

УДК 621.324

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КЛАСТЕРНОЙ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ОСКОЛОЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МНОГОСЛОЙНЫЕ ПРЕГРАДЫ

Б. Л. Воронин, М. В. Здорова, С. В. Копкин,
М. В. Ветчинников, И. А. Давыдов, Е. А. Пронин
(РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Рассматривается задача высокоскоростного соударения стального шарика с многослойной преградой. Приводятся результаты расчетов, выполненных по методике MoDuS методом кластерной динамики, в сравнении с экспериментальными данными и с результатами расчетов по другим методикам.

Ключевые слова: MoDuS, кластерная динамика, пробивание преград, потенциал Ми–Грюнайзена, монокристалл, поликристалл, арифметические ускорители.

Введение

Во многих инженерных задачах возникает необходимость определения стойкостных характеристик некоторых конструкций к ударно-пробивному воздействию. Возможности экспериментального исследования высокоскоростных соударений (скорость удара $\sim 4\text{--}7\text{ км/с}$) часто бывают ограничены, во-первых, по экономическим причинам, во-вторых, из-за фиксации небольшого набора данных, по которым трудно проследить всю динамику процесса в рассматриваемых системах. По этим причинам, а также в силу современных возможностей вычислительной техники очевидной становится полезность применения численного моделирования к задачам соударения для более детального их изучения. В результате расчетов можно получить очень подробную картину деформации и фрагментации конструкций.

Исследования высокоскоростного пробивания преград поражающими элементами ведутся в РФЯЦ-ВНИИЭФ с 1990-х годов. Расчеты рассматриваемых ниже двумерных и трехмерных задач (или аналогичных им) проводились по различным математическим методикам [1–3]. В данной работе рассматриваются результаты расчетов, выполненных по методике MoDuS [4, 5] методом кластерной динамики (КД) [6].

1. Постановка задач пробивания

Задачи пробивания двухслойной преграды ставятся следующим образом [1]: стальной шарик массой 10 г и диаметром $\approx 13,5\text{ мм}$ движется со скоростью $\sim 4\text{ км/с}$ под углами 90° , 45° , 60° к преграде; преграда представляет собой две плоских пластины из текстолита и алюминия с размерами $300 \times 300\text{ мм}$ и толщиной 10 и 4 мм соответственно. Геометрия этих задач представлена на рис. 1.

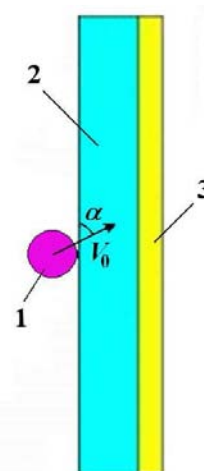


Рис. 1. Геометрия задач пробивания двухслойной преграды: 1 — стальной ударник; 2 — текстолит; 3 — алюминий

Необходимо рассчитать процесс пробивания до времени экспериментального рентгенографирования t_γ , оценить размеры повреждений при следующих данных:

Задача 1: $\alpha = 90^\circ$; $V_0 = 4,2$ км/с; $t_\gamma = 28,9$ мкс;

Задача 2: $\alpha = 45^\circ$; $V_0 = 4,17$ км/с; $t_\gamma = 36,7$ мкс;

Задача 3: $\alpha = 60^\circ$; $V_0 = 4,03$ км/с; $t_\gamma = 43,7$ мкс.

Постановка задач пробивания многослойных преград такова [7]: стальной шарик массой 10 г движется со скоростью $\sim 5,5\text{--}7$ км/с под углом 90° к преграде; преграда представляет собой набор плоских пластин с размерами 300×300 мм, разделенных воздушной прослойкой. Геометрия этих задач и толщины (h) пластин представлены на рис. 2.

Здесь, как и для двухслойной преграды, необходимо рассчитать процесс пробивания до времени t_γ и оценить размеры отверстий при следующих данных:

Задача 4: $V_0 = 6,75$ км/с; $t_\gamma = 17,2$ мкс;

Задача 5: $V_0 = 6,75$ км/с; $t_\gamma = 67,6$ мкс;

Задача 6: $V_0 = 5,49$ км/с; $t_\gamma = 69,4$ мкс.

