

Как видно из приведенных графиков, при степенях нерасчетности, меньших половины величины относительного удлинения сопла, положение ЦСУ в струе, истекающей из щелевого сопла, подчиняется закономерностям плоской струи (для  $a \geq 2$ ).

При степенях нерасчетности  $\sim 14a$  (и, по-видимому, при больших ее значениях) положение ЦСУ в струе, истекающей из щелевого сопла, совпадает с его положением в струе, истекающей из осесимметричного сопла с таким же расходом газа.

Авторы благодарят К. А. Волосова за помощь в обработке экспериментальных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Крист, Шерман, Гласс. Исследование сильно недорасширенных звуковых струй. — РТК, 1966, № 1.
2. Уэри, Шаффер, Дрифтмайер. Центральные скачки в свободных струях. — РТК, 1970, № 12.
3. Соколов Е. И., Усков В. И. Экспериментальное исследование трехмерных недорасширенных струй. — В кн.: Гидроаэромеханика и теория упругости. Межвуз. сборник научн. трудов. Днепропетровск: ДГУ, 1976, вып. 20.

Поступила 1/VII 1985 г.

УДК 532.546

### ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ СХОДЯЩИХСЯ КОНИЧЕСКИХ УДАРНЫХ ВОЛН В ПОРИСТЫХ ОБРАЗЦАХ

И. М. Воскобойников, М. Ф. Гоголя, Н. Г. Демченко  
(Москва)

В работе приведены результаты изучения взаимодействия конических ударных волн (УВ) в пористых образцах алюминия, магния, иодистого калия, графита, железа, смесей алюминия с железом и алюминия с иодистым калием (соответственно 50/50 и 70/30 по весу).

Для создания сходящихся конических УВ образцы 1 помещались в оболочку 2 из литого ТГ50/50 (плотность  $1,68 \text{ г/см}^3$ , скорость детонации  $7,65 \text{ км/с}$ ) с внешним диаметром 40 мм и внутренним 20 мм (рис. 1, а). В большинстве опытов высота оболочки 60 мм. Иницирование детонации оболочки проводилось генератором плоского фронта 3 через алюминиевую пластину 4 толщиной 2 мм. Детонационная волна, распространяющаяся по оболочке, вызывала в исследуемых образцах сходящиеся УВ со скоростью  $D_0$ . На верхний торец экспериментальной сборки в первой серии опытов помещался набор плексигласовых пластин 5 с воздушными зазорами 0,08 мм. Ожидалось, что высвечивание зазоров даст информацию о конфигурации выходящей УВ и ее параметрах в плексигласе. Запись процесса проводилась скоростным фоторегистром при скорости непрерывной развертки  $3,75 \text{ мм/мкс}$ , щель устанавливалась по диаметру сборки.

Фотограммы опытов с образцами алюминия (рис. 1, б) различной начальной плотности от  $2,71$  до  $1,08 \text{ г/см}^3$  качественно подобны и показыва-

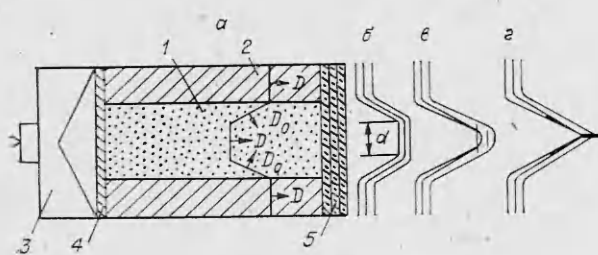


Рис. 1

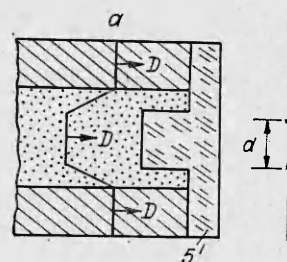


Рис. 2

ют наличие нерегулярного взаимодействия, которое характеризуется образованием маховского диска в вершине конической УВ. В принципе используемый в первой серии опытов метод регистрации может давать истинную ударно-волновую картину только в том случае, когда отсутствует искажение геометрии ударных фронтов дополнительными волнами, которые могут возникать в момент взаимодействия конической УВ с поверхностью плексигласовой преграды и, кроме того, нет искажения от УВ в плексигласовой сборке, вызванной продуктами детонации оболочки. В связи с этим проведены контрольные опыты (вторая серия), в которых сборка из плексигласовых пластин заменялась на профилированную 5' (рис. 2, а). Высота плексигласового цилиндра, вводимого в пористый образец, рассчитывалась на основании уже полученных фотограмм из первой серии так, чтобы была одновременная засветка от детонационной волны в оболочке и маховского диска в образце. Диаметр цилиндра взят несколько больше, чем зарегистрированный в первой серии опытов диаметр маховского диска  $d$ . Полученная фотограмма представлена на рис. 2, б. Видно, что высвет зазоров происходит практически одновременно, а засветка от маховского диска по размерам соответствует полученной ранее на той же пористости алюминия ( $\rho_{00} = 1,08 \text{ г/см}^3$ ). Таким образом, если на фотограммах опытов с алюминиевыми образцами, которые получены в первой серии, и имеются искажения, то они незначительны.

