

с экспериментом, что свидетельствует о возможности использования разработанной модели для расчета влияния отдачи на параметры истечения двухфазной среды с концентрацией твердой фазы, близкой к насыпному состоянию. Некоторый разброс экспериментальных результатов в случае 75 % песка с учетом отдачи, по-видимому, связан с тем, что при значительном расширении столба двухфазной среды она уже не может быть описана моделью равновесного течения ввиду значительной разности инерционных характеристик фаз.

Таким образом, для повышения эффективности выброса огнетушащего порошка из канала и доставки его в очаг пожара целесообразно уменьшение влияния отдачи ствола огнетушащей установки и повышение начального давления порохового газа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Брушлинский Н. И., Кафидов В. В., Козлачков В. И. и др. Системный анализ и проблемы пожарной безопасности народного хозяйства.— М.: Стройиздат, 1988.
2. Иванов А. С. Экспериментальное исследование метания тел нестационарным потоком двухфазной среды // ФГВ.— 1989.— 25, № 1.— С. 73.
3. Любарский С. Д., Иванов А. С. Движение сжатой двухфазной среды насыпной плотности при внезапном расширении // Там же.— № 3.— С. 78.
4. Rudinger G. AIAA J.— 1965.— N 3.— P. 7.
5. Гельфанд Б. Е. и др. // ПМТФ.— 1986.— № 1.
6. Атанов Г. А. Основы одномерной нестационарной газодинамики.— Киев: Вища шк., 1979.
7. Холл Дж., Уатт Дж. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений.— М.: Мир, 1979.

г. Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 24/IV 1991

УДК 534.222.2

А. С. Смирнов, И. О. Шкалябин, Е. В. Колганов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВРЕМЕНИ РЕАЛИЗАЦИИ КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОЙ ТЕПЛОТЫ ВВ, СОДЕРЖАЩИХ С, Н, N И О

Исследовались энергетические характеристики шести индивидуальных ВВ с сильно отличающимися характеристиками состава и строения. Экспериментально определено время реализации калориметрической теплоты. В результате анализа полученных данных рассчитана предельная температура, ниже которой вторичные реакции в продуктах взрыва не идут.

Теплота взрывчатого превращения, определяемая в детонационном калориметре,— одна из фундаментальных характеристик ВВ. Традиционно использование калориметрической теплоты совместно с величиной объема газообразных продуктов в расчетах скорости, давления детонации [1], скорости метания, определяемой в стандартном цилиндре-тесте, фугасного действия взрыва. Для расчета калориметрической теплоты существуют различные схемы методики:

1. Авакяна [2]

$$Q = Q_{\text{п max}} \cdot 0,32\alpha^{0,24} + \Delta H^{\circ}$$

2. Пепекина [3]

$$Q = Q_{\text{max}} \left\{ 1 - (0,528 - 0,165\rho)(1,4 - \alpha)^{1,4} \left[1 - \left(\frac{H}{C + H} \right)^{(5,73 - 2,28\rho)(1,4 - \alpha)^3} \right] \right\}$$

3. Махова [4]

$$Q/Q_{\text{max}} = 1 - (0,75 \exp K_1 + 0,15 \exp K_2) A, \quad K_1 = -(0,58\rho + 2,2\alpha^{2,5}), \\ K_2 = -[0,6\rho + 150(\alpha_1 - 1)^2], \quad A = 1 - \beta^{\bar{\alpha}^3}, \quad K_3 = 5 \exp K_4, \\ K_4 = 3,2\alpha_1^2 - 0,95\rho, \quad \beta_1 = H/(C + H).$$

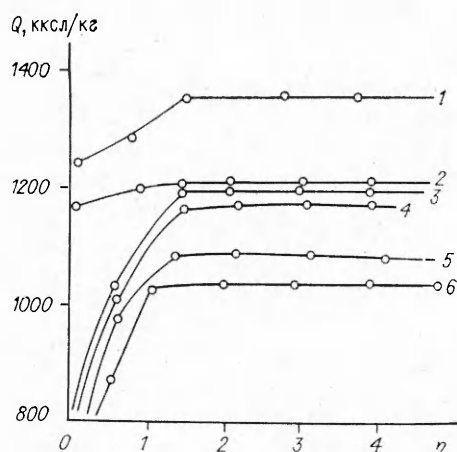


Рис. 1. Зависимость calorиметрической теплоты взрыва от коэффициента нагрузки для гексогена (1), бензотрифуроксана (2), NN-дипитропиперазина (3), тетрила (4), тринитротолуола (5) и триаминотринитробензола (6).

