

# МЕХАНИКА

УДК 532.593

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ УДАРНОЙ ВОЛНЫ С ПРОНИЦАЕМОЙ ПРЕГРАДОЙ

© 2014 г.

*Е.Г. Глазова, А.В. Кочетков, И.А. Турыгина*

НИИ механики Нижегородского госуниверситета им. Н.И. Лобачевского

kochetkov@mech.unn.ru

*Поступила в редакцию 08.07.2013*

Методами численного моделирования исследуются процессы прохождения взрывной ударной волны через преграду, представляющую собой слой металлических плетеных сеток. Анализируются основные параметры проходящей и отраженной ударных волн. На основе сравнения численных решений задач с проницаемой преградой и без нее оценивается влияние преграды на газодинамическое течение. Численное решение сравнивается с экспериментальными данными по параметрам проходящей через проницаемую преграду ударной волны.

*Ключевые слова:* численное моделирование, ударная волна, газ, газопроницаемая преграда.

Пакеты металлических плетеных сеток различной структуры, являясь проницаемыми для газа, используются для уменьшения амплитуды проходящих ударных волн [1]. Реальные физические процессы, происходящие при взаимодействии взрывной ударной волны с подобными преградами, отличаются высокой степенью сложности [2–5] и требуют тщательного изучения. В данной работе с помощью вычислительного комплекса STAR-ССМ+ исследуется пространственное газодинамическое взаимодействие воздушной взрывной ударной волны с пакетом металлических плетеных сеток.

### **Постановка задачи. Основные уравнения**

Вводится декартова система координат  $Oxyz$ , ось  $Oy$  которой направлена перпендикулярно расположенному на твердой поверхности пакету сеток толщиной  $H$ . В направлениях осей  $Ox$  и  $Oz$  пакет сеток предполагается неограниченным. Начало координат располагается на «свободной поверхности» пакета сетки, т.е. на плоскости, параллельной плоскости под пакетом  $y = 0$ , на которую он опирается. В процессе расчета полагается, что проволочки в пакете сетки неподвижны и толщина пакета не изменяется.

Размер канала выбран исходя из размеров сетки в предположении симметрии на боковых границах канала. Вдоль оси  $Oy$  выделяется эле-

ментарный канал квадратного сечения  $(l+d) \times (l+d)$ , где  $(l+d)$  – размер ячейки плюс половина проволочки с каждой стороны. Пакет сетки состоит из 10 слоев.

Боковые границы являются плоскостями симметрии. Область определения задачи включает в себя объем канала, ограниченный плоскостями симметрии  $x = 0$ ,  $x = (l+d)/2$ ,  $z = 0$ ,  $z = (l+d)/2$ , поверхностями проволочек и плоскостями  $y = L$ ,  $y = -H$  (рис. 1). Параметры в набегающей ударной волне (УВ) с плоским головным фронтом задаются на плоскости  $y = -H$ . Расстояния  $L, H$  выбираются из таких соображений, чтобы в процессе моделирования отраженная от пакета сеток взрывная волна не искажала решение:  $L = 396$  мм,  $H = 210$  мм. Параметры ударной волны соответствуют экспериментальным исследованиям [4]. Схема экспериментов показана на рисунке 2. Взрывная волна образовывалась от взрыва цилиндрического заряда массой 200 г, диаметром 40 мм, высотой 100 мм. Заряд помещался внутри цилиндрического пакета плетеных сеток внутренним диаметром 108 мм и внешним диаметром 118 мм. Поскольку заряд не является ни сферическим, ни бесконечно длинным цилиндрическим, параметры ударной волны определялись из расчета двумерной осесимметричной задачи о взрыве

