

О ПОЛНОМ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭНЕРГИИ ВЗРЫВА

А. Я. Апин, Н. Ф. Велина, Ю. А. Лебедев

(Москва)

К проблеме повышения полезного действия взрыва обращено большое внимание исследователей [1-3]. Одной из основных величин, определяющих эффективность действия взрывчатого вещества (ВВ), является теплота взрыва.

В работе рассмотрены зависимости тепловыделения от условий, в которых происходит взрыв, и связь теплоты взрыва с его импульсом.

В результате проведенного исследования устанавливается, что:

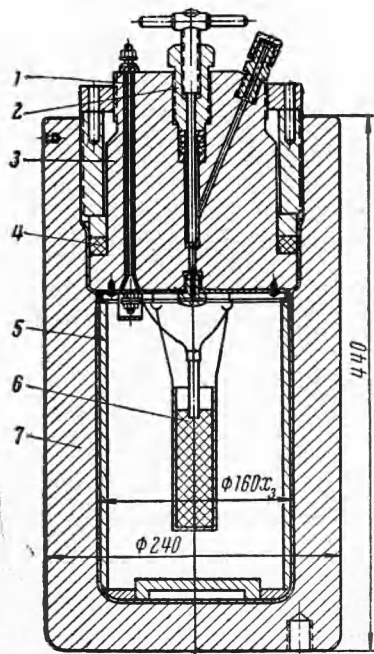
1. При детонации ВВ с отрицательным кислородным балансом (КБ) в виде плотных зарядов, помещенных в достаточно массивную оболочку, имеет место значительное добавочное выделение тепла без соответствующего повышения скорости детонации.

2. С увеличением плотности заряда теплота взрыва возрастает по линейному закону. Теплота взрыва в известных пределах зависит от толщины и материала оболочки.

3. Увеличению теплоты взрыва отвечает соответствующее приращение импульса детонационной волны, измеренного для зарядов свободных и утяжеленных.

4. Добавочное выделение теплоты взрыва связано с протеканием медленных химических реакций генераторного газа, энергии которых не усиливают детонационную волну.

5. Теплота взрыва подразделяется на теплоту детонации, фугасную теплоту и максимальную. Даны эмпирические правила для расчета этих теплот. Дана формула для расчета теплоты детонации в зависимости от плотности заряда.



Калориметрическая бомба, предназначенная для исследования теплот взрыва зарядов ВВ весом до 100 г.

1 — электроввод; 2 — вентиль; 3 — самоуплотняющаяся крышка бомбы; 4 — тефлоновое или резиновое уплотнение; 5 — сменные металлические прокладки, предохраняющие стенки бомбы от разрушения осколками; 6 — заряд ВВ в оболочке и электродетонатор; 7 — корпус бомбы.

1. Зависимость теплоты взрыва от плотности заряда и толщины оболочки. Определение теплоты взрыва производилось в большой калориметрической бомбе с самоуплотняющейся крышкой. Примененная бомба имеет оригинальную конструкцию (фигура). Объем бомбы составлял около 5 л; в центре ее подвешивался цилиндрический заряд ВВ диаметром 20 мм и весом около 50 г. Перед взрывом испытуемого заряда бомба продувалась азотом и откачивалась вакуумным насосом до давления 1—2 мм рт. ст., после чего при помощи небольшого подъемного приспособления она переносилась в калориметрический сосуд с водой и автоматической мешалкой. Вес бомбы составлял около 120 кг. Подъем температуры воды в калориметре измерялся с точностью $\pm 10^{-3}$ °C.

В табл. 1 приводятся результаты измерения теплоты взрыва гексогена и тротила. Во всех случаях теплота взрыва определена при воде парообразной.

Данные табл. 1 показывают значительное увеличение теплоты взрыва при детонации заряда в достаточно массивной и прочной оболочке. Например, при взрыве

тротила, плотно запрессованного в латунную оболочку, выделяется почти на 25% больше энергии, чем при взрыве такого же по весу и плотности заряда тротила в слабой стеклянной оболочке.

Таблица 1

Влияние оболочки заряда на теплоту взрыва

ВВ	ρ , г/см ³	Q, кал/г (вода пар)	Условия взрыва
гексоген	1,78	1270	в стеклянной оболочке толщиной 2 мм
гексоген	1,78	1420	в латунной оболочке толщиной 4 мм
тротил	1,60	840	в стеклянной оболочке толщиной 2 мм
тротил	1,60	1080	в латунной оболочке толщиной 4 мм

Повышение теплоты взрыва наблюдается и у плотных, заключенных в массивную оболочку, зарядов пикриновой кислоты, тетрила, дины, пироксилина, пироксилинового и баллиститного порохов. Аналогичное явление повышения теплоты взрыва имеет место также у литых или прессованных смесевых ВВ, типа ТГ (тротил, гексоген), содержащих до 80% гексогена; причем теплота взрыва складывается приблизительно аддитивно.

