

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Подгребенков А. Л. Усиление слабых ударных волн в горячей двухфазной системе жидкость — газ. ПМТФ, 1970, № 1, стр. 168—174.
2. Борисов А. А., Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М., Подгребенков А. Л. Механизм образования волны сжатия за фронтом слабой ударной волны, распространяющейся по горячей двухфазной смеси. Докл. АН СССР, 1970, т. 190, № 3, стр. 621—625.
3. Domich E. G., Hanson A. R., Adams H. S. Shock tube investigation of the breakup of drops by air blasts. Phys. Fluids, 1963, vol. 6, No. 8, pp. 1071—1080.
4. Dickerson R. A., Coultas T. A. Breakup of droplets in an accelerating gas flow. AIAA paper, 1966, No. 611.
5. Sami M., Ogasawara M. Study on the burning of a full drop in heated pressurized air stream. Bull. JSME, 1970, vol. 13, No 57, pp. 395—404.
6. Гельфанд Б. Е., Губин С. А., Когарко С. М. Деформация струй и капель жидкости в сносящем газовом потоке. Изв. АН СССР, МЖГ, 1971, № 3, стр. 82—88.

УДК 539.3

ВЛИЯНИЕ ТЯЖЕЛЫХ ПРИМЕСЕЙ НА РЕЖИМЫ ДЕТОНАЦИИ
КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ*Л. В. Альтшулер, В. Т. Рязанов, М. П. Сперанская**(Москва)*

Исследовалось влияние тяжелых металлических добавок на режимы детонации конденсированных взрывчатых веществ (ВВ). Зафиксировано сильное снижение давлений детонации. Эффект объясняется возникновением режимов с повышенными скоростями детонации, не удовлетворяющих условию Чепмена — Жуге. Для составов с большим содержанием металла обнаружено дополнительное снижение давлений, вызванное охлаждающим влиянием примесей. Экспериментальные результаты сопоставлены с расчетами, выполненными в аддитивном приближении.

Введение тяжелых металлических примесей существенно влияет на параметры детонационных волн и газодинамику продуктов взрыва. Данное исследование посвящено экспериментальному изучению первого из этих вопросов.

Как известно [1], состояния детонации конденсированных ВВ определяются уравнением адиабаты Гюгонио

$$\epsilon_c = Q + \frac{1}{2} p (v_0 - v) \quad (1)$$

и условием Чепмена — Жуге

$$-\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s = \frac{p}{v_0 - v} \quad (2)$$

Здесь ϵ — удельная внутренняя энергия продуктов взрыва (ПВ), Q — теплота реакции, p — давление ПВ, $v_0 v$ — начальный удельный объем ВВ и удельный объем ПВ, s — энтропия.

Пренебрегая возможными эффектами перераспределения тепловой энергии, будем рассчитывать сжимаемость смесевых составов в так называемом аддитивном приближении [2, 3]. При этом подходе удельный объем смеси

$$v_c(p) = \alpha v_i(p) + (1 - \alpha) v(p) \quad (3)$$

представляет собой сумму удельных объемов продуктов взрыва и тяжелой фракции отвечающих их индивидуальным ударным адиабатам при одном и том же давлении.

Условием Чепмена — Жуге гетерогенных смесей на основании (3) является уравнение

$$-\left[\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_s + \frac{\alpha}{1 - \alpha} \left(\frac{\partial v_i}{\partial p}\right)_s\right]^{-1} = p \left[v_0 - v + \frac{\alpha}{1 - \alpha} (v_{0i} - v_i) \right]^{-1} \quad (4)$$

В (3), (4) α — весовая доля инертной добавки, v_{0t} и v_t — ее начальные и конечные удельные объемы.