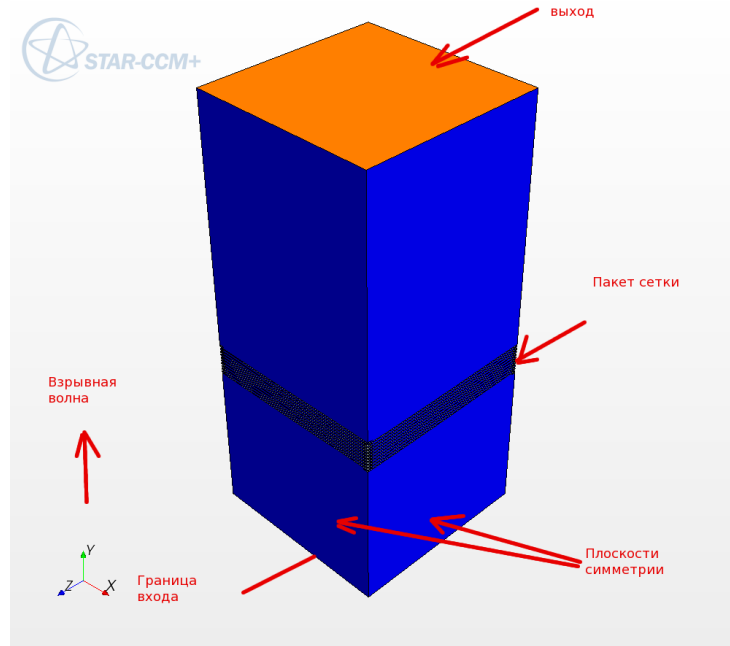


Рис. 1. Область определения задачи

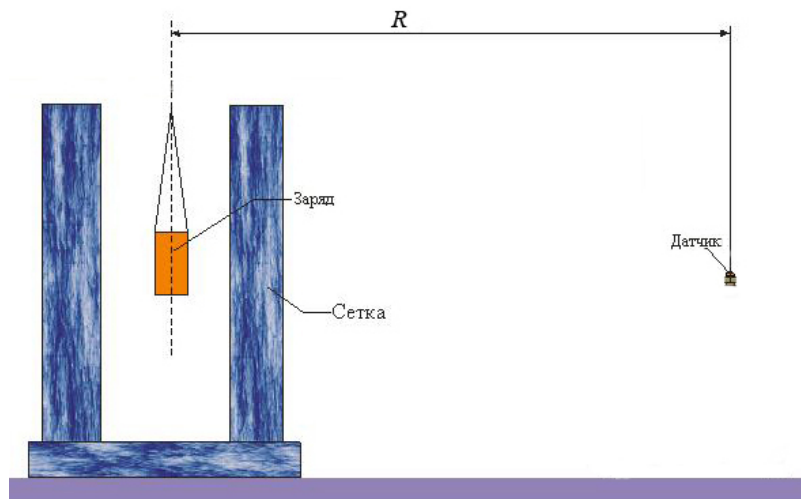


Рис. 2. Схема эксперимента

цилиндрического заряда конечной длины в воздухе с использованием пакета программ UPS-GOD, разработанного в НИИМ ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Полученные параметры волнового поля на момент подхода ударной волны к координате, соответствующей внутренней границе пакета сеток на плоскости симметрии заряда, использовались в качестве начальных условий для решения трехмерной задачи для фрагмента пакета сеток, который предполагается плоским (рис. 1), в вычислительном комплексе STAR-CCM+ [6]. Начальные волновые поля показаны на рис 3, 4, 5.

Движение газа (воздуха) описывается системой уравнений [5], включающей в себя уравнение неразрывности, уравнения Навье–Стокса и уравнение сохранения энергии:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \mathbf{V}) = 0, \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \cdot \mathbf{V}) = \\ \quad = -\nabla p - \frac{2}{3} \nabla(\mu \nabla \cdot \mathbf{V}) + 2 \nabla \cdot (\mu \text{def} \mathbf{V}), \\ \rho \frac{\partial E}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (E \mathbf{V}) = -p \nabla \cdot \mathbf{V} + \Phi, \end{cases}$$

где  $\rho$  – плотность,  $\mathbf{V} = (u, v, w)$  – скорость,  $\mu$  – коэффициент вязкости,  $E$  – удельная полная энергия,  $p$  – давление,  $k$  – коэффициент теплопроводности,  $\text{div} \mathbf{V} = \frac{1}{2}(\partial v_i / \partial x_j + \partial v_j / \partial x_i)$ ,  $\Phi$  – диссипативная функция. Для воздуха при умеренных температуре и давлении термодинамические параметры связаны уравнением состояния идеального газа:

$$p = \frac{m}{M} R_p T,$$

где  $m$  – масса,  $M$  – молярная масса,  $T$  – температура,  $R$  – газовая постоянная,  $R = 0.278$  кДж/кг · К.

Решение задачи проводилось с помощью пакета STAR CCM+, версия 7.02.008 [6]. При численном исследовании использовались методики на основе неявного метода конечных объемов [7, 8], аппроксимирующие полные уравнения Навье–Стокса для сжимаемого вязкого теплопроводного газа первого и второго порядков точности. Шаг по времени принимался равным  $\Delta t = 5 \cdot 10^{-8}$  с. Для области  $-H < y < L$  ( $L = 1.89H$ ) типовая пространственная сетка из многогранников содержит 7 084 484 ячейки.