Повышение удельной теплоты взрыва за счет эффекта уплотнения и оболочки наблюдается лишь у ВВ с отрицательным кислородным балансом.

У тэна, нитроглицерина и других индивидуальных и смесевых ВВ, обладающих небольшим отрицательным, нулевым или положительным кислородным балансом, не наблюдается повышения удельной теплоты взрыва при уплотнении их и помещении заряда в прочную или массивную оболочку.

У ВВ с отрицательным КБ теплота взрыва линейно возрастает с увеличением плотности заряда [6]. Теплота взрыва при одной определенной плотности возрастает при увеличении толщины оболочки и в зависимости от материала оболочки достигает предела при некоторой определенной толщине последней; например, в латунной оболочке насыщение наступает при толщине ее 3—4 мм.

Существование зависимости теплоты взрыва от толщины оболочки заряда позволяет утверждать, что теплота взрыва должна зависеть от массы ВВ, если предположить, согласно правилу А. Ф. Беляева [7], что инертная металлическая оболочка может быть компенсирована приблизительно эквивалентным ей по весу слоем ВВ (взрывчатая оболочка). Таким образом, при взрыве крупных безоболочечных зарядов высокой плотности можно ожидать более полного выделения энергии вследствие увеличения удельной теплоты взрыва в центральной части заряда.

Используемые в описываемых калориметрических опытах заряды ВВ имели диаметр 20 мм и превосходили критический диаметр в несколько раз. При взрыве в этих условиях осуществляется устойчивая детонация с так называемой идеальной скоростью, поэтому помещение заряда в оболочку, очевидно, не должно влиять на скорость детонации, что было проверено экспериментом (табл. 2).

Данные табл. 2, как и следовало ожидать, показывают, что оболочка заряда не оказывает никакого влияния на скорость детонации.

Сопоставление данных табл. 1 и 2 показывает, что при наличии оболочки теплота взрыва возрастает, а скорость детонации остается неиз-

Таблица 2

Влияние оболочки на скорость детонации

ВВ	ρ , г/см ³	D, м/сек	Условия взрыва
гексоген	1,71	8490	без оболочки
гексоген	1,71	8500	в стальной оболочке
тротил	1,63	6950	без оболочки
тротил	1,63	6940	в стальной оболочке

менной. Если при неизменном элементарном составе ВВ имеет место увеличение теплоты взрыва, то, согласно приближенному соотношению

$$D_1/D_2 = \sqrt{Q_1/Q_2} \quad (1)$$

должна возрасти и скорость детонации. Например, при детонации монокристалла гексогена ($\rho_0 = 1,80 \text{ г/см}^3$) в массивной оболочке можно ожидать повышения скорости детонации с 8800 м/сек до 9300 м/сек. Однако в действительности этого не наблюдается.

Таким образом, приходится констатировать, что суммарная энергия взрывной реакции не полностью передается детонационной волне. Возможно, что часть энергии выделяется на более поздних стадиях дореагирования в условиях замедленного расширения продуктов взрыва (ПВ). Не исключено поэтому, что измеренная скорость детонации высокоплотного гексогена и тротила еще не является вполне идеальной и для ее достижения требуются значительно большие диаметры заряда. Роль оболочки при этом сводится не только к ограничению разброса периферийных слоев ВВ, но и к замедлению расширения ПВ и увеличению времени, отводимого на последующие реакции дореагирования внутри заряда. Необходимо иметь в виду, что рост теплоты взрыва происходит также за счет химических реакций, которые идут с сокращением удельного объема газообразных ПВ и образованием твердого углерода, а в таких случаях трудно ожидать увеличения скорости детонации [8].

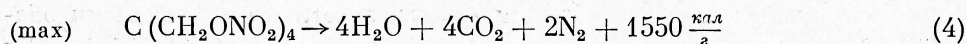
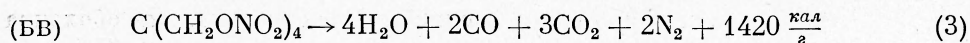
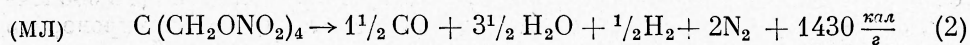
Вопрос о «малых» и «больших» теплотах несколько необычен, так как до сих пор при любых расчетах действия взрыва или скорости детонации используется малая теплота взрыва, принимаемая за константу. На самом деле теплота взрыва не является константой, так как она сильно зависит от плотности заряда и условий взрыва.

В одной из последних работ, затрагивающих вопрос о теплотах взрыва [9], высказано сомнение в отношении реальности больших теплот взрыва, в связи с чем при расчете действия взрыва используются только малые теплоты взрыва. В частности, утверждается, что установленная ранее [6] теплота взрыва гексогена $Q = 1420 \text{ кал/г}$ является слишком большой и вообще находится на пределе возможного. Это утверждение не обосновано и противоречит опыту; кроме того, простой расчет показывает, что максимальная теплота взрыва для гексогена составляет $Q = 1510 \text{ кал/г}$.