2. Постановка задачи по методу КД

В основе метода КД лежат следующие основные положения [6]:

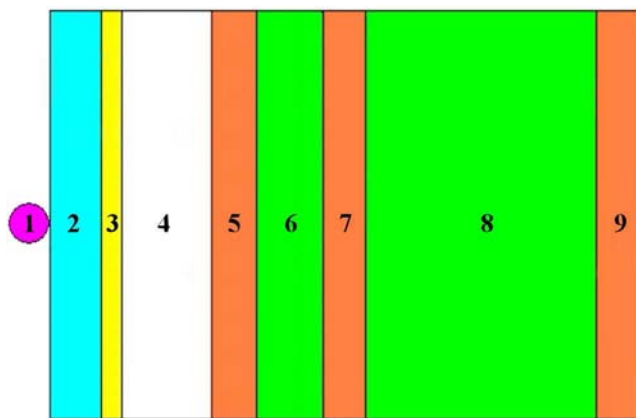


Рис. 2. Геометрия задач пробивания многослойной преграды: 1 — сталь, $d = 13,5$ мм; 2 — текстолит, $h = 15$ мм; 3 — алюминий, $h = 4$ мм; 4 — воздушный зазор, $h = 25$ мм; 5, 7, 9 — сталь (сталь 1, сталь 2, сталь 3), $h = 10$ мм; 6 — парафин (парафин 1), $h = 20$ мм; 8 — парафин (парафин 2), $h = 60$ мм

- сплошная среда представляется в виде набора выделенных структурных элементов (точечных базовых кластеров);
- уравнения механики сплошной среды заменяются на уравнения движения взаимодействующих кластеров;
- для описания динамики движения кластеров применяются методы, аналогичные методам молекулярной динамики;
- выбор потенциалов взаимодействия кластеров осуществляется исходя из реального уравнения состояния (УРСа) моделируемого материала.

Выбор размеров базового кластера производится так, чтобы правильно передавались плотность вещества и геометрия области. При этом, с одной стороны, необходимо достаточно подробно передать особенности начальной геометрии задачи, а с другой стороны, — обеспечить выполнение расчетов для реальных размеров области за приемлемое время. Свобода в выборе размеров кластера (при сохранении плотностей среды и размеров области) означает, что исходные уравнения в методе КД обладают масштабной инвариантностью [6].

Начальная область моделирования задается как прямоугольный параллелепипед. Внутри области размещаются моделируемые объекты, которые представляют собой совокупность кластеров (микрочастиц). Рассматривается парное взаимодействие микрочастиц. В данном случае все объекты заполняются микрочастицами, которые находятся в равновесном положении на расстоянии $r_0 = 0,5$ мм от ближайших соседей, в узлах гранецентрированной кубической (ГЦК) решетки с периодом $a_0 = r_0\sqrt{2} = 0,707$ мм.

В газодинамических расчетах данного класса задач для всех материалов используются УРСы Ми–Грюнайзена с параметрами, представленными в табл. 1.

Для данного УРСа удельная энергия упругого сжатия холодного вещества (упругая энергия) определяется как

$$\varepsilon_x(\delta) = \frac{c_0^2}{n} \left(\frac{\delta^{n-1} - 1}{n-1} + \frac{1}{\delta} - 1 \right), \quad (1)$$

где $\delta = \rho/\rho_0$, c_0 , n — редактируемые параметры УРСа.

Можно показать, что потенциал взаимодействия микрочастиц (зависимость энергии от расстояния между ними), соответствующий

Значения параметров для УРСов Ми–Грюнайзена и упругопластические параметры [7]

Вещество	$\rho_0, \text{г/см}^3$	$c_0, \text{км/с}$	n	$\gamma = \Gamma + 1$	$P_{\text{отк}}, \text{ГПа}$	$Y, \text{ГПа}$	N
Железо (ударник)	7,8	4,9	5,0	2,6	-2,0	2,0	0,29
Текстолит	1,35	2,76	4,77	2,0	0	0,2	0,14
Алюминий	2,7	4,9	5,0	2,1	-0,5	0,5	0,3
Сталь	7,8	5,0	5,0	2,6	-1,6	0,6	0,33
Парафин	0,9	2,96	4,77	2,0	0	0	0,5

УРСу (1) для плотнейших гексагональной и ГЦК упаковок, определяется выражением

$$E_{3D}(r) = \frac{\sqrt{2}\rho_0 r_0^3 c_0^2}{12n} \left[\frac{\left(\frac{r_0}{r}\right)^{3n-3} - 1}{n-1} + \left(\frac{r}{r_0}\right)^3 - 1 \right]. \quad (2)$$

Массы единичных микрочастиц для рассмотренных трехмерных упаковок определяются следующим образом: $m_{3D} = \rho_0 r_0^3 / \sqrt{2}$.

