

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ ВСПЕНЕННЫХ АЛЮМОТОЛА И ТРОТИЛА ОТ ПЛОТНОСТИ ЗАРЯДА

Г. Д. Козак, Б. Н. Кондриков, А. И. Сумин

РХТУ им. Д. И. Менделеева, 125047 Москва

Приведены экспериментальные результаты, описывающие зависимости критического диаметра и скорости детонации литого и жидкого пористого тротила и алюмотола ТА-15 от плотности заряда. Результаты измерения скорости детонации сопоставлены с расчетом. На основе сравнения выдвинуто предположение о существенной гетерогенности реакции при детонации алюмотола, которое подтверждается построением зависимостей скорости детонации от плотности для модельных смесей тротила с различным содержанием алюминия и инертного компонента.

Зависимость скорости детонации взрывчатых веществ (ВВ) от плотности заряда — одна из основных закономерностей, позволяющая, с одной стороны, установить механизм протекания физических, физико-химических и химических процессов при высокой температуре и сверхвысоком давлении, а с другой — конструировать заряды ВВ, предназначенные для решения конкретных технических задач. Необходимость разработки систем с невысокими давлением и скоростью детонации, обеспечение технологической безопасности производства и переработки ВВ требуют детального изучения механизма детонации пористых взрывчатых систем. В связи с этим становится ясным тот интерес, который уделяется исследованию взрывчатых систем с пониженной плотностью.

Развитие термодинамически и физически обоснованного метода расчета параметров детонации, реализованного в виде прикладной программы SD, использующей уравнение состояния вещества при высоком давлении [1], позволяет получить расчетную зависимость скорости детонации D от плотности ρ для индивидуальных ВВ и смесей, состоящих из элементов С, Н, О, N, Al, Na, Cl, и сравнить ее с результатами эксперимента. В данной работе такое сравнение проводится применительно к зарядам литого и жидкого тротила и алюмотола с замкнутой пористостью.

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТОВ

Аэрацию расплавленного тротила осуществляли в загущенном виде ($2 \div 3\%$ коллоксилина) при механическом перемешивании с добавлением небольшого количества ($0,2 \div 0,3\%$)

поверхностно-активного вещества. Для формирования пористой кристаллической отливки приготовленную пену, залитую в изложницу, в течение $0,5 \div 1$ ч охлаждали до комнатной температуры. Подробно методика получения пористых систем на основе тротила описана в [2]. Отливки имеют однородную микропористую структуру; средний размер пор $\approx 0,01$ мм, он почти не зависит от плотности. Для получения литых пористых зарядов алюмотола расплавленный тротил смешивали с алюминиевой пудрой марки ПАП-2, заливали в изложницы и кристаллизовали по технологии, описанной в [2]. Пудра ПАП-2 (пудра алюминиевая пигментная, удельная поверхность $2 \text{ м}^2/\text{г}$) — это чешуйки или пластинки толщиной $\approx 0,2$ мкм, покрытые тонким слоем стеарина. Состав алюмотола — 15% алюминия, 85% тротила (алюмотол ТА-15). Используемые методы позволяли получать заряды с плотностью ρ до $0,2 \div 0,3 \text{ г}/\text{см}^3$.

При кристаллизации расплава ТА-15 при атмосферном давлении получались заряды с $\rho \approx 1,2 \text{ г}/\text{см}^3$. Отливки из алюмотола при $\rho \leq 0,8 \text{ г}/\text{см}^3$ менее однородны, чем из тротила. Литой алюмотол состоит из относительно крупных ячеек, между которыми находится более плотное мелкопористое вещество. Средний размер пор в 2–3 раза больше, чем в литых тротиловых зарядах. При истирании в фарфоровой ступке образца пористого алюмотола с $\rho = 0,6 \text{ г}/\text{см}^3$ получают частички размером $0,5 \div 1$ мм и тонкодисперсный порошок. Плотность частиц, отделенных от порошка, определяли пикнометрически. Для этого навеску измельченного алюмотола в пикнометре залива-

ли водой и несколько раз подвергали вакуумированию. При понижении давления в пикнометре осевшие на дно частицы алюмотола поднимались к поверхности жидкости, а при сообщении с атмосферой вновь погружались на дно. Средняя плотность частиц по результатам измерения составляла $1,0 \text{ г/см}^3$.