Более объективный подход в оценке теплот взрыва на основании опытных данных о химическом составе ПВ был проявлен в работах [10, 11].

2. Расчет теплот взрыва. Чаще всего приближенный расчет теплоты взрыва производится по эмпирическим правилам написания уравнений распада ВВ Малляра — Лешателье (МЛ) или Бринкли — Вильсона (БВ) [12].

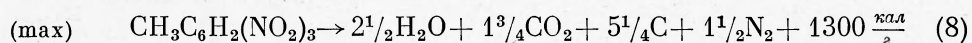
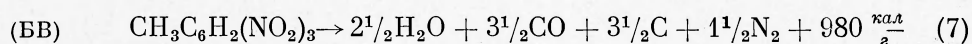
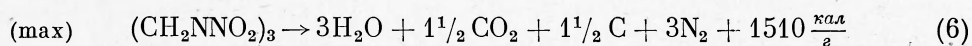
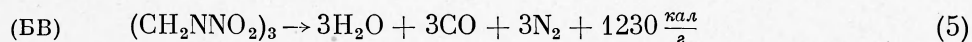
Применение этих правил к ВВ с небольшим отрицательным, нулевым или положительным КБ приводит почти к одинаковым результатам, которые достаточно хорошо согласуются с опытом и более строгим расчетом, учитывающим влияние температуры и давления на неравновесные химические процессы, устанавливающиеся в детонационной волне. Например, для тэна уравнения распада записываются по различным правилам так:



Согласно правилу максимума (max) требуется, чтобы кислород сперва расходовался на образование H_2O из H_2 , а остаток его окислял C до CO_2 .

Для ВВ с сильно отрицательным КБ правило (МЛ) мало подходит, расчет следует вести по правилу (БВ). Строго говоря, оба правила не свободны от недостатка. Так, например, в ПВ тротила обнаруживается H_2O , CO , CO_2 , H_2 , C_2N_2 , NH_3 и др.; появление в ПВ H_2O и CO_2 не согласуется с правилом (МЛ), наличие H_2 и CO_2 противоречит правилу (БВ).

Напишем уравнения распада гексогена и тротила по правилам (БВ) и максимума



Рассчитанные по правилу (Б—В) теплоты взрыва формально более или менее соответствуют экспериментальным теплотам, определяемым в калориметрической бомбе при взрыве заряда ВВ малой плотности ($\rho = 1.0 \text{ г/см}^3$) в массивной оболочке. В случае тротила правило (БВ) дает все же несколько завышенную в сравнении с опытом теплоту взрыва.

Расчет по правилу (max) предельных теплот гексогена и тротила приводит к довольно большим величинам, которые в реальных условиях взрыва, конечно, не достижимы. По максимальной теплоте взрыва можно оценить предельные возможности того или иного ВВ, если предполагается осуществимость полного превращения химической энергии в тепловую.

Максимальная теплота взрыва Q_m превосходит теплоту, рассчитанную по способу БВ в случае гексогена, на 22%, а для тротила эта разница составляет 33%, особенно сильный разрыв в 50—60% имеет место у коллоксилина.

Малую теплоту взрыва Q_d , рассчитанную по правилу (БВ), условно можно считать той минимальной усредненной теплотой, которая выделяется в детонационной волне, полностью передается ей и определяет стационарный детонационный режим. Будем рассматривать Q_d как теплоту детонации. Прямое экспериментальное определение теплоты детонации Q_d сильно затруднено, и по существу до сих пор не имеется надежного способа ее определения.

Рассмотрим большую теплоту взрыва, определяемую экспериментально у плотных зарядов в массивной оболочке. Эта теплота представляет наибольший интерес с точки зрения более полного использования энергии взрыва в практических условиях, когда плотный заряд помещен в оболочку окружающей породы. В конечном итоге фугасное и метательное действия ВВ определяются большой теплотой взрыва (обозначим ее Q_f), а не теплотой детонации Q_d . Опыт показывает, что по величине фугасная теплота Q_f занимает промежуточное положение между теплотой детонации и максимальной теплотой

$$Q_d < Q_f < Q_m$$

Ранее на основании данных табл. 1 и 2 было показано, что увеличение теплоты взрыва не сопровождается соответствующим увеличением скорости детонации. Все это говорит о том, что выделившееся за счет реакций дореагирования добавочное тепло $\Delta Q = Q_f - Q_d$ не передается детонационной волне и не усиливает ее. К вопросу о причинах этого явления вернемся позднее.

