

ОБ УСТОЙЧИВОСТИ КУМУЛЯТИВНЫХ СТРУЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА КОНИЧЕСКИЕ МИШЕНИ

УДК 537.84

А. А. Чарахчян

Вычислительный центр РАН, 117967 Москва

Рассматривается задача, моделирующая эксперимент [1] по взрывному инициированию D — D-реакции в конических мишенях. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Алюминиевый ударник толщиной 2 мм со скоростью $\sim 5,4$ км/с налетает на свинцовую мишень, заполненную дейтерием под давлением около атмосферного и закрытую сверху алюминиевой крышкой толщиной 0,3 мм. Радиус отверстия на поверхности мишени 1 мм, угол раствора конуса 53° . Численное решение задачи в рамках уравнений газовой динамики с широкодиапазонными уравнениями состояния [2] приведено в [3].

На рис. 2 показаны границы раздела сред для двух моментов времени; видно, что вблизи границы конуса возникает кольцевая кумулятивная струя алюминия (а), которая затем схлопывается на оси симметрии (б).

Настоящая работа посвящена численному исследованию устойчивости возникающего течения по отношению к осесимметричным возмущениям внутренней границы крышки мишени, т. е. границы раздела между алюминием и дейтерием.

Обозначим через r радиальную координату, а через z — осевую координату, отсчитываемую от основания конуса. Начальное положение невозмущенной границы раздела определяется равенством $z = z_0$ при $0 \leq r \leq r_0$, где r_0, z_0 — координаты точки пересечения границы с конусом. Рассматривается задача с синусоидальным возмущением границы раздела

$$z = z_0[1 + d \sin(m\pi r/r_0)] \quad \text{при} \quad 0 \leq r \leq r_0, \quad (1)$$

где d — амплитуда возмущений; m — номер гармоники, который в данном случае задает число экстремумов на начальном профиле границы раздела.

Задача решается в той же постановке, что и в [3]. Методика расчета базируется на использовании подвижной регулярной (т. е. с естественной двумерной нумерацией узлов)

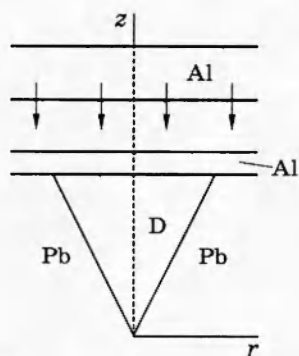


Рис. 1

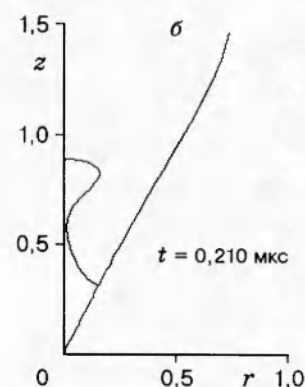
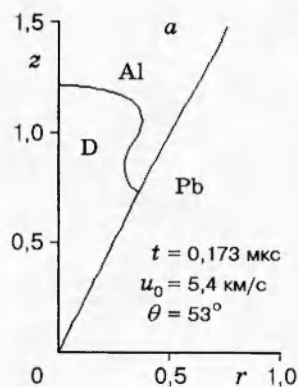


Рис. 2

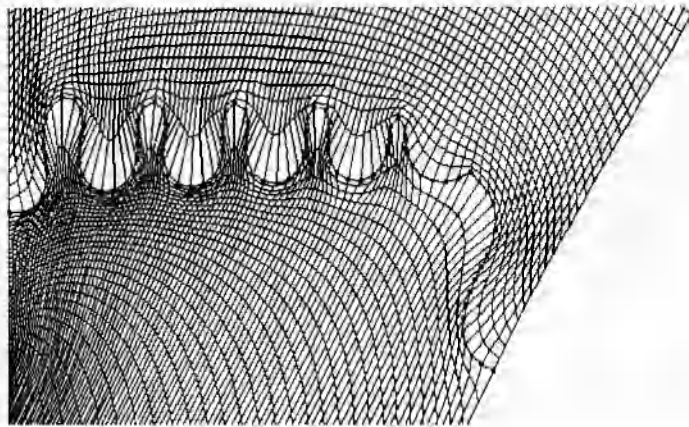


Рис. 3

криволинейной сетки с явным выделением основных границ раздела в виде линий сетки [4].

