

УДК 539.3

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕХМЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ РАЗГОНА УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ТЕЛ ВЗРЫВОМ*

© 2018 г.

**Абузяров К.М.¹, Абузяров М.Х.¹,
Глазова Е.Г.¹, Кочетков А.В.¹, Крылов С.В.¹,
Маслов Е.Е.², Романов В.И.²**

¹*Научно-исследовательский институт механики
Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация*

²*Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
Саров, Российская Федерация*

abouziar@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 30.03.2018

Описывается численная методика расчета трехмерных процессов разгона деформируемых тел продуктами детонации твердых взрывчатых веществ в воздухе. Численное решение уравнений совместного движения продуктов взрыва, воздуха и упругопластической среды производится в эйлеровых переменных на базе модифицированной схемы С.К. Годунова, единой как для газодинамических, так и для упругопластических течений, с применением точного решения задачи распада разрыва в средах и на границе газ – упругое тело. Методика использует три вида пространственных сеток. Первые сетки – наборы треугольников (STL-файлов), задающие поверхности объектов и отслеживающие эти поверхности в процессе движения. Вторые сетки – это базовые неподвижные декартовы сетки, вложенные в каждую среду. Третий вид сеток – локальные ортогональные подвижные сетки, привязанные к каждому треугольнику первого вида сеток. На базовых и локальных сетках происходит интегрирование уравнений динамики сплошной среды и взаимная интерполяция параметров между сетками различных видов. Для расчета процесса распространения детонации в твердом взрывчатом веществе используется алгоритм, основанный на принципе Гюйгенса и учете энерговыделения при приходе детонационной волны в интегрируемую ячейку. Приведены примеры численных расчетов разгона упругих и упругопластических тел, имеющих форму диска, тетраэдра и куба из различных материалов, примыкающих к заряду. Результаты проведенных исследований свидетельствуют о применимости описанной методики для расчета связанных процессов разгона деформируемых тел продуктами детонации до торможения в окружающей среде. Выявлены закономерности процесса разгона при инициации детонации в центре сферического заряда. В частности, длительность времени разгона тела сопоставима

* Выполнено при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 16-08-00458а, 17-308-50008 мол_нр).

с временем выхода детонационной волны на поверхность контакта; основные остаточные деформации, изменяющие геометрию тел, происходят на начальной стадии разгона и влияют на взаимодействие с продуктами детонации и на параметры движения тел; наблюдается значительная зависимость максимальной скорости разгона от начальной геометрии разгоняемого тела, его ориентации к детонационному фронту и деформационных свойств при одной и той же массе.

Ключевые слова: моделирование, детонация, трехмерные процессы, многосеточный подход, интерполяция, схема Годунова, нелинейные связанные задачи, аэроупругопластичность, разгон тел.

Введение

Исследование процессов взаимодействия и разгона деформируемых упругопластических тел продуктами взрыва является актуальной задачей. Экспериментальное изучение этих процессов связано со значительными трудностями. Взаимодействие с взрывной волной может вызывать в упругопластическом теле напряжения, значительно превосходящие предел текучести, и существенно его деформировать. Фактически продуктами детонации может разгоняться тело, начальная форма которого значительно изменяется, включая площадь контактной поверхности и действующие силы. Поэтому требуется рассматривать эти задачи в связанной постановке, описывая одновременно процессы в газе и деформируемом теле. Кроме того, при решении таких задач необходимо учитывать, в какой части заряда происходит инициирование детонации с последующим энерговыделением и генерацией ударных волн продуктами взрыва и их взаимодействием с упругопластическими телами, деформированием и перемещением этих тел. Решение подобных задач возможно только численно и требует развитых математических моделей и численных методов. Одна из первых работ по разгону осесимметричных деформируемых тел продуктами детонации – публикация М. Уилкинса [1], где использован лагранжев подход к описанию движения газа и упругопластических течений. Эта методика показала свою работоспособность и получила широкое распространение в пакетах прикладных программ для решения задач динамики сплошных сред. В настоящее время пакеты AUTODYN [2] и LS DYNA [3] с использованием лагранжевых методик типа [1] и эйлеровых подходов для гидрогазодинамики являются основным инструментом для решения подобных задач динамики сплошных сред. Моделирование разгона металлических тел в AUTODYN с использованием только лагранжевых [4] или эйлерово-лагранжевых [5, 6] подходов с непрерывным примыканием разностных сеток к выделяемым искривляющимся лагранжевым границам различных сред возможно лишь на начальной стадии процесса, пока искажения расчетной сетки невелики. Использование эйлерово-лагранжева подхода, основанного на схеме Годунова для газодинамических и упругопластических течений с привязкой границ разностной сетки к контактными границам раздела газа и твердого тела [7], в двумерном случае позволило рассчитать только начальную стадию процесса разгона.