С использованием соотношения (2) УРСы веществ, заданные посредством табл. 1, были преобразованы в потенциалы взаимодействия микрочастиц. При этом для веществ использованы следующие значения радиусов обрезания* (R_c) потенциалов взаимодействия: для алюминия $R_c = 1,015r_0$; для железа (ударник) $R_c = 1,025r_0$; для текстолита $R_c = 1,02r_0$; для парафина $R_c = 1,02r_0$; для стали $R_c = 1,02r_0$. Указанные начальные параметры R_c подбирались таким образом, чтобы воспроизводилась удельная энергия разрушения для соответствующих материалов [6].

3. Технология проведения расчетов

Для задач пробивания двухслойных преград в файле начальных данных программы MoDyS задаются три трехмерные области: куб (из которого вырезается шар) и две пластины ($300 \times 300 \text{ мм}$). Как уже указывалось, равновесное расстояние между частицами $r_0 = 500 \text{ мкм}$, упаковка частиц — ГЦК, постоянная решетки $a_0 = 707,1 \text{ мкм}$. Массы микрочастиц: $m_{\text{Fe}} = 6,894 \cdot 10^{-7} \text{ кг}$; $m_{\text{Тех}} = 1,193 \cdot 10^{-7} \text{ кг}$; $m_{\text{Al}} = 2,386 \cdot 10^{-7} \text{ кг}$. Задача содержит 31 028 379 микрочастиц.

*Радиус обрезания — расстояние между кластерами, на котором взаимодействие прерывается.

Граничные условия по всем граням — *свободная поверхность*. Начальная температура — 0 К. Частицам ударника в начальный момент приписывалась скорость в направлении, определяемом углом пробития α .

Для задания потенциала взаимодействия частиц из разных материалов применялся алгоритм, который основывается на использовании условия равновесия сил, действующих на частицы при сжатии [6]. Результатом выполнения алгоритма являются таблицы значений энергии и сил для заданного спектра значений расстояния между частицами. Пример построения потенциалов взаимодействия частиц различных материалов показан на рис. 3.

Анализ результатов расчетов показал, что основная проблема при моделировании макроскопического поведения твердых тел методом КД состоит в том, что регулярные упаковки частиц приводят к анизотропным моделям и свойствам материалов. Подход, позволяющий решить эту проблему, заключается в конструировании неидеальных упаковок частиц, в частности, поликристаллических упаковок со случайным распределением ориентации монокристал-

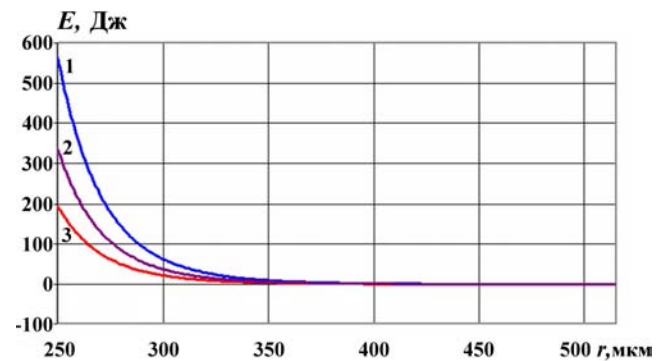


Рис. 3. Потенциалы взаимодействия частиц из различных материалов: 1 — сталь—сталь; 2 — алюминий—сталь; 3 — алюминий—алюминий

лов. Этот метод позволяет создать изотропные модели материалов, удовлетворяющие широкому спектру механических, термодинамических и физических свойств.

