

УДК 539.3

**ЧИСЛЕННАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК В ЭЙЛЕРОВЫХ ПЕРЕМЕННЫХ
НА ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ
ПРИ ДЕТОНАЦИИ ТВЕРДЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ***

© 2014 г. **Абузяров К.М., Абузяров М.Х., Зефирова С.В.**

*НИИ механики Нижегородского государственного университета
им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

abouziar@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 25.09.2014

Предлагается численный метод определения ударно-волновых нагрузок в эйлеровых переменных на пространственные конструкции, не требующий сложных трехмерных сеточных генераторов. Для задания геометрии расчетных областей достаточно задания поверхностей взаимодействующих сред набором треугольников, созданных САД-системами, что существенно сокращает время подготовки данных задачи. Метод основан на использовании неподвижной декартовой сетки и локальных подвижных сеток, связанных с треугольниками, задающими поверхности тел, и модификации схемы Годунова повышенной точности, единой как для гидрогазодинамики, так и для упругопластических течений. В областях, удаленных от границ, интегрирование происходит в неподвижной декартовой сетке, а в областях, примыкающих к границам, на подвижных локальных сетках. Для каждой среды они представляют собой кубичные сетки со стороны ячейки, близкой к декартовой, построенные на каждом треугольнике поверхности и достаточные для интегрирования ячейки, прилегающей к этому треугольнику, с соответствующей точностью. Для схемы Годунова это локальная сетка $3 \times 3 \times 3$. Параметры в центрах локальных сеток задаются интерполированием параметров неподвижной декартовой сетки. Проблема взаимодействия газа или жидкости с конструкцией при этом сводится к решению соответствующей задачи распада разрыва на контактной границе. Скорости движения узлов треугольников, полученные на контакте, используются для смещения локальной сетки и перемещения поверхности тела. Процесс интегрирования завершается интерполяцией параметров течения с занесением их значений в ячейки неподвижной декартовой сетки, для интегрирования которых не хватило разностного шаблона (примыкающих к границам или вновь захваченных при смещении границ), из неподвижной декартовой и локальных сеток. Для моделирования процессов распространения детонации в твердых взрывчатых веществах применяется лучевая модель детонации. Приводятся результаты расчетов взрывных нагрузок на

* Выполнено при частичном финансировании Программой поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-593.2014.8), РФФИ (гранты №13-08-97091-р_поволжье_а, №13-08-00219а, №14-08-00197а), Мероприятием 7.2.1. СИ 7 ННГУ (проект №Н498-99).

конструкции, заполненные воздухом. Сравнение полученных результатов с решениями осесимметричных задач на криволинейных сетках, связанных с геометрией конструкции, демонстрирует адекватность применяемого подхода.

Ключевые слова: моделирование, детонация, схема Годунова, деформирование, интерполяция.

Введение

Моделирование процессов взаимодействия деформируемых конструкций с ударно-волновыми нагрузками, возникающими при детонации твердых взрывчатых веществ (ВВ) в сжимаемых упругопластических средах, актуально в науке и технике. При решении таких задач необходимо учитывать процессы инициирования и распространения детонации в твердых ВВ с генерацией ударных волн расширяющимися продуктами взрыва и последующим взаимодействием их с конструкциями. Решение таких задач даже в упрощенных постановках возможно только численно и требует значительных вычислительных ресурсов. Как правило, конструкции и среды, передающие взрывную нагрузку, имеют различные механические и термодинамические свойства, и описание процессов взрывного нагружения требует применения лагранжевых подходов и явных схем. Наиболее работоспособными для решения двумерных плоских и осесимметричных задач этого класса, в том числе и с учетом процессов упругопластического деформирования твердых ВВ, грунтовых сред и конструкций, являются схема С.К. Годунова и ее модификации [1–4]. Однако подход, связанный с непрерывным примыканием криволинейной сетки, покрывающей передающую среду, к аналогичной сетке, покрывающей конструкцию, и отслеживанием движения контактных границ с соответствующими перестройками сетки внутри однородной области, рекомендованный в [1] и широко используемый в решении двумерных задач, оказался практически непригодным для решения пространственных задач этого класса. Основные проблемы связаны с построением начальной 3D-сетки и ее перестроением в процессе счета. Даже в случае неподвижных сеток этап, связанный с построением криволинейной сетки, является наиболее сложной и трудоемкой частью подготовки компьютерной программы для численного решения задачи.