В настоящей статье для моделирования процессов разгона деформируемых тел используется трехмерная численная методика [8] на основе многосеточного подхода «Химера» [9–12]. В основе методики лежит модификация схемы С.К. Годунова повышенной точности на компактном шаблоне [13], единая как для газодинамических, так и для упругопластических течений, и вариант метода вложенных сеток

[8, 14], использующий три вида пространственных сеток. Первые сетки в виде наборов треугольников (STL-файлов) задают поверхности сред и отслеживают эти поверхности в процессе движения. Вторые сетки – базовые неподвижные декартовы сетки, покрывающие каждую среду. На этих сетках происходит интегрирование параметров в ячейках, не примыкающих к границам сред. Третий вид сеток – локальные ортогональные подвижные сетки, привязанные к каждому треугольнику поверхности среды, с шаблоном, достаточным для интегрирования центральных ячеек этой локальной сетки со вторым порядком точности по модифицированной схеме с выделением контактной поверхности. Параметры в областях перекрытия второго и третьего вида сеток определяются линейной интерполяцией.

Для моделирования процесса распространения детонации по взрывчатому веществу (ВВ) используется гидродинамическая теория детонации как самоподдерживающегося явления [15]. В численных расчетах часто используется один из вариантов теории – так называемая лучевая детонация (time dependent) [16]. Согласно данной модели, детонационная волна является ударной волной, на фронте которой за счет химических реакций происходит мгновенное энерговыделение, поддерживающее процесс ее распространения в другие точки заряда в соответствии с принципом Гюйгенса (каждая точка заряда, до которой дошла волна, становится источником детонации и независимо излучает детонационные волны в область непродетонировавшей части заряда). Скорость детонационной волны полагается постоянной, детонация от места инициации распространяется по лучам. Энерговыделение, вызванное химическими реакциями, учитывается введением в уравнение энергии дополнительного члена. В [7] приведена численная реализация этой модели в схеме С.К. Годунова для двумерного случая. Развитие указанной численной методики для трехмерного варианта на основе метода С.К. Годунова приведено в работе [14], где численно моделировались трехмерные процессы взрыва сферических зарядов в цилиндрической камере с жесткими стенками при иницировании детонации в различных точках заряда. Для описания процессов в продуктах детонации и воздухе используется уравнение состояния идеального газа с переменным показателем адиабаты, вычисляемым из уравнения состояния типа JWL [17]. Граница между воздухом и продуктами детонации не выделяется в силу близости их термодинамических свойств.

1. Определяющая система уравнений и метод решения

Замкнутая система уравнений, описывающая деформирование сплошной среды в приближении модели сжимаемого упругопластического тела, в декартовой системе координат имеет вид [18]:

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

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

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

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

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

Здесь t – время; x_i – пространственные координаты; u_i – компоненты вектора скорости по осям x_i ; ρ – плотность; $E = \rho(\Sigma + u_i u_i/2)$ – полная энергия единицы объема;

Σ – внутренняя энергия единицы массы, заданная уравнением состояния (5); $\|\sigma_{ij}\|$ – тензор напряжений, который представляется в виде шаровой и девиаторной частей $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + S_{ij}$, $p = -\sigma_{ii}/3$; $\|e_{ij}\|$ – девиатор тензора скоростей деформаций $e_{ij} = \epsilon_{ij} - \epsilon_{kk}\delta_{ij}/3$, где $\epsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i})/2$, индексы i, j и k изменяются от 1 до 3. Символом D/Dt обозначена производная Яуманна, учитывающая поворот тензора напряжений в эйлеровых переменных: $DS_{ij}/Dt = S_{ij,t} + u_k \partial S_{ij} / \partial x_k - S_{ik} \omega_{jk} - S_{jk} \omega_{ik}$, где $\omega_{ij} = (u_{i,j} - u_{j,i})/2$, μ – модуль сдвига материала, индекс после запятой обозначает дифференцирование по соответствующей переменной, по повторяющимся индексам происходит суммирование от 1 до 3. В качестве критерия перехода из упругого в пластическое состояние используется условие текучести Мизеса

$$S_{ij} S_{ij} = \frac{2}{3} \sigma_S^2,$$

σ_S – предел текучести при одноосном растяжении. Параметр λ должен оставаться положительным в ходе пластической деформации при условии текучести

$$\lambda = \frac{3}{2} \frac{S_{ij} S_{ij}}{\sigma_S^2}.$$

Пластическое течение описывается путем сохранения девиатора на поверхности текучести [18]. Система уравнений (1)–(5) для каждой среды замыкается уравнениями состояния с соответствующими параметрами. В случае отсутствия сдвиговых напряжений система (1)–(5) переходит в уравнения Эйлера для движения сжимаемого газа.

