

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВНУТРЕННЕГО ВЗРЫВНОГО НАГРУЖЕНИЯ ТРЕХСЛОЙНОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ С РУЛОНИРОВАННЫМ ПАКЕТОМ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ СЕТОК

А. В. КОЧЕТКОВ, И. А. МОДИН

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

При перевозке взрывоопасных грузов активно используют защитные конструкции, которые снижают взрывную нагрузку и защищают окружающие объекты от осколков. Рассматривается взрывное нагружение цилиндрического пакета плетеных сеток в составе трехслойной оболочки. Общая постановка задачи показана на рисунке 1. Для расчета параметров на контактных границах «двухфазная среда-газ» используется алгоритм, основанный на решении задачи о распаде произвольного разрыва в канале со скачком площади поперечного сечения [1]. Возможные виды газодинамического течения при истечении и втекании в пористую среду подробно описаны и проанализированы в [2]. Алгоритм строится по принципу расщепления процесса на два этапа. На первом этапе определяется движение границы пористой среды с использованием газодинамического давления, полученного на предыдущем шаге расчета, а затем на втором этапе решается задача распада разрыва в движущейся системе координат, связанной с комбинированным разрывом. В результате определяются все необходимые граничные параметры для численного интегрирования уравнений.

Цилиндрический пакет сеток 3 (рисунок 1) размещается перед силовыми слоями открытой с торцов цилиндрической оболочки. Ее внешний слой 1 выполнен из базальтопластика, внутренний 2 – из стали. Взрывное нагружение осуществляется шаровым зарядом ТГ 50/50, центр которого размещен на пересечении оси и плоскости симметрии системы. Длина оболочки $L = 60$ см, внешний радиус $R = 16,1$ см, толщина базальтопластикового слоя $h_1 = 1,38$ см, толщина стального слоя $h_2 = 0,2$ см, толщина пакета сетки $h_3 = 2,5$ см. Масса заряда $m_{\text{вв}} = 247$ г (радиус заряда $r_{\text{вв}} = 3,27$ см). Механические характеристики стали – $E = 2,1 \cdot 10^5$ МПа, $\mu = 0,3$ (коэффициент Пуассона), $\rho = 7,8$ г/см³, $\sigma_{\text{т}} = 400$ МПа; базальтопластика – $E = 3,6 \cdot 10^4$ МПа, $\mu = 0,2$, $\rho = 2$ г/см³. Базальтопластиковый слой, ортотропный по своему конструктивному строению и механическим свойствам, в расчетах предполагается изотропным и упругим, значение E соответствует окружающему значению модуля деформации [3].

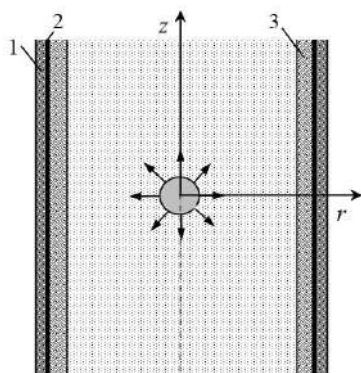


Рисунок 1

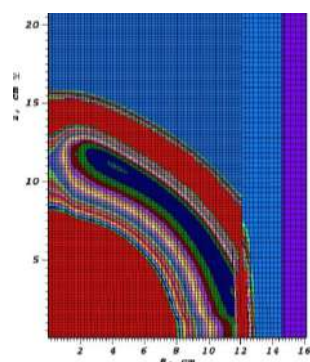


Рисунок 2

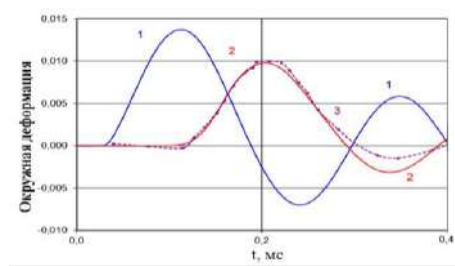


Рисунок 3

В силу симметрии рассматривается 1/4 всей области (рисунок 2). Пакет сетки начальной плотностью $\rho_{20} = 1,09$ г/см³ вплотную примыкает к силовому корпусу оболочки. Цилиндрический пакет сеток сворачивается из слоёв плетеной сетки с размером стороны квадратной ячейки $l = 0,2$ см и толщиной проволоки $d = 0,05$ см. В этом случае структурные параметры газопроницаемого пакета имеют следующие значения: объемное содержание металла $\alpha_{20} = 0,144$, коэффициенты газопрони-

цаемости в направлении, перпендикулярном слоям сетки $\beta_{r_0} = 0,64$, $\beta_{z_0} = 0,42$ – в направлении проволочек. Закон сжатия сетки принимается в соответствии с динамической диаграммой сжатия пакета из металлических сеток, задаваемой в табличной форме с линейным законом разгрузки. Вдоль линий проволочек на растяжение предполагается упругая связь между напряжением и деформацией с модулем $1,2 \cdot 10^4$ МПа.

