

ТРЕХМЕРНОЕ ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КУМУЛЯТИВНЫХ ЗАРЯДОВ СО ЗВЕЗДООБРАЗНОЙ ФОРМОЙ ОБЛИЦОВКИ

В. И. Тарасов, Ю. В. Янилкин, Ю. А. Ведерников*

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

*Институт математики им. С. Л. Соболева, 630090 Новосибирск

Приводятся результаты трехмерного численного моделирования процесса формирования кумулятивной струи и пробивания стальной преграды зарядом со звездообразной формой облицовки. Результаты расчетов показали работоспособность использованной трехмерной численной методики ТРЭК-УП и возможность ее применения для прямого численного моделирования рассматриваемой задачи. Показана также возможность значительной оптимизации звездообразных зарядов с целью достижения большей эффективности.

ВВЕДЕНИЕ

Практически все разрабатываемые в настоящее время кумулятивные заряды имеют цилиндрическую симметрию. Эта форма считается оптимальной для достижения наибольшего проникающего эффекта. Однако исследователи не оставляют попыток создания зарядов иной конфигурации, надеясь на возможность достижения большей эффективности. Разработка таких зарядов представляет собой сложную задачу в силу ее многопараметричности. На наш взгляд, данная задача может быть решена только с привлечением трехмерного численного моделирования. Однако до сих пор такие исследования были недоступны в силу отсутствия, во-первых, достаточных мощностей ЭВМ, во-вторых, соответствующих трехмерных численных кодов. Эксперименты с нецилиндрическими зарядами описаны в работе [1], там же рассматривается проблема пробивания преград ударниками разной формы, которая близка к проблеме пробивания преграды кумулятивной струей.

В настоящей работе проведено трехмерное численное моделирование процесса формирования кумулятивной струи и пробивания ею стальной преграды для зарядов со звездообразной формой облицовки. Расчеты проводились в упругопластическом приближении по методике ТРЭК-УП [2], в которой в рамках комплекса программ ТРЭК [3] реализована модифицированная для многокомпонентной среды модель Уилкинса. Характерной особенностью методики является использование непо-

движной счетной сетки и метода концентраций [4] для расчета движения контактных границ. Суть метода концентраций заключается в том, что в нем для выделения разных компонентов применяется полный набор термодинамических параметров компонентов — их плотности и энергии, а также объемные концентрации (доли) и специальный алгоритм расчета потоков из смешанных ячеек, содержащих два и более компонентов. Термодинамическое состояние каждого компонента рассчитывается отдельно, т. е. в каждый момент времени указанные величины пересчитываются по соответствующим уравнениям газодинамики и упругопластики. Таким образом, в расчетах по методике ТРЭК-УП появляются смешанные ячейки, содержащие два и более компонентов одновременно. Метод концентраций позволяет локализовать положение границ с точностью до одной счетной ячейки. Таким образом, в методике нет точного положения границ раздела внутри смешанных ячеек. Для определения их примерного положения в ячейках можно использовать изоповерхности (изолинии для двумерных сечений) или растровые картины объемных концентраций разного уровня, которые могут меняться от 0 до 1.

Методика ТРЭК-УП предназначена для моделирования течений с большими деформациями контактных границ, вплоть до нарушения односвязности областей. Именно такого типа задача и рассматривается в настоящей работе. Заметим, что методика ТРЭК-УП является трехмерным обобщением двумерной методики ЭГАК-УП [5], которая нашла широкое приме-

нение при моделировании цилиндрических зарядов [5, 6].

Как уже отмечалось выше, задача расчета эффективности струи от звездообразных облицовок является многопараметрической. Эффективность проникания струи для таких зарядов зависит от числа лучей в звезде, от угла между лучами, от угла схождения лучей в одну точку на оси звездообразного заряда и др. В наших расчетах варьировались только два последних параметра. Эффективность струи оценивалась по глубине ее проникания в стальную преграду и по массе, выбитой струей из преграды.