Для численного решения уравнений (1)–(5) применяется модификация схемы С.К. Годунова [13], обеспечивающая второй порядок аппроксимации на компактном $3 \times 3 \times 3$ шаблоне. Для газодинамической части уравнений по сравнению с базовой схемой С.К. Годунова [19] модификации необходимы только на шаге предиктор при подготовке параметров к обычному решению задачи распада разрыва [20]. Для моделирования упругопластических течений на этапе предиктор достаточно упругого решения задачи распада разрыва для линейаризованных уравнений. Учет пластического поведения производится на этапе корректор [18]. Решение задачи распада разрыва линейаризованной системы (1)–(5) строится аналогично [13]. Это же решение используется для реализации основных граничных условий: неподвижная жесткая стенка – задаются симметричные параметры с противоположной нормальной скоростью; жесткая заделка – задаются 3 компоненты скорости на границе; Р-граница – задаются нормальные напряжения и нулевые касательные напряжения. Свободные границы являются частным случаем Р-границ. Решение задачи распада для трехмерного случая между упругой средой и продуктами детонации строится в виде итерационной комбинации нелинейного решения задачи распада разрыва для подвижной жесткой стенки при взаимодействии с продуктами детонации [19] и Р-границы для упругого тела [13].

Расчет процесса распространения детонации состоит из трех шагов. Первый шаг – ячейка, содержащая ВВ, интегрируется по обычной схеме в зависимости от агрегатного состояния ВВ (газ или упругопластическое тело). На втором шаге производится расчет момента времени детонации в ячейке в соответствии с принципом Гюйгенса [7] и оценивается, достигла ли центра ячейки детонационная волна из соответствующего центра инициации. На третьем шаге, если произошла детонация, то к полной энергии единицы объема ячейки прибавляется теплота сгорания

единицы объема ВВ. На изменение давления эта энергия повлияет на следующем разностном шаге.

2. Результаты численного моделирования

Рассматривался разгон деформируемых тел в форме кубиков, тетраэдров и цилиндров из алюминия, стали 3 и модельного материала различной массы. Характерная постановка задачи приведена на рис. 1.

Светло-синим цветом изображен заряд ВВ ТГ36/64 сферической формы, радиусом 5 см, массой 0,9 кг; источник начальной детонации задавался в центре заряда в области радиусом 0,2 см. Сечение проходит через центр заряда и центры масс разгоняемых тел. Для заряда и воздуха использовалась разностная сетка со стороной кубической ячейки 0,15 см. Красным цветом отмечены 3 стальных кубика со стороной 1 см и массой 7,8 г, вплотную прилегающие к заряду (зазоры на рис. 1, 2 между продуктами детонации и телами связаны с неточностью изображения). Шаг основной сетки для кубиков равен 0,07 см. Отсчет времени начинался с момента инициации ВВ. В начальный момент времени поверхности воздуха и продуктов детонации были покрыты сеткой из 100 тысяч треугольников со сторонами от 0,125 см до 0,6 см, поверхности кубиков покрывались сеткой из 768 треугольников со сторонами от 0,125 см до 0,176 см. Основная сетка для продуктов детонации, воздуха и кубиков состояла из 3,6 миллиона ячеек. Для продуктов детонации применялось уравнение состояния типа JWL [17]:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_1 \rho_0} \right) \exp \left(-R_1 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + B \left(1 - \frac{\omega \rho}{R_2 \rho_0} \right) \exp \left(-R_2 \frac{\rho_0}{\rho} \right) + \frac{\omega \rho}{\rho_0} E,$$

где ρ_0 – начальная плотность ВВ; A, B, R_1, R_2, ω – эмпирические константы: $A = 524,2$ ГПа, $B = 7,678$ ГПа, $R_1 = 4,2$, $R_2 = 1,10$, $\omega = 0,34$. При расчете деформирования металлов уравнение энергии не использовалось, применялась модель баротропной упругопластической среды с линейным изотропным упрочнением. Параметры для стали 3: плотность 7800 кг/м³, модуль объемного сжатия 175 ГПа, модуль сдвига 80,77 ГПа, линейный модуль упрочнения 0,24 ГПа, предел текучести 0,34 ГПа.

На рис. 2 приведено характерное распределение плотности на момент 55 мкс.

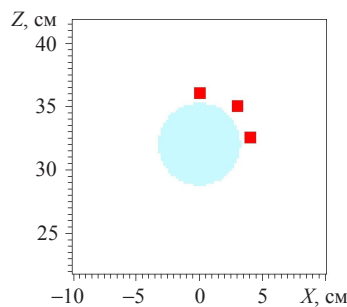


Рис. 1

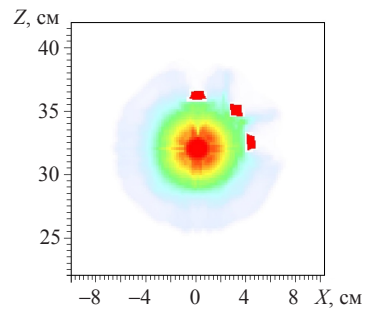


Рис. 2

На рис. 3 показаны формы кубиков и их положение в начальный момент времени и в момент времени 55 мкс. Кубики необратимо деформируются, потоки продуктов детонации движутся существенно быстрее, формируются газовые струи, обтекающие кубики.

