

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОМ КЛАСТЕРНОЙ ДИНАМИКИ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ОСКОЛОЧНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МНОГОСЛОЙНЫЕ ПРЕГРАДЫ

М. В. Здорова, С. В. Копкин, М. В. Ветчинников, И. А. Давыдов, Е. А. Пронин

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Во многих инженерных задачах возникает необходимость определения стойкостных характеристик некоторых конструкций к ударно-пробивному воздействию. В настоящее время возможности по экспериментальному моделированию высокоскоростных соударений (скорость удара $\sim 4-7$ км/с) весьма ограничены, во-первых, по экономическим причинам и, во-вторых, из-за фиксирования 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 конструкций.

Исследования высокоскоростного пробивания преград поражающими элементами ведутся в ИТМФ с 1990-х годов. Двумерные и трехмерные расчеты рассматриваемых ниже модельных экспериментов (или аналогичных им) проводились в самых разнообразных математических методиках [1, 2]. В данной работе по методике МД (Молекулярная Динамика) методом кластерной динамики (КД) [3] рассматриваются задачи высокоскоростного соударения стального шарика с многослойной преградой.

Цель работы (результат) – адаптация программы МД, отработка технологии проведения расчетов

задач пробивания методом КД, проведение трехмерных расчетов пробивания преград до времен экспериментального рентгенографирования, получение картины поврежденности и количественное сравнение полученных результатов с экспериментом и аналогичными расчетами по другим методикам.

1. Постановка и краткие результаты экспериментов

Эксперименты по обстрелу плоских преград были проведены в 1991 г. на легкогазовой установке, где поражающий элемент, в зависимости от его массы, может быть разогнан до скоростей ~ 7 км/с [4]. Преграды представляли собой набор плоских пластин размерами 300×300 мм. Поражающим элементом являлся стальной шарик массой 10 г и диаметром $\approx 13,5$ мм.

На рис. 1 приведены физические схемы опытов по пробитию двухслойных (серия № 1) и семислойных (серия № 2) преград.

Опишем начальные условия проведенных опытов и их краткие результаты (на время t_γ , отсчитываемое от момента касания преграды).

Опыт № 1: $d_{\text{текстолит}} = 10$ мм, угол $\alpha = 90^\circ$, $V_0 = 4,2$ км/с, $t_\gamma = 28,9$ мкс.

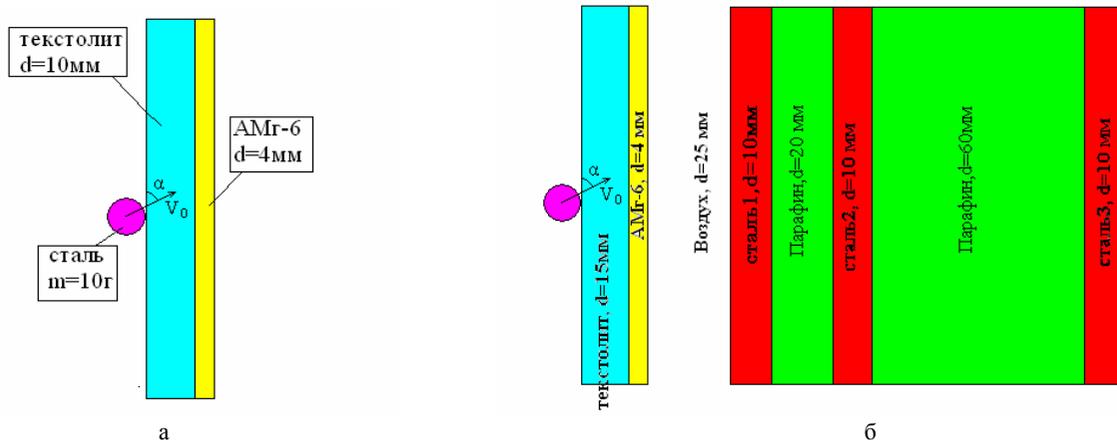


Рис. 1. Физическая схема опытов (а) – серия № 1; (б) – серия № 2

В текстолите пробито круглое отверстие диаметром ~ 70 мм, вокруг отверстия вспучивание и отслоение материала в зоне диаметром ~ 140 мм. В слое АМГ-6 пробито круглое отверстие, диаметр которого на свету ~ 100 мм, края отверстия отогнуты внутрь, по краю отверстия образовалось 9 лепестков высотой ~ 50 мм.

Опыт № 2: $d_{\text{текстолит}} = 10$ мм, угол $\alpha = 45^\circ$, $V_0 = 4,17$ км/с, $t_\gamma = 36,7$ мкс.

В текстолите пробито отверстие размерами $\sim 65 \times 75$ мм, в слое АМГ-6 – отверстие размерами $\sim 75 \times 100$ мм с развитыми по краям 9 лепестками высотой ~ 45 мм.