В двух идеализированных ситуациях прибавление тяжелых добавок, увеличивая время разлета продуктов взрыва, не изменяет давлений детонации исходного взрывчатого вещества. Действительно, как следует из уравнения (4), давление Жуге инвариантно при несжимаемых и линейно-сжимаемых добавках. В первом случае инвариантность сохраняется из-за обращения в нуль выражений $(\partial v_t / \partial p)_s$ и $(v_{0t} - v_t)p^{-1}$, во втором — из-за их равенства. Эти результаты характеризуют влияние добавок из малосжимаемых металлов в рамках аддитивного приближения. Реальные добавки, обладающие конечной теплоемкостью и теплопроводностью, поглощают часть энергии взрыва. Как показывают оценки, при 50% содержания тяжелых металлов, установление теплового равновесия в смеси понижает температуру продуктов взрыва исходного взрывчатого вещества и давления на 6–9% и 4–6% соответственно.

Для экспериментальной проверки предположений, основанных на аддитивном приближении, и для выявления действительно реализующихся режимов детонации было предпринято изучение смесей бризантного взрывчатого вещества с вольфрамом. Основной компонентой смеси являлся экспериментальный состав с начальной плотностью $\rho_0 = 1.82 \text{ г/см}^3$ ($v_0 = 0.55 \text{ см}^3/\text{г}$), скоростью детонации $D = 8.9 \text{ км/сек}$ и эффективным показателем адиабаты $n = 2.65$, найденным по методу преград [4].

При этих параметрах уравнение

$$p \cdot 10^{-1} \text{ кбар} = 16.9 (v_0/v)^{2.65} \quad (5)$$

описывает адиабату ПВ вблизи состояния Жуге.

В качестве примеси использовался порошкообразный вольфрам с кристаллической плотностью 19.17 г/см^3 ($v_0 = 0.052 \text{ см}^3/\text{г}$), адиабата которого по [5] может быть представлена выражением

$$p \cdot 10^{-1} \text{ кбар} = \frac{3.97^2 (v_{0t} - v_t)}{(1.27v_t - 0.27v_{0t})^2} \quad (6)$$

ответающему линейному $D - U$ -соотношению вольфрама $D_{\text{W}} = 3.97 + 1.27 U$ [6], связывающему скорость D_{W} ударных волн в вольфраме с массовой скоростью U вещества за фронтом волны. (Здесь и далее D и U даны в км/сек.)

По уравнениям (5), (6) на основании соотношения аддитивности (3) были получены адиабаты продуктов взрыва смесевых составов и по наклону графиков $\ln p - \ln v_c$ найдены их эффективные показатели n . Параметры адиабат и ожидаемые характеристики состояний Жуге даны в табл. 1, где приведены концентрации вольфрама $\alpha\%$, начальные плотности ρ_{0c} и начальные удельные объемы смесей v_{0c} , показатели n , удельные объемы в точках Жуге $v_* = nv_{0c}/(n+1)^{-1}$ и отвечающие им давления p_* , массовые скорости U_* и скорости детонации D . Для составов с большим содержанием вольфрама полученные начальные плотности оказались меньше расчетных, вычисленных по уравнению (3). Данные, отвечающие фактическим плотностям, приведены в табл. 1 в скобках. Расчеты выявляют практически постоянные давления детонации для всех непористых составов и резкое уменьшение у них ожидаемых скоростей детонации и массовых скоростей.

Экспериментальная программа исследований состояла в измерении скоростей детонации и определении по методу преград состояний Жуге.

Таблица 1

Расчетные параметры детонации смесевых составов

$\alpha, \%$	$\rho_{0c}, \text{ г/см}^3$	$v_{0c}, \text{ см}^3/\text{г}$	n	$v_*, \text{ см}^3/\text{г}$	$p_*, \text{ кбар}$	$U_*, \text{ км/сек}$	$D, \text{ км/сек}$
0	1.82	0.55	2.65	0.399	395	2.44	8.9
20	2.22	0.45	2.70	0.328	395	2.20	8.1
40	2.85	0.351	2.77	0.258	395	1.92	7.23
60	3.98	0.251	2.98	0.188	395	1.58	6.28
70	4.95	0.201	3.12	0.152	395	1.39	5.71
70	(4.92)	(0.203)	3.12	(0.154)	(385)	(1.37)	(5.69)
80	6.61	0.152	3.30	0.116	395	1.20	5.08
80	(6.42)	(0.156)	3.30	(0.12)	(371)	(1.16)	(5.01)
90	9.84	0.102	4.31	0.082	395	0.91	4.62
90	(8.20)	(0.122)	4.31	(0.099)	(171)	(0.63)	(3.32)

