

На правах рукописи



РУБЦОВА ВАРВАРА ПЕТРОВНА

**ДВУМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ФИЗИКИ ВЗРЫВА И УДАРА
МЕТОДОМ SPH НА ОСНОВЕ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РИМАНА**

**05.13.18. Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ**

Автореферат

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

МОСКВА, 2001

Работа выполнена в Московском Государственном Техническом
Университете им. Н.Э. Баумана

Научный руководитель:

д. т. н., проф. Орленко Л.П.

Официальные оппоненты:

д. ф.-м. н. Дмитриенко Ю.И.

к. ф.-м. н. Паршиков А.Н.

Ведущая организация:

Научно-исследовательский
машиностроительный институт

2002 г. в 11³⁰ час. на заседании
15 при Московском
те имени Н.Э. Баумана по
15.

библиотеке МГТУ.

им направить по адресу:

1545824

==

Волков И.К.

Диссертация посвящена численному моделированию методом SPH (Smooth Particle Hydrodynamics – метод сглаженных частиц) на основе решения задачи Римана процессов физики взрыва и удара, таких как: высокоскоростное метание тел, кумуляция, метание осесимметричных оболочек продуктами детонации и проникание тел с большой скоростью в преграды.

Актуальность темы. Активное использование методов математического моделирования при разработке новых конструкций позволяет резко сократить сроки научных и конструкторских разработок. В тех случаях, когда реальный эксперимент трудно осуществим и информация о процессе носит нечеткий, косвенный характер, математическое моделирование служит, практически, единственным инструментом исследования. Процессы физики взрыва и удара связаны с совокупностью сложных явлений, включающих в себя разнообразные физические процессы, как, например, детонация взрывчатых веществ (ВВ), распространение сильных ударных волн, разрушение материалов и другие, связанные в первую очередь с большим выделением энергии, высокими давлениями и большими деформациями. Подбор адекватной математической модели позволит уточнить физику происходящих явлений и заменить часть экспериментов моделированием.

Целью работы явилась разработка:

- математической модели для расчета процессов физики взрыва и удара по алгоритму SPH на основе решения задачи Римана;
- программного кода для прямого моделирования процессов физики взрыва и удара.

Научная новизна работы заключается:

- в адаптации метода SPH на основе решения задачи Римана для задач физики взрыва путем введения в алгоритм методики расчета детонации ВВ и подбора уравнения состояния для продуктов детонации (ПД);
- в решении задач высокоскоростного метания тел, кумуляции, метания осесимметричных оболочек продуктами детонации с использованием разработанной программы методом прямого вычислительного эксперимента (т.е. сквозным счетом) без каких-либо дополнительных искусственных ограничений кинематического и расчетного характера, свойственных сеточным методам.

На защиту выносятся следующие положения:

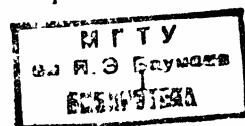
процессы детонации конденсированных ВВ и связанные с ними процессы ударно-волнового нагружения продуктами взрыва твердых тел адекватно моделируются методом SPH на основе решения

15755227



1575827

Рубцова В.П. Двумерное чис



задачи Римана;

- применение уравнения состояния Джона-Вилкинса-Ли для продуктов детонации допустимо в комбинации с акустическим решением задачи распада разрыва и позволяет методом SPH на основе решения задачи Римана получать надежные результаты при решении широкого круга задач взрывного и ударного нагружения.

Достоверность результатов обусловлена корректной постановкой задачи, применением математически обоснованных методов ее решения, сравнением результатов с экспериментальными данными.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на:

- XXVI Научно-технической конференции «Проектирование систем» - МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва), 1999;
- XXVIII Научно-технической конференции «Проектирование систем» - МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва), 2001.