Поскольку алгоритм построения поликристалла был внедрен в программный комплекс MoDyS, была проведена еще одна серия расчетов, где для ударника использовалась ГЦК-упаковка частиц (постоянная решетки $a_0 = 707,1$ мкм), а для материалов преград — поликристалл, состоящий из ГЦК-зерен ($a_0 = 707,1$ мкм). Линейный размер одного зерна выбран ~ 3 мм, и соответственно в слое текстолита задано 35 000 зерен, а в слое алюминия — 18 000 зерен. Поскольку поликристалл менее плотен, чем идеальная ГЦК-структура, то массы частиц для текстолита и алюминия скорректированы: $m_{\text{Fe}} = 6,894 \cdot 10^{-7}$ кг; $m_{\text{Тех}} = 1,2427 \times 10^{-7}$ кг; $m_{\text{Al}} = 3,2782 \cdot 10^{-7}$ кг. Задача содержала 22 975 001 микрочастиц. Взаимодействие между частицами разных веществ описывалось табличными потенциалами. В остальном постановка задачи прежняя.

Для задач пробивания семислойных преград в файле начальных данных задается восемь трехмерных областей: куб (из которого вырезается шар) и семь пластин. Расстояние между частицами $r_0 = 500$ мкм, упаковка частиц — ГЦК (постоянная решетки $a_0 = 707,1$ мкм). Массы частиц: $m_{\text{Fe}} = 6,894 \cdot 10^{-7}$ кг; $m_{\text{Тех}} = 1,193 \cdot 10^{-7}$ кг; $m_{\text{Al}} = 2,386 \cdot 10^{-7}$ кг; $m_{\text{сталь1}} = 6,894 \cdot 10^{-7}$ кг; $m_{\text{парафин}} = 7,954 \cdot 10^{-8}$ кг. Задача содержит 144 176 958 микрочастиц.

Так же, как и для задач пробивания двухслойной преграды, была проведена серия расчетов с использованием поликристаллического заполнения областей частицами. А именно для частиц ударника, парафина и третьего слоя стали использовалась ГЦК-упаковка частиц (постоянная решетки $a_0 = 707,1$ мкм), а для остальных слоев — поликристалл, состоящий из ГЦК-зерен, линейный размер одного зерна ~ 3 мм. Таким образом, число зерен составило 50 000 в слое из текстолита, 12 000 — в слое из алюминия и по 35 000 — в первом и втором слоях стали. Массы частиц также скорректированы: $m_{\text{Fe}} = 6,894 \times 10^{-7}$ кг; $m_{\text{Тех}} = 1,652 \cdot 10^{-7}$ кг; $m_{\text{Al}} = 2,95 \times 10^{-7}$ кг; $m_{\text{сталь1}} = 9,56 \cdot 10^{-7}$ кг; $m_{\text{парафин}} = 7,954 \cdot 10^{-8}$ кг. Задача содержала 130 794 042 микрочастиц.

4. Результаты расчетов методом КД пробивания двухслойных преград

При моделировании пробивания двухслойных преград было проведено три серии расчетов:

- 1) с монокристаллическим заполнением областей частицами и использованием в качестве потенциала взаимодействия между частицами разных веществ потенциала наименее плотного из них;
- 2) с монокристаллическим заполнением областей частицами и использованием табличного потенциала взаимодействия между частицами разных веществ;
- 3) с поликристаллическим заполнением областей частицами и использованием табличного потенциала взаимодействия между частицами разных веществ.

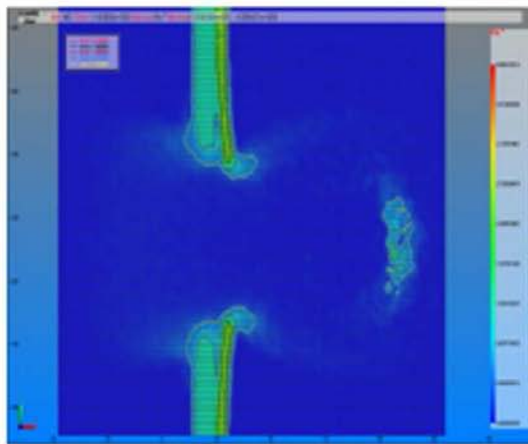
Расчеты второй серии проводились на современном многопроцессорном комплексе с использованием арифметических ускорителей.

На рис. 4, 5 (см. также цветную вкладку) представлена сравнительная картина поля плотностей для сечений различными плоскостями в случаях монокристаллического и поликристаллического заполнения областей частицами для задачи 1 (см. разд. 1) на момент рентгенографирования. Видно, что использование поликристалла позволило получить изотропную модель вещества, что привело к более качественному определению формы и размера полученных отверстий.