Для определения скорости детонации жидкую пену ВВ заливали в толстостенные стальные трубы диаметром $d_i = 10 \text{ мм}$ с толщиной стенки $\delta = 13 \text{ мм}$ и длиной $L = 125 \div 250 \text{ мм}$ (или $d_i = 20 \text{ мм}$, $\delta = 7,5 \text{ мм}$, $L = 100 \div 130 \text{ мм}$), закрытые снизу резиновой пробкой. Иницирование осуществляли промежуточным инициатором (шашка прессованного флегматизированного гексогена массой 2 г , диаметром 12 мм , плотностью $1,65 \div 1,66 \text{ г/см}^3$). В верхней части трубы имелось плавное расширение канала для размещения промежуточного инициатора. Скорость детонации регистрировали оптическим способом (приборы СФР-2 и ВФУ-1). Для этого в стенке трубы с шагом 15 мм предварительно сверлили радиальные отверстия диаметром $1,2 \div 2 \text{ мм}$. Отверстия на время заливки и кристаллизации закрывали деревянными пробками, а при испытании расплавленных систем — силикатным стеклом, приклеенным к фрезерованной (в месте расположения отверстий) наружной поверхности стенки трубы. Свечение в радиальных отверстиях при детонации было четким, и дополнительных мер для его усиления не применяли.

Полный термодинамический расчет зависимости параметров детонации от плотности заряда (шаг изменения плотности составлял $0,1$ или $0,2 \text{ г/см}^3$) был выполнен с помощью программы SD с использованием уравнений состояния основных продуктов из [1]. Принимаемое фазовое состояние углерода в продуктах детонации — графит.

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТОВ И ВЫЧИСЛЕНИЙ

Критические условия распространения детонации литого ТА-15 определены в цилиндрических и плоских зарядах по методу «да — нет». Цилиндрический заряд или пластину алюмотола (в виде параллелепипеда, выплеченного из зарядов большого диаметра — $40 \div 50 \text{ мм}$) укладывали на металлическую пластину-свидетель, прижимая к последней грань меньшей ширины. О результате опыта судили по отпечатку следа детонации на пластине-свидетеле. На рис. 1 представлена зависимость эквивалентного критического диа-

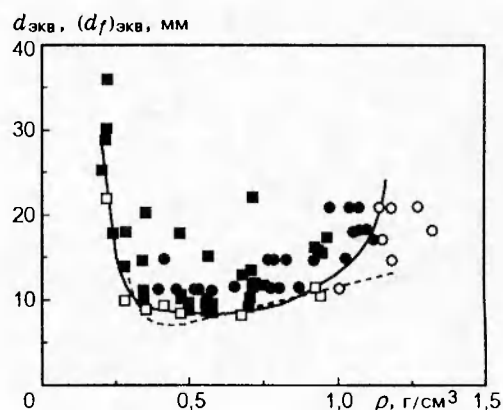


Рис. 1. Зависимость критического диаметра детонации литого ТА-15 от плотности:

●, ○ — цилиндрические заряды, ■, □ — заряды прямоугольного сечения; темные точки — детонация, светлые — отказ; штриховая кривая — зависимость $d_f(\rho)$ для зарядов тротила [2]

метра детонации $(d_f)_{\text{экв}}$ от плотности заряда алюмотола. Эквивалентный диаметр рассчитывали по формуле $d_{\text{экв}} = 4S/\Pi$, где S — площадь поперечного сечения заряда Π — периметр этого сечения (в большинстве опытов $d_{\text{экв}} \approx 2h$, где h — толщина пластины). Линия, отделяющая зону детонации от зоны отказов детонации, образует протяженный минимум ($d_f = 9 \div 10 \text{ мм}$) в диапазоне $\rho = 0,4 \div 0,8 \text{ г/см}^3$. При $\rho < 0,4 \text{ г/см}^3$ она быстро растет (при $\rho = 0,22 \text{ г/см}^3$ отказ детонации получен при $d_{\text{экв}} = 2h = 22 \text{ мм}$). При $\rho > 0,8 \text{ г/см}^3$ также происходит рост критического диаметра детонации, вначале более медленный, чем в области малых плотностей, а затем — быстрый. В диапазоне $\rho = 0,3 \div 0,9 \text{ г/см}^3$ критические диаметры детонации тротила и ТА-15 практически совпадают. При высокой плотности детонационная способность тротила выше, чем алюмотола.