По теме диссертации опубликовано 4 статьи и одно учебное пособие.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы. Текст изложен на 82 машинописных страницах, включая 38 рисунков, 9 таблиц и список литературы из 45 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной тематики исследования. Сформулирована цель работы и ее научная новизна. Дана краткая аннотация по главам.

В первой главе проанализированы основные трудности, возникающие при моделировании процессов физики взрыва и удара, и выбран подходящий численный метод.

В п. 1.1 отмечено, что строгое решение задач физики взрыва и удара требует интегрирования системы дифференциальных уравнений в частных производных. В общем случае это нелинейная система смешанного типа с подвижными границами – граничные условия задачи ставятся на поверхностях или линиях, которые сами определяются в процессе вычислений. Аналитическое решение задач удастся получить только в самых простейших случаях. Тогда как с прикладной точки зрения наряду с аналитической формой точного решения задачи не меньшее значение имеет получение численных, хотя и приближенных, значений искомых величин.

Для получения численного решения задачи необходимо иметь:

- физическую модель изучаемого процесса,
- математическую модель изучаемого процесса,
- численный метод решения соответствующей математической модели,
- алгоритм, построенный на базе этого метода,
- программу для ЭВМ, соответствующую такому алгоритму.

Все перечисленные задачи решались во второй и третьей главах.

В п. 1.2 проведен анализ существующих методов решения рассматриваемого класса задач и обоснован выбор метода SPH на основе решения задачи Римана.

Применение лагранжевой системы координат и лагранжевой аппроксимации (например, метод Уилкинса) целесообразно в случае отсутствия областей сильно развитых деформаций или малости этих областей. Эйлерово представление (например, метод Лакса-Вендроффа) наиболее подходит для расчета течения однородной среды при наличии значительных областей больших деформаций. Основные сложности эйлеровой сетки связаны с расчетом параметров на свободных поверхностях и границах раздела сред. Комбинация эйлерова и лагранжевого представлений (например, метод «частиц в ячейках», метод «крупных частиц») успешно применяется для исследования процессов течения и формирования многокомпонентных сред при отсуствии областей сильного разряжения.

Предложенный А.Н. Паршиковым метод SPH на основе решения задачи Римана существенно отличается от перечисленных методов тем, что он является чисто лагранжевым и при этом не имеет регулярной вычислительной сетки. Введение, для расчета взаимодействия сглаженных частиц в SPH-среде, решения Римана задачи распада разрыва позволяет обеспечить высокую точность и монотонность решения вблизи контактной границы раздела различных сред без использования искусственной вязкости. Таким образом, метод позволяет сквозным счетом решать задачи течения с контактными границами при наличии сильных деформаций.

Во второй главе представлена используемая упругопластическая модель задач физики взрыва и удара, обоснован выбор уравнений состояния для твердых тел и ПД, описана используемая модель детонации ВВ, приведены начальные и граничные условия.

В п. 2.1 приведена система уравнений двумерных упругопластических течений в цилиндрической системе координат z, r (z - ось симметрии):

- уравнение движения

$$\rho \frac{dU_r}{dt} = \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta}}{r},$$

$$\rho \frac{dU_z}{dt} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \sigma_{rz}}{\partial r} + \frac{\sigma_{rz}}{r},$$

где ρ - плотность; U_r - скорость в направлении r ; U_z - скорость в направлении z ; t - текущее время; $\sigma_{rr} = S_{rr} - P$, $\sigma_{zz} = S_{zz} - P$, $\sigma_{\theta\theta} = S_{\theta\theta} - P$, $\sigma_{rz} = S_{rz}$ - компоненты тензора напряжений; S_{zz} , S_{rr} , S_{rz} , $S_{\theta\theta}$ - компоненты девиатора напряжений; P - гидростатическое давление;

- уравнение неразрывности

$$\frac{d\rho}{dt} + \rho \left(\frac{\partial U_r}{\partial r} + \frac{\partial U_z}{\partial z} + \frac{U_r}{r} \right) = 0,$$

