

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Я. Апин, И. М. Воскобойников. ПМТФ, 1960, 4.
2. Г. А. Авакян. Расчет энергетических и взрывчатых характеристик ВВ. М., изд-е ВИА им. Дзержинского, 1964.
3. M. J. Kamlet, H. Nuzwitz. J. Chem. Phys., 1968, 48, 8.
4. Д. Сталл, Э. Вестрам, Г. Зинке. Химическая термодинамика органических соединений. М., «Мир», 1971.
5. M. Dewitte. Explosifs, 1967, 18, 3.
6. С. Сарнер. Химия ракетных топлив, М., «Мир», 1969.
7. Р. Х. Курбангалина, Н. Н. Тимохин. ФГВ, 1970, 6, 4.
8. К. Юхансон, П. Персон. Детонация взрывчатых веществ. М., «Мир», 1973.

ИЗЭНТРОПИЧЕСКОЕ РАСШИРЕНИЕ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ПРОДУКТОВ ВЗРЫВА ТРОТИЛА

А. А. Евстигнеев, М. В. Жерноклетов, В. Н. Зубарев

Основой для получения уравнения состояния продуктов взрыва (ПВ) при высоких давлениях служат экспериментальные данные по исследованию параметров детонационных волн. При начальных плотностях ВВ $\rho_0 = 1 \div 2$ г/см³ давление за фронтом детонационных волн составляет 100–400 кбар. Температура ПВ при этом равна $(2 \div 5) \cdot 10^3$ К. С точки зрения расчета параметров детонации определение уравнения состояния ПВ наиболее интересно в этой области давлений и температур. Решение других задач, таких как разгон пластин, взрыв в грунте, взрывное упрочнение и др., требует знания уравнения состояния в значительно более широком интервале давлений — от 1 млн. атм (отражение детонационных волн от жестких преград, пересжатые детонационные волны) до давлений нескольких атмосфер.

В последние годы при исследовании уравнений состояния ПВ использовалось экспериментальное изучение их изэнтропического расширения [1–4]. Благодаря условию касания, по параметрам состояния Жуге устанавливается не только точка в p — V -плоскости (p — давление, V — удельный объем), но и изэнтропическая производная, являющаяся в точке Жуге общей для изэнтропы, детонационной адиабаты и адиабаты повторного ударного сжатия (кривая торможения). Поэтому при давлениях, не сильно отличающихся от давления в состоянии Жуге, можно считать ударную адиабату совпадающей с изэнтропой ПВ и описывать их единой зависимостью. Точность такого описания во многих случаях оказывается достаточной.

В настоящее время экспериментально исследовано поведение ПВ целого ряда ВВ, в том числе и смесевых ВВ на основе тротила и гексогена с различным содержанием компонент [1, 4]. Поскольку еще не установлены универсальные правила, позволяющие описать с хорошей точностью поведение ПВ широкого класса ВВ, при решении многочисленных практических задач необходимо знание кривых расширения и торможения конкретных взрывчатых веществ, что является (совместно с измеренными параметрами детонации) главным источником сведений об уравнении состояния плотных газов. Несмотря на очень широкое применение тротила на практике, в экспериментальном отношении поведение ПВ тротила изучено неполно. В частности, в литературе отсутствуют экспериментальные данные об изэнтропическом расширении ПВ тротила.

Расчет изэнтроп до больших степеней расширения ПВ тротила (начальные плотности ВВ составляли 1,5 и 1,0 г/см³) был выполнен в работе [15]. Для этого была использована экспериментальная зависимость скорости детонации (D) от начальной плотности ВВ (ρ_0) и сделаны расчеты в некоторых упрощающих предположениях. Отсутствие прямых экспериментальных данных в широкой области давлений (100 ÷ ÷ 1 кбар) ограничивает надежность этих расчетов. Для выполнения этого пробела в настоящей работе исследовалось изэнтропическое расширение ПВ прессованного тротила начальной плотности $\rho_0 = 1,63$ г/см³ в широком диапазоне давлений.

