

24. Р. И. Солоухин. Методы измерений и основные результаты исследований на ударных трубах. Новосибирск, 1969.
 25. В. И. Манжалея, В. В. Митрофанов, В. А. Субботин. ФГВ, 1974, 10, 1.
 26. Я. Б. Зельдович, С. М. Когарко, Н. Н. Симонов. ЖТФ, 1956, 26, 8.
 27. Е. С. Щетников. Физика горения газов. М., «Наука», 1965.

МЕТОД РАСЧЕТА ИДЕАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВВ

И. Н. Айзенштадт

В настоящее время находят применение несколько методов расчета скорости детонации конденсированных $C-H-N-O$ -ВВ [1—3]. Все они, как правило, дают удовлетворительное согласие с экспериментом для довольно широкого круга ВВ, несмотря на существенные методологические различия. Так, ключевой этап расчета — фиксация состава продуктов детонации — в каждой из упомянутых схем [1—3] базируется на своих, отличных от других, физико-химических основах. В результате химические уравнения взрывной реакции для одного и того же ВВ в схемах [1—3] не совпадают. Впрочем, видимо, ни один из вариантов уравнений разложения ВВ по этим схемам не отражает существа дела, поскольку перечень продуктов детонации ограничен только молекулами газов и углеродом.

Предлагаемый экспресс-метод расчета не требует написания гипотетического уравнения химической реакции превращения ВВ в детонационной волне. В его основу положен постулат, что для широкого круга мощных ВВ величина идеальной скорости детонации при заданной плотности может быть с достаточной точностью выражена в виде стандартной функции нескольких параметров, базирующихся на формуле ВВ и его энтальпии образования.

Выберем в качестве таких управляющих параметров — факторов — удельное число грамм-атомов в исходном ВВ (фактор B), абсолютное значение кислородного баланса (КБ) и удельную изохорную теплоту образования ВВ (Q_v).

Будем считать, что величина фактора B должна косвенно информировать о концентрации частиц продуктов превращения ВВ в детонирующем объеме и тем самым компенсировать отсутствие в схеме уравнения разложения ВВ.

Для формулы ВВ общего вида $C_aH_bO_cN_d$ величины выбранных параметров выразятся следующим образом:

$$B = a + b + c + d/\mu \cdot 10^3 \text{ (г·атом/кг)},$$

$$|\text{КБ}| = |16(c - 2a - b/2)/\mu \cdot 10^2| \text{ (\%)},$$

$$Q_v = -[\Delta H_f + 0,3(b + c + d)]/\mu \cdot 10^3 \text{ (ккал/кг)},$$

где ΔH_f — стандартная энтальпия образования ВВ при $T = 298,15 \text{ К}$, ккал/моль; μ — молекулярный вес ВВ.

Примем двухэтапную схему расчета идеальной скорости детонации (D_{ρ_0}) при плотности ρ_0 . Целью первого этапа, главного звена схемы, является вычисление величины идеальной скорости детонации при эталонной для всех ВВ начальной плотности $1,60 \text{ г/см}^3$ ($D_{1,60}$).

Скорости детонации ВВ

ВВ	Формула	В, г·атом кг	КБ, %	Q _v , ккал кг	D _{1,60} , км/с		
					Расчет		Эксперимент
					по фор- муле (2)	по про- грамме RUBY	
ТНТ	C ₇ H ₅ O ₆ N ₃	92,51	-74,00	44,05	7,03	6,867	6,97+0,03
Тетрил	C ₇ H ₅ O ₈ N ₅	87,11	-47,39	-45,30	7,25	7,380	7,27+0,02
Гексоген	C ₃ H ₆ O ₆ N ₆	94,59	-21,62	-90,59	8,03	8,033	8,01+0,02
Октоген	C ₄ H ₈ O ₈ N ₈	94,59	-21,62	-84,90	8,03	—	8,08+0,03
Тэн	C ₅ H ₈ O ₁₂ N ₄	91,77	-10,13	379,75	7,86	7,825	7,78+0,04
Тринитробен- зол	C ₆ H ₃ O ₆ N ₃	84,51	-56,34	-59,15	6,97	—	7,02+0,03
Пикриновая кислота	C ₆ H ₃ O ₇ N ₃	82,97	-45,41	208,73	6,94	7,050	7,01+0,03
Тринитроани- лин	C ₆ H ₄ O ₆ N ₄	87,71	-56,14	59,64	7,08	—	7,01+0,04
Нитроглицерин	C ₃ H ₅ O ₉ N ₃	88,10	+ 3,52	369,60	7,80	—	7,74+0,02
ТНТ/гексоген 50/50	C _{22,18} H _{24,53} O _{26,73} N _{20,12} *	93,55	-47,82	-23,27	7,55	—	7,49+0,03

* Условная формула 1 кг смеси.

