

УДК 539.42

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ В МАТЕРИАЛАХ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВЗРЫВНЫХ НАГРУЗОК

В.Н. Аптуков¹, П.Н. Ильющенко¹, А.В. Фонарев²¹Пермский государственный университет, Пермь, Россия²Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Россия

На основе явной конечно-разностной схемы, модернизированной авторами ранее на случай нерегулярных треугольных сеток с локальной автоматической перестройкой, рассмотрено моделирование процесса трещинообразования материалов при действии продуктов детонации. Разработан алгоритм численного моделирования трещин отрыва и сдвига, на базе которого создан дополнительный программный модуль для пакета программ EXPLOSION. Рассмотрены примеры применения программного продукта для решения задачи о формировании трещин в горном массиве при действии продуктов детонации.

Ключевые слова: продукты детонации, разрушение горного массива, трещины отрыва и сдвига, явная конечно-разностная схема, пакет прикладных программ

MODELING OF CRACK FORMATION IN MATERIALS UNDER EXPLOSION LOADS

V.N. Aptukov¹, P.N. Iljushenko¹ and A.V. Fonarev²¹Perm State University, Perm, Russia²Institute of Continuous Media Mechanics UB RAS, Perm, Russia

Based on the explicit finite-difference scheme, earlier modernized for the case of irregular meshes and local automatic refinement, we simulate fracture processes in materials subjected to the action of detonation products. An algorithm for numerical modeling of tensile and shear cracks is developed. The approach presented in this paper is used to design an auxiliary program module for software package EXPLOSION. Examples illustrating how to apply the proposed package product for solving the problem of crack formation in rock mass under the action of detonation products are given.

Key words: detonation products, rock mass fracture, tensile and shear cracks, explicit finite-difference scheme, software packages

1. Введение

Вопросам численного моделирования поведения материалов при действии ударных и взрывных нагрузок посвящено большое количество работ [1–3]. Сложность и разнообразие сопутствующих данным процессам явлений (неупругие деформации, волновые эффекты, тепловыделение, влияние скорости деформирования, разрушение и другие) делают невозможным создание единой универсальной расчетной модели. В данной статье на основе развиваемой авторами явной конечно-разностной схемы [4] для случая нерегулярных треугольных сеток с локальной автоматической перестройкой [5–7] осуществлено моделирование процесса разрушения материалов при действии продуктов детонации. На базе подхода, изложенного в работе [8], разработан алгоритм численного моделирования трещин отрыва и сдвига, реализованный в виде программного модуля,

включенного в пакет программ EXPLOSION [9]. Рассмотрены примеры применения программного продукта для решения задачи о действии продуктов детонации на горный массив.

2. Постановка задачи

Рассматривается процесс взаимодействия продуктов детонации (ПД) взрывчатого вещества (ВВ) с деформируемым твердым телом. Решается осесимметричная контактная задача совместного расширения газа 1 (Рис. 1) и деформирования плиты 2. Для фиксации жесткого смещения плита помещена в недеформируемую обойму 3. Область расширения газа ограничена взрывной камерой 4.

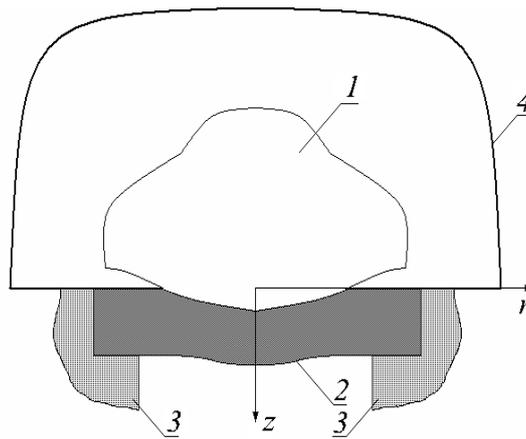


Рис. 1. Расчетная схема взаимодействия продуктов детонации с плитой

Расширение ПД описывается уравнениями законов сохранения массы и импульса

$$\frac{1}{\rho} \dot{\rho} = -\frac{\partial v_z}{\partial z} - \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r}, \quad \rho v_z \dot{z} = -\frac{\partial p}{\partial z}, \quad \rho v_r \dot{r} = -\frac{\partial p}{\partial r}, \quad (1)$$

где v_z , v_r — компоненты вектора массовой скорости по осям Oz и Or ; p — давление, точка обозначает частную производную по времени.