Величина фугасной теплоты Q_f зависит от начальной плотности заряда и толщины оболочки, причем Q_f достигает оптимального значения при

максимальной плотности заряда ρ_m и некоторой предельной толщине оболочки. Утолщение оболочки выше предельной перестает оказывать влияние на Q_f . Последнее указывает, что Q_f в какой-то мере является равновесной теплотой, поэтому утолщение оболочки и, следовательно, увеличение времени пребывания ПВ в условиях высокого давления и высокой температуры больше не оказывает влияния.

Зависимость Q_f кал/г от плотности заряда ρ г/см³ имеет линейный характер и может быть записана в следующем виде:

$$Q_f = A + B\rho \quad \left(B = \frac{dQ}{d\rho} \right) \quad (9)$$

где член A представляет фугасную теплоту ВВ в газообразном состоянии, т. е. при очень малой начальной плотности заряда $A = Q_{f0}$.

Экспериментальные зависимости фугасной теплоты (теплоты взрыва в массивной оболочке) от плотности заряда принимают следующие значения для гексогена

$$Q_f = 1090 + 180\rho \quad (10)$$

и тротила

$$Q_f = 550 + 340\rho \quad (11)$$

Максимальное значение фугасной теплоты

$$Q_{fm} = Q_{f0} + \frac{dQ}{d\rho} \rho_m \quad (12)$$

как уже упоминалось, занимает промежуточное значение между Q_m и Q_d . Имея это в виду, Q_{fm} можно представить в виде суммы долей максимальной теплоты и теплоты детонации, определяемых по соответствующим правилам написания реакций распада

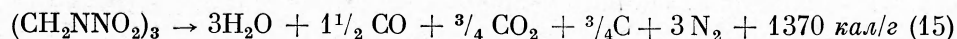
$$Q_{fm} = \alpha Q_m + (1 - \alpha) Q_d \quad (13)$$

Приняв для всех ВВ приближенно $\alpha = 0.5$, будем иметь простое эмпирическое уравнение

$$Q_{fm} \approx \frac{Q_m + Q_d}{2} \quad (14)$$

более или менее удовлетворяющее опыту.

В соответствии с (12) и (13) уравнение распада можно записать по правилу усреднения (У), считая, что вначале кислород окисляет H_2 до H_2O , а затем остаток его расходуется поровну (пропорционально α) на окисление C до CO и CO_2 . В таком случае (при $\alpha = 0.5$) уравнение распада гексогена запишется в виде



Каждому ВВ должно отвечать свое определенное численное значение коэффициента α , которое определяется из вполне надежных и точных экспериментальных данных по теплотам Q_f , Q_d и химическому составу ПВ, устанавливаемых в условиях наиболее совершенной «закалки».

По предварительным данным величина этого коэффициента для гексогена, при экспериментальном значении $Q_{fm} = 1420$ кал/г, составляет

$$\alpha = \frac{Q_{fm} - Q_d}{Q_m - Q_d} = 0.68$$

Оценка величины α , вероятно, вполне возможна и чисто расчетным путем по константам равновесия медленных реакций.

В табл. 3 приведены для некоторых ВВ результаты расчета теплот взрыва, соответственно подразделенных на теплоту детонации Q_d , фугасную Q_{fm} и максимальную Q_m .

Расчет Q_d для нитроглицерина велся по БВ в предположении, что 25% CO_2 диссоциирует [13] по $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2$, а в процессе расщепления ПВ происходит обратная рекомбинация, поэтому для всех БВ с нулевым и положительным КБ можно принять $Q_{fm} \approx Q_m$. При расчете предполагается, что Q_d не зависит от плотности заряда. На самом деле, возможно, имеет место слабая линейная зависимость Q_d от плотности заряда, причем крайние значения Q_d будут не сильно отличаться от усредненного, рассчитываемого по упрощенной схеме (БВ).

Если иметь в виду, что фугасная теплота при плотности заряда $\rho = 1.0 \text{ г/см}^3$ приблизительно равна теплоте детонации $Q_d = Q_{f1}$, то по имеющимся данным легко подсчитываются коэффициенты A и B в уравнении (9), устанавливающим зависимость Q_f от плотности заряда

$$B = \frac{Q_{fm} - Q_d}{\rho_m - 1}$$

$$A = \frac{\rho_m Q_d - Q_{fm}}{\rho_m - 1} \quad (16)$$

3. Время установления равновесий и закалка ПВ. В случае конденсированных взрывчатых систем точный равновесный расчет ПВ весьма затруднен и он не в состоянии дать удовлетворительные результаты. Попытка учесть при расчете как можно больше равновесных реакций не всегда

является признаком точности.

Так, на основании равновесного расчета Кук (14) приходит к выводу, что при детонации высокоплотного гексогена можно ожидать образования в детонационной волне метилового спирта и муравьиной кислоты в количестве до $\frac{1}{3}$ первоначального веса заряда.

Все равновесные расчеты, как правило, ведутся в предположении, что при достаточно большом диаметре заряда устанавливается идеальная скорость детонации, причем все химические реакции в детонационной волне успевают полностью завершиться до равновесного состояния. Следует однако различать химические реакции быстрые и очень медленные, а также реакции, усиливающие детонационную волну и не усиливающие.