Изэнтропа ПВ исследовалась методом «преград» [6]. По этому методу измеряются параметры ударной волны в инертном материале (преграде), контактирующем с исследуемым ВВ. Измерения волновой скорости в преграде с известными динамическими свойствами позволяют определить точку на кривой расширения (или нагрузки) ПВ. Иницирование плоских детонационных волн в зарядах из исследуемого ВВ осуществлялось плосковолновыми линзами [6]. Заряды готовились в виде цилиндров диаметром 90 и длиной 40 мм. В качестве преград использовались следующие материалы: магний, фторопласт-4, плексиглас, пенопласт различной начальной плотности, а также ксенон и аргон при различных начальных давлениях. Кроме этого, были использованы данные по отражению ПВ ТНТ от алюминия, полученные ранее [7].

Измерение скоростей ударных волн в твердых преградах производилось осциллографически с помощью электроконтактов [6]. Для выявления затухания ударных волн в преградах проводилось измерение их скоростей при различных толщинах преград. За толщину преграды x ,

Таблица 1

Материал	ρ_0 , атм	ρ_0 , г/см ³	D , км/с	u , км/с	p , кбар
Алюминий*	—	2,71	7,10+0,04	1,32	254
Магний	—	1,74	6,68+0,05	1,72	200
Фторопласт-4	—	2,18	5,00±0,05	1,78	194
Плексиглас	—	1,18	5,97+0,02	2,17	153
Пенопласт	—	0,74	5,03+0,04	2,77	103
»	—	0,58	4,93+0,05	3,03	86,6
»	—	0,32	4,82+0,04	3,60	55,5
Ксенон	40	0,215	4,39+0,07	3,83	36,1
»	30	0,174	4,59+0,07	4,04	32,2
»	20	0,113	4,86+0,07	4,31	23,7
»	10	0,0538	5,42+0,08	4,85	14,1
Аргон	20	0,0352	6,08+0,04	5,13	11,0
Ксенон	5,6	0,0338	5,82+0,04	5,24	10,3
»	5	0,0290	6,06+0,08	5,46	9,60
Аргон	10	0,0176	6,47+0,11	5,54	6,31
»	5	0,00880	6,88+0,10	5,98	3,62
Ксенон	1	0,00596	7,16+0,05	6,51	2,78
Аргон	3	0,00533	7,09+0,11	6,21	2,35
»	2	0,00352	7,59+0,12	6,71	1,79
»	1	0,00175	8,02+0,06	7,16	1,06

* Из работы [7].

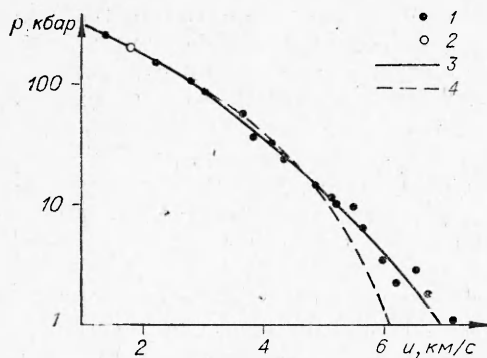


Рис. 1. Изэнтропа расширения ПВ тротила. 1 — экспериментальные точки; 2 — состояние Жуге; 3 — изэнтропа по уравнению (1); 4 — изэнтропа, соответствующая кубическому уравнению состояния.

в функции от которой определялись параметры ударной волны, принималось расстояние от поверхности ВВ до середины базы измерения. Величина x менялась от 2 до 6,5 мм. Для перехода к параметрам состояния на кривой торможения ПВ зависимость $D=D(x)$ необходимо экстраполировать к толщине преграды, соответствующей границе области повышенных давлений химического пика. В данной работе принималась экстраполяция к $x=0$. Оценки этой величины для магния дают значение ~ 1 мм.

Экстраполяция экспериментальных результатов к $x=0$ и к $x=1$ мм приводит к расхождению в определении D в 1%, что находится в пределах ошибок измерения.

Измерение скоростей ударных волн в инертных газах осуществлялось фотохронографически по схеме, аналогичной [4]. База измерений варьировалась от 5 до 12 мм. Точки на изэнтропе ПВ получались, как и в случае твердых преград, экстраполяцией к нулевой толщине «преграды».

