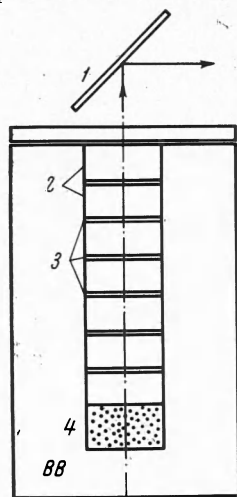


ПАРАМЕТРЫ МАХОВСКОГО ОТРАЖЕНИЯ В ПЛЕКСИГЛАСОВЫХ ЦИЛИНДРАХ

Г. А. Ададуров, А. Н. Дремин, Г. И. Канель

(Москва)

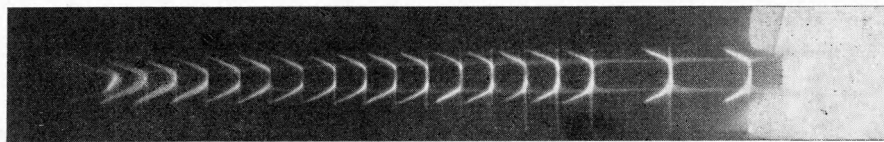
Методом «схлопывающихся воздушных зазоров» исследовались развитие и предельные параметры маховского отражения конической сходящейся ударной волны в плексигласовых цилиндрах, расположенных по оси детонирующего заряда взрывчатого вещества. Диаметры цилиндрических образцов менялись от 15 до 100 мм. Показано, что на стационарном участке развития трехударной конфигурации, где скорость головной волны равна скорости детонации, существует линейная зависимость между диаметром головной волны, ее радиусом кривизны и диаметром цилиндра.



Фиг. 1

В работах [1,2] сообщалось об экспериментальном обнаружении маховского отражения в случае конических сходящихся ударных волн, генерируемых в цилиндрических образцах из меди, железа, алюминия, плексигласа, воды и пористого NaCl детонацией окружающих их зарядов взрывчатого вещества (ВВ). Ниже описываются измерения параметров головной волны в плексигласовых цилиндрах диаметром δ от 15 до 100 мм при использовании различных ВВ (ТНТ, гексоген и литой состав тротил — гексоген ТГ 40/60) по способу, предложенному в [2]. Схема опытов представлена на фиг. 1, на которой 1 — зеркало, 2 — элементы составного плексигласового цилиндра, 3 — воздушные зазоры, 4 — «амортизирующая прокладка» из очень пористой окиси магния, предназначенная для уменьшения влияния удара детонационной волны по дну цилиндра на зарождение и развитие головной волны. Ударная конфигурация и ее эволюция при распространении по цилиндру фиксировались по свечению воздушных зазоров скоростным фоторегистром СФР-1, работающим в режиме целевой фоторазвертки (стрелкой показан ход лучей к фоторегистру). Длина цилиндрических образцов бралась в 5—6 раз больше их диаметров, а диаметр заряда — втрое больше диаметра цилиндрического образца, чтобы избежать искажения картины ударного сжатия разгрузкой с боковой поверхности заряда.

Как видно из приведенной фотохронограммы (фиг. 2), в цилиндрическом образце генерируется сходящаяся конусообразная ударная волна с маховским отражением в вершине конуса. По фотохронограммам измерялись угол раствора ударного конуса α , скорость головной (маховской) волны D^* , ее диаметр d , радиус кривизны R и угол φ между осью цилиндра и касательной к поверхности головной волны в тройной точке O (фиг. 3).



Фиг. 2

Для определения α по фотохронограмме измерялся промежуток времени τ между моментами прохождения через зазор основания ударного конуса и предполагаемой вершины его. Осевая составляющая скорости ударного конуса равна скорости детонации D , поэтому

$$\alpha = \arctg \delta / 2 D \tau$$

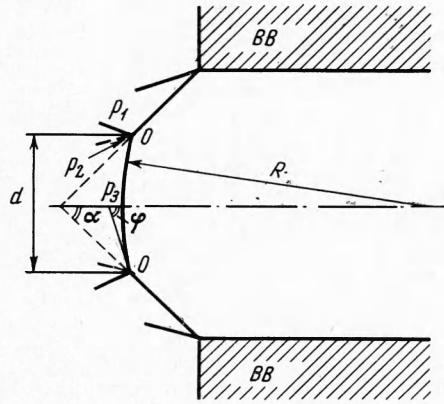
При нахождении R и φ принималось, что головная волна имеет форму сегмента сферы. Из фотохронограмм определялись высота головной волны h и D^* . Значение h определялось по величине промежутка времени между моментами прохождения через зазор основания головной волны OO и ее вершины. Тогда

$$R = \frac{1}{2} \left(\frac{d^2}{4h} + h \right), \quad \varphi = \frac{\pi}{2} - \arcsin \frac{d}{2R}$$