На рис. 3 приведен типичный пример фрагмента такой сетки на достаточно развитой стадии роста возмущений. Левая граничная линия — ось симметрии, правая — коническая граница мишени, сетка в которой на рисунке не показана. Точками отмечена линия сетки, являющаяся границей раздела между алюминием и дейтерием. Для расчета внутренних узлов сетки используется метод [5], гарантирующий выпуклость всех четырехугольных ячеек сетки. Применяется расщепление на лагранжев этап и этап пересчета с лагранжевой сетки на сетку, отвечающую очередному моменту времени. На обоих этапах используются квазимонотонные схемы второго порядка точности. На лагранжевом этапе это почти консервативная модификация [6] схемы [7]. Для расчета разрыва на гранях ячеек уравнение состояния в каждой ячейке заменяется на двухконстантное уравнение из [4], построенное по значениям скорости звука и отношения удельных теплоемкостей исходного уравнения состояния. На этапе пересчета использовался консервативный интерполяционный алгоритм, являющийся модификацией известного алгоритма [8]. В тех ячейках сетки, где условие близости сеток не позволяет применять этот алгоритм, использовался неконсервативный алгоритм третьего порядка точности из [9], применимость которого не ограничена условием близости сеток.

Налетающий ударник инициирует в крышке мишени ударную волну, выход которой на внутреннюю границу крышки приводит к неустойчивости Рихтмайера — Мешкова [10, 11]. Выполненные расчеты воспроизводят известную картину развития этой неустойчивости при прохождении ударной волны из тяжелого вещества в легкое (см., например, [12]).

На рис. 4 показана начальная стадия развития неустойчивости для $d = 0,002$, $m = 20$ (a — положения границы раздела для серии моментов времени, b — зависимость амплитуды возмущения вблизи оси симметрии от времени, отсчитываемого от момента удара по крышке). Видно, что возмущения вначале меняют свой знак («горбы» становятся «впадинами» и наоборот), а затем их амплитуда начинает расти линейно по времени с последующим переходом в нелинейную стадию. Кривые на рис. 4, b отвечают расчетам с числом сеточных интервалов вдоль границы крышки $N = 100$ (т. е. пять интервалов на полупериод начального возмущения), 200 и 400. Достаточно хорошее совпадение кривых для сеток с $N = 200$ и 400 говорит об удовлетворительной точности расчета. Для более поздних моментов времени расчет проводился на сетке с $N = 200$. С уменьшением m точность расчета на одной и той же сетке возрастает.

Дальнейшее развитие возмущений показано на рис. 5 в виде положений границы раздела для серии моментов времени начиная с последнего момента, показанного на рис. 4, a ,

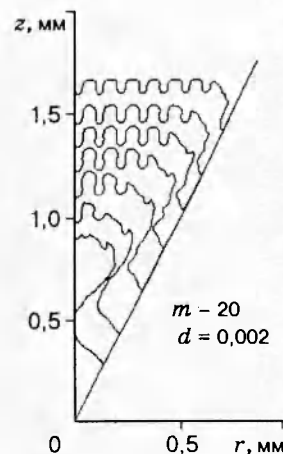
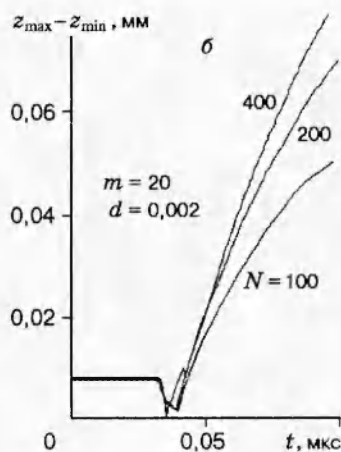
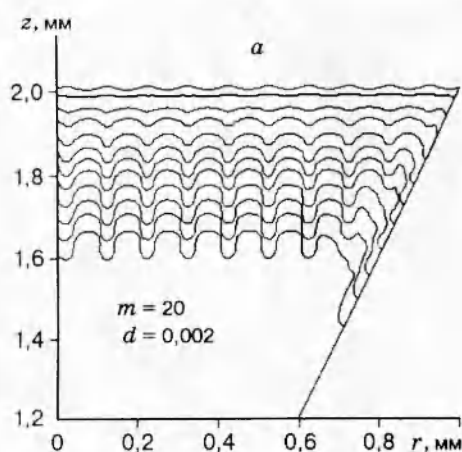


Рис. 4

Рис. 5

вплоть до момента схлопывания кумулятивной струи на оси симметрии. Формирование кумулятивной струи происходит на фоне развитой неустойчивости Рихтмайера — Мешкова на основной части границы раздела. След этой неустойчивости остается на границе струи в виде небольших по амплитуде немонотонностей, которые со временем уменьшаются. К моменту схлопывания струи эти немонотонности исчезают, и граница струи оказывается гладкой.