Какими бы медленными ни были химические реакции, усиливающие детонационную волну, они всегда проявляются при очень больших диаметрах заряда. При увеличении диаметра заряда будет наблюдаться увеличение скорости детонации в зависимости от скорости химических реакций в детонационной волне и глубины их завершения. Если энергетический и прочий вклад медленных реакций невелик, то при равновесных расчетах им можно пренебречь.

Если реакции не усиливают детонационную волну, то при расчете скорости детонации ими также можно пренебречь, причем не имеет никакого значения медленные они или быстрые. Некоторые из химических реакций, протекающих в детонационной волне, могут ослаблять ее, но если они очень медленные, то и влияние их будет совершенно ничтожным.

Разделение реакций на медленные и быстрые, с положительным и отрицательным вкладом в некоторой степени носит условный характер, так как при суммарном равновесном расчете все они взаимно уравновешиваются, а их кинетические особенности проявляются на ширине зоны химических реакций и форме фронта детонационной волны.

Таблица 3

Взрывчатое вещество	Теплота взрыва, кал/г		
	детонационная Q_d	фугасная Q_{f1}	максимальная Q_m
тэн	1420	1480	1550
гексоген	1230	1370	1510
тетрил	1050	1240	1440
тротил	980	1140	1300
коллоксилин (динитрат целлюлозы)	730	930	1130
пироксилин (тринитрат целлюлозы)	1030	1140	1250
нитроглицерин	1290	1510	1510
тетбан (2,2,3,3-тетранитробутан)	1500	1630	1760

Положительная сторона раздельного рассмотрения различных типов реакций заключается в том выводе, который следует отсюда. Медленные экзотермические реакции с нулевым или любым отрицательным вкладом могут совершенно свободно протекать за основной зоной химических реакций, т. е. за плоскостью Чепмена — Жуге. В данном случае для свободных зарядов возможны как бы два предельных диаметра: первый, совершенно четко ограниченный, детонационный предельный диаметр, выше которого детонация распространяется с постоянной идеальной скоростью, и второй, довольно расплывчатый и значительно превосходящий первый, — энергетический предельный диаметр, выше которого в глубинных слоях заряда завершаются все реакции до равновесного состояния и происходит полное выделение энергии взрыва.

Лучше всего последнее проявляется при детонации зарядов, заключенных в оболочку.

Одновременное существование очень быстрых и очень медленных реакций с положительным вкладом должно существенным образом влиять на форму фронта детонационной волны. Если доля положительного вклада очень медленных реакций сравнительно мала, то зона химических реакций будет сильно растянута за счет «хвоста» медленных реакций, причем плоскость Чепмена — Жуге (Ч — Ж) формально должна быть отнесена на конец хвоста, хотя по существу основные определяющие реакции завершаются на переднем узком участке зоны. В этом случае увеличение диаметра заряда выше критического будет сопровождаться сначала более сильным приростом скорости детонации, а затем медленным насыщением вплоть до предельного значения. Из характера зависимости скорости детонации от диаметра заряда можно составить некоторые заключения о кинетике реакций дореагирования.

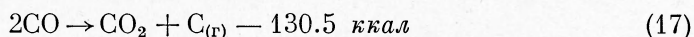
Более детальное исследование скоростей детонации плотных зарядов большого диаметра (100—500 мм) может привести к новым фактам и представляет определенный интерес при изучении роли медленных реакций в детонационной волне.

Для равновесных расчетов следует отобрать только наиболее существенные быстрые реакции, а очень медленные второстепенные реакции необходимо отбросить. В связи с этим приобретает важное значение оценка времен химических реакций в условиях детонационной волны.

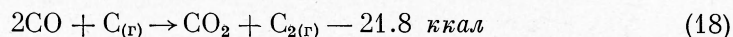
Оценку времени химических реакций в детонационной волне, по-видимому, следует производить согласно Ю. Б. Харитону [15] по величине критического диаметра d_k . Исследование ширины зоны, а также зависимости скорости детонации, состава ПВ и тепловыделения от диаметра заряда может дать много сведений о скорости химических реакций при детонации ВВ.

Можно утверждать, что в детонационной волне равновесия гетерогенных и сложных каталитических реакций будут устанавливаться значительно позднее быстро протекающих гомогенных реакций.

К медленно идущим реакциям следует отнести гетерогенные реакции генераторного газа. Эти реакции диффузионные и на начальных стадиях довольно сложные, ибо для их протекания необходимо формирование первичных центров постепенно укрупняющихся твердых частиц углерода. Прямая реакция



идет через образование атомарного углерода и требует больших затрат тепла. Последующая реакция

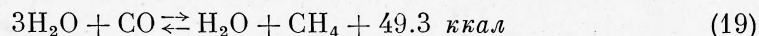


уже идет со значительно меньшей затратой тепла. Реакции генераторного газа существенно облегчаются, если при детонации возможно дополнительное формирование твердых частиц углерода, повышение их концент-

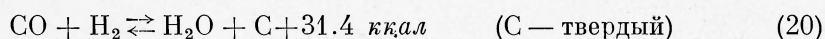
рации за счет других источников. В частности, этому благоприятствует избыток углерода в молекуле ВВ.