В настоящее время для расчета нагрузок на конструкции сложной формы при решении пространственных задач применяются в основном два подхода. Первый, достаточно грубый, заключается в том, что в области, примыкающей к поверхности конструкции, строится регулярная сетка [5], из которой исключаются ячейки, секущиеся поверхностью конструкции. Фактически получается поверхность непрерывного контакта одной зубчатой поверхности с другой. Для повышения точности здесь применяется более подробное разбиение регулярной сетки вблизи границы раздела сред. Вторым подходом, более точным и сложным, подразумевается гладкую поверхность контакта, обрезание этой поверхностью регулярных сеток контактирующих сред и вычисление параметров в этих обрезанных ячейках с использованием различных подходов или использование дополнительных наложенных сеток, связанных с поверхностью контакта, и различных форм сопряжения решений основной и наложенной сеток [5–8]. Достаточно подробно эти методики описаны в [9]. Перечисленные методики имеют общий существенный недостаток – требуют сложных 3D-сеточных генераторов.

В настоящей статье предлагается метод расчета ударно-волновых нагрузок на подвижные конструкции, также использующий наложение сеток, но фактически не требующий 3D сеточных генераторов. В качестве численного метода решения уравнений Эйлера применяется модификация схемы С.К. Годунова [3], обеспечивающая второй порядок аппроксимации на компактном (3×3×3)-шаблоне, не требующая каких-либо дополнительных изменений для предлагаемого метода и реализующая проблему взаимодействия газожидкостной среды с упругопластической средой через решение задачи распада разрыва на границе газ – упругое тело. Выбор схемы Годунова обусловлен простотой реализации граничных условий, возможностью использования подвижных лагранжевых и эйлеровых сеток, а также относительно несложным алгоритмом реализации лучевой модели детонации.

1. Определяющие уравнения и метод решения

Замкнутая система уравнений, описывающая деформирование сплошной среды в приближении модели сжимаемого упругопластического тела в декартовой системе координат, имеет следующий вид [2]:

$$\rho_{,t} + (\rho u_i)_{,x_i} = 0, \quad (1)$$

$$(\rho u_i)_{,t} + (\rho u_i u_j - \sigma_{ij})_{,x_j} = 0, \quad (2)$$

$$e_{,t} + (e u_j - u_i \sigma_{ij})_{,x_j} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} + \lambda_t S_{ij} = 2\mu e_{ij}, \quad (4)$$

$$\varepsilon = \varepsilon(p, \rho). \quad (5)$$

Здесь t – время, x_i ($i = 1, 2, 3$) – пространственные координаты; u_i – компоненты вектора скорости по осям x_i соответственно; ρ – плотность; $e = \rho(\varepsilon + u_i u_i/2)$ – полная энергия единицы объема; ε – внутренняя энергия единицы массы, заданная уравнением состояния (5); p – давление; σ_{ij} – тензор напряжений, который представляется в виде шаровой и девиаторной частей: $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + S_{ij}$, $p = -(1/3)\sigma_{ij}$; e_{ij} – девиатор тензора скоростей деформаций $e_{ij} = \varepsilon_{ij} - (1/3)\varepsilon_{kk}\delta_{ij}$, где $\varepsilon_{ij} = (1/2)(u_{i,j} + u_{j,i})$, S_{ij} – девиатор тензора напряжений. Символом D/Dt обозначена производная Яумана, учитывающая поворот тензора напряжений в эйлеровых переменных:

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} = S_{ij,t} + u_k \frac{\partial S_{ij}}{\partial x_k} - S_{ik}\omega_{jk} - S_{jk}\omega_{ik},$$

где $\omega_{ij} = (1/2)(u_{i,j} - u_{j,i})$, μ – модуль сдвига материала.