На рис. 4 более подробно изображен кубик, разгоняемый по диагонали.

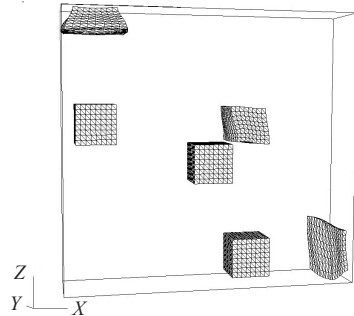


Рис. 3

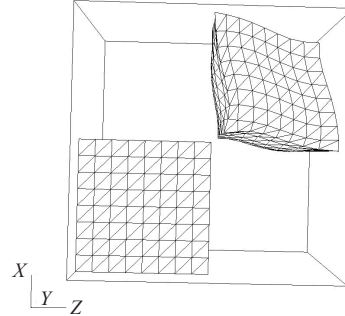


Рис. 4

На рис. 5 приведены зависимости скоростей от времени в центральных точках нижней и верхней поверхностей кубика, разгоняемого в вертикальном направлении; нижняя кривая соответствует верхней (дальней от заряда) поверхности кубика, верхняя кривая – центру нижней (ближней к заряду) поверхности кубика. Разгон кубика происходит за время порядка 10 мкс, основные остаточные формы кубик приобретает за время, меньшее 5 мкс, площадь поперечного сечения при этом возрастает почти в 4 раза, то есть поверхность контакта существенно увеличивается в процессе разгона, что увеличивает разгоняющую силу и скорость тела.

На рис. 6 приведены зависимости от времени скоростей центров масс кубика, разгоняемого в вертикальном направлении (цифра 1), и кубика, в начальный момент расположенного ребром на поверхности заряда (цифра 2), это средний кубик на рис. 1. Сплошные линии соответствуют упругопластическим телам, штриховые – упругим телам (расчет без учета пластических свойств). Скорости, рассчитанные в упругой постановке, значительно (до 30%) меньше скоростей, рассчитанных с учетом пластического характера деформирования. Также существенно влияние начальной ориентации кубиков относительно поверхности заряда на процессы деформирования и разгона.

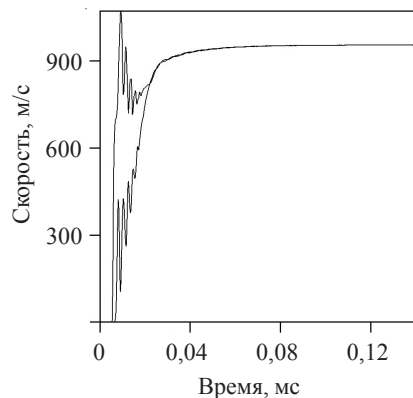


Рис. 5

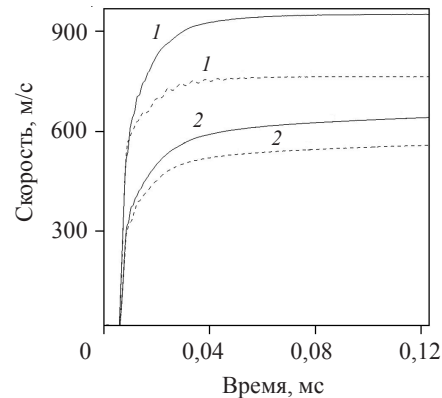


Рис. 6

Рассматривался также разгон зарядом ВВ тел различной формы, но одинаковой массы 0,92 г из той же стали. Это тетраэдры со стороной 1 см, диски диаметром 1 см и высотой 0,15 см и кубики со стороной 0,49 см, расположенные в тех же точках.

На рис. 7 приведены зависимости скоростей центров масс от времени для диска (кривая 1), тетраэдра (кривая 2) и кубика (кривая 3), разгоняемых вдоль вертикальной оси Z . Сплошные и штриховые линии соответствуют расчетам в упруго-пластической и упругой постановках.