Результаты обработки экспериментальных данных как при разлете ПВ в инертные газы, так и при разгрузке в твердые преграды представлены в табл. 1 и на рис. 1. В табл. 2 даны $D-u$ -соотношения, использованные для расчета массовых скоростей (u) в твердых преградах. Ударные адиабаты инертных газов принимались в соответствии с расчетными данными [12]. Экспериментальные точки, полученные при торможении ПВ о преграды из алюминия и магния, вообще говоря, лежат не на изэнтропе, а на второй ударной адиабате. Однако в силу близости их к точке Жуге и с учетом условия касания можно пренебречь при этих давлениях различием в ходе второй ударной адиабаты и изэнтропы.

Полученные экспериментальные результаты позволяют определить параметры фронта детонационной волны. Это осуществлялось пересечением детонационного луча ($p = \rho_0 D_0 u$) и изэнтропы расширения ПВ (при $\rho_0 = 1,63$ г/см³ принята скорость детонации $D_0 = 7,00$ км/с).

Как видно из табл. 3, приведенные значения давлений в состоянии Жуге, полученные разными авторами, существенно отличаются. Этот факт отмечается в [16], где указывается, что давления детонации Жуге не измеряются непосредственно, а извлекаются, как правило, из экспериментальных определений ударных скоростей и скоростей свободной

Таблица 2

Материал	c_0 , км/с	λ *	Литература
Магний	4,49	1,26	[8]
Фторопласт-4	2,18	1,58	[9]
Плексиглас	3,10	1,32	[10]
Пенопласт, $\rho_0 = 0,74$	1,28	1,355	[11]
Пенопласт, $\rho_0 = 0,58$	0,90	1,33	[11]
Пенопласт, $\rho_0 = 0,32$	0,17	1,29	[11]

$$*D = c_0 + \lambda u.$$

Таблица 3

ρ_0 , г/см ³	D_0 , км/с	u_0 , км/с	p , кбар	Литература
1,63	7,00	1,74	199	Наст. работа
1,64	6,95	1,55	177	[13]
1,64	6,94	1,65	189	[14]
1,64	7,00	1,85	212	[15]

поверхности металлических пластин, находящихся в контакте с ВВ. Благодаря неоднозначности интерпретации таких экспериментов возникает большой разброс в определяемых параметрах.

Для аналитического описания экспериментальных результатов зависимость $p_s(\rho)$ (p_s и E_s — давление и энергия на изэнтропе расширения) задавалась в упрощенной по сравнению с принятой в [4] форме

$$p_s = Ae^{-h/\rho} + B\rho^\gamma. \quad (1)$$

Наилучшему описанию экспериментальных результатов в $(p-u)$ -координатах отвечают значения констант

$$\begin{aligned} A &= 5217 \text{ кбар}; & k &= 7,876 \text{ г/см}^3; \\ B &= 17,62 \text{ кбар}; & \gamma &= 1,6. \end{aligned} \quad (2)$$

Переход от термодинамических переменных (p, ρ) к гидродинамическим $(p-u)$ осуществлялся на основе соотношений для волны разрежения

$$dp = \rho c du \text{ и } c^2 = (\partial p / \partial \rho)_s,$$

где c — скорость звука, s — энтропия.

Изэнтропа расширения ПВ ТНТ (1) с параметрами (2) представлена на рис. 1 в соответствующих координатах. На рис. 1 представлена также изэнтропа, удовлетворяющая кубическому уравнению состояния ($p_s = A\rho^3$). Уравнение (1) удовлетворительно описывает экспериментальные данные по торможению ПВ о преграды различной динамической жесткости во всем исследованном диапазоне давлений. Кубическое уравнение состояния дает заметное расхождение с экспериментом в области ниже 10 кбар.

Уравнение состояния ПВ задавалось в калорическом виде:

$$p = p_s(\rho) + \Gamma\rho(E - E_s(\rho)), \quad (3)$$

где Γ — коэффициент Грюнайзена, который считался постоянным и определялся по данным о зависимости скорости детонации от начальной плотности ВВ. Наилучшему описанию зависимости $D_0(\rho_0)$ отвечает значение $\Gamma = 0,9$. На рис. 2 проводится сравнение зависимости скорости детонации от начальной плотности ТНТ, рассчитанной по уравнению (3) с линейным эмпирическим описанием Камлета [17]. На том же графике приведены экспериментальные данные работ [14, 18, 19].

По полученному уравнению состояния были рассчитаны также параметры Жуге для ВВ с различной начальной плотностью. Результаты расчета и сравнение с экспериментальными данными и эмпирическими зависимостями Камлета проведено на рис. 3. В среднем описание эксперимента удовлетворительное.