В качестве критерия перехода из упругого в пластическое состояние используется условие текучести Мизеса $S_{ij}S_{ij} = (2/3)\sigma_s^2$, σ_s – предел текучести при одноосном растяжении. Параметр λ_t должен оставаться положительным в ходе пластической деформации. Пластическое течение описывается путем сохранения девиатора на поверхности текучести [10]. В случае отсутствия сдвиговых напряжений система (1)–(5) очевидным образом переходит в уравнения Эйлера для движения сжимаемой жидкости (газа). Эта система замыкается уравнениями состояния с соответствующими параметрами. Для воздуха и продуктов взрыва (ПВ):

$$S_{rr} = S_{zz} = S_{rz} = 0, \quad e - \frac{\rho(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2)}{2} = \frac{p}{\chi - 1}.$$

В силу близости термодинамических свойств воздуха и ПВ зависимость показателя адиабаты χ от плотности принимается единой для обеих сред [4]. Для моделирования процесса распространения детонации в заряде ВВ применяется гидродинамическая теория детонации [11]. Согласно этой модели детонационная волна является ударной волной, на фронте которой за счет химических реакций происходит мгновенное энерговыделение, поддерживающее процесс ее распространения в соответствии с принципом Гюйгенса (каждая точка ВВ, до которой доходит детонационная волна, становится источником детонации и независимо излучает детонационную волну). Скорость распространения детонационной волны $D_{ВВ}$ постоянна, детонация от места инициации распространяется по лучам. Вызванное химическими реакциями энерговыделение задается путем увеличения энергии на величину $\Delta e = \rho_{ВВ} Q$ в тех точках ВВ, которые располагаются на фронте детонационной волны, здесь Q – калорийность ВВ. Решение уравнений (1)–(5) производится методом Годунова повышенной точности на подвижных эйлерово-лагранжевых сетках [3]. В численной реализации процесса распространения детонационной волны применялся алгоритм, изложенный в [4], обобщенный на 3D-случай.

Метод расчета взаимодействия среды с конструкцией в эйлеровых переменных состоит из последовательности следующих шагов.

1. Расчетные области (конструкции и среды) задаются в виде поверхностей из наборов треугольников с необходимой точностью. Удобно использовать для задания этих поверхностей файлы STL-формата, содержащие координаты внешних нормалей и вершин треугольников. Эти файлы могут быть получены САД-средствами, например такими как КОМПАС или SolidWork. На рис. 1а приведен пример такой поверхности.

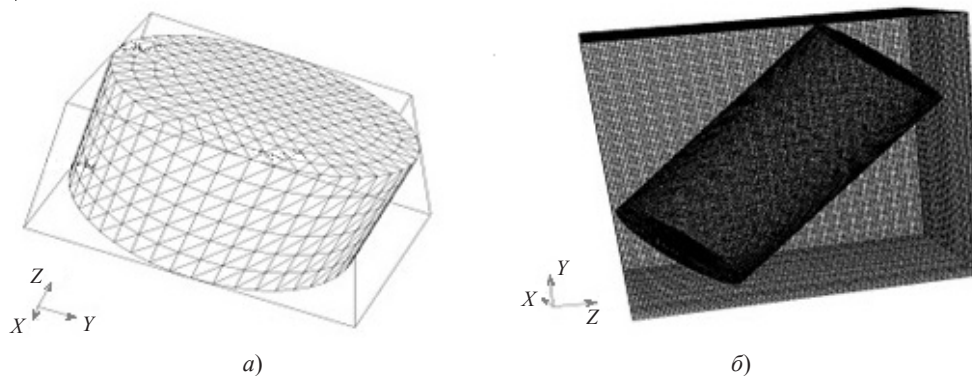


Рис. 1

2. Каждая расчетная область с криволинейными границами заключается в охватывающий прямоугольный параллелепипед и покрывается регулярной декартовой сеткой. Задаются только размеры ячеек декартовой сетки. На рис. 1б, например, изображен цилиндр, заданный набором треугольников (файлом STL-формата), внутри охватывающего параллелепипеда. Получаем четыре вида ячеек для данной расчетной области. Первый вид – ячейки, секущиеся треугольниками поверхности, или граничные ячейки, второй вид – ячейки снаружи поверхности, третий вид – ячейки внутри поверхности, для интегрирования которых с заданной аппроксимацией хватает разностного шаблона из целых ячеек (в нашем случае шаблон $3 \times 3 \times 3$), четвертый вид – ячейки, для интегрирования которых не хватает разностного шаблона из

целых ячеек, находящихся внутри поверхности. Параметры в ячейках третьего вида определяются на новом временном слое в неподвижном декартовом базисе в соответствии с [3].