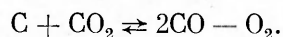
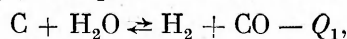
Здесь Q — теплота calorиметрическая (вода — в паровой фазе); Q_{\max} — теплота, вычисленная по условию максимального тепловыделения, для $C_c H_h O_o N_n$ при $\alpha \geq 1$ $Q_{\max} = 5,75 H/2 + 94 C$, при $\alpha < 1$ $Q_{\max} = 47 O + 5,25 H$, $Q_{\max} = Q_{\max} + \Delta H^0$; α — кислородный коэффициент, для $C_c H_h O_o N_n$ $\alpha = \frac{O}{2C + H/2}$; C, H, O, N — стехиометрические коэффициенты в химической формуле исходного ВВ; ρ — плотность заряда; α_1 — модернизированный кислородный коэффициент, для $C H N F$ $\alpha_1 = \frac{1,4 F}{O + F} + \frac{O^2}{(2C + H/2)(O + F)}$.

Значения Q , полученные в результате вычислений по этим формулам, отличаются друг от друга, однако в расчетах Q используют совместно с объемом продуктов взрыва V , рассчитываемым в каждой схеме. В этом случае завышение Q компенсируется занижением значения V . В наиболее простом виде такая взаимокompенсация известна как характеристическое произведение Берто $QV = \text{const}$, которое не зависит от плотности и характеризует количество работы, которую может произвести единица массы данного ВВ. В [5, 6] показано, что с некоторыми уточнениями принцип взаимной компенсации Q и V работает на ранних стадиях расширения продуктов взрыва. Именно поэтому величины Q и Q_{\max} совместно с соответствующими им объемами продуктов с одинаковым успехом могут использоваться при расчетах как скорости детонации, так и фугасного действия взрыва.

Авторы [2] предложили интерпретировать calorиметрическую теплоту как суммарный тепловой эффект первичных химических реакций, протекающих во фронте детонационной волны, и вторичных равновесных реакций, происходящих при адиабатном расширении продуктов взрыва после завершения детонации. Время полного завершения вторичных реакций экспериментально не определялось, обычно его считают равным 100 мкс и более.

В литературе известна зависимость calorиметрической теплоты взрыва от коэффициента нагрузки $\eta = m_{об}/m_{ВВ}$ [7, 8], где $m_{ВВ}$ — масса взрывчатого вещества; $m_{об}$ — масса оболочки, в которую оно помещено. На рис. 1 видно, что зависимость имеет насыщающийся характер: при увеличении η значение Q возрастает и после достижения некоторого критического значения $\eta_{кр}$ теплота взрыва становится постоянной.

Ключ к пониманию химизма явления содержится в [6], где предложено понятие о «буферных равновесиях»:



Эти реакции определяют объем и энергосодержание продуктов взрыва.

Характеристики состава и строения исходных ВВ

| Вещество | $\rho_{\text{МК}}, \text{ г/см}^3$ | $\rho, \text{ кг/см}^3$ | $\text{С}, \text{ г-ат/кг}$ | $\frac{\Delta H_f^0}{\text{кг}}$ кДж | α |
|------------------------|------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|---|----------|
| Тринитротолуол | 1,66 | 1,60 | 30,82 | -261,8 | 0,364 |
| Триаминотринитробензол | 1,938 | 1,46 | 23,24 | -655,6 | 0,400 |
| N, N-динитропиперазин | 1,63 | 1,46 | 22,71 | -323,2 | 0,333 |
| Гексоген | 1,82 | 1,46 | 13,51 | 277,9 | 0,667 |
| Тетрил | 1,73 | 1,60 | 24,39 | 110,8 | 0,487 |
| Бензотрифуроксан | 1,901 | 1,46 | 23,80 | 2305,0 | 0,500 |

Смещение равновесия вправо вызывает уменьшение энергосодержания и увеличение объема. Определяет эти реакции поведение углерода.