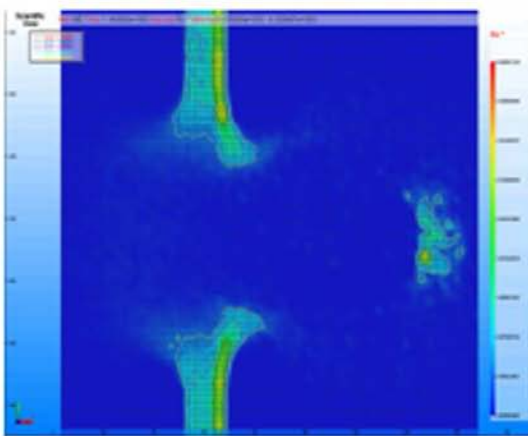
На рис. 6, 7 (см. также цветную вкладку) представлены продольные сечения на момент рентгенографирования соответственно для задач 2 и 3 (см. разд. 1) с использованием изотропной модели в сравнении с рентгенограммой.

В табл. 2—4 представлены значения размеров отверстий, полученные из расчетов методом КД, там же приведены экспериментальные значения. Наибольшее отличие от эксперимента имеют размеры отверстия в АМг6. В целом расчетные значения отличаются от экспериментальных и от данных, полученных по методикам SPH [1, 3, 7] и ТРЭК [2, 8], примерно на 20 %.

В табл. 2 для расчетов задачи 1 методом КД с монокристаллом указаны минимальный (по вертикали) и максимальный (по диагонали) размеры отверстий. Для задач 2 и 3 соответственно в табл. 3 и 4 приведены размеры овальных отверстий в текстолите и АМг6, а также кривизна овала.



a

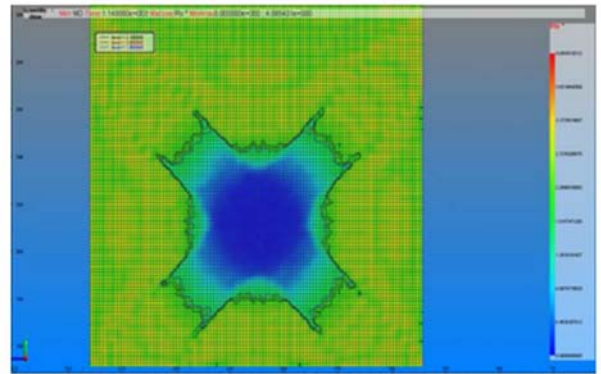


б

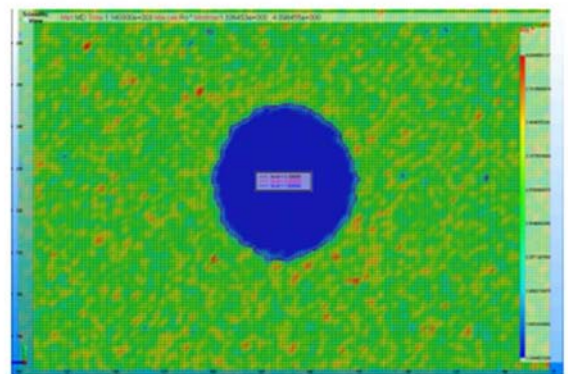


в

Рис. 4. Задача 1 на момент времени $t = 30$ мкс: *a* — монокристалл; *б* — поликристалл; *в* — рентгенограмма [1] (облако запреградных осколков)



a



б

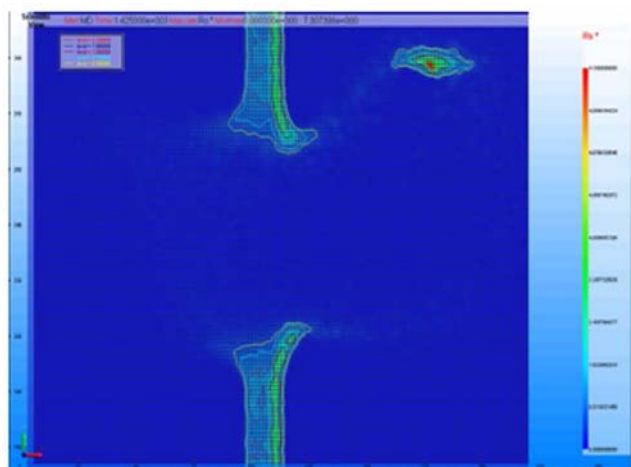
Рис. 5. Задача 1. Отверстие в АМг6 на момент времени $t = 30$ мкс: *a* — монокристалл; *б* — поликристалл