3. На каждом треугольнике поверхности строится локальная декартова сетка $3 \times 3 \times 3$ внутрь объема от этой поверхности с плоскостями, параллельными плоскости соответствующего треугольника (рис. 2а). Жирной линией на рисунке обозначена контактная поверхность в плоскости, параллельной плоскости треугольника. Размеры ячеек этой локальной 3D-сетки берутся близкими к декартовой. В случае контакта треугольника с другой подобластью (близость с каким-либо ее треугольником) локальная сетка симметрично достраивается наружу от плоскости треугольника еще на $3 \times 3 \times 3$ ячеек. Данного шаблона $3 \times 3 \times 6$ достаточно для интегрирования четырех центральных ячеек (отмечены точками на рис. 2) со вторым порядком точности по модифицированной схеме Годунова. Значения параметров локальной сетки определяются интерполяцией, исходя из значений параметров основной сетки. Рассчитывается задача распада разрыва на границе «упругая среда – упругая среда», «газ – газ», «газ – упругая среда» (Riemann's problem – RP). Результатом решения RP являются скорости и силы на половинном временном слое в центре треугольника, фактически это и есть расчет взаимодействия среды с конструкцией. С нормальной скоростью двигаем контактную границу на новый временной слой, получаем новую сетку (рис. 2б). Проводим стандартное интегрирование параметров в подвижных сетках для ячеек, отмеченных на рис. 2, получаем параметры вблизи границ (граничный слой) на новом временном слое на сетке из рис. 2б. При таком движении локальной сетки 3D подвижные объемы, необходимые для вычисления потоков и интегрирования, вычисляются точно.

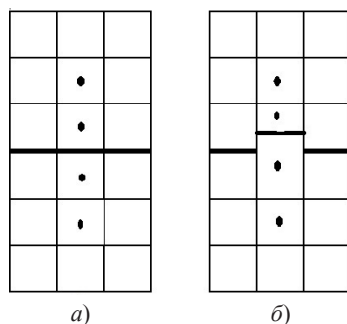


Рис. 2

4. Используя скорости в центре каждого треугольника, полученные из RP на шаге 3, вычисляем с соответствующими весами скорости в вершинах треугольников STL-файла и двигаем их на новый временной слой. Получаем положение поверхности на новом временном слое (новый STL-файл).

5. Определяем ячейки внутри нового положения поверхности и в ячейки вида 4 интерполируем параметры из ячеек вида 3 и ячеек граничного слоя.

6. Производим перестройку базисного параллелепипеда в соответствии с новым STL-файлом (сдвигаем на необходимое количество ячеек, чтобы расчетная область осталась внутри параллелепипеда), таким образом завершив расчетный шаг.

2. Результаты расчетов

Рассмотрено нагружение недеформируемых конструкций при детонации твердых зарядов ВВ в воздухе, что не ограничивает общности предлагаемого метода. С целью тестирования методики был проведен сравнительный расчет взрывных нагрузок осесимметричной задачи для мгновенной модели распространения детонации. Для верификации использовалась модификация повышенной точности ППП «Динамика-2» [12] на близкой по размерам сетке. Моделировалось взрывное нагружение замкнутой абсолютно жесткой цилиндрической камеры с внутренним диаметром $D = 1,6$ м и высотой $H = 3,2$ м. Поверхность цилиндра и плоских жестких торцов в 3D-случае аппроксимировалась STL-файлом, состоящим из 10^5 треугольников со сторонами от 0,02 до 0,04 м. Основная сетка состоит из 432000 ($60 \times 60 \times 120$) кубичных ячеек со стороной 0,03 м. Центр сферического заряда диаметром 0,2 м находится в плоскости симметрии цилиндра на оси симметрии (осесимметричная задача). Начальные значения в продуктах детонации: давление 10^4 МПа, плотность 1600 кг/м^3 , скорость равна нулю, эффективный показатель адиабаты 3,0; в окружающем воздухе: давление 0,1 МПа, плотность $1,28 \text{ кг/м}^3$, показатель адиабаты 3,0. На рис. 3 приведены осциллограммы давлений, рассчитанные в трехмерной постановке и по двумерному комплексу [12]. На кривых в левой части рисунка приведено давление на поверхности цилиндра в ближайшей к заряду точке $X = 0, Y = D/2, Z = 0$, на кривых в правой части – давление на оси симметрии на крышке цилиндра, точка $X = 0, Y = 0, Z = H$. Результаты практически совпадают, что подтверждает достоверность 3D-расчетов.