- уравнение энергии

$$\frac{dE}{dt} = -P \frac{dV}{dt} + S_{rr} \left(\frac{\partial U_r}{\partial r} - \frac{U_r}{r} \right) + S_{zz} \left(\frac{\partial U_z}{\partial z} - \frac{U_z}{r} \right) + S_{rz} \left(\frac{\partial U_r}{\partial z} - \frac{\partial U_z}{\partial r} \right),$$

где $V = \frac{1}{\rho}$ - относительный объем; E - внутренняя энергия на единицу

начальной массы;

- компоненты девиатора скоростей напряжений

$$\begin{aligned} S_{rr}^J &= 2\mu \left(e_{rr} - \frac{1}{3V} \frac{dV}{dt} \right) & S_{rr}^J &= \frac{\partial S_{rr}}{\partial t} + \omega S_{rz}, \\ S_{zz}^J &= 2\mu \left(e_{zz} - \frac{1}{3V} \frac{dV}{dt} \right) & S_{zz}^J &= \frac{\partial S_{zz}}{\partial t} - \omega S_{rz}, \\ S_{rz}^J &= 2\mu e_{rz} & S_{rz}^J &= \frac{\partial S_{rz}}{\partial t} - \frac{\omega}{2} (S_{rr} - S_{zz}), \\ S_{\theta\theta}^J &= 2\mu \left(e_{\theta\theta} - \frac{1}{3V} \frac{dV}{dt} \right) & S_{\theta\theta}^J &= \frac{\partial S_{\theta\theta}}{\partial t}, \end{aligned}$$

где $\omega = \left(\frac{\partial U_z}{\partial z} - \frac{\partial U_r}{\partial r} \right)$ - скорость вращения; μ - модуль сдвига;

- скорости деформации

$$e_z = \frac{\partial u_z}{\partial z},$$

$$e_r = \frac{\partial u_r}{\partial r},$$

$$e_{rz} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right),$$

$$e_{\theta\theta} = \left(\frac{dV}{Vdt} - (e_r + e_z) \right);$$

- уравнение состояния в общем виде

$$P = P(\rho, E).$$

В п. 2.2. обоснован выбор следующих уравнений состояния:

- для твердых тел в форме Ми-Грюнайзена:

$$P = \frac{B(\rho - \rho_0)}{\rho_0} + \gamma \rho,$$

где B – коэффициент; ρ_0 – начальная плотность материала; γ – постоянная Грюнайзена;

- для продуктов детонации в форме Jones-Wilkins-Lee (Джон-Вилкинс-Ли):

$$P = A \left(1 - \frac{w}{R_1 \bar{V}} \right) e^{-R_1 \bar{V}} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 \bar{V}} \right) e^{-R_2 \bar{V}} + \frac{wE}{\bar{V}},$$

где A, B, w, R_1, R_2 – коэффициенты; $\bar{V} = \frac{V}{V_0}$ – отношение объема ПД к

объему непродетонировавшего ВВ.

Для описания перехода из упругого состояния в пластическое используется условие текучести Мизеса:

$$(S_{rr}^2 + S_{rz}^2 + S_{zz}^2 + S_{\theta\theta}^2) - \frac{2}{3} (Y)^2 = 0,$$

где Y – динамический предел текучести материала, зависящий от скорости деформации.

В п. 2.2. подробно описана выбранная модель расчета детонации.

В случае отсутствия сходящихся детонационных волн, является возможным применить достаточно простую модель детонации с постоянной скоростью детонации D . Таким образом, в каждый момент времени t возможно геометрически определить поверхность π , которая является фронтом детонационной волны.

Для точечного инициирования – это сфера с радиусом r_D (см.