ПОСТАНОВКА РАСЧЕТОВ

Начальная геометрия системы представлена на рис. 1 в виде ее сечений с торца (рис. 1,а) и вдоль оси заряда (рис. 1,б) по сечению DD (см. рис. 1,а). Заряд взрывчатого вещества (ВВ) содержится в медной цилиндрической оболочке.

Облицовка в сечении с торца заряда имеет четырехлучевую форму. Расстояние от оси заряда до облицовки уменьшается вдоль длины заряда непропорционально. Поэтому двумерные сечения облицовки различны в разных плоскостях. В силу этого облицовка имеет четыре плоскости симметрии. Свойства симметрии позволяют в значительной мере сделать расчеты доступными по числу точек и времени счета — в расчете задавалась четвертая часть заряда, на рис. 1,а соответствующая часть заряда обозначена AOB . Часть геометрических размеров оставалась неизменной во всех расчетах: толщина облицовки ($h = 3,5$ мм), наибольший радиус облицовки ($OR = 27,5$ мм),

толщина оболочки ($H = 5$ мм), внешний радиус оболочки ($OA = 32,5$ мм), длина заряда ВВ ($MN = 70$ мм), расстояние от торца заряда до преграды ($ST = 22$ мм), толщина преграды ($TK = 100$ мм).

Использовалась прямоугольная равномерная счетная сетка с линейным размером ячейки $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 1$ мм и количеством ячеек $35 \times 35 \times 200$. Расчеты проводились в эйлеровых переменных на неподвижной счетной сетке.

Начальные данные веществ: ВВ — плотность $\rho = 1,85$ г/см³, скорость детонации $D = 8,68$ км/с, калорийность $Q = 4,7$ кДж/г; облицовка и оболочка (медь) — $\rho = 8,9385$ г/см³, предел текучести $Y = 0,7$ ГПа, коэффициент Пуассона $\nu = 0,27$; преграда (сталь) — $\rho = 7,82$ г/см³, $Y = 1$ ГПа, $\nu = 0,23$. Уравнение состояния меди и стали брали в виде уравнения Ми — Грюнайзена, а продуктов взрыва — соответствующим идеальным газом с показателем адиабаты $\gamma = 3$.

ВВ инициировалось в точке C на оси заряда (см. рис. 1).

Проведена серия из девяти расчетов, в которых для каждого угла $\varphi = 36,75, 53,8, 76,3^\circ$ выполнено три расчета с углами схождения лучей к оси $\theta = 34,1, 48,2, 60,3^\circ$. Подчеркнем еще раз, что угол φ измеряется на торце заряда.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Процесс формирования струи, характерный для всех проведенных расчетов, показан на рис. 2 в виде двумерных растровых картин объемной концентрации вещества облицовки в момент времени $t = 10$ мкс при $\theta = 48,2^\circ$ и $\varphi = 76,3^\circ$ в разных сечениях (трехмерные изобра-

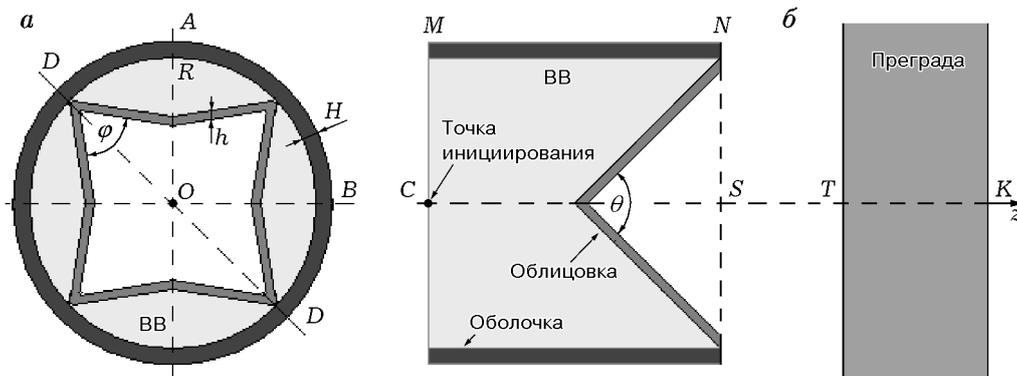


Рис. 1. Начальная геометрия заряда:

а — торцевое сечение, б — сечение вдоль оси заряда

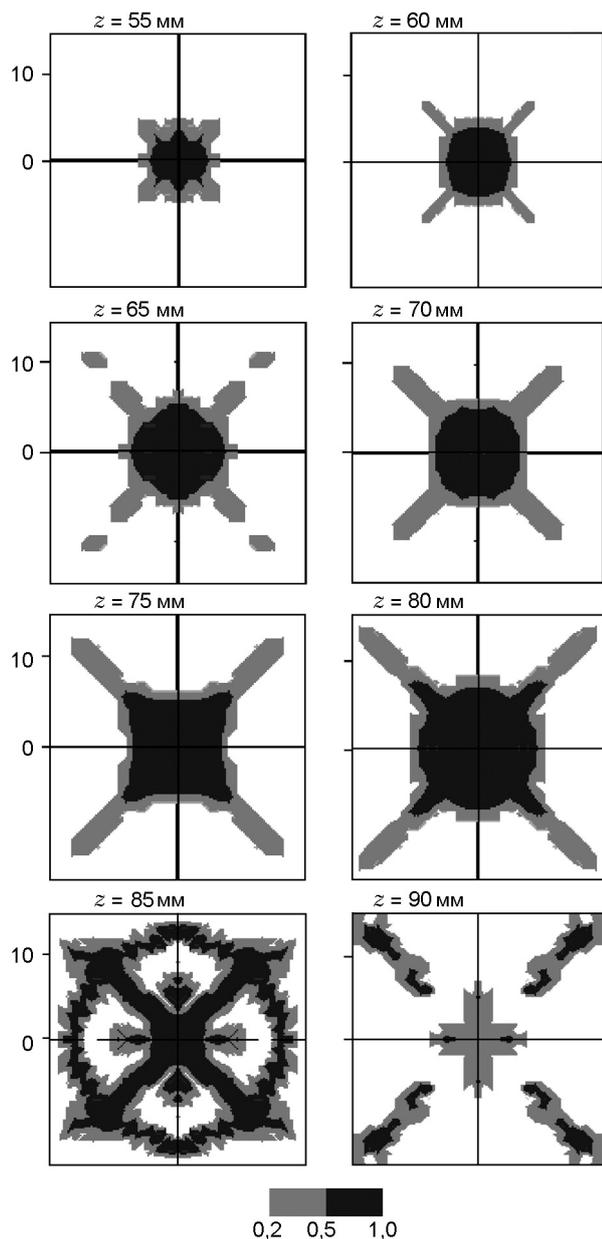


Рис. 2. Двумерные растровые картины объемной концентрации облицовки по уровням $0,2 \div 0,5$ и $0,5 \div 1$ в момент времени $t = 10$ мкс (размеры по осям в миллиметрах)

жения струи из-за сложности ее восприятия не приводятся). На рис. 3 приведены растровые картины облицовки в сечении $z = 70$ мм для указанных выше параметров в различные моменты времени (здесь и ниже отсчет координаты z ведется от точки C ($z = 10$ мм)).

Процесс пробивания преграды наглядно представлен на рис. 4 в виде трехмерных растровых картин для вещества преграды в различные моменты времени. Кроме того, на рис. 5 приведены двумерные растровые картины для вещества преграды, полученные в разных сечениях в момент времени $t = 45$ мкс. Все картины приведены для указанных выше параметров.