Предполагается, что фронт детонации имеет сферическую форму (с центром в точке инициирования) и распространяется по материалу ВВ с постоянной скоростью D [10]. При построении вычислительного алгоритма принимается, что в момент прохождения фронта детонации через узел сетки последнему сообщается скорость U_J по нормали к фронту. После прохождения фронта через центр счетной ячейки состояние вещества в ней описывается уравнением состояния для ПД

$$p = p_J (\rho / \rho_J)^k, \quad (2)$$

где ρ_J , p_J — плотность и давление на фронте детонационной волны (параметры Чепмена–Жуге); k — показатель изэнтропы разгрузки ПД.

Параметры детонационной волны определяются зависимостями [10]:

$$U_J = \frac{D}{k+1}, \quad \rho_J = \frac{k+1}{k} \rho_0, \quad p_J = \frac{1}{k+1} \rho_0 D^2, \quad (3)$$

где U_J — скорость ПД за фронтом детонационной волны; ρ_0 — плотность исходного ВВ.

Состояние деформируемого тела описывается законами сохранения массы и импульса

$$\rho \dot{v} + \rho \operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad \rho \dot{\mathbf{v}} = \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma}, \quad (4)$$

где ρ — плотность среды; \mathbf{v} — вектор массовой скорости, $\boldsymbol{\sigma}$ — тензор напряжений Коши.

Уравнение изменения температуры деформируемого тела в адиабатическом приближении имеет вид

$$\rho c_V \dot{\theta} = W, \quad (5)$$

где c_V — теплоемкость; θ — температура; W — мощность внутренних тепловых источников.

В упругой области компоненты девиатора тензора напряжений S_{ij} определяются выражением

$$\frac{DS_{ij}}{Dt} = 2G \left(\varepsilon_{ij} \dot{\rho} + \frac{1}{3} \frac{\rho \dot{\rho}}{\rho} \delta_{ij} \right) = 2G e_{ij}^{\dot{\rho}}, \quad (6)$$

где G — модуль сдвига, а $\frac{D(\cdot)}{Dt}$ обозначает производную по Яуманну [4]

$\frac{DS_{ij}}{Dt} = S_{ij} \dot{\rho} - S_{ik} \omega_{jk} - S_{jk} \omega_{ik}$, в которой $\omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} - \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)$ — компоненты тензора вихря скорости.

Связь между гидростатическим давлением и текущей плотностью описывается зависимостями [4, 12]

$$p = A(\rho / \rho_0)^n - B \quad \text{или} \quad p = -K \ln(\rho / \rho_0), \quad (7)$$

где K — модуль объемного сжатия; A, B, n — константы материала.

Первое из соотношений (7) справедливо для больших давлений (в ударных волнах), а второе — для малых.

В неупругой области используется модель упруго-вязкопластической среды в форме Кукуджанова–Пэжины

$$e_{ij}^{p\dot{\rho}} = \Phi \left\langle \frac{\sigma_u}{\sigma_s} - 1 \right\rangle \frac{S_{ij}}{\sigma_u}, \quad (8)$$

где $e_{ij}^{p\dot{\rho}}$ — компоненты девиатора тензора скорости пластической деформации; σ_u — интенсивность напряжений; $\sigma_s(e_u^p, \theta)$ — статический предел текучести; e_u^p — интенсивность пластических деформаций.

Конкретный вид зависимости (8) представлен в работах [7, 11].

Мощность внутренних тепловых источников W в уравнении (5) определяется изменением объема ΔV и работой пластического формоизменения. В терминах приращений уравнение для изменения температуры (5) имеет вид

$$\rho c_V \Delta \theta = -3\alpha K \theta \Delta V + \frac{1}{\sqrt{3}} \sigma_u \Delta e_u^p, \quad (9)$$

где α — коэффициент температурного расширения.

Граничные условия подразделяются на три типа: условия на свободных поверхностях ($\sigma_{ij} n_j = 0$, где n_j — компоненты вектора внешней нормали к поверхности); условия непротекания, характеризующиеся отсутствием скачка скорости, нормального к поверхности, и отсутствием трения ($v_j n_j = 0$, $\sigma_{ij} \tau_j = 0$, где τ_j — компоненты вектора касательной к поверхности); условия динамического контакта с проскальзыванием на границе газ — твердое тело, которые задают непрерывность нормальной скорости и нормального напряжения к поверхности и отсутствие трения ($v_j^1 n_j = v_j^2 n_j$, $\sigma_{ij}^1 n_j = \sigma_{ij}^2 n_j$, $\sigma_{ij}^1 \tau_j = \sigma_{ij}^2 \tau_j = 0$).

