

УДК 539.3

ВЗРЫВНОЕ НАГРУЖЕНИЕ ДЕФОРМИРУЕМЫХ ГАЗОПРОНИЦАЕМЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Е. Г. Глазова, А. Ю. Константинов, А. В. Кочетков, С. В. Крылов

Научно-исследовательский институт механики Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского, 603950 Нижний Новгород, Россия
E-mails: glazova@mech.unn.ru, constantinov.al@yandex.ru, kochetkov@mech.unn.ru, krylov@mech.unn.ru

Представлена математическая модель, описывающая в двумерном осесимметричном приближении взаимосвязанные процессы нестационарного упругопластического деформирования пакетов металлических плетеных проволочных сеток и волновые процессы в поровом газе. С использованием модифицированной схемы Годунова численно решены нелинейные уравнения динамики двух взаимопроникающих континуумов. Получено решение задачи о взрывном нагружении многослойной оболочки с внутренним пронизываемым деформируемым слоем. Проведено сравнение результатов численных расчетов с экспериментальными данными. Установлено влияние газопроницаемого слоя на деформацию оболочки.

Ключевые слова: металлические сетки, многослойные камеры, взаимопроникающие континуумы, упругопластическое деформирование, взрыв, схема Годунова.

DOI: 10.15372/PMTF20160513

Эффективным способом ослабления газодинамических нагрузок, возникающих при воздействии ударных волн, является использование пакетов мелкоячеистых проволочных тканевых сеток (рис. 1), размещаемых перед преградой. В ряде работ получены оценки эффективности уменьшения газодинамических параметров проходящих ударных волн с использованием подобных многослойных экранов [1–4]. В работе [4], в которой рассматривались одномерные плоские, цилиндрические и сферические пакеты сеток, пакеты считались упругопластически деформируемыми при их сжатии в направлении, перпендикулярном слоям сеток, и растяжении вдоль металлических нитей.

В данной работе нелинейная математическая модель и численная схема [4] обобщаются на случай двумерных процессов нестационарного деформирования цилиндрических рулонированных пакетов металлических проволочных сеток и волновых процессов в поровом газе. Приводятся численные решения задач о взрывном воздействии на цилиндрические рулонированные пакеты сеток в многослойных цилиндрических камерах.

Основные уравнения. Деформация пакета сеток с содержащимся в них поровым газом описывается на основе уравнений динамики двух взаимопроникающих континуумов,

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 14-19-01096) и Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 13-08-00219, 14-08-00197).

© Глазова Е. Г., Константинов А. Ю., Кочетков А. В., Крылов С. В., 2016

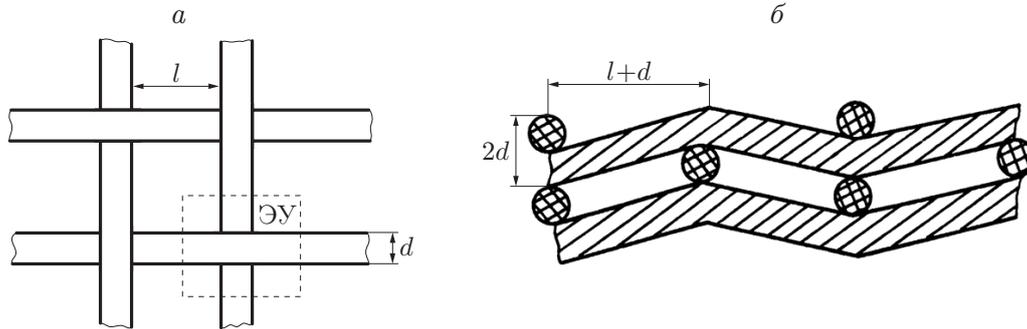


Рис. 1. Схема фрагмента пакета проволочных сеток:

a — элементарная ячейка сетки в ее плоскости, *б* — сечение пакета сеток плоскостью, ортогональной их плоскости; ЭУ — элементарный узел

каждый из которых имеет собственные скорость, напряжение (давление) и температуру. При формулировке уравнений использованы стандартные для подобных смесей предположения [5]: размеры элементарных узлов в области, занимаемой дисперсной смесью (за исключением линий разрыва), значительно больше молекулярно-кинетических масштабов и много меньше расстояний, на которых макроскопические параметры фаз меняются существенно; влияние вязкости и теплопроводности существенно лишь в процессах межфазного взаимодействия; процессы межфазного массообмена, дробления частиц отсутствуют; влияние пульсационного движения фаз пренебрежимо мало; газовая фаза представляет собой идеальный газ; внешние массовые силы и теплообмен с окружающей средой отсутствуют. Наряду с этим предполагается, что цилиндрический пакет сеток деформируется нелинейно и ортотропно, т. е. в направлении, перпендикулярном слоям сеток, упругопластически сжимается, а в окружном направлении упругопластически растягивается. Сдвиговыми напряжениями пренебрегается. Применение аналогичной модели в одномерном приближении [4] позволяет получить достоверные данные о поведении плоских пакетов сеток при взрывном нагружении.