Таблица 2

Результаты расчета задачи 1, $t \sim 30$ мкс

Метод расчета	Размеры отверстия в текстолите, мм	Размеры отверстия в АМг6, мм	Размеры поврежденных текстолита, мм
SPH [1]	80	90	170
ТРЭЖ	62,5	53,3	107,7
КД, серия 1	66–126	50–83	53,2–126,9
КД, серия 2	55–90	65–95	90–126
КД, серия 3	≈ 83	≈ 90	≈ 100
Эксперимент [1]	≈ 70	≈ 100	≈ 140

Из таблиц и рисунков видно, что введение модели изотропного вещества позволяет однозначно проводить измерения полученных отверстий. Их форма стала соответствовать экспериментам, а для задачи 3 получено очень близкое количественное совпадение по сравнению с предыдущими расчетами.



а



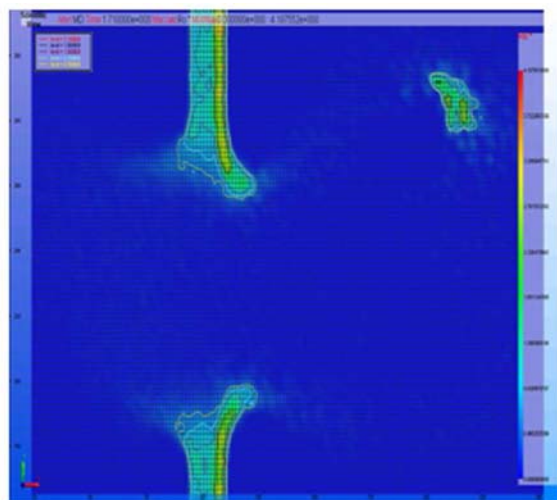
б

Рис. 6. Задача 2 на момент времени $t = 37,5$ мкс: *а* — расчет; *б* — рентгенограмма [1] (облако запреградных осколков)

Таблица 3

Результаты расчета задачи 2, $t \sim 37$ мкс

Метод расчета	Размеры отверстия в текстолите ($A \times B$, мм)	Отношение B/A	Размеры отверстия в Амгб ($C \times D$, мм)	Отношение D/C
SPH [1]	50×60	1,200	70×80	1,143
ТРЭЖ	$73,3 \times 73,7$	1,005	$72,3 \times 74,1$	1,025
КД, серия 1	$73,6 \times 82,1$	1,115	$78 \times 103,3$	1,324
КД, серия 2	60×80	1,333	70×100	1,428
КД, серия 3	90×92	1,022	94×101	1,074
Эксперимент [1]	$\approx 65 \times 75$	1,154	$\approx 75 \times 100$	1,333



а



б

Рис. 7. Задача 3 на момент времени $t = 45$ мкс: *а* — расчет; *б* — рентгенограмма [1] (облако запреградных осколков)

Таблица 4

Результаты расчета задачи 3, $t \sim 45$ мкс

Метод расчета	Размеры отверстия в текстолите ($A \times B$, мм)	Отношение B/A	Размеры отверстия в Амгб ($C \times D$, мм)	Отношение D/C
SPH [1]	70×80	1,143	110×120	1,091
ТРЭЖ	68×71	1,044	67×67	1,000
КД, серия 1	$65,3 \times 83,3$	1,276	81×110	1,358
КД, серия 2	65×90	1,384	80×112	1,4
КД, серия 3	91×93	1,022	99×108	1,091
Эксперимент [1]	$\approx 80 \times 90$	1,125	$\approx 100 \times 100$	1,100

5. Результаты расчетов методом КД пробивания семислойных преград

При моделировании опытов по пробиванию семислойных преград были проведены две серии расчетов:

- 1) с монокристаллическим заполнением областей частицами и использованием в качестве потенциала взаимодействия между частицами разных веществ потенциала наименее плотного из них;
- 2) с поликристаллическим заполнением областей частицами и использованием в качестве потенциала взаимодействия между частицами разных веществ потенциала, заданного таблицей.

На рис. 8, 9 (см. также цветную вкладку) представлены продольные сечения на момент рентгенографирования соответственно для задач 4, 5 (см. разд. 1) с использованием изотропной модели в сравнении с рентгенограммой.