Опыт № 3: $d_{\text{текстолит}} = 10$ мм, угол $\alpha = 60^\circ$, $V_0 = 4,03$ км/с, $t_\gamma = 43,7$ мкс.

В текстолите пробито овальное отверстие размерами $\sim 80 \times 90$ мм, в слое АМГ-6 – отверстие размерами $\sim 100 \times 110$ мм с развитыми по краям 9 лепестками высотой ~ 50 мм.

На рис. 2 приведены рабочие рентгенограммы первой серии опытов.

Опыты № 4, 5: $d_{\text{текстолит}} = 15$ мм, угол $\alpha = 90^\circ$, $V_0 = 6,75$ км/с.

На момент $t_\gamma = 17,2$ мкс (опыт № 4): в слое АМГ-6 пробито отверстие диаметром ~ 57 мм, слои наружных оболочек углубились в парафин на 14 мм, размер зоны деформации в парафине $\sim 95 \times 74$ мм.

На момент $t_\gamma = 67,6$ мкс (опыт № 5): в слое АМГ-6 – отверстие диаметром ~ 86 мм, в первом слое стали – сквозная пробоина ~ 55 мм, углубление наружных оболочек в парафин ~ 11 мм, зона его промятия ~ 90 мм.

Опыт № 6: $d_{\text{текстолит}} = 15$ мм, угол $\alpha = 90^\circ$, $V_0 = 5,49$ км/с, $t_\gamma = 69,4$ мкс.

В слое АМГ-6 пробито отверстие диаметром ~ 80 мм, в первом слое стали – сквозная пробоина ~ 42 мм, слои наружных оболочек углубились в парафин на ~ 11 мм, зона промятия оболочек ~ 110 мм.

На рис. 3 приведены рабочие рентгенограммы этой серии опытов.