Результаты измерений скорости детонации жидкого и литого пористого тротила различной плотности приведены на рис. 2. Следует отметить, что учет теплоты плавления тротила ($Q_{\text{пл}} = 15,2 \text{ кДж/моль}$) в энтальпии образования слабо влияет на результаты расчета параметров детонации (скорость детонации увеличивается не более чем на 2%). Обработка результатов измерения скорости детонации тротила в интервале $\rho = 0,4 \div 1,5 \text{ г/см}^3$ с использованием метода наименьших квадратов

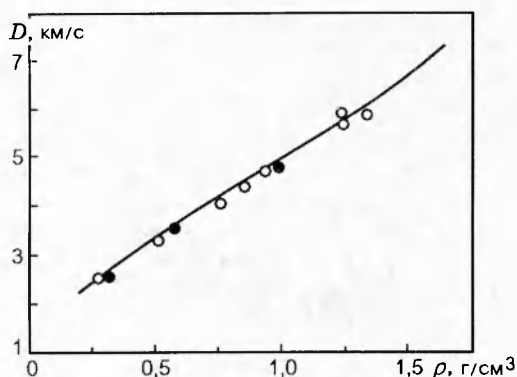


Рис. 2. Зависимость скорости детонации литого (темные точки) и жидкого (светлые точки) пористого тротила от плотности:

прямая — расчет [1]

дает линейную зависимость вида

$$D_{\text{экс}} [\text{м/с}] = 1585 + 3312\rho \quad (\rho, \text{г/см}^3). \quad (1)$$

Из рис. 2 видно, что результаты вычислений и измерений согласуются между собой. Среднее отклонение точек от расчетной зависимости составляет 3,8%.

На рис. 3 приведены результаты измерений скорости детонации расплавленного и литого алюмотола. Корреляционная зависимость выражается уравнением

$$D [\text{м/с}] = 391 + 3694\rho \quad (\rho, \text{г/см}^3). \quad (2)$$

При высокой плотности расчетная зависимость близка к экспериментальным точкам, а при снижении ее лежит существенно выше. При $\rho = 0,45 \text{ г/см}^3$ расчетная скорость детонации $D_{\text{расч}} = 2960 \text{ м/с}$, а $D_{\text{экс}} = 2000 \text{ м/с}$. На рис. 3 также показаны результаты опытов, проведенных с порошкообразной смесью ТА-15 (размер частиц тротила $50 \div 70 \text{ мкм}$). Скорости детонации при $\rho = 0,4$ и $1,0 \text{ г/см}^3$ для этой смеси близки к расчету.

Результаты вычислений параметров детонации алюмотола с различным содержанием алюминия при $\rho = 1,0$ и $0,6 \text{ г/см}^3$ приведены в табл. 1. Увеличение содержания алюминия (C_{Al}) приводит к росту расчетной теплоты (Q) и температуры детонации (T_d) и к одновременному снижению скорости. Таким образом, получается, что расчетная зависимость $D(\rho)$ для тротила располагается выше зависимостей $D(\rho)$ для алюмотолов, каждая из которых лежит тем ниже, чем больше содержание алюминия в смеси. Наибольшей теплотой и температурой детонации обладает смесь, содержащая

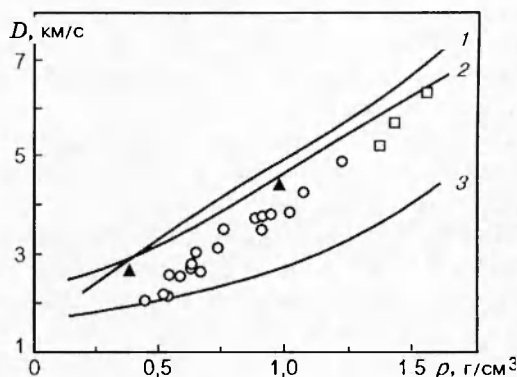


Рис. 3. Зависимость скорости детонации ТА-15 от плотности:

○ — литые заряды, □ — расплавленный алюмотол, ▲ — порошкообразные заряды; результаты расчета: 1 — тротил, 2 — ТА-15, 3 — ТА-32

32% алюминия. Такая смесь отвечает стехиометрическому соотношению компонентов смеси, в которой весь кислород тротила расходуется на окисление алюминия. На рис. 3 показаны расчетные зависимости $D(\rho)$ для алюмотолов ТА-15 (кривая 2) и ТА-32 (кривая 3). Экспериментальные значения скорости детонации литого и жидкого ТА-15 во всем исследованном диапазоне плотности занимают поле, ограниченное этими линиями; постепенно, по мере снижения плотности они смещаются от расчетной зависимости для ТА-15 к линии, отвечающей составу ТА-32.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Тот факт, что экспериментальные точки для пористого литого тротила лежат близко к расчетной зависимости $D(\rho)$, лишь подтверждает полученное ранее согласие расчета и обширных измерений, проведенных многими исследователями для прессованного и порошкообразного тротила. Отметим, что сравнение расчетных зависимостей $D(\rho)$, получаемых с помощью программы SD, с результатами экспериментальных измерений для тэна, гексогена, пикриновой кислоты, тетрила, так же как и для тротила, показывает хорошее согласие между ними. Существенно новым моментом являются сами системы, представляющие собой жидкую или застывшую пену с замкнутой пористостью. Характеристики микроструктуры этой пены определены по микрофотографиям в работе [2]. Возникает несоответствие между результатами, полученными для тротила и

