsaemykh paketov setok s udarnymi volnami. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 2012. №3. S. 11–19.

9. Bazhenova T.V., Gvozdeva L.G. *Nestatsionarnye vzaimodeystviya udarnykh voln*. M.: Nauka, 1977. 204 s.

10. Mel'tsas V.Yu., Portnyagina G.F., Solovyev V.P. Chislennoe modelirovanie prokhozheniya udarnykh voln cherez ekraniruyushchie reshetki. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki*. 1993. Vyp. 3. S. 26–31.

11. Gelfand B.E., Frolov S.M. Priblizhennyi raschet oslableniya udarnykh voln pronitsaemymi pregradami. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika*. 1990. №4. S. 42–46.

12. Abuzyarov M.Kh., Krylov S.V., Tsvetkova E.V. Modelirovanie uprugoplasticheskogo vzaimodeystviya s pomoshch'yu programmnogo kompleksa UPSGOD. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2013. Vyp. 75. Ch. 1. S. 25–32.

13. Glazova E.G., Kochetkov A.V., Turygina I.A. Issledovanie razlichnykh algoritmov opredeleniya dinamicheskikh kontaknykh parametrov na deformiruemyykh gazopronitsaemykh elementakh konstruksiy. *Problemy prochnosti i plastichnosti*. 2015. T. 77, №3. S. 301–308.

NUMERICAL MODELING OF SHOCK WAVES INTERACTION WITH DEFORMABLE PERMEABLE MULTILAYERS BARRIERS OF WOVEN GRIDS

Glazova E.G., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Turygina I.A.

*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

Numerical modeling methods are used for investigation of the processes of the passage of a shock blast wave through permeable single-layer and multilayer barriers. Considered barriers are metal layers of woven grids. Multilayer barriers consist of tightly adjacent consolidated layers, and spaced at a certain distance. The parameters of the transmitted and reflected shock waves are analyzed depending on the intensity of the incident wave, the number of layers in the package, the distance between the spaced layers of the package. Results of calculations of the parameters of shock waves at explosion of a cylindrical charge of finite length and wave impact on permeable deformable cylindrical package the woven grids. Numerical results are compared with known experimental data on the parameters passage waves through the package of grids and residual shape deformable elastoplastic package of grids.

Keywords: numerical modeling, shock wave, explosion, permeability, multilayer barrier, gas, deformability, comparison with experiment.