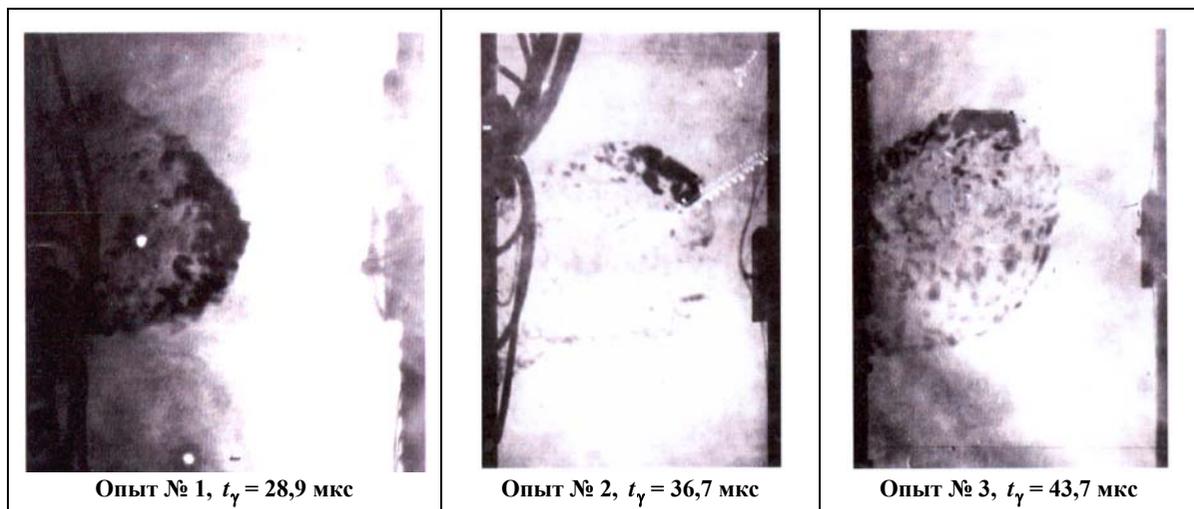


Рис. 2. Рентгенограммы опытов серии № 1 – облако запреградных осколков

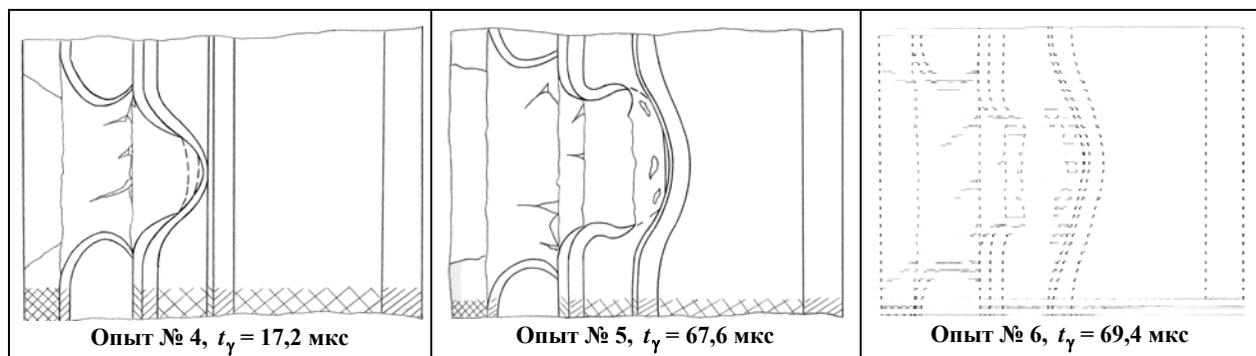


Рис. 3. Экспериментальные рентгенограммы второй серии опытов

2. Постановка задачи по методу КД

Любое моделирование подразумевает переход к идеализированному представлению исследуемого процесса. В методе кластерной динамики постановка задачи выглядит следующим образом.

Начальная область моделирования задается как прямоугольный параллелепипед. Внутри области размещаются модельные объекты – фигуры предметов, участвующих в процессе. Под фигурами понимаются объекты, состоящие из однородного материала, которые заполняются микрочастицами. Микрочастицы – это материальные точки, имеющие свойства выделенного объема материала: массу и энергию. Микрочастицы размещаются внутри объема фигуры по определенному закону. Рассматривается парное взаимодействие микрочастиц. В данном случае все фигуры заполняются микрочастицами, которые находятся в равновесном положении на расстоянии $r_0 = 0,5$ мм от ближайших соседей в узлах гранцентрированной кубической решетки с периодом $a_0 = 0,707$ мм.

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

В программах, реализующих метод КД, предложено использовать двухчастичный потенциал, соответствующий УРС Ми-Грюнайзена. В этом УРС 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 $\delta = \rho/\rho_0$, и c_0 , n – редактируемые параметры УРСа.

Зависимость энергии от расстояния между кластерами для трехмерного случая (для плотнейших (гексагональной и гранцентрированной кубической) упаковок) определяется выражением

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

Размерная константа для перехода от (1) к зависимости энергии от расстояния между кластерами

для данного типа упаковок есть $\frac{\sqrt{2}\rho_0 r_0^3}{12}$, с учетом

того, что $\delta = \left(\frac{r_0}{r} \right)^3$. Массы единичных кластеров для рассмотренных трехмерных упаковок определяются следующим образом: $m_{3D} = \frac{\rho_0 r_0^3}{\sqrt{2}}$.

Исходя из представленных выше соотношений, можно преобразовать произвольную зависимость холодной энергии от степени сжатия в зависимость энергии парного взаимодействия от расстояния между кластерами. Использование соотношения (2) УРСы веществ, заданные табл. 1, были преобразованы в потенциалы взаимодействия кластеров. При этом, для веществ использованы следующие значения радиусов обрезания (R_c) потенциалов взаимодействия: для алюминия $R_c = 1,015r_0$; для стали (ударник) $R_c = 1,025r_0$; для текстолита $R_c = 1,02r_0$, для парафина $R_c = 1,02r_0$, для стали (слои в мишени) $R_c = 1,02r_0$. Указанные начальные параметры R_c подбирались таким образом, чтобы воспроизводилась величина удельной энергии разрушения для соответствующих материалов.

3. Технология проведения расчетов

Для задач пробития двухслойных преград в файле начальных данных программы МД задается три трехмерные области: куб (из которого вырезается шар) и две пластины (30×30 см). Расстояние между частицами $r_0 = 500$ мкм, упаковка частиц – ГЦК (постоянная решетки $a_0 = 707,1$ мкм). Массы частиц: $m_{Fe} = 6,894 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{Тех} = 1,193 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{Al} = 2,386 \cdot 10^{-7}$ кг. Задача содержит 31 028 379 кластеров (частиц).

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

Таблица 1

Значения параметров для УРС Ми-Грюнайзена и УП-параметры

Вещество	ρ_0 , г/см ³	c_0 , км/с	n	$\gamma = \Gamma + 1$	$P_{отк}$, ГПа	Υ , ГПа	ν
Fe (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
Al	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

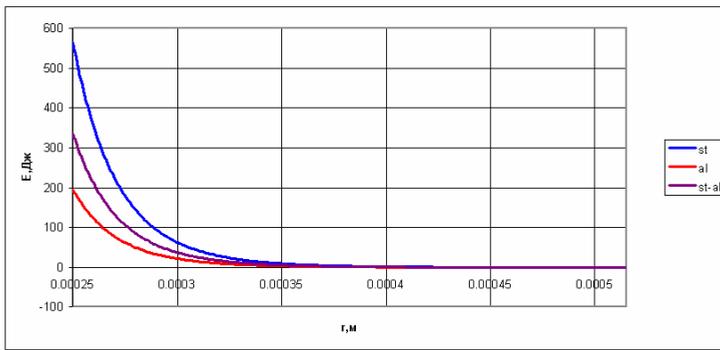


Рис. 4. Потенциалы взаимодействия частиц из различных материалов (сталь – сталь, алюминий – алюминий, алюминий – сталь)

В расчетах использовался потенциал межчастичного взаимодействия Ми-Грюнайзена. Взаимодействие между частицами разных веществ описывалось либо потенциалом наиболее «мягкого» из них, либо табличными потенциалами.