рис. 1), который определяется как

$$r_D(t) = D \cdot t = \sqrt{r(t) + z(t)}$$

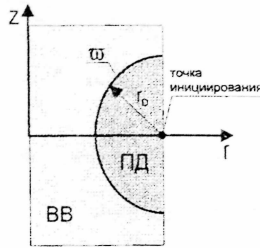


Рис. 1. Схема расчета детонационного фронта для точечного инициирования

В ряде взрывных схем используется плосковолновой генератор, который позволяет создать плоский фронт детонационной волны (см. рис.2). При расчете таких схем положение плоскости детонации ϖ , определяется как

$$r_D(t) = D \cdot t = r(t)$$

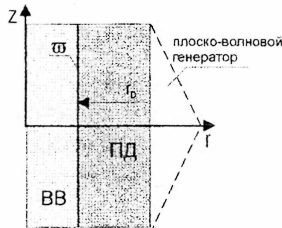


Рис. 2. Схема расчета детонационного фронта для плоской волны

Таким образом, граница ϖ является подвижной в лагранжевом смысле. При переходе через нее лагранжевы частицы из области конденсированного ВВ с давлением $P=0$ переходят в область ПД, на самой же границе ϖ частицы приобретают параметры Чепмена-Жуге (СЖ).

$$P = P_{CJ}, \quad \rho = \rho_{CJ}, \quad E = E_{CJ} \quad \text{при } (r, z) \in \varpi.$$

В п. 2.4 заданы начальные и граничные условия.

Для областей Ω_1 , занятых конденсированными взрывчатыми веществами, до прихода детонационной волны считалось, что давление, скорости и энергия в них равны нулю. В областях Ω_2 , занятых твердыми материалами при времени $t=0$ задавались следующие начальные значения:

$$\rho = \rho_0, \quad U = U_0, \quad E = 0, \quad \sigma_r = \sigma_z = \sigma_{\pi} = \sigma_{\theta\theta} = 0 \quad \text{при } (r, z) \in \Omega_2,$$

где ρ_0 - начальная плотность вещества, U_0 - начальная скорость движения среды.

Граничные условия:

$$\sigma_{\pi\pi} = \sigma_{\pi r} = 0 \quad \text{при } (r, z) \in \varpi_1 - \text{свободная поверхность,}$$

$$\sigma_{\pi\pi} = -P, \quad \sigma_{\pi r} = 0, \quad U_n^1 = U_n^2 \quad \text{при } (r, z) \in \varpi_2 - \text{контактная граница (граница раздела конденсированной }^{(1)} \text{ и газообразной }^{(2)} \text{ среды),}$$

$$\sigma_{\pi\pi}^1 = \sigma_{\pi\pi}^2, \quad \sigma_{\pi r} = 0, \quad U_n^1 = U_n^2 \quad \text{при } (r, z) \in \varpi_3 - \text{контактная граница (граница раздела двух конденсированных сред }^{(1)} \text{ и }^{(2)}),$$

$$P^1 = P^2, \quad \sigma_{\pi\pi} = 0, \quad U_n^1 = U_n^2 \quad \text{при } (r, z) \in \varpi_4 - \text{контактная граница (граница раздела двух газообразных сред }^{(1)} \text{ и }^{(2)}),$$

$$u = 0, \quad \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} = 0, \quad \sigma_{rz} = 0 \quad \text{при } (r, z) \in \varpi_5 - \text{ось симметрии,}$$

$$u = 0, \quad \sigma_{rz} = 0 \quad \text{при } (r, z) \in \varpi_6 - \text{жесткая стенка,}$$

где $\sigma_{\pi\pi}$ и $\sigma_{\pi r}$ - нормальная и касательная составляющая вектора напряжений, действующего на площадку границы с нормалью n ; U_n - значения нормальных компонент вектора скорости граничных точек контактирующих сред.

В третьей главе дано краткое математическое обоснование метода SPH на основе решения задачи Римана с описанием важнейших элементов; подробно описан вычислительный алгоритм, реализованный в разработанном коде; проведена проверка устойчивости счета; дано описание структуры программы.