Динамическая вязкость воздуха  $\mu = 1.855 \times 10^{-5}$  Па · с. Коэффициент теплопроводности  $k = 0.026$  Вт/(м · К),  $r = 0.75$  мм,  $H = 210$  мм,  $L = 350$  мм. Геометрические размеры и параметры взрывной волны, размеры и количество слоев металлической сетки выбраны в соответствии с условиями проведения экспериментов [4]. Для описания турбулентных движений используется стандартная  $k$ - $\epsilon$  модель [5]. В качестве краевых условий на плоскостях симметрии и на поверхностях проволок задается условие непротекания, т.е. нормальная скорость газа на этих поверхностях равна нулю ( $v_n = 0$ ). На поверхностях неподвижных проволок по температурному режиму задаются адиабатические или изотермические условия (выполненные ниже расчеты показывают практическое совпадение результатов). При  $t = 0$  параметры газа имеют распределение, полученное из решения задачи о взрыве цилиндрического заряда и представленное на рис. 3–5.

Ниже приводятся результаты расчетов для каналов с пакетом сеток и без него.

### Результаты численного моделирования

При воздействии ударной волны на слой сетки происходит отражение ударной волны, распространяющейся в обратном направлении по отношению к падающей волне. Внутри слоя

по поровому газу распространяются волны сжатия, воздух обтекает каждую проволочку, как жесткое неподвижное тело. Внутреннее течение является весьма сложным. Его параметры определяют процессы многократного отражения волн и взаимодействия с турбулентными образованиями за проволочками. На выходе из пакета сеток формируется квазиодномерное течение с прошедшей ударной волной. Импульс проходящей сквозь канал с сеткой волны рассчитывается и сравнивается с импульсом по каналу без преграды того же сечения. На рис. 6 представлены значения давления вдоль канала с пакетом сеток и без него в различные моменты времени. Цифрой 1 обозначено давление вдоль канала с сеткой в момент времени  $3E-5$  с, цифрой 2 – давление вдоль канала без сетки в тот же момент времени, цифрой 3 – давление вдоль канала с сеткой в момент времени  $6E-5$  с, цифрой 4 – давление вдоль канала без сетки.

На рисунке 7 представлено изменение давления во времени в плоскости сечения  $y=100$  мм за пакетом плетеной сетки: цифрой 1 обозначено давление в задаче с пакетом сеток, цифрой 2 – без пакета.

Эффект потери амплитуды волны в канале без преграды выше, чем в канале с преградой:

удельный импульс  $\int_0^t (P - P_0) dt$  без преграды

57.4 Па·с, с преградой – 60.5 Па·с. В эксперименте давление измерялось в датчике на расстоянии 18000 мм от оси цилиндрического пакета сеток, таким образом, уменьшение амплитуды проходящей волны составило 7.6%. В расчетах разница в амплитудах импульса в непосредственной близости от пакета сеток составила 15.8%, что в целом можно считать удовлетворительно соответствующим эксперименту ввиду упрощения постановки задачи, численных ошибок моделирования, разброса экспериментальных данных. Кроме того, давление измерялось на расстоянии, более близком к пакету сеток, чем в эксперименте, а на удалении от пакета происходит относительное уменьшение амплитуды, т.к. волна является расходящейся в пространстве.

### Выводы

Таким образом, преграда, представляющая собой пакет металлических плетеных сеток, выполняет свои функции – снижает нагрузку как по амплитуде, так и по величине импульса проходящей ударной волны. Численное моделирование позволяет дать количественную оценку