Для плоской или осесимметричной задачи уравнения динамики порового газа в форме законов сохранения массы, импульса и энергии имеют вид

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial (\rho_1^0 \alpha_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (\rho_1^0 \beta_r u_1) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_1^0 \beta_z v_1) = -\nu \frac{\rho_1^0 \beta_r u_1}{r}, \\
 & \frac{\partial (\rho_1^0 \alpha_1 u_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (\beta_r p_1 + \beta_r \rho_1^0 u_1^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\beta_z \rho_1^0 u_1 v_1) = -\nu \frac{\beta_r \rho_1^0 u_1^2}{r} - n f_r, \\
 & \frac{\partial (\rho_1^0 \alpha_1 v_1)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (\beta_r \rho_1^0 u_1 v_1) + \frac{\partial}{\partial z} (\beta_z p_1 + \beta_z \rho_1^0 v_1^2) = -\nu \frac{\beta_r \rho_1^0 u_1 v_1}{r} - n f_z, \quad (1) \\
 & \frac{\partial}{\partial t} \left[\alpha_1 \rho_1^0 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial r} \left\{ \beta_r \left[\rho_1^0 u_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) + p_1 u_1 \right] \right\} + \\
 & + \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \beta_z \left[\rho_1^0 v_1 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) + p_1 v_1 \right] \right\} = -\nu \frac{\beta_r u_1}{r} \left[\rho_1^0 \left(e_1 + \frac{u_1^2 + v_1^2}{2} \right) + p_1 \right] - n q, \\
 & p_1 = (\kappa - 1) \rho_1^0 e_1, \quad T_1 = e_1 / c_{v1}(T_1).
 \end{aligned}$$

Здесь параметр $\nu = 0$ соответствует декартовой системе координат, $\nu = 1$ — цилиндрической системе координат; нижний индекс 1 соответствует газу, 2 — твердому компоненту; t — время; r, z — координаты; p — давление; ρ^0 — истинная плотность газа; u, v — радиальная и осевая компоненты скорости; e — внутренняя энергия; T — температура;

c_v — удельная теплоемкость; \varkappa — показатель адиабаты; f_r, f_z, q — межфазные силы и тепловой поток, действующие на элементарный узел (см. рис. 1) твердого компонента со стороны порового газа; n — количество элементарных узлов в единице объема смеси; α — объемная доля компонента; β_r, β_z — коэффициенты “проходных” сечений в соответствующих направлениях. При $\alpha_1 = \beta_r = \beta_z = 1$ и $n = 0$ из системы (1) следуют уравнения газовой динамики для однородной среды.

Уравнения динамического деформирования пакета сеток (скелета двухфазной среды) записываются в виде

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho_2}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial r} (\rho_2 u_2) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_2 v_2) &= -\nu \frac{\rho_2 u_2}{r}, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_2 u_2) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho_2 u_2^2 - \sigma_{rr}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_2 u_2 v_2 - \sigma_{rz}) &= \frac{\nu}{r} (\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} - \rho_2 u_2^2) + n f_r, \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_2 v_2) + \frac{\partial}{\partial r} (\rho_2 u_2 v_2 - \sigma_{rz}) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho_2 v_2^2 - \sigma_{zz}) &= \frac{\nu}{r} (\sigma_{rz} - \rho_2 u_2 v_2) + n f_z, \\ \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{rr}}{\partial z} - \varepsilon_{rz} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} - \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) &= \frac{\partial u_2}{\partial r}, \\ \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial z} - \varepsilon_{rz} \left(\frac{\partial v_2}{\partial r} - \frac{\partial u_2}{\partial z} \right) &= \frac{\partial v_2}{\partial z}, \\ \frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{\theta\theta}}{\partial z} &= \frac{u_2}{r}, \\ \frac{\partial \varepsilon_{rz}}{\partial t} + u_2 \frac{\partial \varepsilon_{rz}}{\partial r} + v_2 \frac{\partial \varepsilon_{rz}}{\partial z} - \frac{\varepsilon_{rr} - \varepsilon_{zz}}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} - \frac{\partial v_2}{\partial r} \right) &= \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_2}{\partial z} + \frac{\partial v_2}{\partial r} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ ($i, j = r, z, \theta$) — компоненты тензоров напряжений и деформаций; ρ_2 — приведенная плотность пакета сеток ($\rho_2 = \alpha_2 \rho_2^0, \alpha_1 + \alpha_2 = 1$).