Начальному моменту расширения соответствуют максимальные температура и давление, минимальный объем, что диктует преобладание в продуктах взрыва трехатомных газов. Как видно из уравнений реакций, трехатомные газы наиболее энергетически выгодны. По мере расширения продуктов детонации падают температура и давление, увеличивается объем, что смещает равновесие вправо, к двухатомным газам, менее выгодным энергетически. Если коэффициент нагрузки ниже критического, то продукты детонации не успевают остыть за счет совершения работы по метанию оболочки и собственному расширению. Но главное, что частицы конденсированного углерода остались горячими. После прорыва оболочки массивные, медленно остывающие частицы углерода продолжают реагировать с быстро остывшими трехатомными газами и буферное равновесие смещается далеко вправо, тем дальше, чем меньше η . Если же $\eta > \eta_{\text{кр}}$, то на момент прорыва оболочки температуры продуктов детонации, а значит, и углерода оказываются ниже критической и после прорыва оболочки вторичные реакции не идут.

Время прорыва оболочки при $\eta = \eta_{\text{кр}}$ соответствует времени завершения вторичных реакций и реализации калориметрической теплоты.

Для проведения эксперимента выбраны вещества с сильно отличными характеристиками (см. таблицу): кислородный коэффициент $\alpha = 0,333 \div 0,667$, содержание углерода $\text{С} = 13,51 \div 30,82 \text{ г-ат/кг}$, плотность монокристалла $\rho_{\text{МК}} = 1,63 \div 1,93 \text{ г/см}^3$, энтальпия образования $\Delta H_f^0 = -655,6 \div 2067 \text{ кДж/кг}$.

Определение значения $\eta_{\text{кр}}$. Для проведения калориметрического опыта навеска вещества массой 30 г помещалась в латунную цилиндрическую оболочку с внутренним диаметром 21,5 мм, между зарядом и оболочкой выдерживали постоянный зазор 0,75 мм с каждой стороны для исключения влияния оболочки на предельный диаметр. Сверху образец накрывали латунной крышкой толщиной 7 мм с отверстием под детонатор. Заряд с присоединенным детонатором герметично закрывали в стальной цилиндрической бомбе объемом 5 л. Бомбу помещали в калориметрический сосуд и заливали водой с расчетом покрыть все выступающие части, затем сосуд накрывали крышкой. В результате подрыва образца калориметрическая жидкость нагревалась, подъем температуры измеряли дифференциальными термомпарами. По подъему температуры вычисляли теплоту взрыва.

Каждое вещество испытывали в шести латунных цилиндрических оболочках с различными коэффициентами нагрузки. Толщина стенки оболочек изменялась от 0,5 до 3 мм с шагом 0,5 мм, а толщина дна была постоянной и равнялась 7 мм. Ввиду того, что толщина дна сильно отличалась от толщины боковой стенки, а оболочка заполнялась не вся, коэффициент нагрузки определяли экспериментально. После опыта осколки латунной оболочки извлекали из бомбы, очищали от конденсированной фазы продуктов взрыва и классифицировали на три группы: крупные осколки верхней части оболочки и крышки, мелкие осколки средней части оболочки, крупные осколки дна.

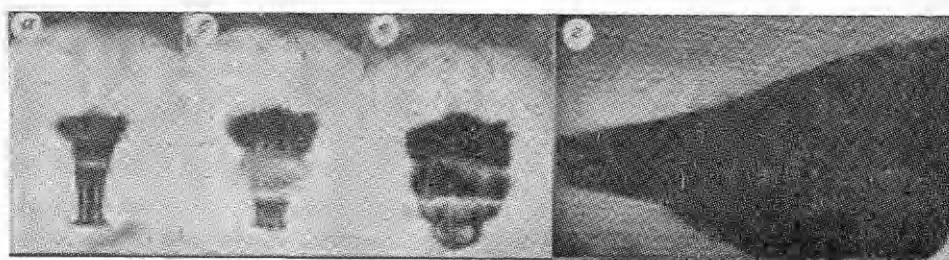


Рис. 2. Фоторегистрограмма процесса ускорения оболочки продуктами взрыва бензотрифуроксана; толщина стенки 1 мм.
а, б, в — покадровая съемка ($t = 3,9; 6,5$ и $12,6$ мкс соответственно); г — щелевая съемка.