В п. 3.1 приводятся ключевые моменты в понимании SPH-среды, на которых строится логика вывода уравнений, используемых в методе SPH на основе решения задачи Римана.

В п. 3.2 полностью изложен алгоритм расчета двумерных упруго-пластических течений методом SPH на основе решения задачи Римана, учитывающий все особенности принятой математической модели.

В п. 3.3 проведена проверка устойчивости счета.

Строгое исследование консервативности расчетной схемы в настоящей работе не проводилось; ее пригодность (с точки зрения зако-

нов сохранения) для решаемого круга задач проверялась на тестовой задаче соударения стальных цилиндров. Дисбаланс импульса и энергии в тестовой схеме не превышает погрешностей соответствующих экспериментов (не более 1%), и с этой точки зрения вполне приемлем для исследования рассмотренных в данной работе задач.

В п. 3.4 приводится структура разработанной программы.

В четвертой главе приводится сравнение результатов численного моделирования с опубликованными экспериментальными данными и результатами расчетов, полученными другими авторами иными методами. С этой целью рассчитаны следующие схемы.

1. Газокумулятивный заряд для разгона сферических металлических элементов (см. рис. 3), который состоит из стальной трубы (1), заряда взрывчатого вещества (2), полости (3) и метаемого элемента (4). При детонации заряда с торца возникает газовая кумулятивная струя, которая разгоняет элемент (4).

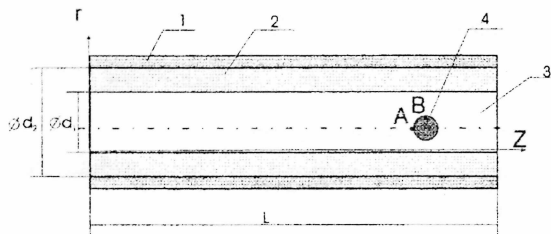


Рис. 3. Газокумулятивный заряд для разгона сферических металлических элементов

Опубликованы следующие экспериментальные данные: $d_1=40$ мм, $d_2=80$ мм, $L=0,5$ м, $M_{ВВ}=3,4$ кг, метаемый элемент: шар из стали ШХ15, имеющий диаметр $d_3=8,0$ мм и массу $M_3=2,1$ г, полученная скорость 1,0 км/с.

Для расчета в качестве ВВ использовался октол со скоростью детонации 8,48 км/с и плотностью $1,821$ г/см³.

В проведенном численном расчете конечная скорость метаемого элемента составила 1,08 км/с, таким образом, ошибка при расчете не превышает 10%. В этой же конструкции увеличение длины заряда до $L=1,0$ м позволило экспериментально получить скорость $V=2,0$ км/с. При численном расчете - $V=2,07$ км/с.

2. Устройство взрывного метания, использующее кумулятивный эффект (см. рис. 4), которое состоит из заряда ВВ (1), плиты (2) и по-

лости (3) в плите. При детонации заряда ВВ (1) плоская детонационная волна отражается от плиты, в которой возникает плоская ударная волна. Эта ударная волна схлопывает полость в плите, в результате из материала плиты образуется метаемый элемент.

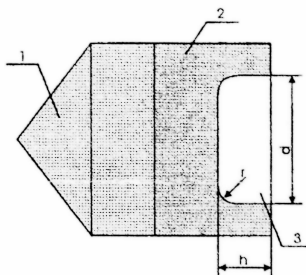


Рис. 4. Метательное устройство, использующее кумулятивный эффект

В таблице 1 приведено сравнение результатов численного решения с опубликованными экспериментальными данными для алюминиевых и медных плит при диаметре заряда ВВ 150мм.

Таблица 1.