Сложности решения поставленной задачи обусловлены наличием контактной границы, большими формоизменениями областей и требованиями корректного расчета развития фронта детонации в ВВ. Скорости распространения детонационной и пластической волн в вовлеченных в процесс средах различаются: в исходном ВВ они имеют значения 6–8 км/с, в металлах 3–4 км/с и в геоматериалах 1–2 км/с. Поэтому в численном алгоритме предусмотрено, что до тех пор, пока все ВВ не перешло в ПД, шаг по времени выбирается из условий устойчивости в газе, а это несколько снижает скорость вычислений. После достижения полной детонации шаг по времени регулируется характеристиками материала и параметрами сетки в области, занятой твердым деформируемым телом.

Численное решение задачи в представленной постановке осуществлено ранее на основе оригинального алгоритма с применением нерегулярных лагранжевых треугольных сеток с локальной автоматической перестройкой [5–7]. Алгоритм реализован в виде пакета программ EXPLOSION [9]. В качестве примера работы пакета на рисунке 2 показана динамика расширения ПД и деформации плиты при контактном подрыве компактного ВВ.

3. Трещины отрыва и сдвига

Эффект разрушения ячеек материала в вычислительной процедуре осуществлен в рамках идей классической работы [8]. На основе некоторого критерия разрушения полагается, что в материале образуется ориентированная трещина, и это приводит к определенной коррекции тензора напряжений, предварительного приведенного к главным осям. Метод позволяет вычислять деформацию, связанную с возможным раскрытием трещины, а также отслеживать возможность схлопывания трещины.

Для учёта образования трещин в материале и их влияния на развитие дальнейшего процесса деформирования и разрушения пакет программ EXPLOSION дополнен модулем CRACK.MOD. В этом модуле производится контроль образования трещин в ячейках сетки в соответствии с заданным критерием разрушения, в случае образования ориентированной трещины выполняется необходимая корректировка тензора напряжений, учитывается эффект раскрытия и схлопывания трещин, а также осуществляется визуализация образования трещин разных типов.

