

КУМУЛЯТИВНЫЕ ЯВЛЕНИЯ  
ПРИ ИМПУЛЬСНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ  
НА КОНИЧЕСКИЕ МИШЕНИ

А.В. Бушман, И.К. Красюк,  
Б.П. Крюков, А.А. Ландин,  
В.Ф. Минин, П.П. Пашигин,  
А.М. Прохоров, А.Ю. Семенов,  
В.Я. Терновой, В.Е. Фортон

К настоящему времени выполнен ряд экспериментальных работ по обжатию дейтериевой или дейтерий-тритиевой плазмы в конических мишенях с целью получения экстремально высоких температур и давлений при различных способах разгона сжимающего ударника — релятивистским электронным пучком [1], интенсивным лазерным излучением [2, 3] и продуктами детонации конденсированных взрывчатых веществ в плоской [4] или остроугольной геометрии [5]. Трудности диагностики в условиях проведения опытов дают возможность надежно фиксировать лишь начальную скорость подлета ударника к мишени и интегральную характеристику — полный выход продуктов высокотемпературной реакции [1–5]. Во всех экспериментах был зарегистрирован существенный выход продуктов реакции, свидетельствующий о достаточно высоких значениях параметров плазмы, что не находит разумного объяснения в рамках используемых сейчас одномерных моделей и в немногочисленных двумерных гидродинамических расчетах [6].

В работе задача обжатия плазмы в конических мишенях под действием движущегося и деформирующегося ударника решена в двумерной постановке, близкой к экспериментальным ситуациям работ [2–4, 7] методом численного моделирования. Основное внимание уделено описанию механизма ускорения лицевой поверхности, обращенной к конусу, а также вопросу о влиянии на гидродинамические параметры течения отношения толщины ударника  $\alpha$  к диаметру основания  $D$ .

Расчеты проводились на 64-х процессорном варианте мультипроцессора ПС-2000 [8], являющемся главной ЭВМ программно-аппаратного комплекса „Стерео-ПС“ [9]. Комплекс предназначен для оперативного получения в диалоговом режиме решений задач динамики сжимаемой среды в двумерной постановке; в состав банка данных комплекса входят широкодиапазонные уравнения состояния алюминия [10] и свинца [11]; в основу комплекса положен адаптированный к многопроцессорной архитектуре численный метод индивидуальных частиц [12]. В отличие от других методов частиц в ячейках [13, 14] в этом методе отсутствуют проблемы расчета различных по термодинамическому описанию веществ, находящихся в контакте, а также нет сильных флуктуаций решения, что позволя-

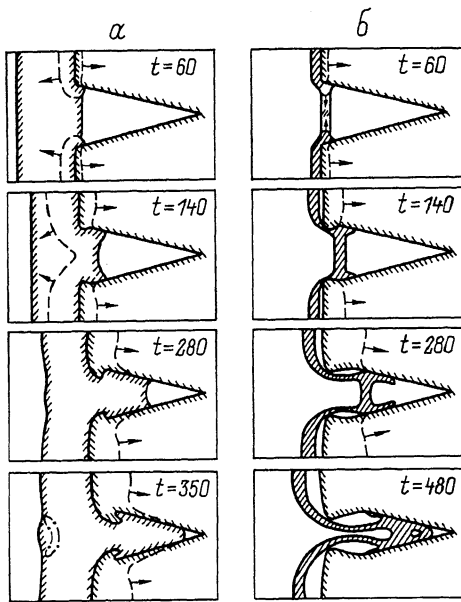


Рис. 1. Картина взаимодействия алюминиевых ударников различной толщины (а -  $d = 2$  мм, б -  $d = 0.25$  мм) со свинцовой конической мишенью на различные моменты времени  $t$  (нс). Пунктиром отмечено положение фронтов ударных волн, стрелками показано направление их движения, штрихпунктиром выделена граница зоны разрушения.

ет проводить расчет широкого класса течений, в том числе и слабосжимаемых, размещая в ячейке только одну счетную частицу.

На рис. 1 представлены два характерных варианта расчета процесса взаимодействия алюминиевых ударников различной толщины с конической мишенью из свинца с полным углом раствора конуса  $\alpha = 28^\circ$  и диаметром  $D = 2$  мм. Начальная скорость ударника  $W_0 = 5.4$  км/с. Влияние на процесс заполняющего полость газа не учитывается. Большой объем оперативной памяти ЭВМ ПС-2000 и эффективное распараллеливание вычислительного алгоритма позволяет проводить расчет одного варианта на эйлеровой сетке с размером ячеек  $320 \times 100$  за время порядка 20 мин.