Предполагается, что зависимость напряжений от деформации имеет вид $\sigma_{rr} = f_n(\varepsilon_{rr}, \sigma_{rr}^*), \sigma_{zz} = f_\tau(\varepsilon_{zz}, \sigma_{zz}^*)$ и при $\nu = 1$ $\sigma_{\theta\theta} = f_\tau(\varepsilon_{\theta\theta}, \sigma_{\theta\theta}^*)$. Сдвиговые компоненты тензора напряжений в системе координат (r, z) полагаем равными нулю. Далее параметры с верхним индексом “*” представляют собой максимальные значения напряжений $\sigma_{rr}, \sigma_{zz}, \sigma_{\theta\theta}$, достигнутые при нагружении частицы в соответствующем направлении. Эти значения используются при описании разгрузки частицы среды, испытывающей необратимые деформации [4]. Уравнения переноса этих величин имеют вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial (\rho_2 \sigma_{rr}^*)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_2 \sigma_{rr}^* u_2)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho_2 \sigma_{rr}^* v_2)}{\partial z} &= -\nu \frac{\rho_2 u_2 \sigma_{rr}^*}{r}, \\ \frac{\partial (\rho_2 \sigma_{zz}^*)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_2 \sigma_{zz}^* u_2)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho_2 \sigma_{zz}^* v_2)}{\partial z} &= -\nu \frac{\rho_2 u_2 \sigma_{zz}^*}{r}, \\ \frac{\partial (\rho_2 \sigma_{\theta\theta}^*)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_2 \sigma_{\theta\theta}^* u_2)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho_2 \sigma_{\theta\theta}^* v_2)}{\partial z} &= -\nu \frac{\rho_2 u_2 \sigma_{\theta\theta}^*}{r}. \end{aligned} \quad (3)$$

При взаимодействии твердого и газового компонентов межфазными силами являются силы сопротивления частиц твердой фазы при их обтекании поровым газом и силы Стокса вязкого трения. Кроме того, учитывается конвективный теплообмен через межфазную поверхность. Выражения для определения указанных выше сил и теплового потока приведены в [4].

Изменение температуры твердой фазы определяется уравнением

$$\frac{\partial (\rho_2 T_2)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_2 T_2 u_2)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho_2 T_2 v_2)}{\partial z} = \frac{nq}{c_{p2}} - \nu \frac{\rho_2 u_2 T_2}{r}, \quad (4)$$

где c_{p2} — удельная теплоемкость металла сетки.

Поскольку в процессе деформации твердая фаза может сильно сжиматься, ряд осредняющих параметров будет зависеть от степени ее уплотнения. В частности [3, 4]:

$$\alpha_2 = \alpha_{20} \frac{\rho_2}{\rho_{20}}, \quad n = n_0 \frac{\rho_2}{\rho_{20}}, \quad 1 - \beta_r = (1 - \beta_{r0}) \frac{\rho_2}{\rho_{20}}, \quad 1 - \beta_z = (1 - \beta_{z0}) \frac{\rho_2}{\rho_{20}}$$

(нижним индексом 0 отмечены начальные значения величин при $t = 0$).

Поверхности контакта чистого газа с пористым пакетом сеток являются комбинированным разрывом [6], на котором выполняются условия динамической совместности, следующие из интегральной формы уравнений (1), записанных для подвижной поверхности разрыва. К этим условиям добавляются условия [7]

$$F^\sigma = p_1^\sigma [\beta_1], \quad p_1^\sigma = \begin{cases} p_1^-, & [\beta_1] > 0, \quad M_{12} < 1, \\ p_1^+, & [\beta_1] > 0, \quad M_{12} > 1, \end{cases}$$

$$[S_1] = 0, \quad [\beta_1] < 0, \quad M_{12} < 1,$$

где S_1 — энтропия газа; $M_{12} = |u_n^- - u_n^+|/c_1$; c_1 — скорость звука; u_n — нормальная к поверхности разрыва компонента скорости; p_1^-, p_1^+ — давление газа слева и справа от поверхности разрыва; квадратные скобки означают скачок величин на разрыве. На поверхностях контакта пакета сеток с непроницаемыми элементами конструкций выполняются условия непроникания.