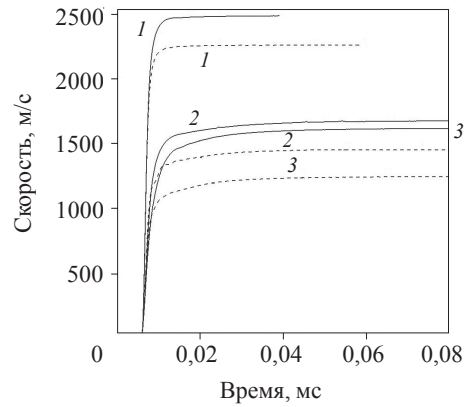


Рис. 7

Очевидна существенная зависимость скорости как от начальной геометрии разгоняемых тел, так и от необратимого деформирования в процессе разгона. Как было отмечено, упругопластические тела различной формы приобретают бóльшую скорость, чем упругие тела. Это вызвано увеличением площади нагружаемой поверхности рассмотренных тел вследствие пластического деформирования и, соответственно, увеличением контактных сил при разгоне. На рис. 8–10 изображены остаточные формы этих тел.

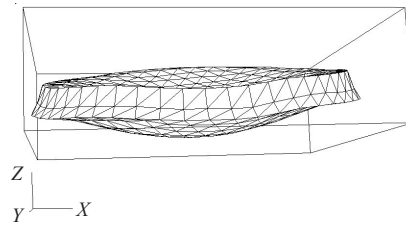


Рис. 8

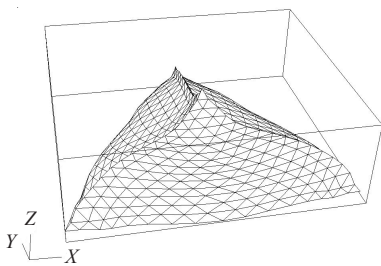


Рис. 9

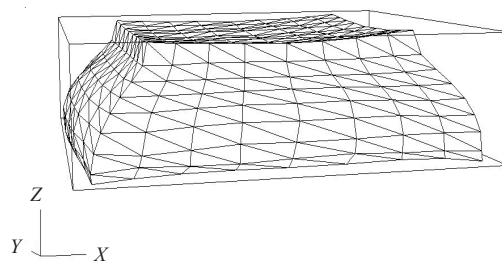


Рис. 10

Исследовались процессы разгона тел, выполненных из различных материалов. На рис. 11 приведены зависимости скоростей центров масс круговых дисков от времени соответственно из алюминия – цифра 1, стали – цифра 2 и модельного материала – цифра 3, разгоняемых вдоль вертикальной оси (штриховые линии – расчеты

ты в упругой постановке). На рис. 12 представлены аналогичные кривые для тетраэдров, на рис. 13 – для кубиков. Материалы алюминия и модельного материала полагались идеально пластичными. Плотность алюминия 2700 кг/м^3 , модуль объемного сжатия $31,95 \text{ ГПа}$, модуль сдвига 27 ГПа , предел текучести $0,1 \text{ ГПа}$. Константы для модельного материала: плотность 18000 кг/м^3 , модуль объемного сжатия 268 ГПа , модуль сдвига 124 ГПа , предел текучести $0,7 \text{ ГПа}$. Параметры движения тел существенно зависят от плотности тел и параметров, определяющих пластическое деформирование. Большие скорости приобретают более легкие тела.