Медленные реакции генераторного газа идут со значительным выделением тепла, однако при этом образуются твердые частицы углерода и происходит сильное уменьшение объема газообразных ПВ. Поэтому вполне возможно, что энергия этих реакций не будет передаваться детонационной волне.

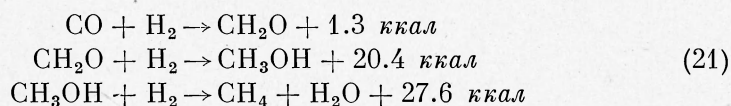
Можно привести много примеров сложных, медленно идущих реакций; к числу их относится и многостадийная реакция образования метана, суммарное уравнение которой записывается в виде



Формально гомогенная реакция (19) может быть суммирована из двух гетерогенных реакций: прямого образования метана $\text{C} + 2\text{H}_2 \rightleftharpoons \text{CH}_4$ и генераторного газа



Кроме того, возможен и гомогенный трехстадийный путь



Таким образом, можно констатировать, что в детонационных процессах необходимо детально учитывать быстро и медленно протекающие химические реакции, в особенности, когда приходится иметь дело с гетерогенными и сложными многостадийными реакциями. Важное значение приобретают медленные реакции, не усиливающие детонационную волну.

Рассмотрим, что происходит при детонации свободных зарядов и зарядов в массивной оболочке.

После завершения основных быстропротекающих реакций, энергия которых полностью передается детонационной волне и поддерживает ее стационарный режим, сразу наступает расширение (ПВ) и давление падает от периферии к центру заряда со скоростью звука в ПВ $C = Dn/(n+1)$. При больших скоростях расширения происходит резкое адиабатическое охлаждение ПВ, причем в процессе охлаждения происходит почти полная закалка ПВ медленных реакций.

В условиях свободного заряда малых размеров медленные реакции генераторного газа не успевают пройти достаточно глубоко вследствие быстрого падения давления и охлаждения ПВ. Поэтому при детонации происходит неполное выделение тепла, хотя детонация и распространяется с идеальной скоростью.

При детонации заряда в массивной оболочке падение давления ПВ сильно замедлится, поэтому реакции генераторного газа вместе с другими реакциями будут располагать временем, достаточным для установления равновесия и более полного выделения энергии. После того как оболочка начнет двигаться и ускоряться, начнется «закалка» ПВ, отвечающая более высокому уровню завершения реакций. В действительности падение давления начинается еще на стадии пластической деформации, которая зависит только от свойств материала оболочки.

Таким образом, роль оболочки сводится к тому, что она обеспечивает более полное завершение реакции и улучшает «закалку» ПВ при последующем их расширении. До сих пор считалось, что реакции генераторного газа полностью завершаются в детонационной волне, а массивная оболочка только улучшает «закалку» ПВ.

Сильное охлаждение ПВ происходит и при свободном расширении их без участия оболочки. В условиях замкнутого пространства, ограничен-

ного стенками калориметрической бомбы, не удастся осуществить свободное расширение, так как при этом происходит многократное столкновение и отражение ПВ от стенок и сравнительно медленное их охлаждение. При столкновении со стенками калориметрической бомбы или любого другого замкнутого пространства кинетическая энергия расширяющихся ПВ переходит в тепловую и температура ПВ вновь сильно повышается. Последнее означает, что в условиях низкого давления и высокой температуры изменится равновесный состав ПВ и равновесия реакций генераторного газа будут сильно смещены в сторону образования СО. Кроме того, создадутся благоприятные условия для образования эндотермических соединений HCN , C_2N_2 , C_2H_2 и др. Поэтому при калориметрическом определении теплот взрыва более правильные результаты можно получить только при детонации заряда в достаточно толстой оболочке.

В практике использования для взрывных работ порохов и ВВ с отрицательным КБ наиболее полного выделения энергии взрыва следует ожидать при максимальной плотности заряда и максимальной плотности заряжения.

При использовании для взрывных работ водонаполненных бездымных порохов, а также водонаполненного гранулированного или зернового тротила легко достигаются оптимальные показатели плотности заряда и плотности заряжения.

Проблема ВВ с охлаждающими и газифицирующимися добавками представляет большой самостоятельный интерес. Не вдаваясь сейчас в подробное рассмотрение этой проблемы, укажем лишь, что в случае водонаполненных ВВ осуществляется наиболее полное выделение энергии взрыва и наиболее эффективное ее использование.