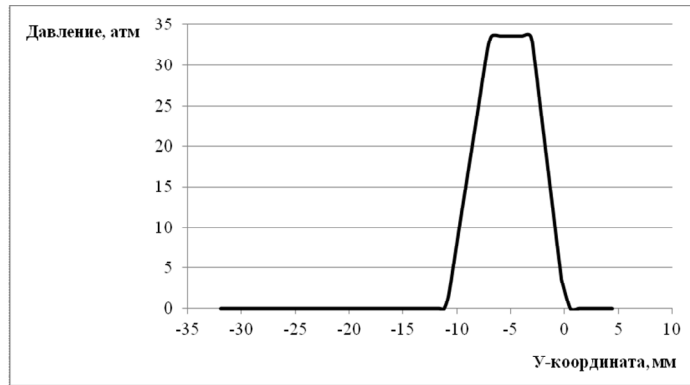


Рис. 3. Начальное распределение давления вдоль канала

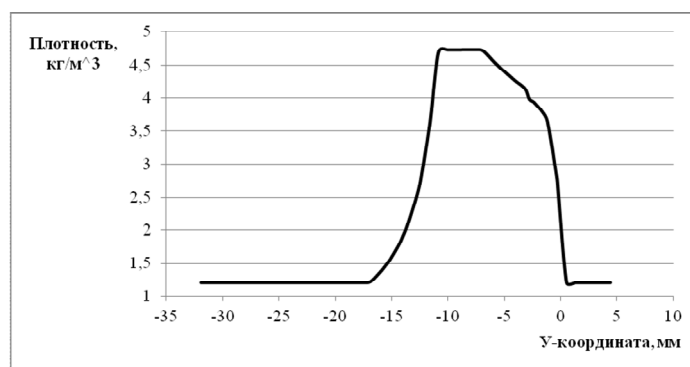


Рис. 4. Начальное распределение плотности вдоль канала

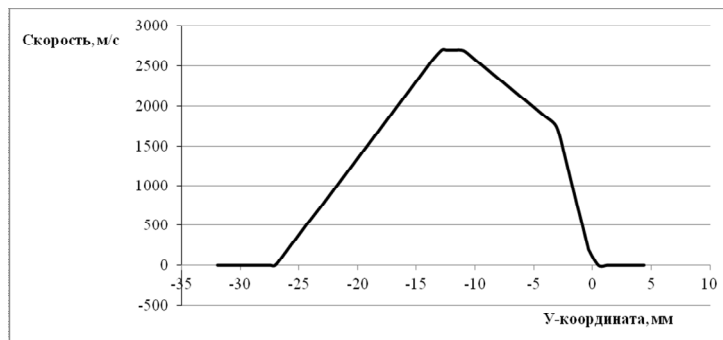


Рис. 5. Начальное распределение скорости вдоль канала

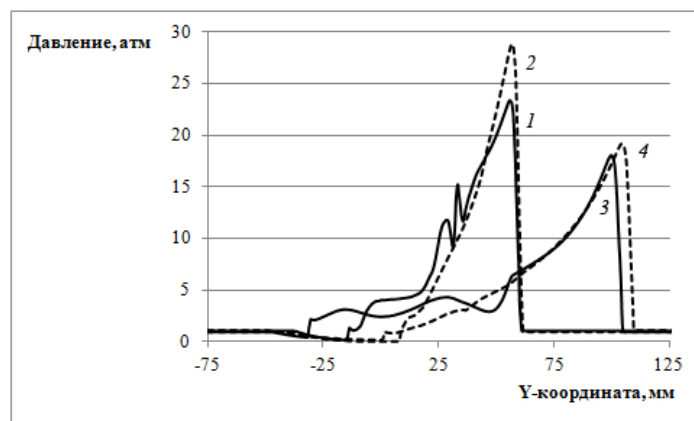


Рис. 6. Давление вдоль канала с пакетом сеток и без него в различные моменты времени

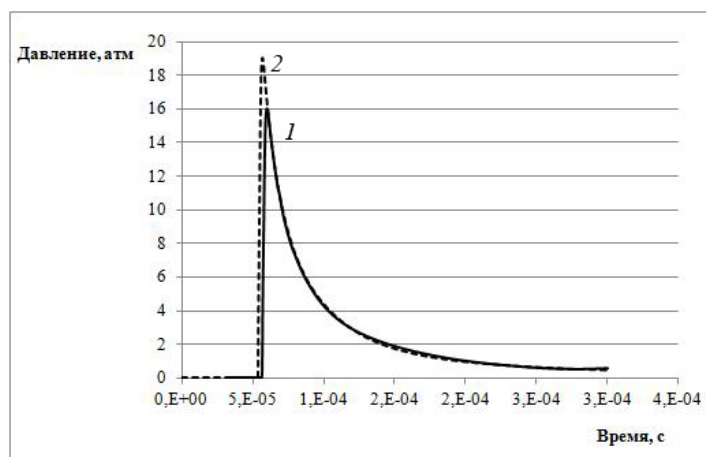


Рис. 7. Давление за пакетом плетеной сетки

демпфирующих свойств преграды. При численном моделировании взаимодействия взрывной ударной волны с газопроницаемой средой процессы теплообмена между металлом и газом оказывают незначительное влияние на процесс ввиду того, что пакет сеток данного типа обладает высокой проницаемостью.