В расчетах определялись глубина пробития преграды и масса выбитого из преграды вещества. Глубина пробития определялась по координате точки, самой дальней по отношению к передней стенке преграды, в которую проникла струя, а масса — по объему области в преграде, занятой воздухом, продуктами взрыва или облицовкой (масса равна произведению этого объема на начальную плотность преграды).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Во всех проведенных расчетах происходит формирование кумулятивной струи, форма которой отличается от цилиндрической. На рис. 2 отчетливо видно, что формы песта и струи в поперечном сечении меняются вдоль оси заряда, причем в каждом сечении значительно отличаются от круглой. Кроме того, на рисунке видны находящиеся вне струи части облицовки, которые летят по периферии, не влияя на процесс пробивания преграды. Понятно, что при этом падает и эффективность заряда.

Надежды на улучшение эффективности звездообразных зарядов по сравнению с цилиндрическими связаны с тем, что в звездообразных зарядах возможна двойная кумуляция облицовки — сначала в направлении к оси заряда вдоль радиуса, затем обычная кумуляция по направлению оси, характерная и для цилиндрического заряда. Здесь эффективность понимается прежде всего с точки зрения увеличения глубины пробития преграды, при этом возможно значительное уменьшение диаметра кратера. Как видно из рис. 3, в заряде действительно происходит кумуляция при схождении облицовки к оси. Однако при этом образуются пест,

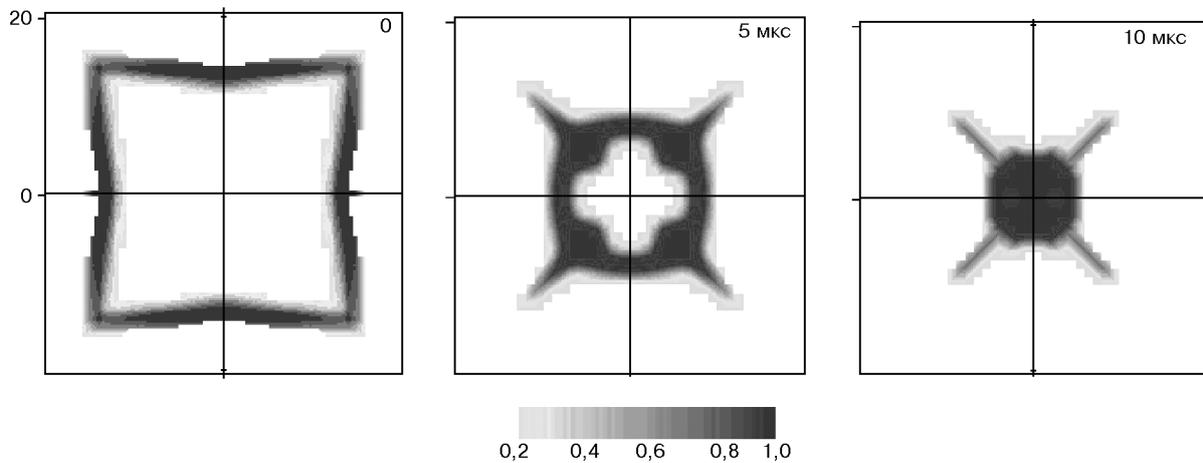


Рис. 3. Растровые картины объемной концентрации облицовки в сечении $z = 70$ мм (размеры по осям в миллиметрах)