Анализ приведенных результатов расчетов показал, что ускорение поверхности ударника обеспечивается действием двух механизмов. Первый из них - ударноволновой, наиболее эффективно проявляется при достаточно больших отношениях  $d/D$ , когда в ударнике на оси симметрии реализуется режим нерегулярного маховского отражения конической ударной волны, идущей от поверхности первоначального контакта ударника и мишени. Разгрузка зоны высокого давления за маховской волной приводит к увеличению скорости лицевой поверхности до значения  $W \approx 2W_0$  при  $t = 220$  нс. При малых

отношениях  $d/D$  на тот же момент времени волны разряжения существенно снижают параметры ударной волны еще до ее прихода на ось симметрии, что приводит к незначительному увеличению скорости до значения  $W = 1.05 W_0$ . Для этой конфигурации характерным является выделение на стенках полости низкоплотной кольцевой струи, значительно опережающей ударник, а также разделение материалов ударника и мишени во всей области за точкой текущего контакта.

Вторым механизмом ускорения является механизм обжатия, при котором происходит разгрузка зон высокого давления, возникающих вследствие радиального схождения материала ударника к оси симметрии под действием стенок полости в мишени. Для варианта рис. 1,а этот механизм становится основным при  $t > 220$  нс и обеспечивает к моменту заполнения полости скорость  $W \approx 4 W_0$ , с максимальным значением плотности вблизи поверхности  $\rho \approx 2 \rho_0$ . Ускорение тонкого ударника и сомкнувшейся перед ним на оси симметрии кольцевой струи на стадии действия механизма обжатия незначительно (рис. 1,б), как из-за низких значений плотности разрыхленной струи, так и из-за наличия развитой свободной поверхности. В результате совместного влияния этих факторов скорость в момент заполнения достигает лишь  $W \approx 1.3 W_0$  при максимальной плотности  $\rho \approx 0.15 \rho_0$ .

Управление временем перехода от ударноволнового механизма ускорения к механизму обжатия обеспечивается изменением угла при вершине конуса. На рис. 2 приведены графики зависимости от времени скорости лицевой поверхности ударника на оси симметрии для вариантов расчета с  $d/D = 1$  и различных  $\alpha$ . Вследствие непрерывного перехода одного механизма ускорения к другому для  $\alpha = 52^\circ$  практически те же значения скорости и плотности, что в случае  $\alpha = 28^\circ$ , достигаются за время, в два раза меньшее.

Для проверки адекватности численного моделирования процесса обжатия было проведено сопоставление расчетных результатов с данными специально выполненными опытами по взаимодействию алюминиевого ударника толщиной 2 мм и скоростью 5.4 км/с со свинцовой мишенью. В мишени имелось отверстие в виде усеченного конуса с углом  $30^\circ$ , обращенное к ударнику диаметром 2.3 мм и выходным диаметром 1.15 мм. Измеренная в вакууме средняя скорость вылетевшего тела на расстоянии 20 мм составила  $16.5 \pm 1$  км/с, численное моделирование в этом случае дало величину скорости 17.5 км/с.

Из проведенных расчетов следует, что оптимальным для получения максимальной скорости схлопывания конической полости в рассмотренной конструкции мишени и начальной скорости ударника 5.4 км/с является вариант с  $\alpha_* = 50-60^\circ$  и отношением  $(d/D)_* = 0.5-0.6$ . Уменьшение угла  $\alpha$  приводит к увеличению времени заполнения и, как следствие, к необходимости увеличения  $d/D$  для устранения негативного влияния волн разгрузки. При  $\alpha > \alpha_*$  ускорение становится неэффективным, так как схождение струи в

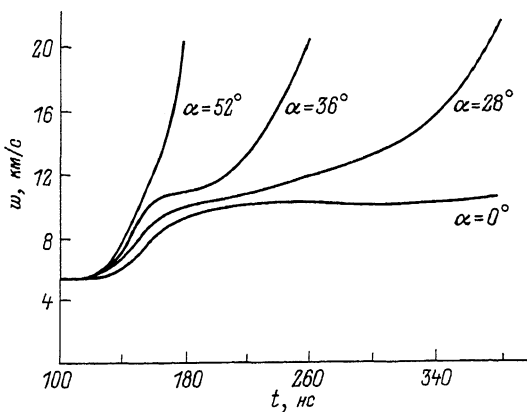


Рис. 2. Скорость  $W$  движения лицевой поверхности ударника на оси симметрии при различных углах конической мишени  $\alpha$ .