Удовлетворительное соответствие численных и экспериментальных данных свидетельствует о достоверности используемой методики и результатов математического моделирования. Это подтверждает целесообразность использования этой методики для подобных расчетов с целью выбора параметров и оценки эффективности рассматриваемого способа защиты конструкций от воздействия ударных волн.

Авторы выражают благодарность Крылову С.В. за предоставленные результаты расчета взрыва цилиндрического заряда конечной длины, а также Кожаеву А.А. за помощь в построении разностных сеток в STAR CCM+ 7.02.

*Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (гранты № 13-08-00219, № 13-08-97091 р\_поволжье\_a) и Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (ГК № 14.В37.21.1495).*

#### Список литературы

1. Мельцас В.Ю., Портнягина Г.Ф., Соловьев В.П. Численное моделирование прохождения ударных волн через экранирующие решетки // ВАНТ. 1993. Вып. 3. С. 26–31.
2. Губайдулин А.А., Дудко Д.Н., Урманчиев С.Ф. Моделирование взаимодействия воздушной ударной волны с пористым экраном // ФГВ. 2000. Т. 36. № 4. С. 87–96.
3. Нигматулин Р.И. Динамика многофазных сред. Т. 1, 2. М.: Наука, 1987.
4. Осавчук А.Н., Глазова Е.Г., Митрофанов С.С. и др. Экспериментально-расчетные исследования процесса распространения ударной волны через цилиндрический пакет из металлической сетки // X Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Н. Новгород, 24–30 августа 2011 г.
5. Глазова Е.Г., Кочетков А.В., Ходыкина И.А. Численное моделирование пространственного взаимодействия воздушной ударной волны с проницаемым гранулированным слоем // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. Вып. 6(1). С. 163–168.
6. Документация, сопровождающая вычислительный комплекс STAR-CCM+ 7.02.008.
7. Флетчер К. Вычислительные методы в динамике жидкостей. Т. 1, 2. М.: Мир, 1991.
8. Пейре Р., Тейлор Т. Вычислительные методы в задачах механики жидкости. Л.: Гидрометеиздат, 1986.

#### NUMERICAL SIMULATION OF THE SPATIAL INTERACTION OF A SHOCK WAVE WITH A PERMEABLE BARRIER

*E.G. Glazova, A.V. Kochetkov, I.A. Turygina*

A blast shock wave passage through a barrier of woven wire mesh layers is studied by numerical simulation methods. The basic parameters of the transmitted and reflected shock waves are analyzed. The influence of the barrier on a gas-dynamic flow is estimated by comparing numerical solutions of the problem with and without a permeable barrier. The numerical solution is compared with the experimental data on the parameters of the shock wave passing through the permeable barrier.

*Keywords:* numerical simulation, shock wave, gas, gas-permeable barrier.

## References

1. Mel'cas V.Ju., Portnjagina G.F., Solov'ev V.P. Chislennoe modelirovanie prohozhdenija udarnyh voln cherez jekranirujushhie reshetki // VANT. 1993. Vyp. 3. S. 26–31.
2. Gubajdulin A.A., Dudko D.N., Urmancheev S.F. Modelirovanie vzaimodejstija vozdušnoj udarnoj volny s poristym jekranom // FGV. 2000. T. 36. № 4. S. 87–96.
3. Nigmatulin R.I. Dinamika mnogofaznyh sred. T. 1, 2. M.: Nauka, 1987.
4. Osavchuk A.N., Glazova E.G., Mitrofanov S.S. i dr. Jeksperimental'no-raschetnye issledovanija processa rasprostranenija udarnoj volny cherez cilindricheskij paket iz metallicheskoj setki // X Vserossijskij s#ezd po teoreticheskoj i prikladnoj mehanike, N. Novgorod, 24–30 avgusta 2011 g.
5. Glazova E.G., Kochetkov A.V., Hodykina I.A. Chislennoe modelirovanie prostranstvennogo vzaimodejstija vozdušnoj udarnoj volny s pronicaemym granulirovannym sloem // Vestnik Nizhegorodskogo universiteta im. N.I. Loba-chevskogo. 2011. Vyp. 6(1). S. 163–168.
6. Dokumentacija, soprovozdajushhaja vychislitel'nyj kompleks STAR-CCM+ 7.02.008.
7. Fletcher K. Vychislitel'nye metody v dina-mike zhidkostej. T. 1, 2. M.: Mir, 1991.
8. Pejre R., Tejlor T. Vychislitel'nye metody v zadachah mehaniki zhidkosti. L.: Gidrometeoizdat, 1986.