Таблица 2

Экспериментальные результаты определения детонационных параметров смесевых составов

α , %	ρ_{0c} , г/см ³	W_{A1} , км/сек	U_* , км/сек	D , км/сек	p_* , кбар	v_* , см ² /г	ΔD , км/сек
0	1.82	3.97	2.44	8.90	395	0.399	0
20	2.22	2.87	1.55	8.47	291	0.368	0.37
40	2.85	2.47	1.21	7.78	268	0.296	0.55
60	3.98	2.06	0.91	6.65	241	0.217	0.37
70	4.92	1.81	0.77	5.80	220	0.176	-0.11
80	6.42	1.59	0.66	4.70	199	0.134	-0.31
90	8.20	—	—	3.08	—	—	-0.24

Перед прессованием порошкообразное ВВ и дисперсный вольфрамовый порошок (размер зерен 5—10 мк) тщательно перемешивались в нужных пропорциях. Смесевые составы изготавливались в форме шашек диаметром 60 мм и высотой 20 мм, из которых затем складывались заряды нужной длины (60—80 мм). Заметная пористость у образцов появляется при весовом содержании вольфрама, превышающем 60%. Измерение скоростей детонации осуществлялось двумя способами — фотохронографическим и осциллографическим при помощи электроконтактов. Во всех опытах заряды исследуемого смесевое состава инициировались шашкой из сплава ТГ 40/60, диаметром 60 мм и высотой 60 мм. Электроконтакты (медная фольга толщиной 0.04 мм) помещались между шашками вблизи их оси и последовательно замыкались детонационной волной.

Для определения давлений и массовых скоростей на фронте детонационных волн на сборках, аналогичных описанным в [5, 6], были зафиксированы скорости W_{A1} движения свободной поверхности алюминиевых преград на расстоянии 5 мм от границы раздела металл — заряд. В этих опытах в инициирующей шашке из сплава ТГ 40/60 при помощи дополнительной выпрямляющей линзы создавалась плоская детонационная волна. Полученные величины были затем экстраполированы к границе ВВ. Величина поправки на затухание, найденная расчетно, была принята равной 5%. В качестве материала преград использовался алюминий, плотностью 2.7 г/см³, адиабата которого согласно [7] взята в виде соотношения $D_{A1} = 5.25 + 1.39 U$. Параметры детонации были найдены построениями на диаграммах давление — скорость. С этой целью через состояния алюминиевых преград под углом $\beta = \arctg(-\rho_{0c} D)$ проводились прямые до пересечения с соответствующими детонационными лучами $p = \rho_{0c} D U$ смесевых составов.

Результаты экспериментального определения параметров детонационных волн для разных составов приведены в табл. 2. В последнем столбце здесь даны разности ΔD экспериментальных и расчетных скоростей детонации.

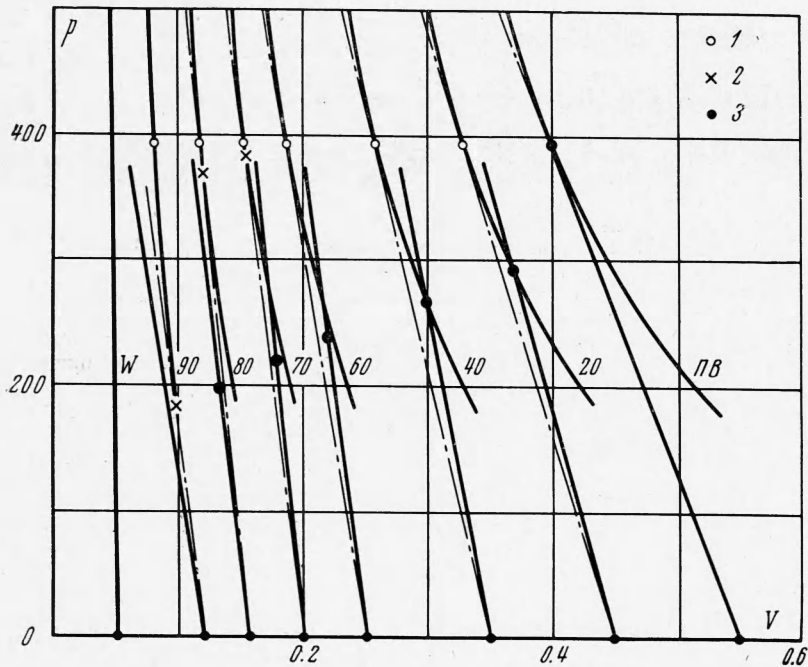
Анализ экспериментальных данных и их сравнение с расчетными оценками приводят к следующим выводам. При весовых концентрациях вольфрама до 60% включительно имеет место небольшое превышение экспериментальных скоростей детонации над расчетными, а при больших содержаниях металла — примерно такое же снижение. Несмотря на увеличение скоростей детонации смесей по сравнению с расчетом при концентрации вольфрама до 60%, давления и массовые скорости резко отличаются от расчетных в меньшую сторону. Для смеси с 20%-ным содержанием вольфрама снижение давлений составляет 26%, а при 40% вольфрама — 32%.