Разброс в одном опыте при определении величины D^* составляет $\pm 1.5\%$, для d он равен $\pm 4\%$. Определение величин α , R , φ связано с дополнительными построениями, поэтому разброс для них доходит до 5% .

Эволюцию головной волны можно разделить на два этапа: нестационарный, на котором происходит зарождение головной волны, а затем рост ее диаметра и радиуса кривизны (на этом участке $D^* > D$), и стационарный, на котором параметры головной волны достигли своих предельных значений и постоянны, причем скорость головной волны становится равной скорости детонации (фиг. 4). Длина нестационарного участка составляет 2—3 диаметра цилиндра, если в качестве ВВ взят гексоген; для ТГ он составляет 3—4 диаметра цилиндра и для ТНТ его длина примерно равна диаметру цилиндра.

Для одного и того же ВВ d и R прямо пропорциональны диаметру цилиндра (фиг. 5). Результаты измерения d , R , φ , α на стационарном участке для каждого из использовавшихся ВВ приведены в таблице. Там же приведены рассчитанные по ударной адиабате плексигласа давления (*кбар*) за ударным конусом p_1 (однократное сжатие), за головной волной в центре p_3 , а также давление p_2 за головной волной в тройной точке O . Использовалась ударная адиабата плексигласа, полученная авторами данной работы в виде $D = 2.60 + 1.50 u$ км/сек.



Фиг. 3

d / δ	R / δ	α°	φ°	p_1	p_3	p_2
--------------	--------------	----------------	-----------------	-------	-------	-------

ТНТ ($\rho_0 = 0.95$ г/см³, $D = 4.9$ км/сек)

0.57 | 1.1 | 55 | 75 | 45 | 89 | 80

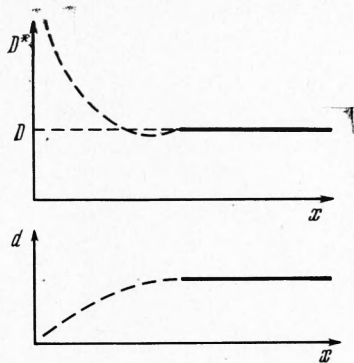
Гексоген ($\rho_0 = 1.2$ г/см³, $D = 6.75$ км/сек)

0.60 | 0.90 | 46 | 72.8 | 86 | 220 | 200

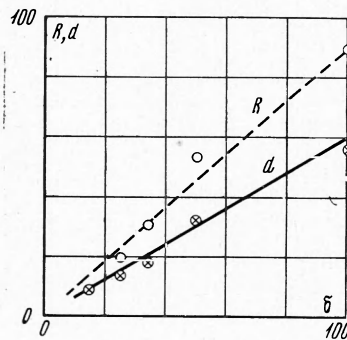
ТГ ($D = 7.8$ км/сек)

0.62 | 0.90 | 42.5 | 70,5 | 110 | 320 | 211

Уменьшение диаметра заряда из гексогена до 80 мм при диаметре цилиндрического образца 50 мм приводит к уменьшению угла α до $44 \pm 1^\circ$, уменьшению d до 0.48δ и некоторому увеличению длины нестационарного участка, что указывает на влияние волн разгрузки от боковой поверхности заряда.



Фиг. 4



Фиг. 5

Представляет интерес сравнить параметры маховского отражения в случае плоских ударных волн и конической сходящейся ударной волны. С этой целью был поставлен опыт по столкновению плоских ударных волн в плексигласовой призме по схеме, использовавшейся в [3]. Угол столкновения и амплитуда падающих ударных волн брались равными определенным из опытов с цилиндрами. Опыт показал, что в этом случае имеет место маховское отражение. Однако ширина головной волны (9—10 мм при высоте призмы 50 мм) значительно меньше, чем в цилиндре достаточно большого диаметра на том же расстоянии от места ее зарождения. По-видимому, это связано с усилением конической ударной волны по мере ее схождения к оси симметрии.