Процесс формирования стационарного маховского диска в центральной части канала имеет достаточно сложный характер и в настоящей работе не рассматривается. Основные эксперименты проводились с оболочками высотой около 60 мм, но были опыты, в которых высота оболочек 40 мм. В таких случаях фотограммы ничем не отличались от полученных на более высоких оболочках. Это указывает на то, что при данной постановке опытов стационарный маховский диск устанавливается на расстояниях менее 40 мм и скорость его распространения равна скорости детонации оболочки  $D$ .

Диаметры маховских дисков  $d$  в опытах с пористыми образцами алюминия уменьшаются с ростом пористости образцов. Аналогичные фотограммы получены и в опытах с пористыми образцами магния.

Нерегулярное взаимодействие с образованием маховского диска также наблюдалось и в первой серии опытов с пористыми образцами графита (рис. 1, в), но достоверное измерение диаметра маховского диска в данном случае затруднено из-за частичного перекрытия высветов первого и второго воздушных зазоров в плексигласовой сборке. По-видимому, это вызвано тем, что скорость распространения косой УВ вдоль границы плексиглас — исследуемое вещество меньше скорости УВ в плексигласовой сборке, вызванной продуктами детонации оболочки. Фотограммы, полученные во второй серии опытов, лишены этого недостатка и позволили более точно определить диаметр маховского диска и конфигурацию УВ. Качественно вид записи подобен представленной на рис. 2, б.

Для образцов иодистого калия и пористого железа в первой серии экспериментов не удалось зарегистрировать маховского взаимодействия. На полученных фотограммах видно перекрытие высветов первого и второго воздушных зазоров плексигласовой сборки. Кроме того, в центральной части фотограмм опытов с пористыми образцами железа фиксируется сплошная засветка (рис. 1, г). Эксперименты, проведенные по второй схеме регистрации, показали наличие небольшого маховского диска ( $\sim 3 \text{ мм}$ ) в образцах йодистого калия с плотностью  $3,1 \text{ г/см}^3$ . Зарегистрировать размеры диска меньше 3 мм в подобной постановке опытов трудно, и поэтому исследования образцов с большей пористостью не проводились. В опытах с пористыми образцами железа удалось добиться одновременности высветов зазоров на торце сборки и в глубине образца при высоте плексигласового цилиндра 25 мм и диаметре 6 мм (высота оболочки 55 мм). Но судить о наличии маховского диска и его размерах трудно, так как размер засветки не превышает 2 мм. При уменьшении высоты вводимого в образец цилиндра засветка в центральной части увеличивается до

Таблица 1

Вещество	$\rho_{00}$ , г/см <sup>3</sup>	$\epsilon$	$d$ , мм	$p_1$ , ГПа	$u$	$u^*$	$p^*$	$p_2$
					км/с		ГПа	
Al	1,08	0,60	6,9	47+4	3,33	5,05	32,2	47,9
	1,22	0,55	7,6	45+3	3,20	4,72	36,0	46,2
	1,78	0,34	8,2	37+3	2,85	3,70	43,6	37,9
	2,25	0,17	8,5	26+2	2,44	2,82	45,0	30,0
	2,71	0	9,8	15+1	—	1,73	35,8	18,1
Mg	0,42	0,76	10,1	42+3	3,65	6,09	12,8	44,0
	0,80	0,53	10,5	39+3	3,44	4,97	23,1	40,0
	1,22	0,29	11,8	33+3	3,13	3,88	31,0	34,6
	1,55	0,10	12,1	29+2	2,76	2,99	33,8	28,8
	1,72	0	—	—	—	2,47	32,6	24,8
Графит	0,80	0,64	6,4	50+4	3,37	5,14	24,2	44,5
	2,20	0	—	—	—	2,04	34,3	20,9
KI	1,32	0,57	—					
	3,10	0	~3					
Fe	2,50	0,68	—					
0,5Al + 0,5Fe	1,76	0,56	4,0	—	3,35	4,91	51,2	54,0
	2,55	0,37	—	43+4	3,06	3,99	65,4	47,0
	3,20	0,21	5,0	38+3	2,76	3,24	71,7	39,8
	4,03	0	—	—	—	2,17	66,9	27,9
0,7Al + 0,3KI	2,77	0,01	8,9	28+3	—	2,55	54,4	29,9

3,5 мм при высоте 19 мм, но растет разновременность выхода волн. По-видимому, в случае образцов из пористого железа высота используемой оболочки недостаточна для установления стационарного маховского диска в центральной части канала.