Границу кумулятивной струи и участок с развитой неустойчивостью Рихтмайера — Мешкова разделяет небольшой участок, где амплитуда колебаний быстро падает с приближением к границе кумулятивной струи. Механизм «гашения» колебаний на этом участке связан с повышением давления за фронтом ударной волны, распространяющейся в алюминии от границы конуса к оси симметрии. Дополнительное ускорение границы раздела из тяжелого вещества в легкое, вызванное повышением давления, приводит к смене знака колебаний. Вблизи границы кумулятивной струи колебания противоположного знака не успевают начаться, поскольку соответствующий участок границы искривляется и становится границей струи.

С течением времени все большая часть границы раздела становится границей кумулятивной струи. К моменту схлопывания струи ударная волна в алюминии также достигает оси симметрии. В результате участок границы раздела с первоначальной неустойчивостью Рихтмайера — Мешкова исчезает, и граница оказывается достаточно гладкой даже вблизи оси симметрии, хотя в дальнейшем там могут начать развиваться колебания противоположного знака.

Номер гармоники $m = 20$ в (1) был максимальным при проведении расчетов. Для $m < 20$ картина развития возмущений аналогична. Ясно, что численное исследование не может дать строгого ответа на вопрос об устойчивости течения к возмущениям (1) для любых m . В то же время трудно представить себе, от каких параметров задачи может зависеть то критическое значение m , начиная с которого возмущения будут проникать в кумулятивную струю и нарастать по амплитуде. Поэтому выполненные расчеты позволяют с большой долей вероятности предположить, что кумулятивные струи, возникающие в эксперименте [1], устойчивы к осесимметричным возмущениям границы раздела между алюминием и дейтерием. Развитие неустойчивости Рихтмайера — Мешкова на остальной части границы раздела оказывается в значительной степени подавленным из-за дополнительного ускорения этой части границы, вызванного повышением давления в алюминии по мере прохождения ударной волны от границы конуса к оси симметрии.

Автор благодарит И. В. Ломоносова за предоставленные таблицы уравнений состояния

металлов, сделанные в соответствии с [2].

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 95-01-01161).

ЛИТЕРАТУРА

1. Анисимов С. И., Беспалов В. Е., Вовченко В. И. и др. Генерация нейтронов при взрывном иницировании D — D-реакции в конических мишенях // Письма в ЖЭТФ. 1980. Т. 31, вып. 1. С. 67–70.
2. Бушман А. В., Канель Г. И., Ни А. Л., Фортвов В. Е. Теплофизика и динамика интенсивных импульсных воздействий. Черногловка: ИХФ АН СССР, 1988.
3. Чарахчьян А. А. Численное исследование сжатия дейтерия в конической мишени при наличии сильного кумулятивного эффекта // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 4. С. 22–32.
4. Годунов С. К., Забродин А. В., Иванов М. Я. и др. Численное решение многомерных задач газовой динамики. М.: Наука, 1976.
5. Иваненко С. А., Чарахчьян А. А. Криволинейные сетки из выпуклых четырехугольников // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1988. Т. 28, № 4. С. 503–514.
6. Чарахчьян А. А. Почти консервативные разностные схемы для уравнений газовой динамики // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1993. Т. 33, № 11. С. 1681–1692.
7. Родионов А. В. Повышение порядка аппроксимации схемы С. К. Годунова // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1987. Т. 27, № 12. С. 1863–1870.
8. Van Leer В. Towards the altimate conservative difference scheme. IV. A new approach to numerical convection // J. Comput. Phys. 1977. V. 23, N 3. P. 276–299.
9. Чарахчьян А. А. Расчет сжатия дейтерия в конической мишени в рамках уравнений Навье — Стокса для двухтемпературной магнитной гидродинамики // Журн. вычисл. математики и мат. физики. 1993. Т. 33, № 5. С. 766–784.
10. Richtmyer R. D. Taylor instability in shock acceleration of compressible fluids // Communs. Pure and Appl. Math. 1960. V. 13, N 2. P. 297–319.
11. Мешков Е. Е. Неустойчивость границы раздела двух газов, ускоряемой ударной волной // Изв. АН СССР. МЖГ. 1969. № 5. С. 151–157.
12. Анучина Н. Н., Бахрах С. М., Забродин А. В. и др. Исследования по гидродинамической неустойчивости границы раздела двух сред // Исследование гидродинамической устойчивости с помощью ЭВМ. М.: Ин-т прикл. математики АН СССР, 1981. С. 108–162.

Поступила в редакцию 12/II 1996 г.