вершине конуса происходит раньше, чем ударная волна дойдет до оси симметрии. Уменьшение параметра  $d/D$  по отношению к оптимальному приводит к снижению доли ударноволнового механизма, выделению низкоплотной струи. Увеличение отношения  $d/D$  выше оптимального не меняет параметры процесса ускорения.

Результаты аналогичной серии расчета вариантов с  $d=D=2$  мм и начальной скоростью ударника  $W_0 = 10$  км/с показали, что оптимальным в этом случае является угол при вершине конуса  $\alpha_* = 30-35^\circ$ . Заполнение полости алюминием происходит за время  $t \approx 220$  нс, максимальная скорость ударника  $W \approx 32$  км/с.

Отметим в заключение, что лучшие результаты по выходу продуктов реакции плазмы в конических мишенях работ [4, 7] были получены на конструкциях с параметрами, близкими к указанным оптимальным.

#### Л и т е р а т у р а

- [1] Боголюбский С.Л., Герасимов Б.П., Ликсонов В.И., Михайлов А.П., Попов Ю.П., Рудаков Л.И., Самарский А.А., Смирнов В.П. - Письма в ЖЭТФ, 1976, т. 24, в. 4, с. 206-209.
- [2] Вовченко В.И., Гончаров А.С., Касьянов Ю.С., Козлов О.В., Красюк И.К., Милютин А.А., Пастухов М.Г., Пашинин П.П., Прохоров А.М. - Письма в ЖЭТФ, 1977, т. 26, в. 9, с. 628-630.

- [3] Анисимов С.И., Вовченко В.И., Гончаров А.С., Иванов М.Ф., Касьянов Ю.С., Козлов О.В., Красюк И.К., Малютин А.А., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Щур Л.Н. - Письма в ЖТФ, 1987, т. 4, в. 7, с. 388-392.
- [4] Анисимов С.И., Беспалов В.Е., Вовченко В.И., Дремин А.Н., Дубовицкий Ф.И., Жарков А.П., Иванов М.Ф., Красюк И.К., Пашинин П.П., Прохоров А.М., Терновой В.Я., Фортгов В.Е., Щур Л.Н. - Письма в ЖЭТФ, 1980, т. 31, в. 1, с. 67-70.
- [5] Derentowicz H., Fruszek M., Kaliski S., Wrobel J., Ziolkowski Z. In: High Pressure Science and Technology. Oxford: Pergamon, 1980, v. 2, p. 1003-1008.
- [6] Рассказова В.В., Рогачев В.Г., Свилинская Н.Ф. Вопросы атомной науки и техники. Серия: Методы и программы численного решения задач математической физики, 1985, в. 3, с. 39-47.
- [7] Терновой В.Я. - МПТФ, 1984, в. 5, с. 68-73.
- [8] Трапезников В.А., Прангишвили И.В., Новохатный А.А., Резанов В.В. - Приборы и системы управления, 1981, в. 2, с. 29-31.
- [9] Агурейкин В.А., Бучнев А.А., Вельдмандер П.В., Крюков Б.П., Куликов Г.Г., Ландин А.А., Минин В.Ф., Огрызко К.В., Сизых В.Г. В сб.: Проблемы автоматизации проектно-конструкторских работ. Тез. докл. межотраслевых конференций. М.: ВИМИ, 1986, с. 31-33.
- [10] Агурейкин В.А., Анисимов С.И., Бушман А.В., Канель Г.И., Карягин В.П., Константинов А.Б., Крюков Б.П., Минин В.Ф., Разоренов С.В., Сагдеев Р.З., Сугак С.Г., Фортгов В.Е. - ТВТ, 1984, т. 22, № 5, с. 964-983.
- [11] Альтшулер Л.В., Бушман А.В., Жерноклетов М.В., Зубарев В.Н., Леонтьев А.А., Фортгов В.Е. - ЖЭТФ, 1980, т. 78, в. 2, с. 741-760.
- [12] Агурейкин В.А., Крюков Б.П. - Численные методы механики сплошной среды, 1986, т. 17, № 1, с. 17-31.
- [13] Харлоу Ф.Х. В сб.: Вычислительные методы в гидродинамике. М.: Мир, 1967, с. 316-342.
- [14] Margder В.М. - Mathem. of Comput., 1975, v. 29, N 130, p. 434-446.

Институт общей физики  
АН СССР, Москва

Поступило в Редакцию  
16 мая 1988 г.