Сравнение расчетных и экспериментальных скоростей головных струй

Материал плиты	d, мм	h, мм	R, мм	V_0 , км/с (эксперимент)	V_0 , км/с (расчет)	Погрешность
Al	20	20	1	21,5	19,9	7,4%
	20	20	10	9,7	9,5	2%
Cu	30	30	15	5,3	6,0	13%
	30	30	3	15,5	15,9	2,5%

3. Трехкаскадное метательное устройство (рис. 5), которое состоит из заряда ВВ и трех каскадов (I, II, III). Каждый каскад включает в себя ВВ (1,4,7), отсекающую пластину (2,5,8) и метаемый элемент (3,6,9). При детонации основного заряда ВВ (1) метается элемент (3), он ударяет по ВВ (4), в котором возникает пересжатая детонация. При этом продуктами детонации метается элемент (6). Он детонирует при ударе третий каскад и элемент (9) приобретает скорость V_0 .

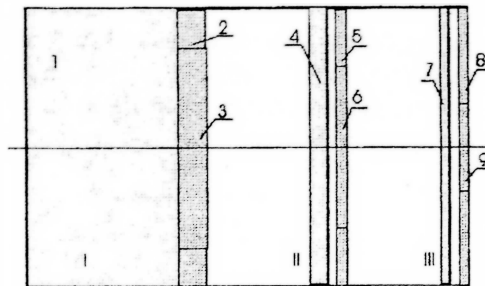


Рис. 5. Трехкаскадная схема высокоскоростного метания металлических элементов

В эксперименте для второго каскада была получена скорость 9,5 км/с - для стального элемента массой 9 г, а для третьего скорость 13,8 км/с - для алюминиевого элемента массой 1,75г. При численном моделировании скорость второго каскада равна 8,9 км/с, а третьего – 13,0 км/с. Соответственно погрешность составляет (5% и 6%).

4. Проникание компактного ударника в толстую преграду. Для оценки пригодности данной программы к решению задач проникания компактного ударника в толстую преграду были проведены тестовые расчеты и их сравнение с результатами опубликованных экспериментальных исследований.

С этой целью было рассчитано проникание ударников различной плотности в толстую алюминиевую мишень со скоростью 6,6 км/с. Ударники были изготовлены из пластика с плотностью $\rho_0=1,20$ г/см³ и диаметром 8,0 мм; из алюминиевого сплава с плотностью $\rho_0=2,70$ г/см³ и диаметром 6,1 мм и из стали с плотностью $\rho_0=7,80$ г/см³ и диаметром 4,3 мм (все ударники имеют массу 2,5 г). Экспериментальные данные: ударник из пластика – глубина кратера 15мм, ударник из алюминиевого сплава – глубина кратера 17мм, ударник из стали – глубина кратера 20мм. В результате расчета получены следующие глубины кратеров: для ударника из пластика – 14мм, для ударника из алюминиевого сплава – 16мм, для стального ударника – 18мм. Расхождение расчетных данных с результатами экспериментов не превышает 10%.

5. Кумулятивный заряд. Лабораторный кумулятивный заряд калибром 46 мм (см. рис. 6) снаряжен ВВ с плотностью 1720 кг/м³ и скоростью детонации 8000 м/с. Заряд взрывчатого вещества (2), снабженный детонатором (4), имеет коническую выемку, облицованную

тонким слоем металла (3). Заряд помещен в корпус (1).

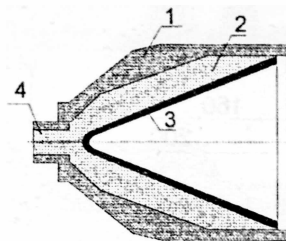


Рис. 6. Лабораторный кумулятивный заряд

Результаты сравнения скорости струи, полученной расчетным путем, с известными экспериментальными данными приведены на рис. 7. Расхождение экспериментальных и расчетных данных не превышает 5%.