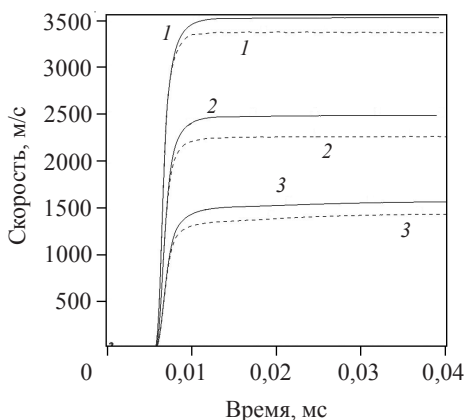


Рис. 11

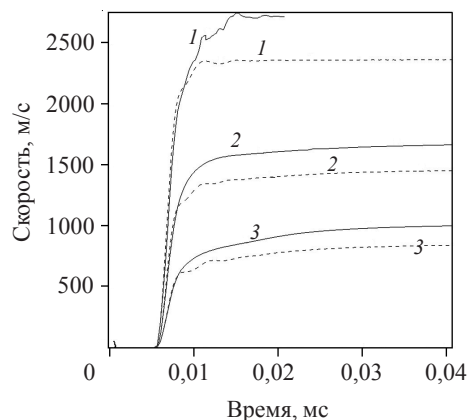


Рис. 12

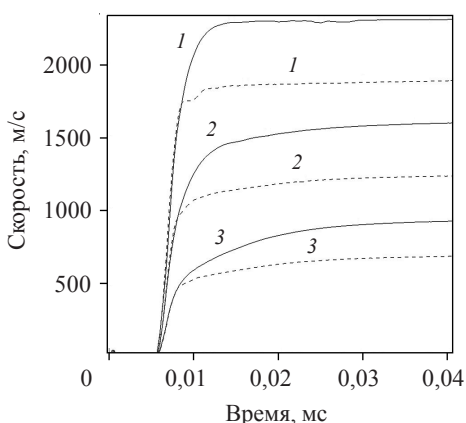


Рис. 13

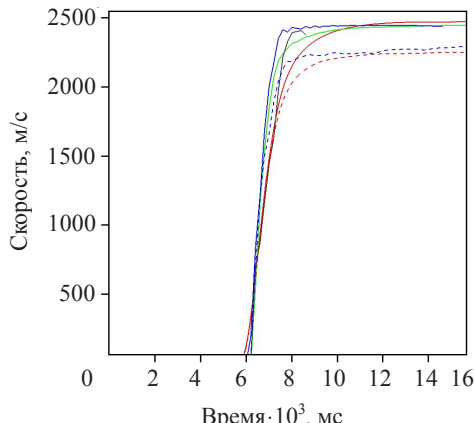


Рис. 14

Задача разгона кругового диска является осесимметричной. С целью верификации расчетов трехмерных задач были проведены дополнительные расчеты по двумерному комплексу UPSGOD-2D [7] процесса разгона диска из стали с привязкой разностной сетки к границам газ – тело. На рис. 14 приведены зависимости скорости центра масс от времени. Красным цветом отмечено решение в трехмерной постановке, зеленым и синим – решение по UPSGOD-2D на сетке для газа с начальными размерами ячеек соответственно $0,15 \text{ см}$ и $0,03 \text{ см}$, штриховыми линиями показаны соответствующие кривые в упругой постановке. Кроме того, черным цветом обозначено численное решение, полученное с помощью пакета прикладных программ «Динамика-2» [21], где использовались схема С.К. Годунова для газа и схема М. Уилкинса в лагранжевых переменных для стального диска.

Результаты решения трехмерных задач находятся в хорошем соответствии с численными решениями по двумерным методикам.

Заключение

Приведенные численные исследования свидетельствуют о применимости описанной методики для расчета разгона деформируемых тел, примыкающих к заряду, продуктами взрыва от момента инициирования ВВ до формирования квазистационарной стадии движения. Моделирование позволило выявить закономерности процесса разгона при инициации детонации в центре сферического заряда. В частности, длительность времени разгона тела сопоставима с временем выхода детонационной волны на поверхность контакта. Основные остаточные деформации, изменяющие геометрию тел, происходят на начальной стадии процесса разгона и влияют на взаимодействие с продуктами детонации и на параметры движения тел. Наблюдается значительная зависимость максимальной скорости разгона от начальной геометрии и массы разгоняемого тела, его деформационных свойств и ориентации тела к детонационному фронту при одной и той же массе.

Список литературы

1. Уилкинс М.Л. *Расчет упругопластических течений. Вычислительные методы в гидродинамике*. М.: Мир, 1967. С. 212–263.
2. *AUTODYN-2D & 3D User Documentation*. Century Dynamics, 2005. 91 p.
3. *LS-DYNA Keyword User's Manual*. Livermore Software Technology Corporation, 2007. 1176 p.
4. Fairlie G.E., Marriott C.O., Robertson N.J., Levingstone I.H., Birnbaum N.K. Computer modelling of full size fragmenting amiable warheads using AUTODYN-3D. *Ballistics '98. International Symposium on Ballistics*. South Africa. 23–27 March, 1998.
5. Ugric M. Numerical simulation of the fragmentation process of high explosive projectiles. *Scientific Technical Review*. 2013. Vol. 63. No 2. P. 47–57.
6. Fairlie G., Glanville J., Quan X. Analysis of fragment generation from structures under extreme blast loads using Euler–Lagrange. *16th Technical Dymat Meeting. 27–28 October, 2005*. Belgium: Royal Military Academy, 2005. P. 55–70.
7. Абузаров М.Х., Кочетков А.В., Крылов С.В., Цветкова Е.В. Численное моделирование детонации и воздействия газокумулятивных зарядов на преграды. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2008. Т. 1. №2. С. 5–15.
8. Abuziarov M.H., Abuziarov K.M., Kochetkov A.V. 3D fluid structure interaction problem solving method in Euler variables based on the modified Godunov scheme. *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 28. No 1/2. P. 1–5.
9. Benek J., Steger J., Dougherty F. A flexible grid embedding technique with application to the Euler equations. *AIAA Paper: 6th Computational Fluid Dynamics Conference Danvers*. 1983. P. 373–374.
10. Benek J., Bunning P., Steger J. A 3D Chimera grid embedding technique with application to the Euler equations. *AIAA Paper: 7th Computational Fluid Dynamics Conference*. Cincinnati. 1985. P. 322–321.
11. Дерюгин Ю.Н., Саразов А.В., Жучков Р.Н. Особенности построения методики расчета на сетках типа «Химера» для неструктурированных сеток. *Математическое моделирование*. 2017. Т. 29. №2. С. 106–118.
12. Меньшов И.С., Корнев М.А. Метод свободной границы для численного решения уравнений газовой динамики в областях с изменяющейся геометрией. *Математическое моделирование*. 2014. Т. 26. №5. С. 99–112.
13. Abouziarov M., Aiso H. An application of retroactive characteristic method to conservative scheme for structure problems (elastic-plastic flows). *Hyperbolic Problems. Theories. Numerics*.

