

УДК 539.3

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ ВОЛН С ПОРИСТЫМИ ГАЗОПРОНИЦАЕМЫМИ ПАКЕТАМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕТОК

© 2011 г.

А.В. Кочетков¹, В.И. Романов², И.А. Ходыкина¹¹НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского²Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики,
г. Саров

kochetkov@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 15.06.2011

Формулируются начально-краевые задачи, описывающие взаимодействие ударных волн с газопроницаемыми пакетами металлических плетеных сеток. Рассматриваются среды из двух взаимопроникающих континуумов – деформируемый пакет сеток, как скелет двухфазной среды, и поровый газ, движущийся внутри скелета. Численное решение задачи проводится на основе схемы Годунова в эйлерово-лагранжевых подвижных разностных сетках. Приводятся результаты экспериментальных исследований влияния внутренних плоских и цилиндрических пакетов плетеных сеток на деформации силовых оболочек камер при внутреннем взрывном нагружении. Численные результаты соответствуют экспериментальным данным.

Ключевые слова: взрыв, плетеные сетки, двухфазная среда, деформация, моделирование, эксперимент.

Одним из эффективных способов ослабления газодинамических нагрузок от ударных волн является использование пакетов мелкоячеистых проволочных тканевых сеток, размещаемых перед преградой. В ряде исследований даются оценки эффективности подобных многослойных экранов с точки зрения снижения газодинамических параметров проходящих ударных волн. За исключением [1], пакет сетки предполагался недеформируемым и неподвижным в пространстве.

Динамическое поведение пакета сетки с содержащимся поровым газом описывается на основе уравнений динамики двух взаимопроникающих континуумов, каждый из которых имеет свои скорости, напряжения (давления) и температуры. При формулировке уравнений использованы обычные для подобных смесей предположения [2]. Наряду с этими допущениями полагаем, что проволочки металлической сетки ориентированы по двум ортогональным направлениям в плоскости слоев и эти направления являются осями ортотропии пакета сеток, как скелета анизотропной сплошной среды. Вдоль этих направлений происходит упругопластическое растяжение скелета среды. Третью ось ортотропии образует направление, нормальное к плоскостям сеток, вдоль которого происходит упругопластическое сжатие скелета.

В декартовой ($v = 0$) или цилиндрической системе координат ($v = 1$, Oz – ось вращения) урав-

нения динамики порового газа в форме законов сохранения массы, импульса и энергии имеют вид:

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

$p_1 = (\kappa - 1) \rho_1^0 e_1$, $T_1 = e_1 / c_{v1}(T_1)$. Здесь и далее нижний индекс 1 относится к газу, 2 – к твердой

компоненте; t – время; r, z – координаты; p – давление; ρ^0 – истинная плотность газа; u, v – компоненты скорости; e – внутренняя энергия; T – температура; c_v – удельная теплоемкость; K – показатель адиабаты; f_r, f_z, q – межфазные силы и тепловой поток, действующие на «элементарный узел» (рис. 1, штриховая линия) твердой компоненты со стороны порового газа, n – количество таких узлов в единице объема смеси. Из системы (1) при $\alpha_1 = \beta_r = \beta_z = 1$ и $n = 0$ следуют уравнения газовой динамики для однородной газовой среды. Тогда уравнения динамики скелета среды примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_2 u_2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 v_2) &= -v \frac{\rho_2 u_2}{r}, \\ \frac{\partial(\rho_2 u_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_2 u_2^2 - \sigma_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 u_2 v_2 - S_{rz}) &= \\ &= \frac{v}{r}(2S_{rr} + S_{zz} - \rho_2 u_2^2) + n f_r, \\ \frac{\partial(\rho_2 v_2)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r}(\rho_2 u_2 v_2 - S_{rz}) + \\ + \frac{\partial}{\partial z}(\rho_2 v_2^2 - \sigma_{zz}) &= \frac{v}{r}(S_{rz} - \rho_2 u_2 v_2) + n f_z, \\ \frac{\partial \epsilon'_{rr}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \epsilon'_{rr}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \epsilon'_{rr}}{\partial z} - \\ - \epsilon'_{rz} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} - \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) &= \frac{\partial u_2}{\partial r} - \frac{1}{3} \epsilon_v, \\ \frac{\partial \epsilon'_{zz}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \epsilon'_{zz}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \epsilon'_{zz}}{\partial z} - \\ - \epsilon'_{rz} \left(\frac{\partial v_2}{\partial r} - \frac{\partial u_2}{\partial z} \right) &= \frac{\partial v_2}{\partial z} - \frac{1}{3} \epsilon_v, \\ \epsilon'_{\theta\theta} = -(\epsilon'_{rr} + \epsilon'_{zz}), \quad \frac{\partial \epsilon'_{rz}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \epsilon'_{rz}}{\partial r} + \\ + v_2 \frac{\partial \epsilon'_{rz}}{\partial z} - \frac{\epsilon'_{rr} - \epsilon'_{zz}}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} - \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) &= \\ = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} + \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) \frac{\partial \epsilon_v}{\partial t} = -\frac{1}{3\rho_2} \frac{\partial \rho_2}{\partial t}. \end{aligned}$$

Здесь S_{ij}, ϵ'_{ij} – девиаторные компоненты тензоров напряжений и деформаций; полные деформации рассчитываются обычным образом:

$$\epsilon_{ij} = \epsilon'_{ij} + \delta_{ij} \epsilon_v \quad (i, j = r, z, \theta),$$

δ_{ij} – символ Кронекера.