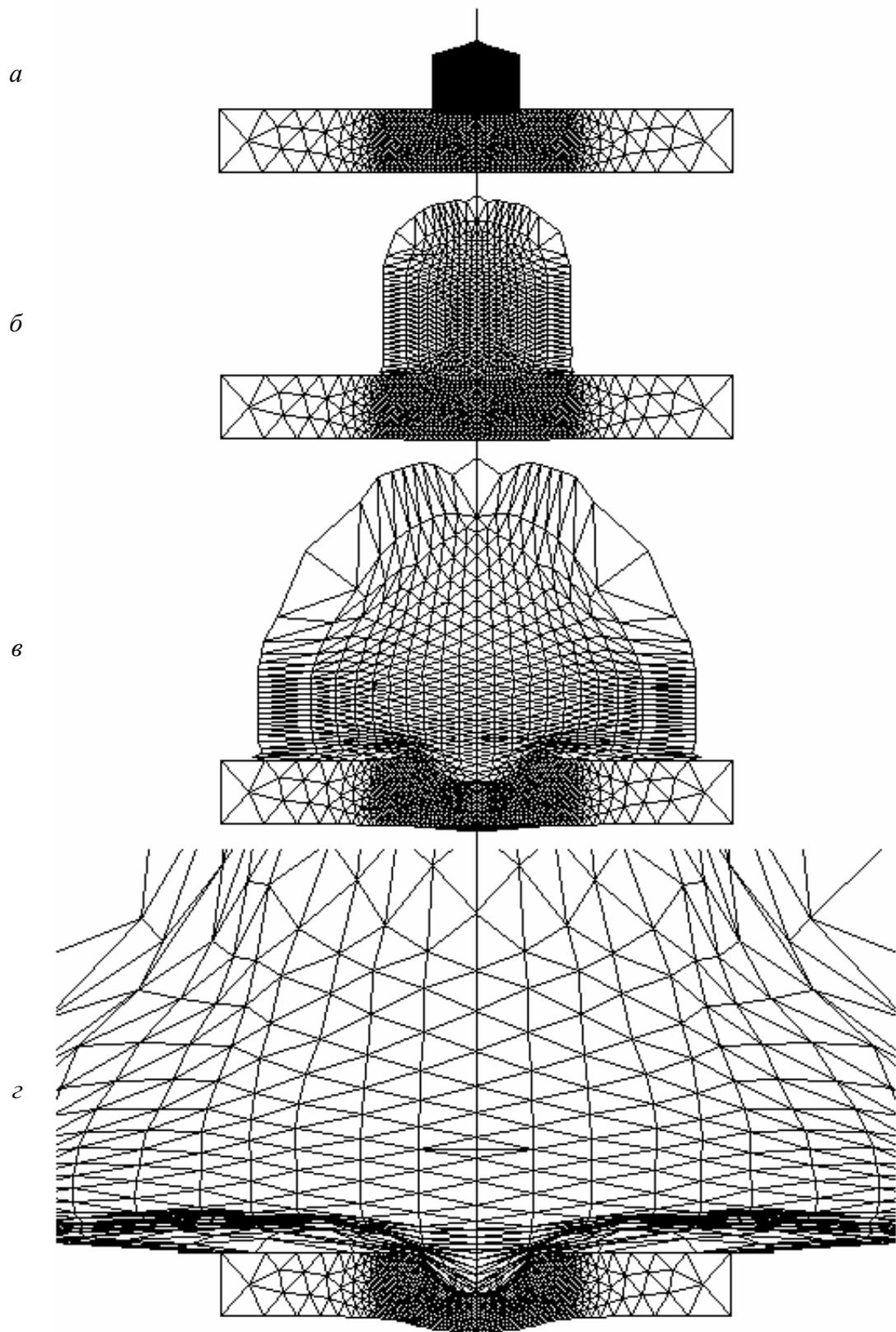


Рис. 2. Деформация плиты и область, занятая продуктами детонации в различные моменты времени:
 $t = 0$ (а), 2,38 мкс (б), 5,57 мкс (в), 10,64 мкс (г)

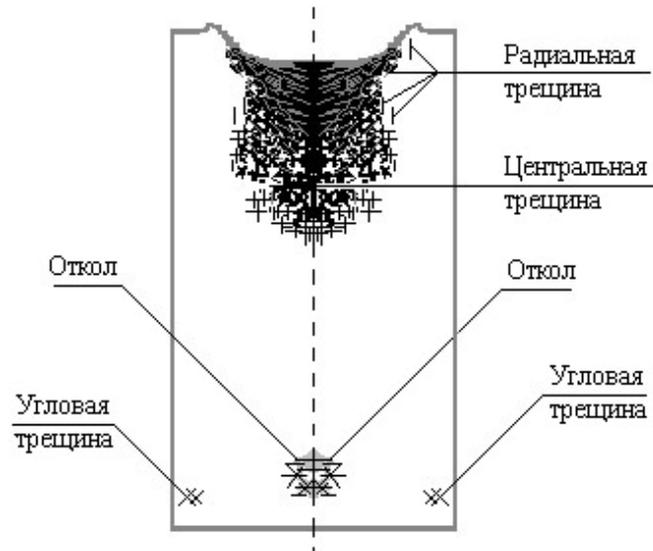


Рис. 3. Различные типы трещин в цилиндрическом блоке при действии продуктов детонации

В модуле реализованы два классических критерия разрушения: критерий максимального растягивающего напряжения, связанный с образованием трещин отрыва, и критерий Кулона, связанный с образованием трещин сдвига:

$$\sigma_1 \leq \sigma_p, \quad \tau_{\max} \leq \tau_0 + \operatorname{tg} \varphi \sigma_n, \quad (10)$$

где σ_1 , σ_p — главное и предельное напряжения; σ_n , τ_{\max} — нормальное и максимальное касательное напряжения; τ_0 — сцепление; φ — угол внутреннего трения.

Следует отметить, что в реализованном алгоритме тип критерия разрушения не является принципиальным: модель (критерий) разрушения может быть и более сложной, например, учитывающей образование и рост поврежденности. Главное здесь — эффекты образования макротрещин (им соответствует разрушение расчетных ячеек) и дальнейшее моделирование их эволюции в рамках явной конечно-разностной схемы.

Пример расчета образования различных трещин (радиальных, угловых, центральных, откольных) в металлическом цилиндре при контактном взрыве компактного заряда показан на рисунке 3.

4. Расчет разрушения массива каменной соли под действием ПД

С помощью пакета программ EXPLOSION, включающего модуль CRACK.MOD, исследованы процессы образования трещин в массиве каменной соли под действием ПД для зарядов различной геометрии, но одинакового объема. Рассмотрены три типа заряда: плоский ($h/R = 0,35$), компактный ($h/R = 1$) и удлиненный ($h/R = 8,14$), где h , R — высота и радиус заряда.