Applications. 10th International Conference in Osaka. September 2004. Copyright 2006 by Yokohama Publishers. P. 223–230.

14. 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. *Проблемы прочности и пластичности*. 2014. Т. 76. №4. С. 326–334.

15. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М.: Наука, 1966. 656 с.

16. Mader C.L. *Numerical Modeling of Detonations*. Berkeley: University of California Press, 1979.

17. Баум Ф.А., Орленко Л.Л., Станюкович К.П. *Физика взрыва*. М.: Наука, 1975. 704 с.

18. Кукуджанов В.Н. Метод расщепления упругопластических уравнений. *Механика твердого тела*. 2004. №1. С. 98–108.

19. 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.

20. Абузяров М.Х., Баженов В.Г., Кочетков А.В. О новом эффективном подходе к повышению точности схемы Годунова. *Прикладные проблемы прочности и пластичности. Методы решения*. 1987. Вып 35. С. 43–49.

21. 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. *Математическое моделирование*. 2000. Т. 12. №6. С. 67–72.

References

1. Wilkins M.L. *Calculation of Elastic-Plastic Flow*. University of California Lawrence radiation laboratory. 1963. 40 p.

2. AUTODYN-2D & 3D User Documentation. Century Dynamics. 2005. 91 p.

3. LS-DYNA Keyword User's Manual. Livermore Software Technology Corporation. 2007. 1176 p.

4. Fairlie G.E., Marriott C.O., Robertson N.J., Levingstone I.H., Birnbaum N.K. Computer modelling of full size fragmenting amiable warheads using AUTODYN-3D. *Ballistics '98. International Symposium on Ballistics*. South Africa. 23–27 March, 1998.

5. Ugrcic M. Numerical simulation of the fragmentation process of high explosive projectiles. *Scientific Technical Review*. 2013. Vol. 63. No 2. P. 47–57.

6. Fairlie G., Glanville J., Quan X. Analysis of fragment generation from structures under extreme blast loads using Euler–Lagrange. *16th Technical Dymat Meeting. 27–28 October, 2005*. Belgium. Royal Military Academy. 2005. P. 55–70.

7. Abouziarov M.K., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Tsvetkova Ye.V. Chislennoe modelirovanie detonatsii i vozdeystviya gazokumulyativnykh zaryadov na pregrady [Numerical modeling of detonation and action of gas-cumulative charges on solid obstacles]. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred [Computational Continuum Mechanics]*. 2008. Vol. 1. No 2. P. 5–15 (In Russian).

8. Abuziarov M.H., Abuziarov K.M., Kochetkov A.V. 3D fluid structure interaction problem solving method in Euler variables based on the modified Godunov scheme. *Materials Physics and Mechanics*. 2016. Vol. 28. No 1/2. P. 1–5.

9. Benek J., Steger J., Dougherty F. A flexible grid embedding technique with application to the Euler equations. *AIAA Paper: 6th Computational Fluid Dynamics Conference Danvers*. 1983. P. 373–374.

10. Benek J., Bunning P., Steger J. A 3D Chimera grid embedding technique with application to the Euler equations. *AIAA Paper: 7th Computational Fluid Dynamics Conference. Cincinnati*. 1985. P. 322–321.

11. Deryugin Yu.N., Sarazov A.V., Zhuchkov R.N. Specific features of the Chimera calculation methodology implemented for unstructured grids. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2017. Vol. 9. Iss. 5. P. 587–597.

12. Menshov I.S., Kornev M.A. Free-boundary method for the numerical solution of gas-dyna-

mic equations in domains with varying geometry. *Mathematical Models and Computer Simulations*. 2014. Vol. 6. Iss. 6. P. 612–621.

13. Abouziarov M., Aiso H. An application of retroactive characteristic method to conservative scheme for structure problems (elastic-plastic flows). *Hyperbolic Problems. Theories. Numerics. Applications. 10th International Conference in Osaka. September 2004*. Copyright 2006 by Yokohama Publishers. P. 223–230.

14. Abuziarov K.M., Abuziarov M.H., Zefirov S.V. Chislennaya metodika opredeleniya vzryvnykh nagruzok v eylerovykh peremennykh na prostranstvennyye konstruksii pri detonatsii tverdykh vzryvchatykh veshchestv [A numerical Euler variable method for determining the explosion loads on spatial structures from the detonation of solid explosives]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2014. Vol. 76. No 4. P. 326–334 (In Russian).