Экспериментальное исследование деформационных свойств пакетов сеток.

Для определения вида функций $\sigma_{rr} = f_n(\varepsilon_{rr}, \sigma_{rr}^*)$, $\sigma_{zz} = f_\tau(\varepsilon_{zz}, \sigma_{zz}^*)$ проведены серии динамических и статических испытаний наборов слоев промышленной сетки 2-2-0.5 НУ ГОСТ 3826-82 на одноосное сжатие. Размеры ячейки 2×2 мм, диаметр проволоки 0,5 мм. Статические испытания образцов пакетов сеток, включающих 10 и 20 слоев, проводились на сервогидравлической испытательной машине МИУ-500К с предельным усилием на сжатие 500 кН [8]. Динамические испытания проведены на газовых пушках с использованием методики Кольского и разрезных стержней Гопкинсона [9] при скоростях деформации 10^3 с^{-1} . На рис. 2 представлены динамические и статические диаграммы деформирования, полученные при сжатии пакета данной сетки. Диаграммы деформирования для пакетов

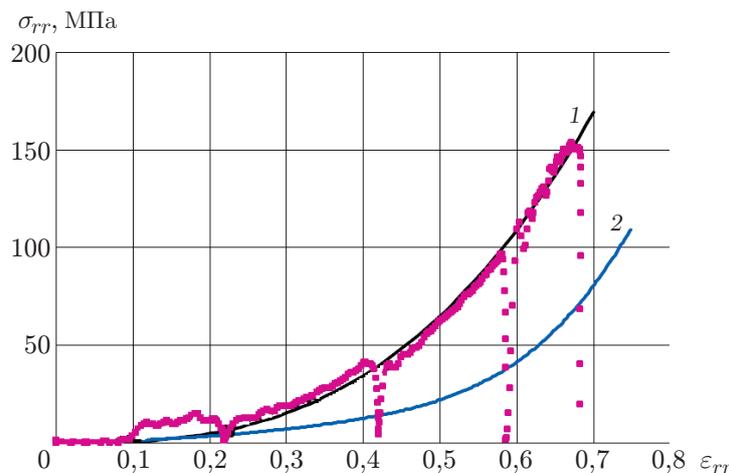


Рис. 2. Диаграммы деформирования на сжатие пакетов сеток:

точки — экспериментальные данные, полученные при динамическом нагружении пакетов сеток, 1 — аппроксимация экспериментальной зависимости $\sigma = 467,6\varepsilon^{2,845}$, 2 — статическая диаграмма на сжатие [8]

сеток, состоящих из 10 и 20 слоев, практически совпадают. В качестве меры больших деформаций принята мера Грина. На рис. 2 видно, что динамическая и статическая диаграммы существенно различаются. Разгрузочные ветви кривой $\sigma_{rr}(\varepsilon_{rr})$ близки к прямым линиям, тангенс угла наклона которых (упругий модуль деформации при разгрузке) является практически постоянным: $E_r \approx 10^4$ МПа. В численных расчетах использовалась динамическая диаграмма, пересчитанная на логарифмическую меру деформации.

Особенности численной реализации. Уравнения (1)–(4) решаются численно с использованием схемы Годунова [10, 11]. С целью адаптации этой схемы для решения уравнений динамики деформирующихся взаимопроникающих континуумов разработаны алгоритмы решения задачи о распаде произвольного разрыва для сильнопористой упруго-пластической среды, а также алгоритмы решения уравнений динамики порового газа на сетках Эйлера — Лагранжа с учетом изменяющихся коэффициентов “проходных” сечений и объемной концентрации пор.