Для задания потенциала взаимодействия частиц из разных материалов в табличном виде использовался алгоритм и программа, разработанные в отделе 08. Алгоритм построения таких потенциалов основывается на использовании условия равновесия сил, действующих на частицы при сжатии. Результатом работы алгоритма являются текстовые файлы, содержащие таблицы значений энергии и сил для заданного спектра значений расстояния между кластерами. Пример построения потенциалов взаимодействия частиц различных материалов показан на рис. 4.

Анализ результатов расчетов показал, что основная проблема при моделировании макроскопического поведения твердых тел методом кластерной динамики 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 монокристаллов. Этот метод позволяет создать изотропные модели материалов, удовлетворяющие широкому спектру механических, термодинамических и физических свойств. Поскольку метод построения поликристалла был внедрен в МД, то 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 был выбран ~ 3 мкм, и соответственно, в слое текстолита было задано 35000 зерен, а в слое алюминия 18000 зерен. Поскольку поликристалл менее плотен, чем идеальная ГЦК структура, то массы частиц для текстолита и алюминия были скорректированы: $m_{Fe} = 6,894 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{Tex} = 1,2427 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{Al} = 3,2782 \cdot 10^{-7}$ кг. Задача содержит 22 975 001 кластеров (частиц). Взаимодействие между частицами

разных веществ описывалось табличными потенциалами. В остальном постановка задачи такая же.

Для задач пробития семислойных преград в файле начальных данных задается 8 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: $m_{Fe} = 6,894 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{Tex} = 1,193 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{Al} = 2,386 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{сталь1} = 6,894 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{парафин} = 7,954 \cdot 10^{-8}$ кг. Задача содержит 144 176 958 кластеров (частиц).

Граничные условия по всем граням – «свободная поверхность». Начальная температура 0 К. В расчетах использовался потенциал межчастичного взаимодействия Ми-Грюнайзена. Взаимодействие между частицами разных веществ описывалось потенциалом, соответствующим наиболее «мягкому» из них. Частицам ударника в начальный момент приписывалась скорость в направлении, определяемом углом пробития α .

Так же, как и для задач пробития двухслойной преграды, была проведена серия расчетов с использованием поликристаллического заполнения областей частицами. А именно, для частиц ударника, парафина и третьего слоя стали упаковка частиц – ГЦК (постоянная решетки $a_0 = 707,1$ мкм), для остальных слоев – поликристалл, состоящий из ГЦК зерен, линейный размер одного зерна ~ 3 мкм. Таким образом, число зерен составило 50000 в слое из текстолита, 12000 – в слое из алюминия и по 35000 – в первом и втором слоях стали.

Массы частиц также были скорректированы: $m_{Fe} = 6,894 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{Tex} = 1,652 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{Al} = 2,95 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{сталь1} = 9,56 \cdot 10^{-7}$ кг, $m_{парафин} = 7,954 \cdot 10^{-8}$ кг. Задача содержит 130 794 042 кластеров (частиц).

Граничные условия по всем граням – «свободная поверхность». Начальная температура 0 К. Потенциал межчастичного взаимодействия – Ми-Грюнайзена. Взаимодействие между частицами разных веществ описывалось табличными потенциалами.

4. Результаты расчетов пробития двухслойных преград по КД

При моделировании пробития двухслойных преграды было проведено три серии расчетов:

1. расчеты с монокристаллическим заполнением областей частицами и использованием в качестве потенциала взаимодействия между частицами разных веществ потенциала наиболее «мягкого» из них;

2. расчеты с монокристаллическим заполнением областей частицами и использованием табличного потенциала взаимодействия между частицами разных веществ;

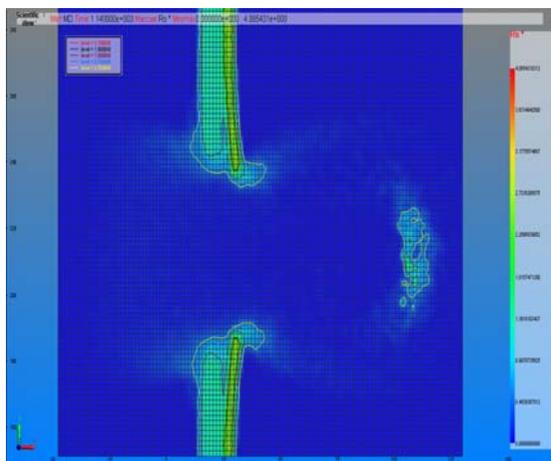
3. расчеты с поликристаллическим заполнением областей частицами и использованием табличного потенциала взаимодействия между частицами разных веществ.