Данная работа, как и [2], была предпринята для выяснения условий ударного сжатия веществ при их сохранении в цилиндрических ампулах. В дополнение к [2] можно сказать следующее.

Угол раствора ударного конуса зависит от давления, развиваемого при детонации используемого ВВ, и скорости детонации. Как известно [4], параметры косой ударной волны, образованной в инертном веществе скользящей детонацией, фронт которой перпендикулярен границе между инертным веществом и ВВ, определяются пересечением поляры разгрузки продуктов взрыва и ударной поляры инертного материала. Вследствие осесимметричности параметры каждого элемента ударного конуса возрастают по мере схождения к оси цилиндра. В [4] отмечается, что, как показали Г. Биркгоф и Ж. М. Уолш, «нерегулярное отражение всегда должно иметь место в коническом сходящемся течении материала с «нормальным» уравнением состояния».

По-видимому, наблюдавшееся маховское отражение в плексигласовых цилиндрах аналогично нерегулярному отражению слабых ударных волн в газах [5], так как поляры падающей и отраженной волны не пересекаются (поляры строились без учета сходимости волны). Поэтому простая теория с одним тангенциальным разрывом [6] здесь неприменима. Учитывая это, а также наличие градиента параметров по радиусу цилиндра вследствие осесимметричности, о равенстве давлений за головной и отраженной ударными волнами можно говорить лишь в первом приближении. Что касается распределения массовых скоростей, то при нерегулярном отражении сильных ударных волн в газах скачок массовой скорости за маховской волной больше суммарного скачка за падающей и отраженной волнами. В случае взаимодействия слабых ударных волн это различие, по-видимому, не меньше. Этот факт наблюдался экспериментально [7].

Если ударная адиабата материала цилиндра имеет излом и скользящая детонация генерирует параметры, соответствующие области расщепления ударной волны, то образуются две косые волны [1,4]. Поскольку поток за первым ударным фронтом сверхзвуковой относительно фронта, то нет причины для появления маховского отражения. Усиления первой волны не происходит, так как любые возмущения в сторону увеличения давления отстают от первого ударного фронта. В этом случае маховское отражение может давать вторая волна с параметрами выше излома ударной адиабаты. При этом если маховская волна не выходит вперед вершины первого ударного конуса, то приравнять ее скорость к скорости детонации для определения развиваемого давления нельзя, так как вещество перед ней уже сжато и имеет некоторую скорость. В [4] методом отражения света от свободной поверхности железа наблюдалось маховское отражение второй пластической ударной волны, в то время как упругая волна и первая пластическая волна с амплитудой 130 кбар маховского отражения не давали. Маховская волна находилась позади вершины конуса первой пластической волны.

Поступила 19 VIII 1968

ЛИТЕРАТУРА

1. F o w l e s G. R., I s b e l l W. M. A method for hugoniot equation — ofstate measurements at extreme pressures. J. Appl. Phys., 1965, vol. 36, No. 4, p. 1377.
2. А д а д у р о в Г. А., Д р е м и н А. Н., К а н е л ь Г. И., П е р ш и н С. В. Определение параметров ударных волн в веществе при его сохранении в цилиндрических ампулах. Физика горения и взрыва, 1967, т. 3, № 2, стр. 281.
3. А л ь т ш у л е р Л. В., К о р м е р С. Б., Б а к а н о в а А. А., П е т р у н и н А. П., Ф у н т и к о в А. И., Г у б к и н А. А. Нерегулярные режимы косоугольного столкновения ударных волн в твердых телах. ЖЭТФ, 1961, т. 41 (511), вып. 5, 1382.
4. S t e r n b e r g H. M., P i a c e s i D. Interaction of oblique detonation waves with iron. Phys. Fluids, 1966, vol. 9, No. 7, 1307.
5. Б л и к н е й В., Т а у б А. Взаимодействие ударных волн, Вопросы ракетной техники, 1951, № 1.
6. Л а н д а у Л. Д., Л и ф ш и ц Е. М. Механика сплошных сред. М., Гостехиздат, 1954.
7. Б а ц а н о в С. С., Д о р о н и н Г. С., С т у п н и к о в В. П. О специфике ударного сжатия вещества в цилиндрических ампулах. Инж-физ. ж., 1967, т. 13, № 4.