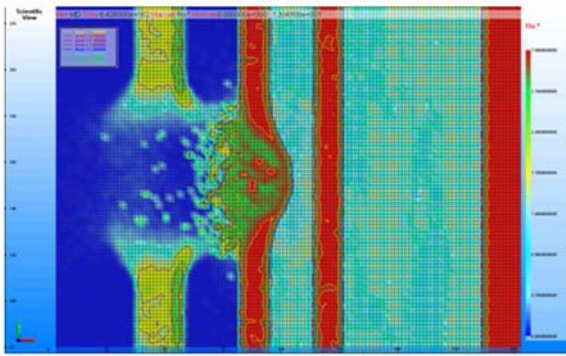
В табл. 5–7 представлены размеры отверстий, углублений стальных оболочек, а также зон деформации в парафине, полученные из расчетов методом КД задач 4–6 соответственно. Там же приведены экспериментальные значения.

Таблица 5
Результаты расчета задачи 4, $t \sim 17,2$ мкс

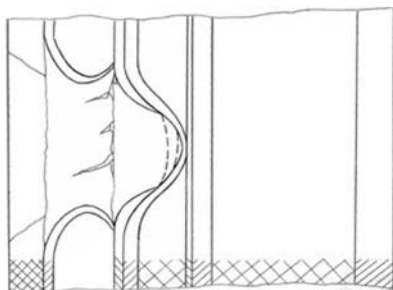
Метод расчета	Диаметр отверстия в Амгб,	Углубление стали 1 в парафине,	Зона деформации в парафине,
	мм	мм	мм
КД, серия 1	65	10	–
КД, серия 2	73	10,4	90 × 70
Эксперимент [7]	≈ 57	14	95 × 74

Таблица 6
Результаты расчета задачи 5, $t \sim 67,6$ мкс

Метод расчета	Диаметр отверстия в Амгб,	Диаметр отверстия в стали 1,	Углубление в парафине 2,	Зона протыкания парафина 2,
	мм	мм	мм	мм
КД, серия 1	110	40	10	–
КД, серия 2	121	73	10	137
Эксперимент [7]	≈ 86	≈ 55	11	90

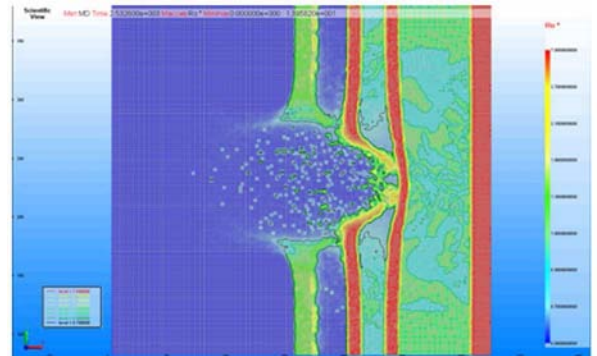


а

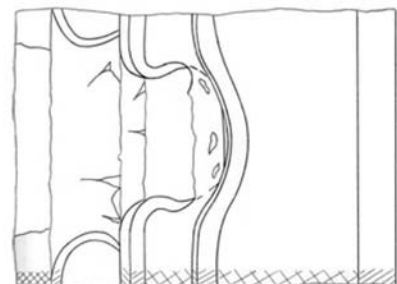


б

Рис. 8. Задача 4 на момент времени $t = 17,2$ мкс: а — расчет; б — рентгенограмма [7]



а



б

Рис. 9. Задача 5 на момент времени $t = 67,6$ мкс: а — расчет; б — рентгенограмма [7]

Таблица 7

Результаты расчета задачи 6, $t \sim 69,4$ мкс

Метод расчета	Диаметр отверстия в Амгб, мм	Диаметр отверстия в стали 1, мм	Углубление в парафине 2, мм	Зона проматывания парафина 2, мм
КД, серия 1	110	50	10	—
КД, серия 2	122	68	8	120
Эксперимент [7]	≈ 80	≈ 42	11	90

Из-за снижения прочностных свойств материалов во введенной модели (поликристалл) происходит увеличение размеров отверстий в Амгб и первом слое стали при больших временах на 10–12 % по сравнению с расчетами с монокристаллом. Отличие расчетных значений от экспериментальных в целом составило не более 40 %.

Размеры зоны деформации в парафине при больших временах (задачи 5, 6) отличаются от экспериментальных значений на 30–50 %, а при $t = 17,2$ мкс (задача 4) отличие составляет менее 6 %.