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

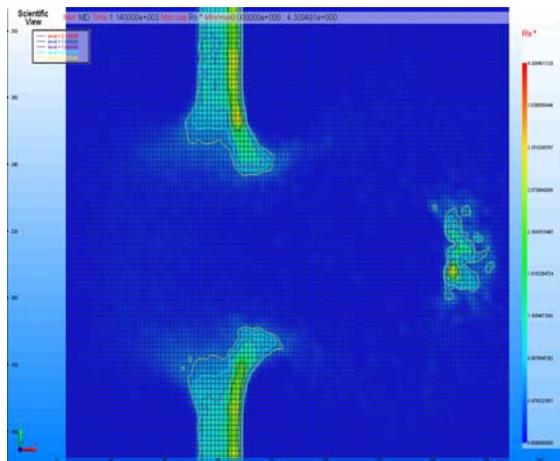
На рис. 5–7 представлена сравнительная картина поля плотностей для сечений различными плоскостями для монокристаллического и поликристаллического заполнения областей частицами для опыта № 1 на момент рентгенографирования.

Видно, что использование поликристалла позволило получить изотропную модель вещества, что привело к более качественному определению формы и размера полученных отверстий.

На рис. 8 представлены продольные сечения для опытов № 2 и 3 с использованием изотропной модели на момент рентгенографирования.

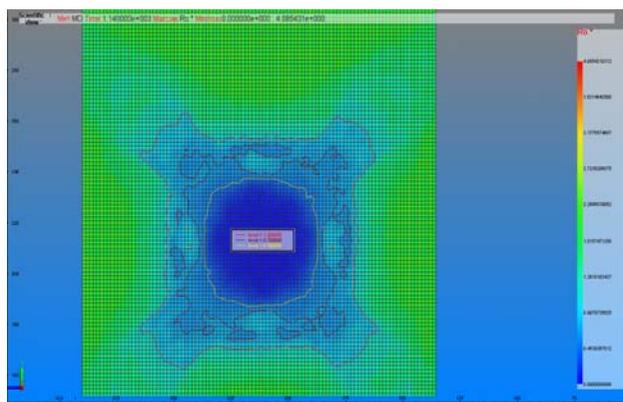


а

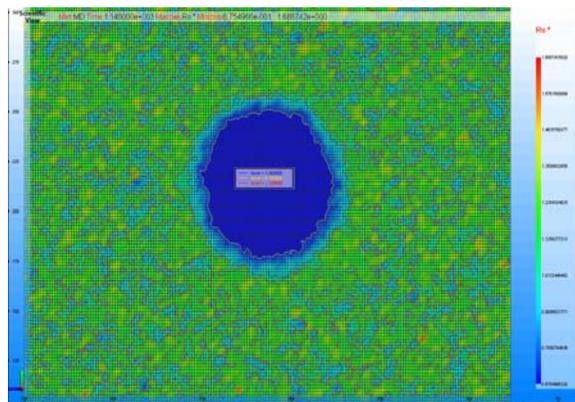


б

Рис. 5. Опыт № 1, поле плотностей в сечении плоскостью XY, $Z = 150$ мм, с изолиниями уровня плотности, $t = 30$ мкс: а – монокристалл, б – поликристалл