Газодинамическое нагружение оболочки с сеткой осуществляется путем моделирования подрыва указанного заряда, геометрический центр которого и точка инициирования расположены в начале координат расчетной области (см. рисунок 2). Процесс детонации заряда рассчитывается при помощи «лучевой модели» [4]. Специального выделения контактной границы между продуктами детонации (ПД) и воздухом в ходе расчетов не проводится. Считается, что смесь данных компонент подчиняется уравнению состояния идеального газа с переменным показателем адиабаты γ , зависящим от ее текущей плотности ρ : $\gamma = 1,25 + 1,45(\rho/\rho_{\text{вв}})$, где $\rho_{\text{вв}}$ – начальная плотность заряда. За момент отсчета физического времени принимается момент инициации заряда. На верхней и нижней границах области течения смеси ПД-воздух реализуются условия «свободного вытока».

Расчет проводится при помощи программного комплекса «UPSGOD» в связанной постановке [2, 5]. Характерный размер четырехугольных ячеек используемых разностных сеток составляет: от 0,2 до 0,5 см – по воздуху, сетке и силовому корпусу. Развитие волнового процесса внутри оболочки после детонации заряда показано на рисунке 2. Здесь приведены поля давлений в газе и компоненты $-\sigma_{rr}$ в области сетки в моменты времени $t = 30$ мкс. Видно отражение головной ударной волны от поверхности сетки и формирование волны сжатия в пакете плетеных сеток.

В эксперименте, результаты которого приведены в [6–8], регистрировалась окружная деформация внешнего слоя силового базальтопластикового корпуса оболочки в сечении $z = 0$. На рисунке 3 в сравнении изображены временные расчетные (сплошная красная линия – 2) и опытные (пунктир – 3) развертки окружных деформаций наружного корпуса в данном сечении. Сплошной линией 1 синего цвета показаны результаты расчета взрывного нагружения рассматриваемой составной оболочки в случае отсутствия защитной сетки. Как показали результаты проведенных вычислений, процессы деформирования пакета сетки под действием продуктов взрыва носят колебательный характер, сопровождающийся периодическими отрывами от внутренней стальной оболочки в окрестности плоскости симметрии и следующими за этим новыми соударениями с ней. Частота таких колебаний определяется не только жесткостью пакета силовых наружных оболочек, но и зависит от жесткостных характеристик пакета сетки, в первую очередь, от упругого модуля.

Выводы. Наличие сетки снижает максимумы окружных деформаций внешнего силового слоя оболочки на 30 %, что соответствует наблюдаемому в экспериментах эффекту. Используемая математическая и численная модель газопроницаемых пакетов плетеных сеток может успешно применяться для анализа их деформирования и для оценки их защитных свойств при взрывных воздействиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (РНФ № 20-79-00108).

Список литературы

- 1 Дулов, В. Г. Газодинамика процессов истечения / В. Г. Дулов. – Новосибирск : Наука, 1984. – 234 с.
- 2 Крайко, А. Н. О течениях газа в пористой среде с поверхностями разрыва пористости / А. Н. Крайко, Л. Г. Миллер, И. А. Ширковский // Прикладная механика и теоретическая физика. – 1982. – № 1. – С. 111–118.
- 3 Глазова, Е. Г. Численное моделирование взаимодействия деформируемых газопроницаемых пакетов сеток с ударными волнами / Е. Г. Глазова, А. В. Кочетков / Прикладная механика и теоретическая физика. – 2012. – № 3. – С. 11–19.
- 4 Андреев, С. Г. Физика взрыва / С. Г. Андреев ; под ред. Л. П. Орленко. – М. : Физматлит, 2002. – 823 с.
- 5 Numerical and experimental study of the penetration of a package of woven metal grid by a steel ball / V. V. Balandin [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – 1214(1). – 012004. – doi: 10.1088/1742-6596/1214/1/012004.
- 6 Study of the stress-strain and strength properties of the metal woven grids / A. V. Kochetkov [et al.] // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Matematika i Mekhanika. – 2018. – Vol. 52. – P. 53–62. – doi: 10.17223/19988621/52/6.
- 7 Modin, I. A. Numerical simulation of quasistatic and dynamic compression of a granular layer / I. A. Modin, A. V. Kochetkov, N. V. Leontiev // AIP Conference Proceedings. – 2019. – 2116(270003). – doi: 10.1063/1.5114277.
- 8 Kochetkov, A. V. Numerical study of elastoplastic dynamic compression of metal braided grid / A. V. Kochetkov, I. A. Modin, E. Y. Poverennov // AIP Conference Proceedings. – 2021. – 2371(050005). – doi: 10.1063/5.0060905.