Для расчета параметров на контактных границах двухфазная среда — газ используется алгоритм, основанный на решении задачи о распаде произвольного разрыва в канале с площадью поперечного сечения, меняющейся скачкообразно [12]. Различные типы газодинамического потока, втекающего в пористую среду и истекающего из нее, подробно описаны и проанализированы в [7]. Алгоритм строится на основе принципа расщепления процесса. На первом этапе на каждом шаге определяется движение границы пористой среды с использованием газодинамического давления, полученного на предыдущем шаге расчета, на втором этапе решается задача о распаде разрыва в движущейся системе координат, связанной с комбинированным разрывом. В результате определяются все граничные параметры, необходимые для численного интегрирования уравнений (1)–(4). На границе между жесткой преградой и пористой средой выполняется условие непротекания ($u_1 = u_2 = 0$). Полное давление на преграду определяется как сумма приведенных давлений порового газа и скелета пористой среды.

Результаты численных расчетов. С целью оценки адекватности математической модели и используемой численной схемы выполнены расчеты одноосного деформирования плоского пакета сеток под действием взрывной нагрузки. Результаты расчетов совпали с результатами, приведенными в [4].

Исследовалось взрывное нагружение цилиндрического пакета плетеных сеток в трехслойной оболочке. Схема задачи показана на рис. 3. Цилиндрический пакет сеток размещался перед силовыми слоями открытой с торцов цилиндрической оболочки. Ее внешний слой выполнен из базальтопластика, внутренний — из стали. Взрывное нагружение осуществлялось шаровым зарядом ТГ 50/50, размещенным в точке с координатами $r = 0$, $z = 0$, удельная теплота взрыва равна 4650 кДж/кг [13]. Длина оболочки $L = 60$ см, внешний радиус оболочки $R = 16,1$ см, толщина базальтопластикового слоя $h_1 = 1,38$ см, толщина стального слоя $h_2 = 0,2$ см, толщина пакета сеток $h_3 = 2,5$ см. Масса заряда равна $m_{ВВ} = 247$ г (радиус заряда $r_{ВВ} = 3,27$ см). В расчетах использовались следующие механические характеристики стали: модуль упругости $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$, плотность $\rho = 7,8$ г/см³, предел текучести $\sigma_T = 400$ МПа; механические характеристики базальтопластика имели следующие значения: $E = 3,6 \cdot 10^4$ МПа, $\mu = 0,2$, $\rho = 2$ г/см³. Слой базальтопластика является ортотропным материалом. В расчетах этот слой полагался изотропным с модулем упругости E , равным значению модуля упругости в окружном направлении [4]. В силу симметрии рассматривается 1/4 области. Пакет сеток с начальной плотностью $\rho_{20} = 1,09$ г/см³ примыкает к силовому корпусу оболочки. Цилиндрический пакет сеток сворачивается из слоев плетеной сетки (длина стороны квадратной ячейки $l = 0,2$ см, диаметр проволоки $d = 0,05$ см). В этом случае параметры газопроницаемого пакета имеют следующие значения: объемная доля металла $\alpha_{20} = 0,144$, коэффици-

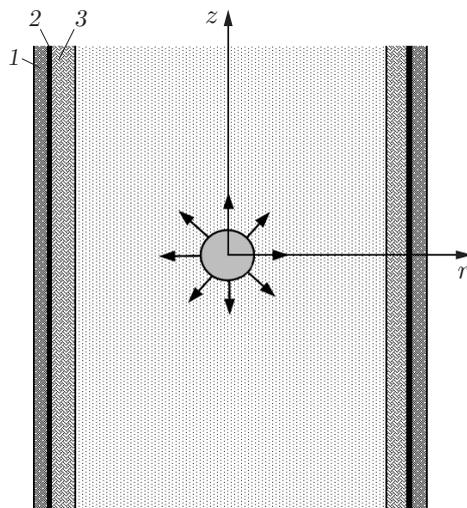


Рис. 3. Схема задачи:

1 — внешний слой оболочки из базальтопластика, 2 — внутренний слой оболочки из стали, 3 — пакет сеток

енты газопроницаемости в направлении, перпендикулярном слоям сетки, $\beta_{r0} = 0,64$, вдоль проволок — $\beta_{z0} = 0,42$. Закон сжатия сетки принимается в соответствии с динамической диаграммой сжатия (см. рис. 2) с линейным законом разгрузки. Вследствие отсутствия достоверных данных экспериментов на растяжение предполагается, что вдоль проволок зависимость между напряжением и деформацией является линейной с эффективным модулем $E_{eff} = 1,2 \cdot 10^4$ МПа. Значение E_{eff} выбиралось по результатам экспериментов и численных расчетов деформирования внешнего корпуса оболочки.