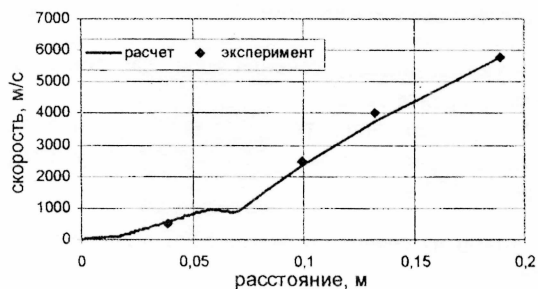


Рис. 7. Сравнение распределения скорости вдоль струи

7. Стандартный осколочный цилиндр. Представляет определенный интерес сравнение с результатами, полученными путем численного расчета другим методом. В данном случае сравнение производилось с программой реализующей модифицированный метод крупных частиц (МКЧ). Сравнение проводилось на примере расчета стандартного осколочного цилиндра (см. рис. 8). При этом определялось распределение давлений по длине оболочки цилиндра. Максимальное расхождение результатов составило 17%.

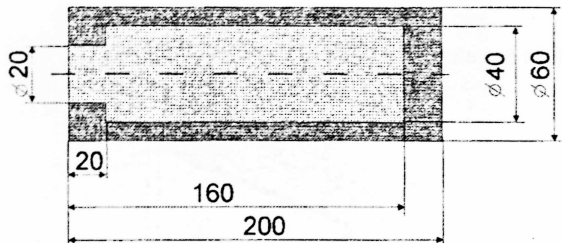


Рис. 8. Расчетная конфигурация стандартного осколочного цилиндра

В таблице 2 приведено сравнение характеристик расчета.

Таблица 2.

Сравнение характеристик расчета

Характеристика	Метод крупных частиц	SPH
Число ячеек МКЧ и частиц SPH	625000	167000
Размер ячейки и частицы, мм	0,14	0,14*
Число ячеек и частиц по толщине стенки	71	75**
Число ячеек и частиц по толщине дна	142	162
Время счета на ПК «Celeron-600», часов	460	30

* - указан диаметр сечения тора для стального корпуса, для ВВ диаметр брался 1мм.

** - при первичном распределении предполагается частичное пересечение торов, поэтому расстояние между центрами окружностей равно 0,133 мм.

Как видно из сравнения метод SPH обладает следующими преимуществами:

- позволяет изначально задавать разные диаметры частиц в различных средах,
- расчетные ячейки необходимо задавать, только в расчетной конструкции, так как влиянием воздуха в большинстве задач физики взрыва и удара возможно пренебречь,
- при сравнении результатов расчета по двум методикам расхождения составили 17%, а скорость счета уменьшена в 15 раз.

8. Сравнение с расчетом по одномерной методике.

На примере двухкамерной установки взрывного метания было проведено сравнение результатов расчета по одномерной и двумерной методикам.

Установка (см. рис. 9) состоит из стального цилиндра (1), основного заряда ВВ (2) и дополнительного заряда ВВ (3), которые детонируют с помощью нескольких передающих зарядов (4), а так же метасмого тела массой M .

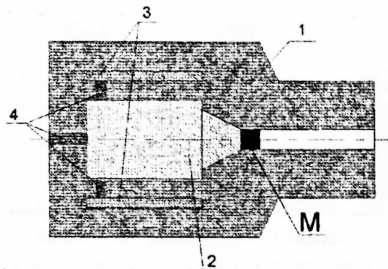


Рис. 9. Схема установки для высокоскоростного метания тел взрывом

Одномерный расчет установки для высокоскоростного метания был проведен по расчетной схеме, представленной на рис. 10.

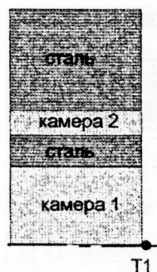


Рис. 10. Схема для одномерного расчета

В результате расчетов была получена зависимость изменения давления на оси камеры от времени (точка 1 на рис. 10), по которой далее была рассчитана скорость метания. Закон движения метасмого тела определяется уравнением:

$$M \frac{dU}{dt} = P(t)F_0,$$

где M - масса метасмого элемента; U - скорость метасмого элемента; $P(t)$ - характер изменения давления от времени на оси симметрии установки; F_0 - площадь поперечного сечения метасмого элемента.