Применение метода водонаполнения для увеличения полноты и эффективности использования энергии взрыва заслуживает самого широкого распространения.

При проведении взрывных работ в слабых породах с использованием воздушных полостей для повышения эффективности взрыва следует отдать предпочтение сбалансированным ВВ ($\text{КБ} \approx 0$).

Возможно, более полное выделение энергии взрыва имеет существенное значение в практике использования ВВ. Добавочному выделению тепловой энергии должно отвечать соответствующее приращение механической работы. Однако в связи с допущением, что некоторые замедленные реакции дореагируют за основной зоной химических реакций и выделяющаяся при этом добавочная энергия не усиливает детонационную волну, возникает вопрос: может ли быть использована добавочная тепловая энергия для совершения полезной механической работы?

Калориметрические измерения не дают прямого ответа на этот вопрос. Поэтому параллельно с калориметрическими определениями были проведены измерения импульса детонационной волны (или импульса взрыва).

4. Импульс и теплота взрыва. Определение импульса производилось по методу обжатия медных крешеров, учитывающему поправку на увеличение поперечного сечения крешера при деформировании его взрывом. Связь между импульсом взрыва и обжатием крешера (бризантность до Касту или Гессу) установлена и подробно рассмотрена в работах М. А. Садовского и П. Ф. Похила [16, 17].

Относительная величина импульса взрыва определялась соотношением

$$J/J_0 = \sqrt{B/B_0} \quad (22)$$

где B и B_0 — приведенные обжатия крешера («истинная бризантность» по Гайду) испытуемого и эталонного ВВ или пропорциональные им величины $\alpha = \Delta H/(H - \Delta H)$, где H — высота крешера и ΔH — величина его обжатия. Испытуемый заряд имел форму цилиндра диаметром $d = 20$ мм, предельная высота которого составляла 80 мм ($4d$). Увеличение высоты заряда выше предельной уже не оказывает никакого влияния на

величину импульса. Импульс эталонного заряда прессованного ТГ 50/50 при $\rho = 1.68 \text{ г/см}^3$ принят за 100.

В табл. 4 (столбец 3) приведены относительные импульсы тэна, гексогена и тротила в чистом виде и с утяжеляющей добавкой 55% по весу порошка вольфрама. Вольфрам играет роль «массивной оболочки», как бы введенной внутрь заряда.

Предполагается, что частицы вольфрама (размер $\sim 5 \text{ мк}$) являются инертными и не взаимодействуют с ПВ. Вольфрам реагирует только в сильно окислительной атмосфере.

В табл. 4 (столбец 4) приведены также отношения импульсов J_2/J_1 заряда утяжеленного к неутяжеленному при сравнимых плотностях, т. е. при равных местных плотностях ВВ.

Утяжеление заряда, как и следовало ожидать, увеличивает импульс взрыва вследствие замедления расширения ПВ и увеличения времени действия высокого давления. Одинаковое утяжеление, однако, по-разному действует на разные ВВ. В случае тротила имеет место более сильное действие утяжеления, а в случае тэна — менее сильное.

Различие в действии утяжеления или так называемой внутренней оболочки обусловлено двумя причинами. Как уже указывалось, утяжеление прежде всего замедляет падение давления, и эта чисто физическая сторона действия распространяется в одинаковой степени на все ВВ. С другой стороны, вследствие замедления расширения ПВ происходит добавочное тепловыделение за счет более полного завершения химических реакций, которое зависит только от состава ВВ.

Ранее указывалось, что при детонации тэна в оболочке не происходит никакого добавочного тепловыделения, поэтому можно считать, что увеличение импульса при утяжелении тэна связано только с увеличением времени действия давления. Более сильное относительное увеличение импульса утяжеленного гексогена или тротила, очевидно, связано как с увеличением времени действия давления, так и с добавочным тепловыделением.

От величины временной и тепловой составляющих зависит суммарная величина прироста импульса.

Рассмотрим, насколько изменения в величине импульса соответствуют изменению в теплоте взрыва. Если согласно (12) принять

$$J = A\rho \sqrt{Q} \quad (23)$$

то должно иметь место

$$J_2/J_1 = \beta \sqrt{Q_f/Q_d} = 1.04 \sqrt{Q_f/Q_d} \quad (24)$$

где β — относительное изменение импульса за счет увеличения времени действия и $\sqrt{Q_f/Q_d}$ — тепловая часть, зависящая от изменения тепловыделения утяжеленного и обычного ВВ. Для тэна $\beta = 1.04$ и предполагается, что это же значение сохраняется для гексогена и тротила.

В последнем столбце табл. 4 приведены относительные изменения импульса, рассчитанные по формуле (24); теплоты взрыва Q_f и Q_d рассчитаны по соответствующим правилам распада. В скобках указаны величины относительного изменения импульса, когда вместо расчетных теплот использованы экспериментальные значения. Сравнение данных последних двух столбцов показывает, что экспериментальные и расчетные значения относительных импульсов находятся между собой в хорошем согласии.