Газодинамическое нагружение оболочки с сеткой моделировалось воздействием описанного выше шарового заряда, геометрический центр и точка инициирования которого расположены в начале цилиндрической системы координат расчетной области (см. рис. 3). В этом случае все параметры задачи зависят только от координат r и z , т. е. рассматривается осесимметричная задача. Процесс детонации заряда рассчитывается с помощью “лучевой модели” [14, 15], согласно которой детонационный фронт, движущийся с постоянной скоростью, определяет область выделения энергии в результате взрыва. На фронте волны в уравнение сохранения энергии добавляется тепловая энергия взрывчатого вещества. В ходе расчетов контактная граница между продуктами детонации и воздухом не выделяется. Считается, что смесь данных компонентов подчиняется уравнению состояния идеального газа с переменным показателем адиабаты γ , зависящим от текущей плотности ρ : $\gamma = 1,25 + 1,45\rho/\rho_{ВВ}$, где $\rho_{ВВ}$ — начальная плотность заряда. В качестве момента отсчета времени принимается момент инициации заряда. На верхней и нижней границах области течения смеси продукты детонации — воздух реализуется условие $\partial f/\partial n = 0$, где n — нормаль к внешней границе расчетной области; f — газодинамическая функция.

Расчет проводится с использованием программного комплекса UPSGOD в связанной постановке [16]. Для воздуха, сетки и силового корпуса характерный размер четырехугольных ячеек используемых разностных сеток изменялся в диапазоне $0,2 \div 0,5$ см. Ударные волны и газодинамическое течение внутри камеры рассчитываются с использованием схемы сквозного счета без выделения фронтов волн и контактных разрывов. В ходе расчета выделяются поверхности контакта пакета сеток, стального слоя и базальтопластиковой оболочки.

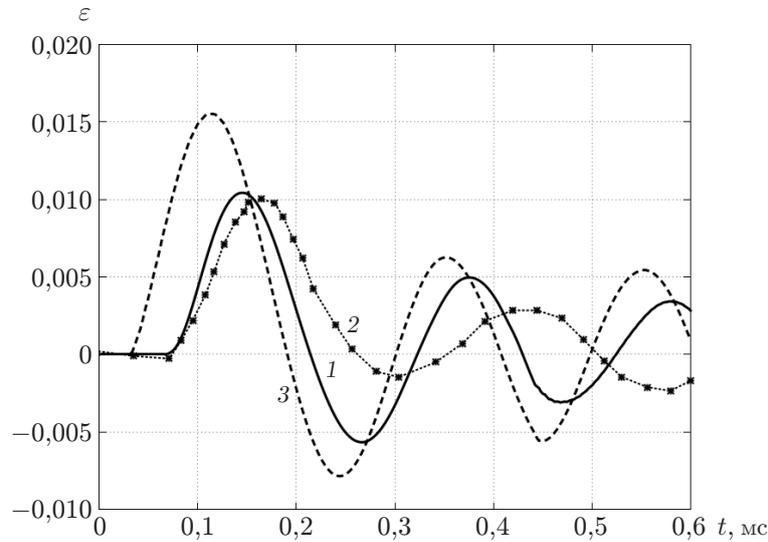


Рис. 4. Расчетная (1), экспериментальная (2) зависимости окружных деформаций внешнего слоя от времени в сечении $z = 0$ и результаты расчета в случае отсутствия защитной сетки (3)

В эксперименте, результаты которого приведены в [17], регистрировалась окружная деформация внешнего слоя корпуса оболочки из базальтопластика в сечении $z = 0$. На рис. 4 показаны расчетная и экспериментальная зависимости окружных деформаций внешнего слоя от времени в сечении $z = 0$, а также результаты расчета взрывного нагружения рассматриваемой составной оболочки в случае отсутствия защитной сетки.