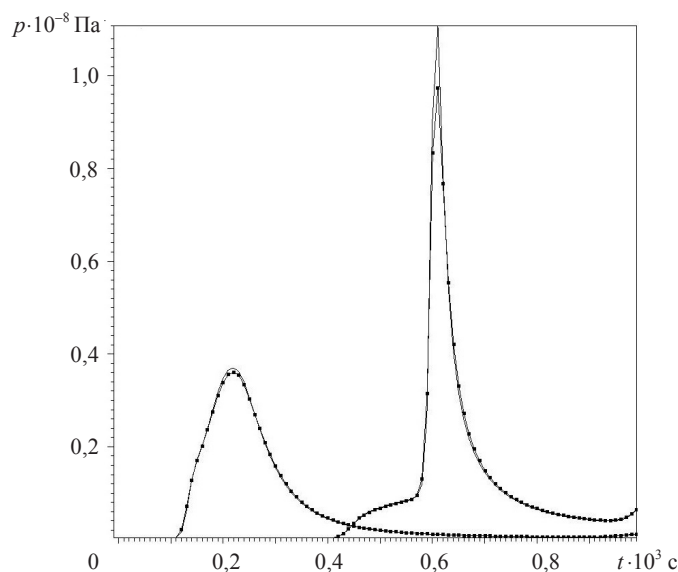


Рис. 3

Для демонстрации возможностей методики также была рассмотрена следующая модельная задача. В цилиндрической оболочке диаметром D и высотой $H = 2D$, заполненной воздухом, содержащей два неподвижных жестких тела кубической формы, одновременно инициируется подрыв двух одинаковых цилиндрических зарядов твердого ВВ диаметром $D/8$ и высотой $D/4$, оси которых лежат в одной плоскости с осью цилиндра.

На рис. 4а приведено сечение цилиндра и зарядов плоскостью $Y = 0$. Область, занятая ВВ, отмечена красным цветом. На рис. 4б в этом сечении красным цветом обозначены точки инициирования детонации. Плотность ВВ 1600 кг/м^3 , скорость детонации 7800 м/с , давление и плотность окружающего воздуха соответственно равны $0,1 \text{ МПа}$ и $1,28 \text{ кг/м}^3$, показатель адиабаты для ПВ и воздуха $\chi = 1,25 + 1,13(\rho/\rho_{\text{ВВ}})$ [4], где $\rho_{\text{ВВ}}$ – плотность ВВ. Размеры дискретизации STL-поверхностей и основной декартовой сетки порядка $0,01D$. На рис. 4в, г, д, е показано соответственно отражение ударной волны от дна и боковых стенок оболочки, распространение нагрузки вдоль образующей, взаимодействие ударных волн с верхней крышкой и жесткими телами.