Таблица 1

Влияние содержания алюминия на расчетные параметры детонации тротила

$C_{Al}, \%$	$\rho, \text{г/см}^3$	$D, \text{м/с}$	$p, \text{ГПа}$	$T_d, \text{К}$	$Q, \text{кДж/кг}$	n
0	1,0	4991	6,53	3470	4501	2,81
15		4703	5,96	4866	6461	2,71
20		4297	4,87	5345	7361	2,79
25		3723	3,70	5814	8386	2,75
30		3037	2,60	6247	9453	2,55
32		2737	2,17	6406	9884	2,45
0	0,6	3687	2,96	3065	3575	2,61
15		3431	2,20	4774	6195	2,22
20		3141	1,93	5313	7245	2,06
25		2781	1,60	5805	8331	1,91
30		2352	1,20	6241	9417	1,76
32		2154	1,03	6398	9853	1,70

Примечание. n — показатель политропы продуктов взрыва.

алюмотола: тротил во всем исследованном диапазоне плотности реагирует полностью, практически гомогенно, существует термодинамическое равновесие в продуктах детонации. Реакция в литом пористом алюмотоле при невысокой плотности заряда в отличие от многих других пористых ВВ идет менее полно, чем при высокой плотности, и несомненно далека от термодинамического равновесия. Расчетные зависимости $D(\rho)$ для смесей с разным содержанием алюминия идут тем ниже, чем больше содержание алюминия. Содержание алюминия в алюмотоле, при котором $D_{\text{расч}} = D_{\text{эксп}}$ при различной плотности заряда, показано в табл. 2. Скорость детонации $D = 2000 \text{ м/с}$ при $\rho = 0,43 \text{ г/см}^3$ достигается при $C_{Al} = 32 \%$, что соответствует полному взаимодействию с ним кислорода тротила по расчету на Al_2O_3 . Это позволяет предположить, что реакция при детонации пористого алюмотола идет существенно гетерогенно: тротил разлагается не полностью, а почти весь выделяющийся кислород реагирует с алюминием, давая Al_2O_3 . Оставшийся тротил не успевает выделить энергию в зоне влияния, и если догорает, то вдали от звуковой поверхности, в волне разрежения.

Второе объяснение состоит в том, что поскольку структура алюмотола неоднородна и пористая масса содержит более плотные прочные включения существенно меньшей пористости, то эти включения в слабой ударной волне при детонации заряда малой плотности не разрушаются, не прогреваются и в зоне влияния

детонационной волны не реагируют. Возможно также, что в результате перераспределения компонентов смеси в ходе кристаллизации тротила содержание алюминия в прочных включениях ниже, чем среднее по массе. Расчетное давление детонации ТА-15 при $\rho = 0,4 \text{ г/см}^3$ составляет всего $\approx 1 \text{ ГПа}$, т. е. почти в десять раз меньше, чем при $\rho = 1,5 \text{ г/см}^3$. При столь низком давлении в детонационной волне воспламеняются и сгорают лишь тонкие стенки пузырьков, из которых состоит заряд алюмотола; более крупные, плотные и прочные частички между пузырьками сгорать не успевают.

При расчете скорости детонации составов алюмотола, содержащих более 15% алюминия (см. табл. 2 и рис. 3), неполнота реакции ВВ не учитывалась. Для того чтобы учесть влияние разбавления, которое оказывает ВВ, не реагирующее в детонационной волне, поступали следующим образом.

Таблица 2

Влияние плотности алюмотола на соотношение тротила и алюминия, при котором $D_{\text{эксп}} = D_{\text{расч}}$

$C_{Al}, \%$, при котором $D_{\text{эксп}} = D_{\text{расч}}$	$\rho, \text{г/см}^3$	$D, \text{м/с}$
20	1,55	6150
24,5	0,72	3060
32	0,43	1975

Таблица 3

Влияние плотности заряда на расчетное содержание инертного компонента и состав алюмотола

при $D_{\text{экс}} = D_{\text{расч}}$

ρ , г/см ³	$D_{\text{расч}}$, м/с	с, %			Al/ТНТ
		Al ₂ O ₃	ТНТ	Al	
1,08	4367	10	75	15	17/83
0,51	2277	23,8	61,2	15	20/80
0,32	1575	38	47	15	24/76