Зададимся видом связи между $D_{1,60}$ и выбранными факторами в форме простого уравнения аддитивности трех вкладов в $D_{1,60}^2$, прямо пропорциональных B , $|КБ|$ и Q_v

$$D_{1,60}^2 = \alpha B - \beta |КБ| - \gamma Q_v, \quad (1)$$

где α , β , γ — постоянные коэффициенты. Для отыскания численных значений α , β и γ решим серию систем из трех уравнений, относящихся к различным ВВ с известными и надежными значениями $D_{1,60}$. Используем для этой цели собственные экспериментальные данные, имея в виду, что в таких случаях необходимо привлекать лишь однородную по происхождению информацию.

Измерения скоростей детонации проведены ионизационным методом на зарядах ВВ диаметром 12÷15 мм постоянной плотности, равной $1,60 \pm 0,005$ г/см³. База измерений составляла 25—30 мм. Для каждого ВВ выполнено по 7—10 параллельных измерений. Погрешность определения $D_{1,60}$ при доверительной вероятности 0,95 не превышала ± 40 м/с. Оказалось, что в тех случаях, когда системы объединяют уравнения для трех ВВ с контрастирующими значениями B , $КБ$ и Q_v , результаты решений близки. Такое постоянство коэффициентов α , β и γ от вещества к веществу служит достаточным показателем корректности как уравнения (1), так, по-видимому, и всей посылки.

Усредняя величины каждого из коэффициентов, находим их общие значения (для $D_{1,60}$ в км/с)

$$\alpha = 0,73; \quad \beta = 0,24; \quad \gamma = 0,0073.$$

Таким образом, основное уравнение для расчета идеальной скорости детонации конденсированных ВВ будет выглядеть так:

$$D_{1,60} = \sqrt{0,73B - 0,24|КБ| - 0,0073Q_v} \quad (\text{км/с}). \quad (2)$$

В таблице представлены рассчитанные по формуле (2) значения скоростей детонации ряда ВВ. Значения ΔH_f взяты из [4]. Здесь же

для сравнения приведены экспериментально найденные величины, а также данные расчета $D_{1,60}$ на ЭВМ по программе RUBY [5]. Следует отметить хорошее взаимное согласие всех результатов.

Путем подстановки в уравнение (2) значений B , KB и Q_v можно получить развернутые формулы, устанавливающие непосредственную связь $D_{1,60}$ с составом ВВ. Последний может быть выражен либо через коэффициенты формулы (a, b, c, d), либо через весовые процентные содержания элементов (С, Н, О, N). Вследствие того, что в уравнении (2) кислородный баланс фигурирует в виде его абсолютного значения для ВВ с положительным, нулевым и отрицательным кислородным балансом, получаем три различных решения:

1. Для ВВ, у которых $c > 2a + b/2$:

$$D_{1,60} = \sqrt[3]{1000/\mu [1,50a + 0,92b + 0,35c + 0,73(d + 0,01\Delta H_f)]}$$

или

$$D_{1,60} = \sqrt[3]{1,25C + 9,20H + 0,22O + 0,52N + 7,3\Delta H_f/\mu}$$

2. Для ВВ с $c = 2a + b/2$:

$$D_{1,60} = \sqrt[3]{1000/\mu \cdot 0,73(a + b + c + d + 0,01\Delta H_f)}$$

или

$$D_{1,60} = \sqrt[3]{0,608C + 7,30H + 0,444O + 0,52N + 7,3\Delta H_f/\mu}$$

3. Для ВВ, у которых $c < 2a + b/2$:

$$D_{1,60} = \sqrt[3]{1000/\mu [-0,04a + 0,54b + 1,12c + 0,73(d + 0,01\Delta H_f)]}$$

или

$$D_{1,60} = \sqrt[3]{-0,033C + 5,40H + 0,70O + 0,52N + 7,3\Delta H_f/\mu}$$

Второй этап расчета заключается в переходе от $D_{1,60}$ к D_{ρ_0} , для чего необходимо зафиксировать общий вид $D = D(\rho_0)$ на участке плотностей, охватываемом схемой. В первом приближении этой цели может служить удовлетворяющая большинству ВВ гипотеза прямолинейности зависимости $D = D(\rho_0)$, хотя строгая проверка применимости ее с помощью дисперсионного анализа и не всегда дает подтверждение.