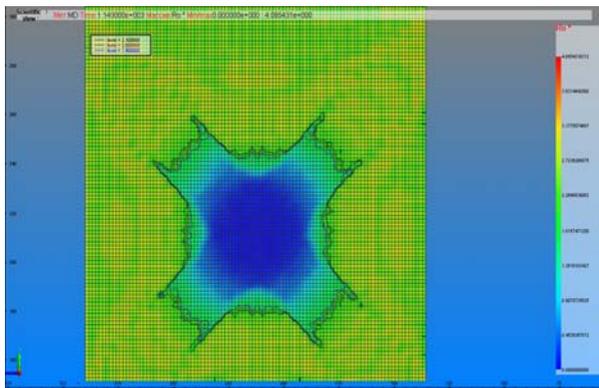


а

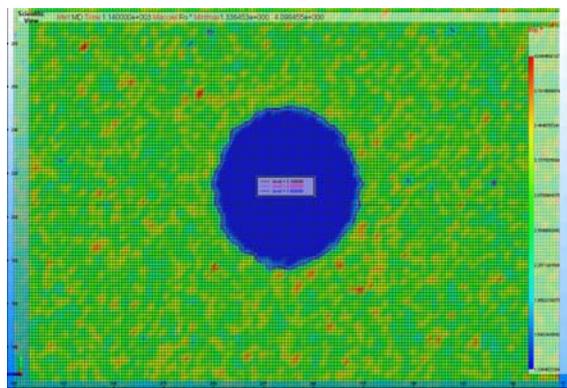


б

Рис. 6. Опыт № 1, поле плотностей в сечении плоскостью, характеризующей отверстие в текстолите с изолиниями уровня плотности на момент времени $t = 30$ мкс: а – монокристалл, б – поликристалл

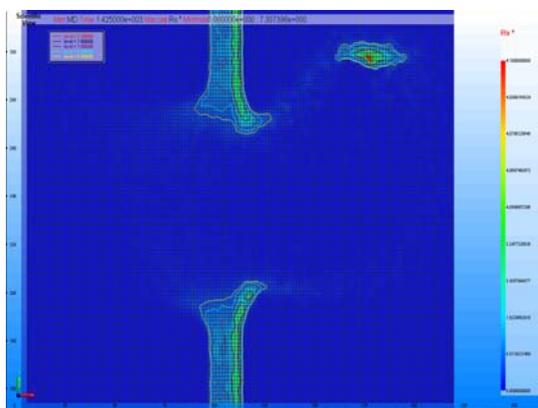


а

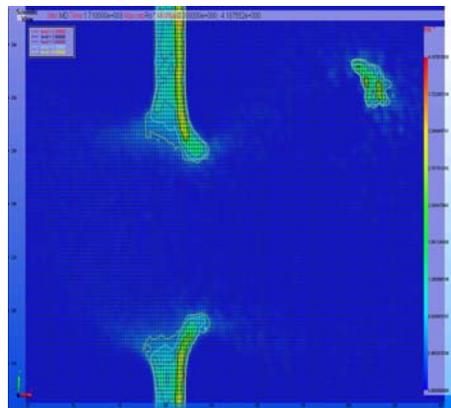


б

Рис. 7. Опыт № 1 поле плотностей в сечении плоскостью, характеризующей отверстие в АМГ-6 с изолиниями уровня плотности на момент времени $t = 30$ мкс: а – монокристалл, б – поликристалл



а



б

Рис. 8. Поле плотностей в сечении плоскостью XY, $Z = 150$ мм, с изолиниями уровня плотности для поликристаллического заполнения областей: а – опыт № 2 на момент времени $t = 37,5$ мкс; б – опыт № 3 на момент времени $t = 45$ мкс

В табл. 2–4 представлены значения размеров отверстий, полученные из расчетов по КД, там же приведены экспериментальные значения. Наибольшее отличие от эксперимента имеет размер отверстия в АМГ-6. В целом, расчетные значения отличаются от экспериментальных [4] и от данных, полученных по методикам SPH [1] и ТРЭК [2], [5], примерно на 20 %.

В табл. 2 для расчетов КД с монокристаллом опыта № 1 указаны минимальный (по вертикали) и максимальный (по диагонали) размеры отверстий.

Для опытов № 2 и № 3 соответственно в табл. 3 и 4 приведены размеры овальных отверстий в текстолите и АМГ-6, а также величина кривизны овала.

Из величин, приведенных в таблицах, и на рисунках видно, что введение модели изотропного вещества позволяет однозначно проводить измерения полученных отверстий. Их форма стала соответствовать экспериментам, а для опыта № 3 получено очень близкое количественное совпадение по сравнению с предыдущими расчетами.

Таблица 2

Результаты расчета опыта № 1 ($t \sim 30$ мкс)

	Диаметр отверстия в текстолите (мм)	Диаметр отверстия в АМГ-6 (мм)	Диаметр поврежденных текстолита (мм)
Эксперимент	≈ 70	≈ 100	≈ 140
SPH	80	90	170
ТРЭК	62,5	53,3	107,7
КД (монокр.)	66...126	50...83	53,2...126,9
КД (монокр.+табл. пот.)	55...90	65...95	90...126
КД(поликр.+табл. пот.)	≈ 83	≈ 90	≈ 100

Результаты расчета опыта № 2 ($t \sim 37$ мкс)

	Диаметр отверстия в текстолите (A*B, мм)	Отношение B/A	Диаметр отверстия в АМг-6 (C*D, мм)	Отношение D/C
Эксперимент	$\approx 65 * 75$	1,154	$\approx 75 * 100$	1,333
SPH	50 * 60	1,200	70 * 80	1,143
ТРЭК	73,3 * 73,7	1,005	72,3 * 74,1	1,025
КД (монокр.)	73,6 * 82,1	1,115	78 * 103,3	1,324
КД (монокр. + табл. пот.)	60*80	1,333	70*100	1,428
КД(поликр.+ табл. пот.)	90*92	1,022	94*101	1,074