Таблица 4

Расчетное содержание инертной добавки к ТА-15 и плотность заряда при $D_{\text{экс}} = D_{\text{расч}}$

ρ , г/см ³	$D_{\text{расч}}$, м/с	$C_{\text{Al}_2\text{O}_3}$, %
1,23	4930	10
0,68	2900	20
0,49	2220	30
0,38	1780	40

1. Расчет проводили для смесей, в которых содержание алюминия оставалось постоянным (15%), а часть тротила заменяли инертным компонентом — Al₂O₃. При этом содержание алюминия в алюмотоле менялось в соответствии с выражением

$$C_{\text{Al}} = 0,15/(1 - C_{\text{Al}_2\text{O}_3}), \quad (3)$$

а содержание «инертного тротила» — по формуле

$$C_{\text{T}} = C_{\text{Al}_2\text{O}_3}/0,85, \quad (4)$$

где C_{Al} — содержание алюминия в алюмотоле в двойной смеси с тротилом, $C_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ — содержание оксида алюминия в тройной смеси.

С помощью программы SD для смесей рассчитывали зависимости $D(\rho)$ и находили плотность смеси, при которой $D_{\text{расч}} = D_{\text{экс}}$. Полученные результаты представлены в табл. 3. Этот вариант расчета учитывал высказанное выше предположение о неполноте реакции тротила. Видно, что по мере снижения плотности заряда экспериментальные значения скорости детонации соответствуют результатам расчета смесей с увеличивающимся содержанием алюминия в алюмотоле и инертного компонента в смеси. Таким образом, расчет подтверждает сделанное предположение и позволяет при данной плотности определить состав реагирующего алюмотола и содержание не реагирующего тротила. При $\rho = 1,08$ г/см³ детонирует алюмотол ТА-17, при этом $C_{\text{Al}_2\text{O}_3} = 10\%$, а относительное содержание недетонирующего тротила $C_{\text{T}} = 12\%$; при $\rho = 0,32$ г/см³ детонирует алюмотол ТА-24, содержащий 24% алюминия, разбавленного 38% инертного компонента, т. е. $C_{\text{T}} = 45\%$.

Был проведен также расчет для смеси 15% алюминия с «тротилом», содержащим столько кислорода, чтобы его хватило только на окисление алюминия. При $\rho = 0,45$ г/см³ скорость

детонации получается такой же (2037 м/с), как в эксперименте.

2. В этом варианте рассчитывали зависимость $D(\rho)$ для алюмотола 15/85, разбавленного различным количеством инертного вещества. Поскольку в программу не было введено уравнение состояния не реагирующего алюмотола, в качестве инертной примеси использовали оксид алюминия, для которого уравнение состояния хорошо известно. Полученные зависимости сравнивали с экспериментальным соотношением для литого и жидкого алюмотола ТА-15 (2), что позволило определить значения скорости детонации и плотности, отвечающие этим смесям. Результаты расчета приведены в табл. 4. При таком способе расчета соотношение алюминия и тротила в смеси оставалось постоянным и снижение параметров детонации происходило за счет разбавления ТА-15 не реагирующим инертным веществом. Из табл. 4 видно, что при уменьшении плотности содержание инертного компонента в смеси, при котором $D_{\text{расч}} = D_{\text{экс}}$, быстро увеличивается. При $\rho = 0,4$ г/см³ и $D_{\text{экс}} = 2$ км/с в детонационной волне не успевает прореагировать $\approx 35\%$ ВВ.

В случае порошкообразной смеси размер частиц тротила на два порядка величины превышает толщину частичек алюминия, степень смешения компонентов несравнимо хуже, чем достигаемая при плавлении тротила, а состав реакционной смеси в зоне детонации близок к заданному (Al/ТНТ 15/85). Как видно из рис. 3, эта механическая смесь детонирует и при малой (0,4 г/см³), и при более высокой (1,0 г/см³) плотности со скоростью, отвечающей расчету.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 96-03-32858а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Кондриков Б. Н., Сумин А. И. Уравнение состояния газов при высоком давлении // Физика горения и взрыва. 1987. Т. 23, № 1. С. 114–122.
2. Козак Г. Д., Кондриков Б. Н., Хорошев С. М., Анников В. Э. Детонация азрированных систем на основе тротила и динитротолуола // Взрывчатые материалы и пиротехника. 1992. Вып. 3 (218). С. 20–27.

*Поступила в редакцию 5/VI 1997 г.,
в окончательном варианте — 22/X 1997 г.*