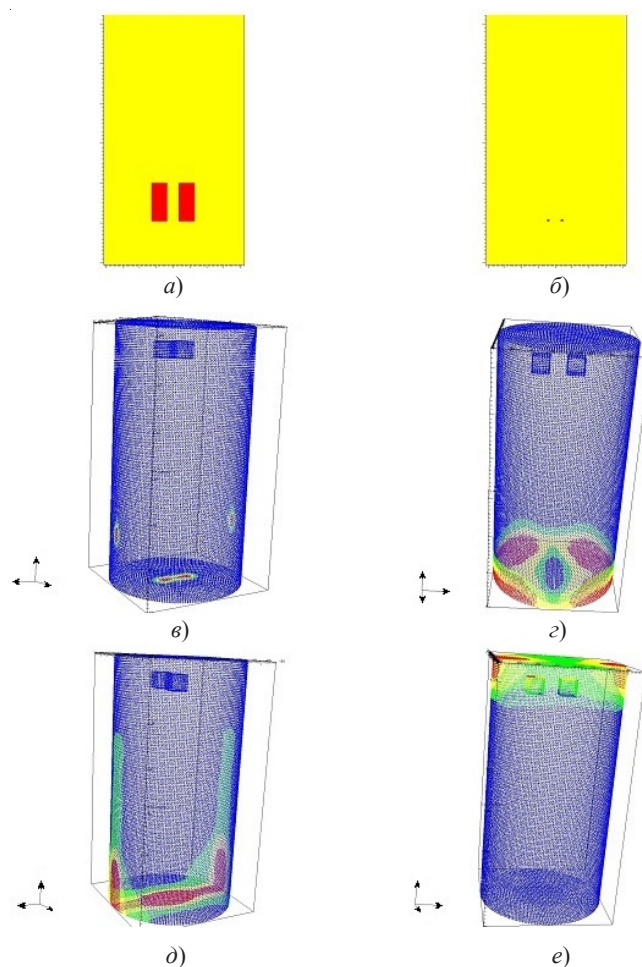


Рис. 4

Заключение

Проведенные численные исследования свидетельствуют о применимости предложенного метода для расчета ударно-волновых нагрузок на пространственные конструкции. Основное достоинство метода заключается в возможности расчета трехмерных задач взаимодействия различных сред в эйлеровых переменных с сопро-

вождением контактных границ без сложных генераторов трехмерных сеток. Фактически удалось исключить построение пространственной сетки не только из этапа подготовки начальных данных для численного решения, но и из процесса перестроения сетки при формоизменениях рассчитываемых сред, что существенно сокращает время подготовки начальных данных и время счета задачи.

Список литературы

1. Годунов С.К., Забродин А.В., Иванов М.Я., Крайко А.Н., Прокопов Г.П. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976. 400 с.
2. Демидов В.Н., Корнеев А.И. Численный метод расчета упругопластических течений с использованием подвижных разностных сеток / Томский ун-т, Томск. 1983. №2924-83 Деп.
3. Abouziarov M., Aiso H. An application of retroactive characteristic method to conservative scheme for structure problems (elastic-plastic flows) // Hyperbolic Problems, Theories, Numerics, Applications. Tenth International Conference in Osaka. September 2004. Copyright 2006 by Yokohama Publishers. P. 223–230.
4. Абузаров М.Х., Барабанов В.Н., Кочетков А.В. Моделирование взрывных воздействий на деформируемые тонкостенные преграды // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб./ Нижегород. ун-т, 2011. Вып. 73. С. 69–76.
5. Зибаров В.А., Медведев А.В. Эффективность комплекса GASDYNAMICSTOOLS/S-VR на современных многоядерных, многопроцессорных вычислительных системах и средствах визуализации // Супервычисления и математическое моделирование: Тез. X Международ. семинара, 29 сент. – 03 окт. 2008 г. РФЯЦ-ВНИИЭФ, Саров. 2008. С. 73.
6. Dadone A., Grossman B. Efficient fluid dynamic design optimization using Cartesian grids // AIAA Orlando, FL. June 2003. P. 2003–3959.
7. Forrer H., Berger M. Flow simulations on Cartesian grids involving complex moving geometries // Proc. 7th Intl. Conf. on Hyperbolic Problems. 1998. P. 315–324.
8. Меньшов И.С., Корнев М.А. Метод свободной границы для численного решения уравнений газовой динамики в областях с изменяющейся геометрией // Матем. моделирование. 2014. Т. 26, №5. С. 99–112.
9. Gilmanov A., Sotiropoulos F. A hybrid Cartesian/immersed boundary method for simulating flows with 3D, geometrically complex, moving bodies // Journal of Computational Physics. 2005. V. 207. P. 457–492.
10. Кукуджанов В.Н. Метод расщепления упругопластических уравнений // Изв. РАН. МТГ. 2004. №1. С. 98–108.
11. Баум Ф.А., Орленко Л.Л., Станюкович К.П. Физика взрыва. М.: Наука, 1975. 704 с.
12. Баженов В.Г., Зефиоров С.В., Кочетков А.В., Крылов С.В., Фельдгун В.Р. Пакет программ «Динамика-2» для решения плоских и осесимметричных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами // Матем. моделирование. 2000. Т. 12, №6. С. 67–72.

References

1. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ya., Krayko A.N., Prokopov G.P. Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki. M.: Nauka, 1976. 400 s.
2. Demidov V.N., Korneev A.I. Chislennyy metod rascheta uprugoplasticheskikh techeniy s ispol'zovaniem podvizhnykh raznostnykh setok / Tomskiy un-t, Tomsk. 1983. №2924-83 Dep.
3. Abouziarov M., Aiso H. An application of retroactive characteristic method to conservative scheme for structure problems (elastic-plastic flows) // Hyperbolic Problems, Theories, Numerics, Applications. Tenth International Conference in Osaka. September 2004. Copyright 2006 by Yokohama Publishers. P. 223–230.
4. Abuzyarov M.Kh., Barabanov V.N., Kochetkov A.V. Modelirovanie vzryvnykh vozdeystviy na deformiruemye tonkostennye pregrady // Problemy prochnosti i plastichnosti: Mezhhuz. sb./ Nizhegorod. un-t, 2011. Vyp. 73. S. 69–76.