Для интерпретации этих парадоксальных результатов на диаграмме (фигура) были построены адиабаты смесей с расчетными состояниями Жуге для монолитных (точки 1) и пористых (точки 2) составов, а также нанесены экспериментальные волновые прямые

$$\frac{p}{v_{0c} - v_c} = \frac{D^2}{v_{0c}^2} \quad (7)$$

точками своего касания или пересечения с смесевыми адиабатами, определяющими возникающие режимы детонации. Для составов с 20, 40 и 60% вольфрама экспериментальные зарегистрированные состояния Жуге (точки 3) практически совпадают с местами пересечений, расположенными ниже точек касания. Здесь осуществляются предсказанные Я. Б. Зельдовичем в [8] режимы принудительной детонации, скорости которых превышают скорости детонационных процессов, удовлетворяющих условию

Чепмена — Жуге. Распространение взрывного процесса у ряда составов с завышенными «негидродинамическими» скоростями авторы объясняют опережающим распространением детонации по зернам взрывчатого вещества между частицами металла. Примечательно, что небольшое увеличение волновых скоростей приводит к очень сильному снижению давлений детонации.



При больших содержаниях вольфрама (70, 80 и 90%) волновые лучи и экспериментально зафиксированные состояния расположены существенно ниже рассчитанных адиабат. Это обстоятельство, по-видимому, объясняется охлаждением ПВ вольфрамовой компонентой и смещением вследствие этого равновесных адиабат по отношению к вычисленным в сторону меньших давлений.

Поступила 2 VI 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Зельдович Я. Б., Компанец А. С. Теория детонации. М., Гостехиздат, 1955.
2. Дремин А. Н., Карпухин И. А. Метод определения ударных адиабат дисперсных веществ. ПМТФ, 1960, т. 3, стр. 184.
3. Алексеев Ю. Ф., Альтшулер Л. В., Крупникова В. П. Ударное сжатие двухкомпонентных парафино-вольфрамовых смесей. ПМТФ, 1971, № 4.
4. Альтшулер Л. В. Применение ударных волн в физике высоких давлений. Усп. физ. н., 1965, т. 85, вып. 2.
5. Альтшулер Л. В., Крупников К. К., Леденев Б. Н., Жучихин В. И., Бражник М. И. Динамическая сжимаемость и уравнение состояния железа при высоких давлениях. ЖЭТФ, 1958, т. 34, вып. 4.
6. Крупников К. К., Бражник М. И., Крупникова В. П. Ударное сжатие пористого вольфрама. ЖЭТФ, 1962, т. 42, вып. 3.
7. Альтшулер Л. В., Кормер С. Б., Баканова А. А., Трунин Р. Ф. Уравнение состояния алюминия, меди и свинца для области высоких давлений. ЖЭТФ, 1960, т. 38, № 3, стр. 790.
8. Зельдович Я. Б. Теория ударных волн и введение в газодинамику. М., Изд-во АН СССР, 1946.