Результаты сравнения расчетов по одномерной и двумерной методикам представлены на рис. 11.

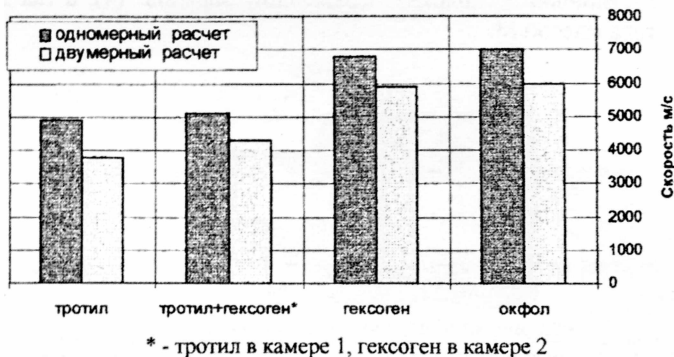


Рис. 11. Сравнение результатов двумерного и одномерного расчетов по конечной скорости метаемого элемента

Известно, что одномерная методика завышает результаты примерно на 10-15%. Таким образом, расчет по двумерной методике можно считать достаточно близким к реальным значениям.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Основные результаты:

1. Составлена математическая модель расчета сжимаемых упруго-пластических течений в двумерной осесимметричной геометрии, подобраны уравнения состояния для твердых тел и ПД, а так же учтена зависимость предела текучести от скорости деформации.
2. Выбран метод SPH на основе решения задачи Римана, который позволяет рассчитать в свободно-лагранжевых координатах большие деформации без использования искусственной вязкости и снижения точности счета на границе контактных поверхностей.
3. Модифицирован алгоритм численного расчета методом SPH на основе решения задачи Римана, для учета особенностей принятой математической модели.
4. Составлена программа численного расчета задач физики взрыва и удара.

Основные выводы:

1. Сравнение полученных результатов с экспериментальными данными для ряда задач в области физики взрыва и удара (высокоскоростное метание тел ПД, образование кумулятивной струи, разлет стандартного осколочного цилиндра, проникание тел с большой скоростью в преграду) показывает, что расхождение не превышает 10%.
2. Достоверность результатов, получаемых при применении данной методики к расчету конкретных задач, обусловлена корректной физической и математической постановкой задачи, применением математически обоснованных методов ее решения, сравнением результатов с экспериментальными данными.
3. Программная реализация расчетной численной методики позволяет применить ее к решению других различных задач физики взрыва и удара. Алгоритм программы составлен таким образом, что легко позволяет вносить изменения в геометрические и физические величины, а так же учитывать новые физические явления без изменения кода численного счета, то есть существует возможность быстрой модификации программы для учета более тонких физических процессов, происходящих при детонации взрывчатых веществ и деформации твердых тел.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ:

1. Орленко Л.П., Рубцова В.П. Моделирование процесса высокоскоростного метания тел взрывом// Оборонная техника. – 1999. - №1-2. – С. 31-34.
2. Орленко Л.П., Рубцова В.П. Моделирование установок для высокоскоростного метания тел взрывом// Оборонная техника. - 1999. - №9-10 – С. 25-27.
3. Орленко Л.П., Рубцова В.П. Математическое моделирование метания взрывом высокоскоростных элементов// Оборонная техника. – 2001. - №1-2 - С. 21-23.
4. Орленко Л.П., Рубцова В.П. Математическое моделирование проникания осесимметричных тел в преграду// Оборонная техника. – 2001. - №1-2 – С. 24-25.
5. Орленко Л.П., Рубцова В.П. Математическое моделирование задач физики взрыва: Метод. указания к лабораторной работе по курсу «Прикладная газодинамика»- М.: МГТУ – 2001. – 16с.