Определенный интерес представляют исследования взаимодействия УВ в смесях различных веществ. Проведены опыты с образцами механических смесей алюминия с подистым калием плотностью 2,77 г/см<sup>3</sup>, что близко к максимальной 2,79 г/см<sup>3</sup>, и алюминия с железом различной начальной плотности. В первой смеси фиксировалось маховское взаимодействие. В смеси алюминия с железом при первом способе регистрации фотографии показали маховское взаимодействие при плотностях образцов 3,2 и 2,55 г/см<sup>3</sup>, причем на плотности 2,55 г/см<sup>3</sup> регистрировалось частичное перекрытие выветов первого и второго воздушных зазоров. На плотности 1,76 г/см<sup>3</sup> выветы зазоров перекрывались и четко выраженного маховского диска в выбранной постановке опытов не наблюдалось. Фотографии опытов, полученные по второй схеме регистрации, показали наличие маховского диска в образцах плотностью 3,2 и 1,76 г/см<sup>3</sup>.

Результаты обработки фотографий представлены в табл. 1, где приводятся начальные плотности образцов  $\rho_{00}$ , относительные пористости  $\epsilon = 1 - \rho_{00}/\rho_0$ , диаметры маховских дисков  $d$ , давления  $p_1$  в плексигласовой преграде в области маховского диска. Из экспериментальных данных следует, что давление  $p_1$  увеличивается, а размер маховского диска уменьшается с ростом пористости образцов.

Состояния, которые реализуются в маховском диске, определяются материалом пористого образца, пористостью и скоростью распространения  $D$ . Скорость  $D$  в выбранной постановке опытов постоянна и равна скорости детонации оболочки (во всех случаях, кроме опытов с железными образцами). Если рассматривать ударное сжатие пористых образцов в рамках одномерной модели [1], в которой пористый образец заменяется

Таблица 2

Вещество	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$a$ , км/с	$b$
Al	2,71	5,25	1,39
Mg	1,72	4,78	1,16
Графит	2,2	4,057	1,763
KI	3,1	1,8	1,4
Fe	7,85	3,8	1,58
0,5Al + 0,5Fe	4,03	4,52	1,443
0,7Al + 0,3KI	2,79	3,82	1,5
Плексиглас	1,18	3,1	1,32

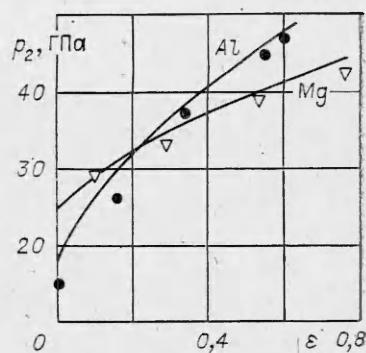


Рис. 3

набором параллельных пластин с зазорами, то при обычных предположениях относительно сжимаемости сплошного вещества скорость распространения волны в наборе определяется выражением

$$D^{-1} = (1 - \epsilon) D_1^{-1} + \epsilon (2u)^{-1},$$

где  $D_1$  — скорость волны;  $u$  — массовая скорость за фронтом УВ в пластине. Конечное состояние при ударном сжатии пористого образца ( $p^*$ ,  $u^*$ ) в рамках этой модели лежит на изэнтропе сплошного вещества, проведенной из состояния с массовой скоростью  $u$ . Рассчитанные значения  $p^*$ ,  $u^*$  и  $u$  представлены в табл. 1. Для сравнения там же приведены рассчитанные параметры УВ для сплошных образцов и соответствующие давления в плексигласовой преграде. При расчете использовались ударные адиабаты сплошных материалов в виде  $D = a + bu$ . Начальные плотности  $\rho_0$  и значения коэффициентов  $a$  и  $b$  взяты из [2] и представлены в табл. 2. Ударные адиабаты сплошных смесей строились в предположении аддитивности удельных объемов компонентов при равных давлениях [3].

По известным состояниям в области маховского диска рассчитаны давления  $p_2$  в плексигласовой преграде, которые хорошо совпадают с экспериментальными значениями  $p_1$  (табл. 1 и рис. 3). Незначительное систематическое превышение рассчитанных значений над экспериментальными для металлических образцов можно объяснить затуханием УВ на базе измерения. Для образцов графита наблюдается занижение  $p_2$ , что, вероятно, связано с невыполнением предположения о зеркальности изэнтропы и ударной адиабаты графита в  $p - u$ -координатах, которое используется при расчетах в рамках слоистой модели.

Итак, проведенное исследование показало, что при взаимодействии сходящихся конических УВ в пористых образцах алюминия, магния, графита, смесей алюминия с железом и алюминия с иодистым калием наблюдается маховское взаимодействие. В использованной постановке опытов с пористыми образцами железа не устанавливался стационарный маховский диск, по-видимому, это связано с недостаточной высотой обложки.

В случае маховского взаимодействия происходит увеличение передаваемого в плексигласовую преграду давления с ростом пористости образцов при уменьшении размера маховского диска.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Thouvenin J. Effect of a shock wave on a porous solid.— In: IV Symposium (Intern.) on Detonation. Washington, 1967.
2. Баум Ф. А., Орленко Л. П., Станюкович К. П. и др. Физика взрыва. 2-е изд. перераб.— М.: Наука, 1975.
3. Дремни А. Н., Карпухин П. А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ.— ПМТФ, 1960, № 3.

Поступила 30/V 1985 г.