Таблица 4

Результаты расчета опыта № 3 ($t \sim 45$ мкс)

	Диаметр отверстия в текстолите (A*B, мм)	Отношение B/A	Диаметр отверстия в АМг-6 (C*D, мм)	Отношение D/C
Эксперимент	$\approx 80 * 90$	1,125	$\approx 100 * 110$	1,100
SPH	70 * 80	1,143	110 * 120	1,091
ТРЭК	68 * 71	1,044	67 * 67	1,000
КД (монокр.)	65,3 * 83,3	1,276	81 * 110	1,358
КД (монокр. + табл. пот.)	65*90	1,384	80*112	1,4
КД(поликр.+ табл. пот.)	91*93	1,022	99*108	1,091

5. Результаты расчетов пробития семислойных преград по КД

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

1. расчеты с монокристаллическим заполнением областей частицами и использованием в качестве потенциала взаимодействия между частицами разных веществ потенциала наиболее «мягкого» из них;

2. расчеты с поликристаллическим заполнением областей частицами и использованием в качестве потенциала взаимодействия между частицами разных веществ потенциала, заданного таблицей.

В табл. 5–7 представлены значения размеров отверстий, величины углублений стальных оболочек,

размеры зоны деформации в парафине, полученные из расчетов по КД опытов № 4, 5 и 6 соответственно. Там же приведены экспериментальные значения.

Из-за снижения прочностных свойств материалов во введенной модели (поликристалл) происходит увеличение размеров отверстий в АМг-6 и первом слое стали на 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 на большие времена (опыты № 5, 6) отличаются от экспериментальных значений на 30–50 %, а на время 17,2 мкс (опыт № 4) составляет менее 6 %.

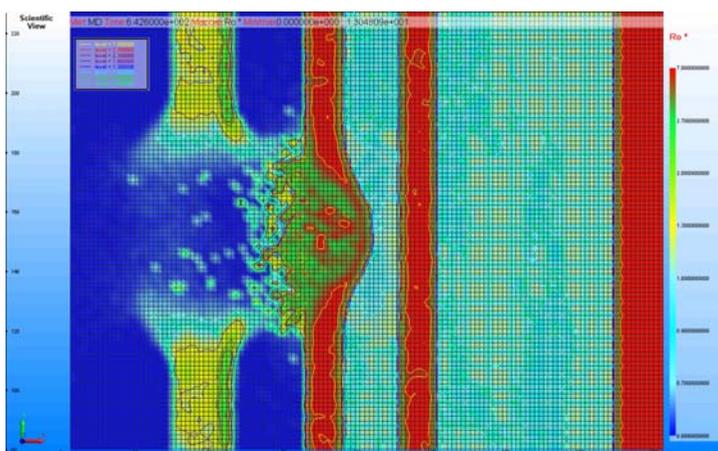


Рис. 9. Опыт № 4 (поликристаллическое заполнение областей), поле плотностей в сечении плоскостью XY, $Z = 150$ мм с изолиниями уровня плотности, $t = 17,2$ мкс

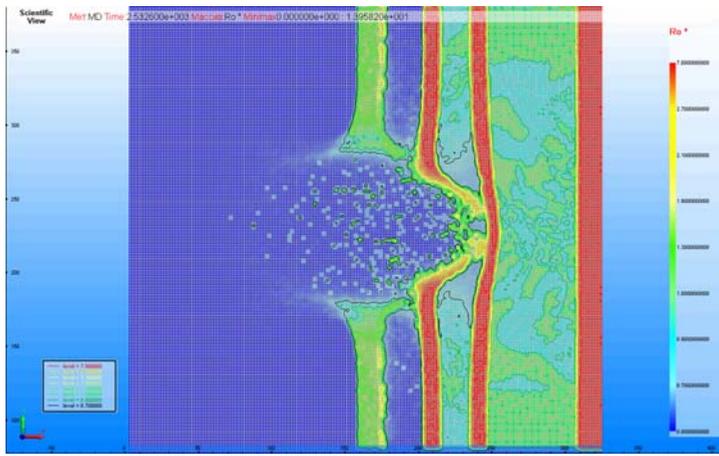
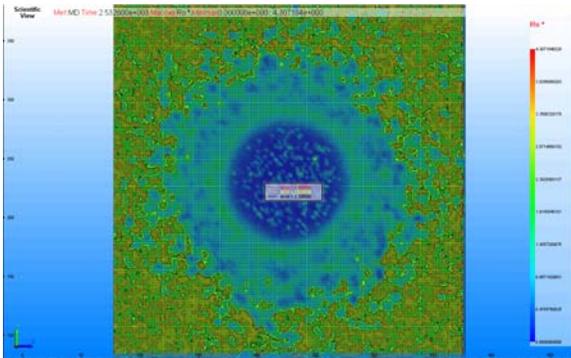
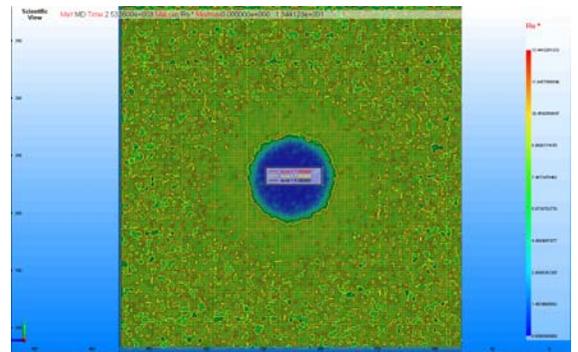