15. Zeldovich Ia.B., Raizer Yu.P. *Fizika udarnykh voln i vysokotemperaturnykh gidrodinamicheskikh yavleniy [Physics of Shock Waves and High-temperature Hydrodynamic Phenomena]*. 1966. Moscow. Nauka Publ. 656 p. (In Russian).

16. Mader C.L. *Numerical Modeling of Detonations*. Berkeley. University of California Press. 1979.

17. Baum F.A., Orlenko L.L., Stanyukovich K.P. *Fizika vzryva [Physics of Explosion]*. Moscow. Nauka Publ. 1975. 704 p. (In Russian).

18. Kukudzhyanov V.N. Metod rasshepleniya uprugoplasticheskikh uravneniy [The splitting method of elastoplastic equations]. *Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of Solids]*. 2004. No 1. P. 98–108 (In Russian).

19. Godunov S.K., Zabrodin A.V., Ivanov M.Ia., Kraiko A.N., Prokopov G.P. *Chislennoe reshenie mnogomernykh zadach gazovoy dinamiki [Numerical Solution of Multidimensional Problems of Gas Dynamics]*. Moscow. Nauka Publ. 1976. 400 p. (In Russian).

20. Abuziarov M.H., Bazhenov V.G., Kochetkov A.V. O novom effektivnom podkhode k povysheniyu tochnosti skhemy Godunova [On a new effective approach to improving the accuracy of the Godunov scheme]. *Prikladnye problemy prochnosti i plastichnosti. Metody resheniya [Applied Problems of Strength and Plasticity. Methods of Solution]*. 1987. Iss. 35. P. 43–49 (In Russian).

21. Bazhenov V.G., Zefirov S.V., Kochetkov A.V., Krylov S.V., Feldgun V.R. Paket programm “Dinamika-2” dlya resheniya ploskikh i osesimmetrichnykh zadach nestatsionarnogo vzaimodeystviya konstruksiy so szhimaemymi sredami [“Dynamics-2” software package for solving plane and axisymmetric problems of non-stationary interaction of structures with compressible media]. *Matematicheskoe modelirovanie [Mathematical Models and Computer Simulations]*. 2000. Vol. 12. No 6. P. 67–72 (In Russian).

NUMERICALLY MODELING 3D PROCESSES OF EXPLOSIVE ACCELERATION OF ELASTOPLASTIC BODIES

**Abuziarov K.M.¹, Abuziarov M.Kh.¹, Glazova E.G.¹,
Kochetkov A.V.¹, Krylov S.V.¹, Maslov E.E.², Romanov V.I.²**

¹*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

²*Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics,
Sarov, Russian Federation*

A methodology for numerically modeling 3D processes of acceleration of deformable bodies by detonation products of solid explosives in the air is described. Simultaneous motion of the explosion products, the air and the elastoplastic medium is numerically analyzed in Euler variables, using a modified Godunov scheme, which is applicable for both fluid dynamics and elastoplastic flows, and an exact solution of Riemann problem of discontinuity breakage in the media and along the gas-elastic body interface.

The methodology uses three types of spatial grids. The grids of the first type are sets of triangles (STL files) defining the surfaces of the objects and updating those surfaces in the process of motion.

The grids of the second type are base fixed Cartesian grids nested into each medium. The grids of the third type are local orthogonal movable grids coupled with each of the triangles of the grids of the first type. The integration of dynamic equations of continua and mutual interpolation of parameters among the different kinds of grids is done on base and local grids. To simulate the detonation propagation process in a solid explosive, an algorithm based on Huygens principle and the account of energy release upon the arrival of the detonation wave into the integrated cell are used. Examples of numerically modeling propagation of elastic and elastoplastic disc-shaped, tetrahedral and cubic bodies of various materials adjacent to the charge are given. The results of the analyses testify to the applicability of the above methodology for modeling coupled processes of acceleration of deform-able bodies by detonation products up to deceleration in the ambient medium. Certain laws of the acceleration process have been found for the case where detonation is initiated in the center of a spherical charge. In particular, the duration of the acceleration of a body is comparable with the time of the arrival of the detonation wave at the surface of the contact; the major residual strains altering the geometry of the bodies occur at the initial stage of the acceleration and affect both the interaction with the detonation products and the parameters of the motion of the bodies; the final acceleration velocity is observed to depend considerably on the initial geometry of the accelerated body, its orientation relative to the detonation front and the deformation properties for the same mass.

Keywords: modeling, detonation, 3D processes, multi-grid approach, interpolation, Godunov scheme, nonlinear coupled problems, aeroelastoplasticity, acceleration of bodies.