Для сравнения с результатами расчетов [5] по уравнению состояния (3) была определена изэнтропа расширения ПВ ТНТ начальной плотности $1,5 \text{ г/см}^3$. Как видно из рис. 4, до давлений ~ 40 кбар результаты расчетов практически совпадают. При более низких давлениях в соответ-

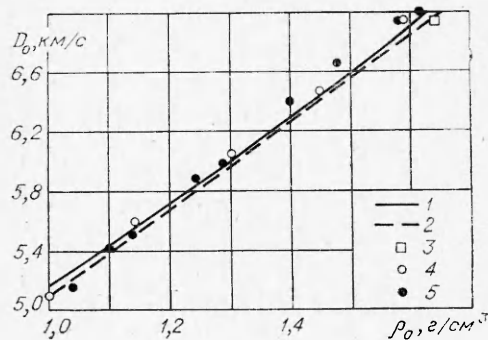


Рис. 2. Зависимость скорости детонации от начальной плотности тротила.
1 — расчет данной работы; 2 — расчет [17]; 3 — [14]; 4 — [18]; 5 — [19].

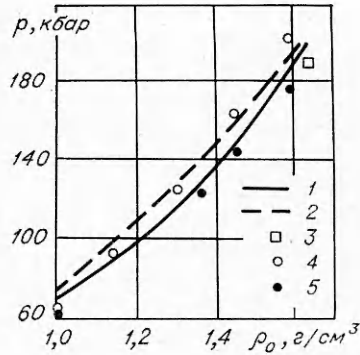


Рис. 3. Зависимость давления детонации от начальной плотности тротила.

1 — расчет по уравнению (3); 2 — расчет [17]; 3 — [14]; 4 — [18]; 5 — [20].

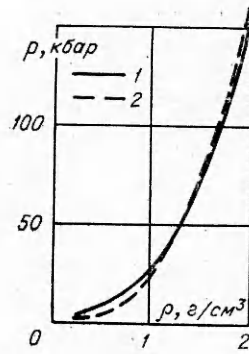


Рис. 4. Сравнение расчетных изэнтроп расширения ПВ тротила начальной плотности $\rho_0 = 1,5 \text{ г/см}^3$.

1 — расчет данной работы; 2 — расчет [5].

ствии с полученными экспериментальными данными уравнение (3) дает более резкий спад плотности ПВ.

Распределение параметров (p , ρ , u и др.) за фронтом нормальной плоской детонационной волны определяется изэнтропой расширения ПВ из состояния Жуге и длины заряда ВВ. При соответствующем выборе уравнения состояния преграды численными методами могут быть получены расчетные кривые затухания ударных волн в преградах различной жесткости. Сопоставление таких расчетов с экспериментальными данными представлено на рис. 5. В расчетах принималось уравнение состояния Al предельной плотности [11] с параметрами: $\rho_0 = 2,71 \text{ г/см}^3$, $c_0 = 5,35 \text{ км/с}$, $n = 4$, $h = 3$ и для Ag и Xe — уравнение идеального газа: $E = pV/(\gamma - 1)$, $\gamma_{\text{Ag}} = 1,37$, $\gamma_{\text{Xe}} = 1,27$. Из рис. 5 следует, что предельные параметры (при нулевой толщине преграды) в расчете и эксперименте совпадают. Однако характер затухания заметно (на величину $\sim 5\%$) отличается. Одной из возможных причин различия может быть влияние химика, который в расчетах не учитывался: фронтом детонационной волны являлась плоскость Жуге. В случае Al могло проявиться также несовершенство гидродинамического приближения, принимаемого в расчетах. Распространение упругопластических волн должно несколько исказить затухание ударных волн в эксперименте в сравнении с идеальной схемой.