На рисунке 4, а–в показаны области разрушения в массиве каменной соли при действии зарядов различной конфигурации в момент времени около 250–270 мкс после начала детонации. В расчетах принималось значение угла внутреннего трения $\varphi = 38^\circ$. На рисунках трещины отрыва изображены серыми штрихами, а трещины сдвига — чёрными. Видно, что область разрушения, образуемая под действием плоского заряда, больше в радиальном направлении, а удлиненного заряда — в осевом. Использование

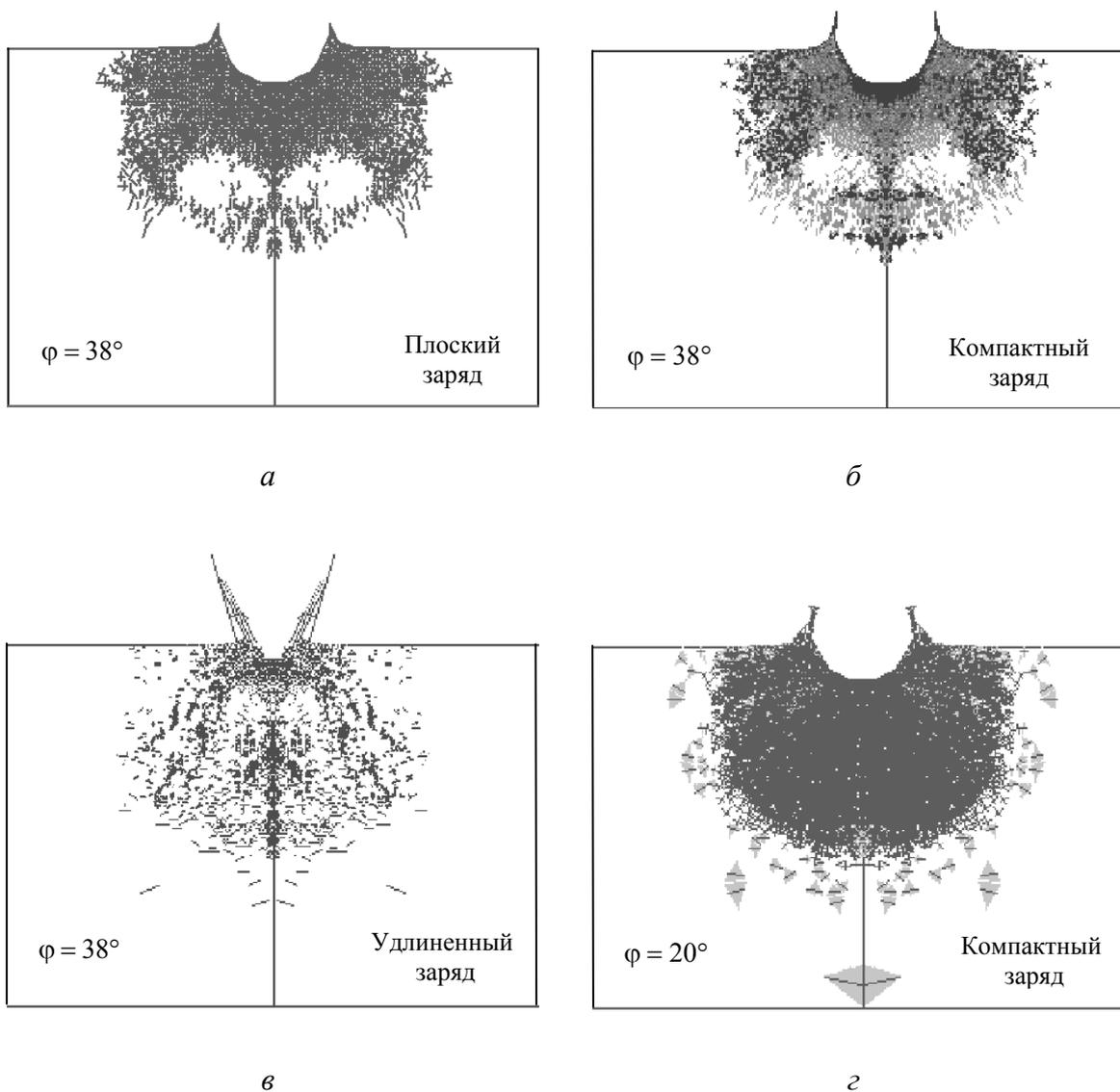


Рис. 4. Область разрушения при взрыве зарядов различного типа

удлиненного заряда приводит к образованию длинных трещин сдвига (черные штрихи), располагающихся под углом около 45° к оси симметрии, а также трещин на самой оси. Для зарядов других типов трещины сдвига формируются под различными углами и расположены в области большего объема, что соответствует дисперсионному разрушению.