Таблица 4

Изменение относительного импульса
в зависимости от состава и утяжеления ВВ

ВВ	$\rho, \text{ г/см}^3$	J/J_0	J_2/J_1	$1.04 \sqrt{Q_f/Q_d}$
тэн	1.75	115	—	—
тэн+55% W	3.50	119.6	1.04	1.06(1.05)
гексоген	1.78	119.3	—	—
гексоген+55% W	3.56	132.6	1.11	1.10(1.10)
тротил	1.60	83.6	—	—
тротил+55% W	3.28	94.7	1.13	1.18(1.12)

По данным А. К. Парфенова аналогичные изменения импульса наблюдаются и в том случае, когда заряд ВВ помещен в медную оболочку.

Полное соответствие увеличения импульса с увеличением теплоты взрыва показывает, что более полное выделение тепловой энергии может быть реализовано для совершения добавочной механической работы.

Увеличение импульса вследствие добавочного тепловыделения проявляется в несколько неблагоприятных условиях, когда при детонации ВВ возможно сокращение объема газообразных ПВ и увеличение содержания в ПВ твердого углерода, являющихся факторами, отрицательно действующими на работоспособность ВВ. Вопрос об энергии взрыва и работоспособности в зависимости от состава и степени расширения ПВ подробно рассматривается в работах [18, 19, 20].

Если предположить, что вся энергия успевает полностью выделиться в главной зоне быстротекущих реакций, тогда у различных ВВ относительные импульсы взрыва утяжеленных зарядов в сравнении со свободными не должны существенно различаться между собой.

Результаты опытов подтверждают, что добавочное тепловыделение связано с протеканием реакций за основной зоной химических реакций.

Поступила 11 V 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Кузнецов В. М., Лаврентьев М. А., Шер Е. Н. О направленном метании грунта при помощи ВВ. ПМТФ, 1960, № 4.
2. Мельников Н. В., Марченко Л. Н. К вопросу о работе и механизме действия взрыва в твердых средах. Взрывное дело, Госгортехиздат, 1960, Сб. № 45/2.
3. Демидюк Г. П. О механизме действия взрыва и свойствах взрывчатых веществ. Взрывное дело, Госгортехиздат, 1960, Сб. № 45/2.
4. Апин А. Я. К вопросу о взрывном горении ВВ. Рефераты научно-исследовательских работ за 1945 г. Изд-во АН СССР, 1947.
5. Апин А. Я. Роль наполнителей при детонации взрывчатых веществ и порохов. Физика взрыва, Изд-во АН СССР, 1953, Сб. № 2.
6. Апин А. Я., Лебедев Ю. А. О взрывчатом разложении гексогена. ДАН СССР, 1957, т. 114, № 4.
7. Андреев К. К., Беляев А. Ф. Теория взрывчатых веществ. Оборонгиз, 1960.
8. Хикита Т., Кихара Т. Расчет детонационных характеристик. Пламена и химическая кинетика. Изд-во иностр. лит-ры, Сборник, 1961.
9. Price D. Dependence of Damage Effects upon Detonation Parameters of organic High Explosives, Chemical Reviews, 1959, vol. 59, № 5.
10. Haide A., Schmidt A. Experimentelle untersuchungen über den detonation zerfall von sprengstoffen ztgssw, 1931, В 26, N 8—9.
11. Снитко К. К. Теория взрывчатых веществ. Л, 1936.
12. Баум Ф. А., Станюкович К. П., Шехтер Б. И. Физика взрыва. Госфизматиздат, 1959.
13. Апин А. Я., Воскобойников И. М. Расчет параметров детонационной волны в конденсированных ВВ, ПМТФ, 1960, № 4.
14. Соок М. А. The Science of High Explosives, N. Y. 1959.
15. Харитон Ю. Б. О детонационной способности ВВ. Вопросы теории ВВ. Изд-во АН СССР, 1947, вып. 1.
16. Садовский М. А. О способах оценки местного действия взрыва, ЖФХ, 1946, т. 20, стр. 1371.
17. Похил П. Ф., Садовский М. А. О связи бризантности с импульсом взрыва. Физика взрыва. Изд-во АН СССР, 1952, Сб. № 1.
18. Беляев А. Ф., Садовский М. А. О природе фугасного и бризантного действия взрыва. Физика взрыва, Изд-во АН СССР, 1952, Сб. № 1.
19. Беляев А. Ф., Курбангалина Р. Х. Определение работоспособности некоторых ВВ с помощью баллистической мортиры. Физика взрыва. Изд-во АН СССР, 1955, Сб. 4.
20. Беляев А. Ф., Курбангалина Р. Х. Определение относительной работоспособности ВВ методом эквивалентных зарядов по величине расширения в бомбе Трауцля. ПМТФ, 1960, № 2.