Законы связи между компонентами напряжений и деформаций строятся в направлениях осей ортотропии.

По нормали к слоям сетки считаем напряжения зависящими от плотности $\sigma_{nn} = f_n(\rho_2, \rho_2^*)$,

по оси ортотропии вдоль проволочек сетки на плоскости rz $\sigma_{\tau\tau} = f_\tau(\epsilon_{\tau\tau}, \epsilon_{\tau\tau}^*)$. При $v=1$ по окружному направлению $\sigma_{\theta\theta} = f_\tau(\epsilon_{\theta\theta}, \epsilon_{\theta\theta}^*)$. 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 и необходимы для описания разгрузки частиц среды, испытывающей необратимые деформации. При взаимодействии твердой и газовой компонентов учитываем в качестве межфазных сил: силы сопротивления частичек твердой фазы при их обтекании поровым газом; силы Стокса вязкого трения. Также учитывается конвективный теплообмен через межфазную поверхность.

Численное решение уравнений производится по схеме С.К. Годунова [3]. С целью ее адаптации к уравнениям динамики деформирующихся взаимопроницающих континуумов разработаны алгоритмы расчета задачи распада произвольного разрыва для высокопористой упругопластической среды, а также алгоритмы решения уравнений динамики порового газа в эйлерово-лагранжевых сетках с учетом изменяющихся коэффициентов проходных сечений и объемной концентрации пор. Для расчета параметров на контактных границах «двухфазная среда – газ» используется алгоритм, реализующий последовательно две задачи о распаде произвольного разрыва – «скелет – газ», «поровый газ – газ». Потoki импульса и энергии от обеих фаз усредняются с учетом значений коэффициентов проходных сечений и используются как граничные потоки для интегрирования в области однородного газа. На рис. 1 показана схема экспериментов со взрывной камерой (1 – базальтопластиковый слой, 2 – сталь, 3 – пакет сеток), а на рис. 2 – сравнение расчетных и экспериментальных зависимостей окружных деформаций базальтопластикового слоя от времени на внешнем силовом корпусе при $z = 0$.

Наблюдается хорошее соответствие численных и экспериментальных результатов в течение первого периода нестационарных колебаний.

Таким образом, предложенная математическая и численная модель деформирования газопроницаемых пакетов плетеных сеток может успешно использоваться для оценки их защитных свойств при взрывных воздействиях.

Авторы выражают благодарность М.А. Сырунину за предоставленные экспериментальные материалы и С.В. Крылову за помощь в расчетах.

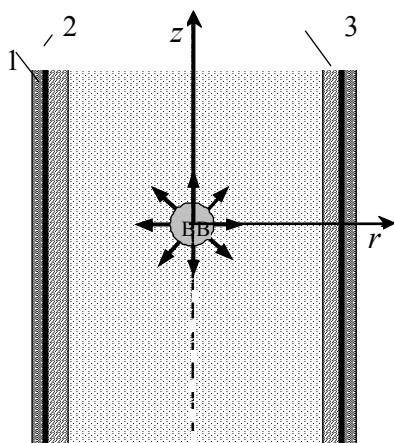


Рис. 1

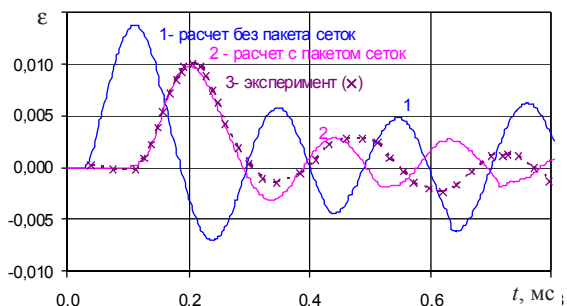


Рис. 2

Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (грант №09-08-00711а).

Список литературы

1. Абакумов А.И. и др. Численная модель деформирования противоосколочной сетки при взрывном

нагрузении // Тр. ВНИИЭФ. Математическое моделирование физических процессов. 2006. №10. С. 16–30.

2. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Ч.1. М.: Наука, 1987.

3. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. С.К. Годунова. М.: Наука, 1976.

MODELLING THE INTERACTION OF SHOCK WAVES WITH POROUS GAS-PERMEABLE METAL GRID PACKAGES

A.V. Kochetkov, V.I. Romanov, I.A.Hodykina

Initial boundary-value problems describing the interaction of shock waves with gas-permeable packages of woven metal grids are formulated. Media consisting of two mutually permeating continua – a deformable grid package as the skeleton of the two-phase medium and a pore gas flowing inside the skeleton – are considered. The problem is numerically analyzed using Godunov's scheme with Euler–Lagrange movable difference meshes. The results of experimentally studying the effect of internal plane and cylindrical packages of woven grids on the deformation of the supporting shells of the chambers under internal explosive loading are presented. The numerical results agree with the experimental data.

Keywords: explosion, woven grids, two-phase medium, deformation, modeling, experiment.