Исследование влияния угла внутреннего трения φ на процесс разрушения показывает, что с его уменьшением область разрушения увеличивается, например, для компактного заряда при $\varphi = 20^\circ$ образуется сплошная область разрушения, форма которой близка к сферической (Рис. 4, г).

Оценка рассмотренных вариантов геометрии зарядов с точки зрения эффективности их действия показывает, что использование компактного заряда приводит к максимальной области разрушения.

5. Заключение

В статье осуществлено дальнейшее развитие разработанного авторами алгоритма решения задач импульсного деформирования и разрушения твердых тел, основанного на применении конечно-разностного алгоритма с использованием нерегулярных треугольных сеток с автоматической локальной перестройкой сетки в ходе счета.

Разработанный алгоритм распространен на класс задач взаимодействия ПД с деформируемым телом с учетом трещинообразования. На основе подхода Майнчена–Сака [8], построен новый алгоритм расчета деформирования материала при наличии ориентированных трещин, в котором реализованы критерии образования трещин отрыва и сдвига.

Алгоритм решения задач импульсного деформирования и разрушения твердых тел апробирован на примере взаимодействия ПД с соляным массивом. Изучено влияние геометрии заряда и параметров прочности массива на тип и расположение трещин. Показано, что компактный заряд приводит к максимальной области разрушения.

Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы Министерства образования и науки РФ «Развитие научного потенциала высшей школы (2009–2010 годы)» (проект № 2.1.2/5135).

Литература

1. *Фомин В.М., Гулидов А.И., Сапожников Г.А. и др.* Высокоскоростное взаимодействие тел. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. – 600 с.
2. *Белов Н.Н., Югов Н.Т., Копаница Д.Г. и др.* Динамика высокоскоростного удара и сопутствующие физические явления. – Northampton; Томск: STT, 2005. – 356 с.
3. *Бураго Н.Г.* Моделирование разрушения упругопластических тел // Вычислительная механика сплошных сред. – 2008. – Том 1, № 4. – С. 5-20.
4. *Уилкинс М.Л.* Расчет упругопластических течений // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 212-263.
5. *Фонарев А.В.* Применение произвольных треугольных разностных сеток к решению задач импульсного деформирования упругопластических тел // Модели деформирования и разрушения композиционных материалов. – Свердловск: УНЦ АН СССР, 1988. – С. 83-89.
6. *Аптуков В.Н., Фонарев А.В.* Расчет упругопластических течений на нерегулярных треугольных сетках с перестройкой // ПМТФ. – 1990. – № 6. – С. 109-115.
7. *Аптуков В.Н., Мурзакаев Р.Т., Фонарев А.В.* Прикладная теория проникания. – М.: Наука. 1992. – 104 с.
8. *Майнчен Дж., Сак С.* Метод расчета «Тензор» // Вычислительные методы в гидродинамике. – М.: Мир, 1967. – С. 185-211.
9. *Аптуков В.Н., Фонарев А.В.* Численное моделирование процессов ударного и взрывного деформирования элементов конструкций // Вестник ПГТУ. Вычислительная математика и механика. – Пермь: ПГТУ. – 2003. – № 1. – С. 27-33.
10. *Баум Ф.М., Орленко Л.П., Станюкович К.П. и др.* Физика взрыва. – М.: Наука. 1975. – 704 с.
11. *Аптуков В.Н., Николаев П.К.* Распространение волн в термоупруговязкопластическом материале // Механика быстропротекающих процессов. – Новосибирск: ИГ СО АН СССР, 1984. – С. 9-14.
12. *Орленко Л.П.* Поведение материалов при интенсивных динамических нагрузках. – М.: Машиностроение, 1964. – 168 с.

Поступила в редакцию 03.09.09

Сведения об авторах

Аптуков Валерий Нагимович, дтн, проф., зав. каф., Пермский государственный университет (ПГУ), 614990, Пермь, ул. Букирева, д. 15; E-mail: artukov@psu.ru

Ильющенко Павел Николаевич, магистр, ПГУ; E-mail: artukov@psu.ru

Фонарев Алексей Владимирович, ктн, нс, Институт механики сплошных сред УрО РАН, 614013, Пермь, ул. Академика Королева, 1; E-mail: afonarev@icmm.ru