5. Zibarov V.A., Medvedev A.V. Effektivnost' kompleksa GASDYNAMICSTOOLS/S-VR na sovremennykh mnogoyadernykh, mnogoprotsessornykh vychislitel'nykh sistemakh i sredstvakh vizualizatsii // Supervychisleniya i matematicheskoe modelirovanie: Tez. X Mezhdunarod. seminara, 29 sent. – 03 okt. 2008 g. RFYaTs-VNIIEF, Sarov. 2008. S. 73.

6. Dadone A., Grossman B. Efficient fluid dynamic design optimization using Cartesian grids // AIAA Orlando, FL. June 2003. P. 2003–3959.

7. Forrer H., Berger M. Flow simulations on Cartesian grids involving complex moving geometries // Proc. 7th Intl. Conf. on Hyperbolic Problems. 1998. P. 315–324.

8. Men'shov I.S., Kornev M.A. Metod svobodnoy granitsy dlya chislennogo resheniya uravneniy gazovoy dinamiki v oblastiakh s izmenyayushchey geometriey // Matem. modelirovanie. 2014. T. 26, №5. S. 99–112.

9. Gilmanov A., Sotiropoulos F. A hybrid Cartesian/immersed boundary method for simulating flows with 3D, geometrically complex, moving bodies // Journal of Computational Physics. 2005. V. 207. P. 457–492.

10. Kukudzhanov V.N. Metod rasshchepeniya uprugoplasticheskikh uravneniy // Izv. RAN. MTT. 2004. №1. C. 98–108.

11. Baum F.A., Orlenko L.L., Stanyukovich K.P. Fizika vzryva. M.: Nauka, 1975. 704 s.

12. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Fel'dgun V.R. Paket programm «Dinamika-2» dlya resheniya ploskikh i osesimmetrichnykh zadach nestatsionarnogo vzaimodeystviya konstruktivnykh sredami // Matem. modelirovanie. 2000. T. 12, №6. S. 67–72.

A NUMERICAL EULER VARIABLE METHOD FOR DETERMINING THE EXPLOSION LOADS ON SPATIAL STRUCTURES FROM THE DETONATION OF SOLID EXPLOSIVES

Abuziarov K.M., Abuziarov M.H., Zefirov S.V.

A numerical method for determining the shock-wave loading of the spatial structures in Euler variables is presented. This method does not require complex 3D mesh generators. To define the geometry of the calculated domains it is enough to determine only the surfaces of these domains using a set of spatial triangles created by the CAD systems, which significantly reduces the time of the data preparation for computer codes. The method is based on the modified high order accuracy Godunov's scheme uniform for computational fluid dynamics and elastic-plastic flows and uses a Cartesian base grid and local mobile grids associated with the each triangle of the surface meshes with the parameters interpolated from the base grid to the local grids and vice versa. In the domain of the solution which is far from the border, integration is made in a fixed Cartesian grid. Regions adjacent to the boundary, are integrated on the mobile local grid. For each medium, it is a cubic grid with the side of the cell, close to the Cartesian one, constructed on the surface of each triangle, and are sufficient for the integration of the cell adjacent to this triangle with the corresponding accuracy. For Godunov's scheme this local mesh is $3 \times 3 \times 3$ cell. The parameters into these local grids are interpolated from the fixed Cartesian. The problem of the interaction of a gas or liquid with the design is thus reduced to the solution of the Riemann's problem at the interface of the local cell. The velocity on the contact surface is used to reconstruct the local grid and to move the body surface. The integration step is completed by interpolation of the parameters of the base and local grids into cells of the fixed Cartesian grid, for integration of which there was no enough cells in the integration stencil (located close to the borders or newly captured during moving the borders). For the simulation of the propagation of detonation in solid explosives the time dependent model of detonation is used. The results of the calculations of the explosive loading of structures containing air, and a comparison with the results of the axisymmetric problem simulation on the curvilinear grids associated with the geometry of the structure are presented.

Keywords: modeling, detonation, Godunov scheme, deformation, interpolation.