Рис. 10. Опыт № 5 (поликристаллическое заполнение областей), поле плотностей в сечении плоскостью XY, Z = 150 мм с изолиниями уровня плотности, $t = 67,6$ мкс



а



б

Рис. 11. Опыт № 5 (поликристаллическое заполнение областей), поле плотностей в сечении плоскостями, характеризующими в АМг-6 (а) и первом слое стали (б) с изолиниями уровня плотности, $t = 67,6$ мкс

Таблица 5

Результаты расчета опыта № 4 ($t \sim 17,2$ мкс)

	Диаметр отверстия в АМг-6 (мм)	Углубление стали 1 в парафин (мм)	Зона деформации в парафине (мм)
Эксперимент	≈ 57	14	95*74
КД (монокристалл)	65	10	–
КД(поликристалл + табл. пот.)	73	10,4	90*70

Таблица 6

Результаты расчета опыта № 5 ($t \sim 67,6$ мкс)

	Диаметр отверстия в АМг-6 (мм)	Диаметр отверстия в стали 1 (мм)	Углубление стали 2 в парафин 2 (мм)	Зона промятия парафина 2 (мм)
Эксперимент	≈ 86	≈ 55	11	90
КД (монокристалл)	110	40	10	–
КД(поликристалл + табл. пот.)	121	73	10	137

Таблица 7

Результаты расчета опыта № 6 ($t \sim 69,4$ мкс)

	Диаметр отверстия в АМг-6 (мм)	Диаметр отверстия в стали 1 (мм)	Углубление стали 2 в парафин 2 (мм)	Зона промятия парафина 2 (мм)
Эксперимент	≈ 80	≈ 42	11	90
КД (монокристалл)	110	50	10	–
КД(поликристалл + табл. пот.)	122	68	8	120

Заклучение

В данной работе представлены результаты применения метода кластерной динамики для расчета трехмерного процесса пробивания плоской многослойной преграды малым поражающим сферическим элементом. Расчеты проведены с помощью разрабатываемой в математическом отделении РФЯЦ ВНИИЭФ параллельной программы «Молекулярная Динамика» (МД), 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 в результате применения изотропной модели материалов получено 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 повышения прочностных свойств материала требуется дальнейшая калибровка модели.

Расчеты показали, что метод КД, реализованный в МД, позволяет проводить моделирование опытов по пробиванию плоских преград, и дает не только качественное, но и неплохое количественное согласие с экспериментальными данными и другими расчетными методиками.

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

Литература

1. Бухарев Ю. Н., Терешин 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. докладов II-й научной конференции Волжского регионального центра РАН «Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
2. Стадник А. Л., Тарасов В. И., Янилкин Ю. В. Эйлерова методика расчета трехмерных упругопластических течений многокомпонентной среды // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1995. Вып. 3. С. 52–60.
3. Давыдов И. А., Пискунов В. Н., Веселов Р. А., Воронин Б. Л., Демин Д. А., Руденко В. В., Янилкин Ю. В., Софронов В. Н. Метод кластерной динамики для моделирования динамических процессов механики сплошной среды // Доклад на конференции ММПСН-2009. М.: МИФИ. 2009.
4. Бухарев Ю. Н., Терешин А. И., Тверсков А. В., Башуров В. В. Результаты решения некоторых задач высокоскоростного (3–10 км/с) соударения твердых частиц с преградами // Сб. докладов II-й научной конференции по механике и прочности конструкций, посвященной 80-летию академика Е. А. Негина (г. Саров, 10–12 января 2001 г.). Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002.
5. Стадник А. Л., Шанин А. А., Янилкин Ю. В. Эйлерова методика ТРЭК для расчета трехмерных газодинамических течений многокомпонентной среды // ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. 1994. Вып. 4. С. 71–78.