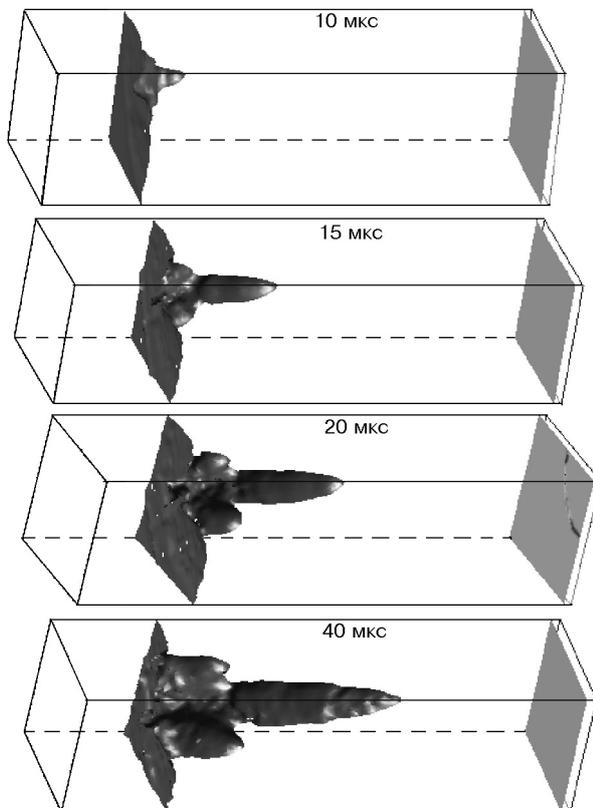


Рис. 4. Растровые картины объемной концентрации вещества преграды по уровню 0,5 (вид со стороны оси заряда)

который летит по направлению к преграде в периферийной области.

Некруглая форма струи, хотя и в меньшей степени, но все же сказывается на форме кратера, образованного струей в преграде, что хорошо видно на рис. 5. Две первые картины свидетельствуют о масштабе кусков песта, возникших при первичной кумуляции, которые летят по периферии и падают на преграду, образуя дополнительные впадины в ней.

Рассмотрим данные по глубине проникания струи (Γ) в преграду. Из таблицы видно, что для разных фиксированных углов θ зависимость $\Gamma(\varphi)$ ведет себя по-разному. Наибольшая глубина проникания для рассмотренной конфигурации заряда получается при $\theta = 48,2^\circ$. Для этого угла отмечен большой разброс значений Γ при разных значениях угла φ , что говорит о том, что для данной конфигурации возможна значительная оптимизация заряда и полученное значение Γ может быть увеличено. Для двух других углов θ глубины проникания значительно меньше. Эти углы, видимо, не оптимальны для данной конфигурации заряда.

Результаты расчетов массы вещества преграды (m), выбитой из нее струей, несколько иные (см. таблицу). В этом случае при фиксированных углах θ влияние угла φ уменьшается. Это значит, что в целом суммарный импульс, падающий на преграду, меняется мало, но происходит его перераспределение из зоны струи в периферийную зону. Это обстоятельство также свидетельствует об имеющихся возможностях оптимизации данной конструкции.