Заключение

В данной работе представлены результаты применения метода КД для расчета трехмерной задачи пробивания плоской многослойной преграды малым поражающим сферическим элементом. Расчеты проведены с помощью разрабатываемой в математическом отделении РФЯЦ-ВНИИЭФ *параллельной* программы MoDyS, в рамках которой реализован метод КД. Часть расчетов была проведена на гибридных вычислительных системах с использованием арифметических ускорителей.

В процессе исследований была использована и модель задания начальных данных в виде поликристаллического заполнения областей, которая позволяет моделировать изотропные материалы. Сравнительный анализ результатов показал, что применение изотропной модели материалов дает лучшее качественное согласие с результатами экспериментов, так как исключено влияние анизотропии материала, являющейся следствием идеальной упаковки частиц. Это позволило провести однозначные измерения доступных для сравнения с экспериментальными данными параметров. Однако из-за снижения прочностных

свойств материалов во введенной модели происходит больший рост отверстий по сравнению с экспериментом. Для правильного моделирования прочностных свойств материала требуется дальнейшая калибровка модели.

Расчеты показали, что метод КД, реализованный в MoDyS, позволяет проводить моделирование опытов по пробиванию плоских преград и дает не только качественное, но и неплохое количественное согласие с экспериментальными данными и результатами, полученными по другим расчетным методикам.

Авторы выражают благодарность Ю. Н. Бухареву, В. В. Башурову, В. А. Разуваеву, А. Л. Стадник, Ю. В. Янилкину, А. В. Патяниной за любезно предоставленные данные.

Список литературы

1. Бухарев Ю. Н., Терёшин А. И., Тверсков А. В., Башуров В. В. Численное моделирование по программе SPH процессов соударения сферических ударников с преградами со скоростями 1–6 км/с // Сб. докл. II науч. конф. Волжского регионального центра РАН "Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения". Саратов: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
2. Стадник А. Л., Тарасов В. И., Янилкин Ю. В. Эйлерова методика расчета трехмерных упругопластических течений многокомпонентной среды // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1995. Вып. 3. С. 52–60.
3. Башуров В. В., Патянина А. В. Численный метод сглаженных частиц в трехмерной постановке для моделирования физических процессов на примере задач столкновения и пробивания // Там же. 1999. Вып. 1. С. 26–38.
4. Анисимов А. Н., Грушин С. А., Воронин Б. Л., Копкин С. В., Ерофеев А. М., Дёмин Д. А., Дёмина М. А., Здорова М. В., Ветчинников М. В., Еричева Н. С., Коваленко Н. О., Крючков И. А., Кечин А. Г., Дегтярёв В. А., Урм В. Я. Комплекс программ молекулярно-динамического мо-

- делирования (MoDyS). Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010614974. http://www1.fips.ru/wps/wcm/connect/content_ru/ru.
5. Алейников А. Ю., Барабанов Р. А., Бутнев О. И., Быков А. Н., Веселов Р. А., Воронин Б. Л., Ганчук Н. С., Делов В. И., Ерофеев А. М., Пронин В. А., Рудько Н. М., Селезнев А. А., Скрыпник С. И. Программа МДП-СОВЦ решения задач молекулярной динамики на параллельных ЭВМ с распределенной памятью // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2001. Вып. 1. С. 3—13.
 6. Davydov I. A., Piskunov V. N., Veselov R. A., Voronin B. L., Demin D. A., Petrov A. M., Nevmerzhitskiy N. V., Sofronov V. N. Cluster dynamics method for simulation of dynamic processes of continuum mechanics // Comp. Materials Sci. 2010. Vol. 49. P. 32—36.
 7. Бухарев Ю. Н., Терёшин А. И., Тверсков А. В., Башуров В. В. Результаты решения некоторых задач высокоскоростного (3—10 км/с) соударения твердых частиц с преградами // Сб. докл. II науч. конф. по механике и прочности конструкций, посвященной 80-летию академика Е. А. Негины (г. Саров, 10—12 января 2001 г.). Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002.
 8. Стадник А. Л., Шанин А. А., Янилкин Ю. В. Эйлера методика ТРЭК для расчета трехмерных газодинамических течений многокомпонентной среды // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1994. Вып. 4. С. 71—78.

Статья поступила в редакцию 06.06.11.