Остановимся на известной формуле

$$D_{\rho_0} = D_{1,60} + M(\rho_0 - 1,60), \quad (3)$$

где M — коэффициент наклона. Использование в расчетной схеме формулы (3) представляется оптимальным, поскольку расположение начала координат ($\rho_0 = 1,60$) внутри рабочего диапазона плотностей благоприятствует минимизации экстраполяционных погрешностей.

Применительно к различным группам ВВ конкретизируем значение M , которое обычно оценивается величиной $3 \div 4$ км/(с·г·см³). Выберем в качестве критерия группу ВВ по признаку соотношения кислорода и горючих элементов и примем

1) для ВВ 1 группы, у которых $c \geq 2a + b/2$

$$M = 4,00 + 0,25,$$

2) для ВВ 2 группы с $a + b/2 < c < 2a + b/2$

$$M = 3,50 + 0,25,$$

3) для ВВ 3 группы ($c < a + b/2$)

$$M = 3,00 + 0,25.$$

Общую погрешность расчета определяют погрешности, которыми отягощен результат каждого из его этапов, в данном случае это $\Delta D_{1,60}$ и ΔM . Согласно закону накопления погрешностей

$$\Delta D_{\rho_0} = \sqrt{(\Delta D_{1,60})^2 + [\Delta M(\rho_0 - 1,60)]^2}.$$

Если на основании данных таблицы оценить $\Delta D_{1,60} = \pm 0,1$ км/с, то, к примеру, для средневероятного ВВ второй группы с рассчитанной $D_{1,60} = 7,50$ км/с при экстраполивании к плотности $1,90$ г/см³ погрешность возрастет и результат будет следующим:

$$D_{1,90} = 8,55 \pm 0,125 \text{ км/с.}$$

Характерная особенность разработанной схемы: превалирующий вклад в конечный результат расчета вносит фактор, связанный с упругой компонентой детонационного давления. Напротив, в других расчетных методах [1—3] преобладает влияние теплоты взрыва. Это отличие, в частности, сказывается на результатах расчетов скоростей детонации ВВ со сравнительно малыми теплотами взрывчатого превращения, но с повышенным содержанием в их составе легких элементов.

К примеру, вычисления скорости детонации нитрата гидразония — безуглеродного ВВ $\text{H}_5\text{O}_3\text{N}_3$ с теплотой взрыва 918 ккал/кг (рассчитано по методу [2]; $\Delta H_f = -59$ ккал/моль [6]) по трем независимым вариантам дает резко отличающиеся результаты: $D_{1,60} = 6,67$ км/с [2]; $D_{1,60} = 7,84$ км/с [3] и по разработанному методу $D_{1,60} = 8,81$ км/с. Сопоставление этих цифр с данными измерений ($D_{1,544} = 8,38$ км/с [7] и $D_{1,63} = 8,69$ км/с [8]) показывает, что правдоподобный результат расчета получается только по разработанной в данной работе схеме, которая, следовательно, обладает более широким диапазоном действия, включающим и своеобразные ВВ типа нитрата гидразония.

Установление диапазона применимости расчетной схемы очень важно, поскольку расплывчатость границ служит источником недоразумений и делает схему ненадежной. Тем не менее область применения существующих расчетных методов четко не обозначена, хотя ни один из них не может претендовать на универсальность ни по химическому составу ВВ, ни по физическим параметрам заряда.

Предлагаемый метод позволяет прогнозировать величину идеальной скорости детонации конденсированных индивидуальных С—Н—N—O-ВВ с теплотами взрыва более 850 ккал/кг и смесей их друг с другом в диапазоне $\rho_0 = 1,30 \div 1,90$ г/см³. При этом во избежание недоразумений желательно, чтобы расчетам скорости детонации предшествовала оценка теплоты взрыва ВВ, к примеру, по методу [2].

Схема не предназначается для расчетов детонирующих составов с инертными добавками или компонентами со слабой детонационной способностью, теплоты взрыва которых менее 850 ккал/кг. Метод может быть распространен и на ВВ, содержащие другие элементы, например, F, Cl, S. Такого рода расчеты следует проводить по формуле (2), причем вычисление величин V и K_B должно производиться с учетом этих элементов. Однако следует иметь в виду, что недостаточный объем систематической и однородной экспериментальной информации не позволяет пока уверенно оценить погрешность расчетов таких систем.

Автор выражает благодарность М. Б. Ростикю за существенную помощь в экспериментах по измерению скоростей детонации.

Ленинградский технологический институт
им. Ленсовета

Поступила в редакцию
1/IX 1975

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.