В заключение можно сделать вывод, что полученное уравнение состояния ПВ ТНТ, помимо описания исходной совокупности экспериментальных данных о расширении ПВ в широком диапазоне давлений, может быть использовано для предсказания с удовлетворительной точ-

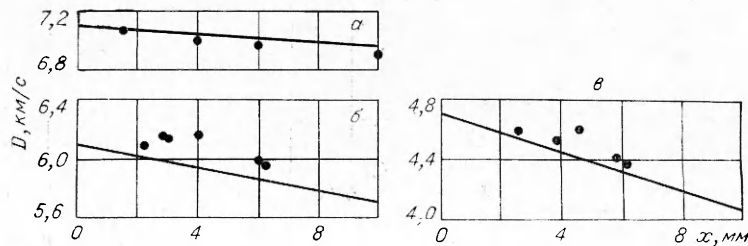


Рис. 5. Затухание ударных волн в преградах.

а) Al; б) Ag, $\rho_0 = 20 \text{ атм}$; в) Xe, $\rho_0 = 30 \text{ атм}$; сплошные линии — расчет.

ностью разнообразных явлений, связанных с изменением детонационных характеристик под влиянием внешних факторов, а также для решения задач о движении ПВ.

Москва

Поступила в редакцию
28/VIII 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. W. E. Deal. *Phys. of Fluids*, 1958, 1, 528.
2. M. L. Wilkins, B. Squier, B. Halperin. X-th Symposium (International) on combustion, Cambridge, 1965, p. 769.
3. L. A. Roslund, N. L. Coleburn. The 5-th International Symposium on Detonation, California, 1969.
4. М. В. Жерноклетов, В. Н. Зубарев, Г. С. Телегин. ПМТФ, 1969, 4.
5. H. Jones. A. R. Miller. *Proc. Roy. Soc.*, 1948, Ser «A», 194, 480.
6. Л. В. Альтшулер. УФН, 1965, 85, 2.
7. В. Н. Зубарев, Н. В. Панов, Г. С. Телегин. ФГВ, 1970, 6, 1.
8. Р. Маккуин, С. Марш и др.—В сб.: *Высокоскоростные ударные явления*. М., «Мир», 1973.
9. Н. Г. Калашников, Л. В. Кулешова, М. Н. Павловский. ПМТФ, 1972, 4.
10. А. А. Баканова, И. П. Дудолодов, Р. Ф. Трунин. ФТТ, 1965, 7.
11. И. П. Дудолодов, В. И. Ракитин и др. ПМТФ, 1969, 4.
12. В. К. Грязнов, И. Л. Иосилевский, В. Е. Фортон. ПМТФ, 1973, 3.
13. R. D. Cowan, W. Fickett. *J. Chem. Phys.*, 1956, 24, 5.
14. W. E. Deal. *J. Chem. Phys.*, 1957, 27, 3.
15. А. Я. Апин, И. М. Воскобойников и др. ПМТФ, 1961, 5.
16. M. Kamlet, S. J. Jacobs. *J. Chem. Phys.*, 1968, 48, 1.
17. M. Kamlet, S. J. Jacobs. *J. Chem. Phys.*, 1968, 48, 1.
18. А. Н. Дремин, П. Ф. Похил. Докл. АН СССР, 1959, 128, 5.
19. Л. Н. Стесик, Л. Н. Акимова.—В сб.: *Физика взрыва*, № 5, 1956.
20. А. Н. Дремин, К. К. Шведов. ПМТФ, 1964, 2.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗА СИЛЬНЫМИ ОТРАЖЕННЫМИ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ В ВОЗДУХЕ

*Б. К. Ткаченко, С. И. Титаров, А. Б. Карасев,
С. В. Алипов*

Определению параметров газа за отраженными ударными волнами посвящены работы [1—4], в которых выяснялось соответствие измеренных и рассчитанных температур за отраженной ударной волной. Измерение температуры проводилось по закону Кирхгофа, интенсивностям линий и фона. Некоторые результаты приведены на рис. 1, 2. Температура рассчитывалась по уравнениям сохранения и термодинамическим функциям в Дебай—Хюккелевском приближении. Для рис. 1, 2 характерно: 1) разброс точек превышает аппаратную погрешность измерений; 2) средние измеренные значения температуры лежат ниже расчетных; 3) расхождение средних измеренных и рассчитанных температур, как правило, не превышает аппаратной погрешности измерений.

Из имеющегося экспериментального материала нельзя сделать вывод о надежности расчетов параметров за сильными отраженными волнами и о причинах возможного расхождения между расчетными и фактическими значениями температуры. Наиболее существенными факторами могут быть: 1) неадиабатичность процесса; 2) неоднородность