Результаты проведенных вычислений показывают, что процесс деформирования пакета сеток под действием продуктов взрыва имеет колебательный характер. Периодически происходят отрыв пакета сеток от внутреннего (стального) слоя оболочки в окрестности плоскости симметрии и соударение с ней. Частота таких колебаний зависит не только от жесткости слоев оболочки, но и от жесткости пакета сеток, т. е. от параметра E_{eff} . Уменьшение данного параметра приводит к уменьшению жесткости пакета сеток в направлении оси симметрии и в окружном направлении. В результате это может привести не к наблюдаемому в экспериментах уменьшению деформаций корпуса из базальтопластика, а, наоборот, к их увеличению. В случае значительного увеличения E_{eff} жесткость пакета сеток существенно увеличивается, что приводит к уменьшению нагрузки на силовые оболочки. При выбранных параметрах системы наблюдается соответствие численных и экспериментальных значений максимальной деформации силовых оболочек, что свидетельствует об адекватности математической модели и численной схемы. В процессе нагружения пакет сеток нагревается на несколько десятков градусов, что не может привести к существенному изменению деформационных характеристик пакета. Поэтому для пакетов с небольшим количеством слоев процессом теплопереноса можно пренебречь.

Заключение. Предложенные в работе математическая модель и численная схема расчета динамики газопроницаемых цилиндрических рулонированных многослойных пакетов плетеных сеток в осесимметричном приближении могут быть использованы при анализе их деформирования, а также для оценки их защитных свойств при взрывных воздействиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Альтшулер Л. В., Кругликов Б. С.** Затухание сильных ударных волн в двухфазных и гетерогенных средах // ПМТФ. 1984. № 5. С. 24–29.
2. **Мельцас В. Ю., Портнягина Г. Ф., Соловьев В. П.** Численное моделирование прохождения ударных волн через экранирующие решетки // Вопр. атом. науки и техники. Сер. Мат. моделирование физ. процессов. 1993. Вып. 3. С. 26–31.
3. **Абакумов А. И., Заикин С. Н., Мельцас В. Ю. и др.** Численная модель деформирования противоосколочной сетки при взрывном нагружении // Математическое моделирование физических процессов: Тр. Всерос. науч.-исслед. ин-та эксперим. физики. 2006. № 10. С. 16–30.
4. **Глазова Е. Г., Кочетков А. В.** Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами // ПМТФ. 2012. Т. 53, № 3. С. 11–19.
5. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987. Ч. 1.
6. **Киселев С. П.** Ударно-волновые процессы в двухкомпонентных и двухфазных средах / С. П. Киселев, Г. А. Руев, А. П. Тренев и др. Новосибирск: Наука. Сиб. издат. фирма, 1992.
7. **Крайко А. Н., Миллер Л. Г., Ширковский И. А.** О течениях газа в пористой среде с поверхностями разрыва пористости // ПМТФ. 1982. № 1. С. 111–118.
8. **Горохов А. Н., Казаков Д. А., Кочетков А. В. и др.** Исследование деформационных свойств пакетов плетеных металлических сеток при квазистатическом сжатию и растяжению // Пробл. прочности и пластичности. 2014. Вып. 76. С. 251–256.
9. **Bragov A. M., Lomunov A. K., Medvedev A. A.** A modified Kolsky method for the investigation of the strain-rate history dependence of mechanical properties of materials // J. Physique. 1991. V. 4, N 1. P. 471–475.
10. **Численное решение многомерных задач газовой динамики** / Под ред. С. К. Годунова. М.: Наука, 1976.
11. **Абузяров М. Х., Баженов В. Г., Котов В. Л. и др.** Метод распада разрывов в динамике упругопластических сред // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 2000. Т. 40, № 6. С. 940–953.
12. **Дулов В. Г.** Газодинамика процессов истечения / В. Г. Дулов, Г. А. Лукьянов. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1984.
13. **Физика взрыва** / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2002. Т. 1.
14. **Абузяров М. Х., Кочетков А. В., Крылов С. В., Цветкова Е. В.** Численное моделирование детонации и воздействия газокумулятивных зарядов на преграды // Вычисл. механика сплошных сред. 2008. Т. 1, № 2. С. 5–15.
15. **Абузяров К. М., Абузяров М. Х., Зефиоров С. В.** Численная методика определения взрывных нагрузок в эйлеровых переменных на пространственные конструкции при детонации твердых взрывчатых веществ // Пробл. прочности и пластичности. 2014. Вып. 76. С. 326–334.
16. **Абузяров М. Х., Крылов С. В., Цветкова Е. В.** Моделирование гидроупругопластического взаимодействия с помощью программного комплекса UPSGOD // Пробл. прочности и пластичности. 2013. Вып. 75. С. 25–32.
17. **Абузяров М. Х., Глазова Е. Г., Кочетков А. В. и др.** Моделирование взаимодействия ударных волн с деформируемыми газопроницаемыми преградами // Пробл. прочности и пластичности. 2010. Вып. 72. С. 120–129.