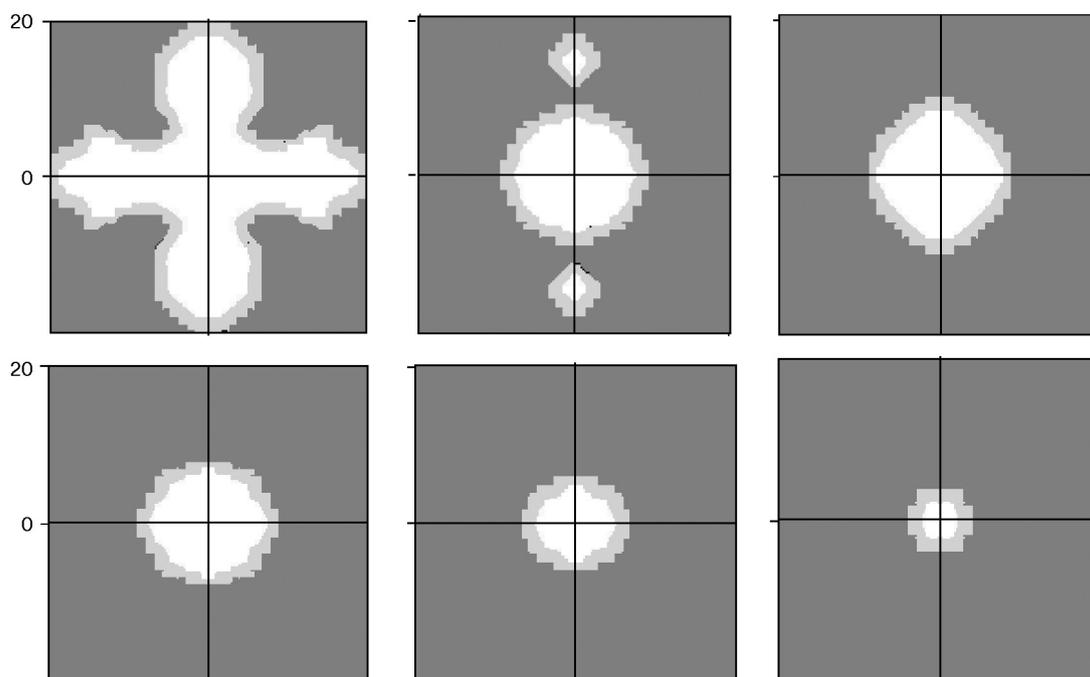


Рис. 5. Растровые картины в поперечном сечении в преграде в момент времени $t = 45$ мкс:

$z = 107, 117, 127, 137, 147, 152$ мм в соответствии с приведенным порядком картин; размеры по осям в миллиметрах

Результаты расчетов

θ , град	34,1			48,2			60,3		
φ , град	36,75	53,8	76,3	36,75	53,8	76,3	36,75	53,8	76,3
Γ , мм	42	43,1	49,3	41,3	54,4	54,3	45,3	47,1	51,1
m , г	204,8	212,4	248	220,8	224	238,8	226	226,8	224

ВЫВОДЫ

Проведенное исследование весьма ограничено малым количеством рассмотренных вариаций параметров задачи и использованием довольно грубой счетной сетки. Хотя полученные результаты расчетов носят предварительный характер, тем не менее они подтвердили наши представления о течениях в этих сложных конструкциях, а также показали, во-первых, работоспособность трехмерной численной методики ТРЭК-УП и возможность ее использования для прямого численного моделирования рассматриваемой задачи и, во-вторых, возможность значительной оптимизации звездообразных зарядов после проведения большего количества более точных расчетов. Проведение подобной работы предполагается.

Авторы выражают благодарность Л. Е. Корзаковой за помощь в проведении расчетов и обработке их результатов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вeдeрникoв Ю. А., Щeпaнoвский В. А. Оптимизация реогазодинамических систем. Новосибирск: Наука, 1995.
2. Стaдник А. Л., Тaрaсов В. И., Янилкин Ю. В. Эйлера методика расчета трехмерных упругопластических течений многокомпонентной среды // ВАНТ. Сер. ММФП. 1995. Вып. 3. С. 52–60.
3. Yanilkin Yu. V., Tarasov V. I., Stadnik A. L. et al. Program system TREK for numerical simulation of 3D multi-component medium flows // Proc. of Workshop "New Models and Numerical Codes for Shock Wave Processes in Condensed Media", Oxford, 1997. P. 413–422.

4. Бахрах С. М., Глаголева Ю. П., Самигулин М. С. и др. Расчет газодинамических течений на основе метода концентраций // Докл. АН СССР. 1981. Т. 257, № 3. С. 566–569.
5. Торопова Т. А., Янилкин Ю. В. Методика расчета двумерных течений многокомпонентной среды с учетом прочностных свойств среды // ВАНТ. Сер. ММФП. 1994. Вып. 4. С. 58–66.
6. Свирский О. В., Ковалев Н. П., Торопова Т. А., Цой А. П. Инженерная методика ATOS для расчета параметров проникания кумулятивной струи // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения. Саров, 2000.

Поступила в редакцию 10/VIII 2000 г.