После классификации определяли массу второй группы осколков и коэффициент нагрузки. Результаты опытов представлены на рис. 1, где Q — теплота калориметрическая при воде жидкой. Как видно из графика, $\eta_{кр} = 1,35; 1,00; 1,42; 1,5; 1,44$ и $1,48$ для тринитротолуола, триаминтринитробензола, N, N-динитропиперазина, гексогена, тетрила и бензотрифуроксана соответственно.

Процесс ускорения оболочки регистрировался параллельно методами покадровой и щелевой съемки. Покадровую съемку проводили с помощью камеры ЖЛВ-2 при частоте съемки $550 \cdot 10^3$ кадр/с с использованием всесторонней взрывной подсветки. Щелевая фоторегистрация проводилась камерой ВФУ-1 в проходящем свете в сечении оболочки, отстоящей от точки инициирования на три диаметра заряда.

Для фоторегистрации каждое вещество помещали в оболочку, соответствующую критическому коэффициенту нагрузки. Так же как и в калориметрическом опыте, между шашками ВВ и стенкой оболочки выдерживался зазор $0,75$ мм с каждой стороны. Для улучшения качества съемки на внешней стороне оболочки проводили матовое никелирование электрохимическим способом. Время полного разрушения оболочки, определенное покадровой съемкой, совпало для всех веществ и оказалось равным $12,6$ мкс с точностью до кадра.

С помощью щелевой съемки установлено, что в узком сечении процесс разрушения оболочки протекает за $5-6$ мкс. Время считалось от начала расширения оболочки до прорыва продуктов взрыва через стенки. Типовая фоторегистрограмма представлена на рис 2.

По результатам калориметрических опытов методом регрессионного анализа выведено уравнение, связывающее величину критического коэффициента нагрузки с факторами состава и строения:

$$\eta_{кр} = (\Delta H_f^0 + 2000)^{0,282} \rho_{МК}^{-1,793} C^{-0,268}$$

Полученные результаты показывают, что $\eta_{кр}$ не связана непосредственно с кислородным коэффициентом, но зависит от содержания углерода в исходном веществе, что косвенно подтверждает определяющую роль конденсированного углерода в процессе расширения продуктов взрыва.

По результатам щелевой съемки и калориметрического эксперимента рассчитана температура продуктов взрыва на момент завершения вторичных реакций. Ее значение соответствует предельной температуре частиц С, ниже которой конденсированный углерод не взаимодействует с трехатомными газами. Формулы для расчета температуры записываются следующим образом:

$$Q = Q_V - nRT_H + \frac{P_6 + P_{атм}}{2} \left(V_T - \frac{V_6}{m_{ВВ}} \right) K,$$

$$Q_V = K \left(\eta v^2 / 2 + \frac{v^2}{4} \right) + \int_{T_ч}^{T_{пр}} c_V dT.$$

Здесь Q — калориметрическая теплота (ккал/кг); Q_v — теплота взрыва при $V = \text{const}$ (ккал/кг); n — число молей газообразных продуктов (моль/кг); R — универсальная газовая постоянная (кал/(моль · К)); K — коэффициент перевода джоулей в калории; T_n — температура завершения калориметрического опыта; p_6 — давление в бомбе после опыта (Па); $p_{\text{атм}}$ — атмосферное давление во время опыта (Па); V_r — объем газовых продуктов, определенных в опыте (м³/кг); V_6 — объем бомбы (м³); m — масса образца (кг); η — коэффициент нагрузки (кг/кг); v — скорость оболочки на момент прорыва (м/с); c_v — удельная теплоемкость продуктов взрыва при $V = \text{const}$ (кал/(моль · К)); $T_{\text{пр}}$ — температура продуктов взрыва на момент прорыва (К); nRT_n — работа по расширению продуктов взрыва до объема, соответствующего им при нормальных условиях; $((p_6 + p_{\text{атм}})/2)(V_r - V_6/m)$ — работа по расширению продуктов взрыва от объема бомбы до объема, соответствующего им при нормальных условиях; $\eta v^2/2$ — кинетическая энергия оболочки; $v^2/4$ — энергия собственного движения продуктов [9, 10]; $\int_{T_n}^{T_{\text{пр}}} c_v dT$ — энергия, выделившаяся

в результате охлаждения продуктов до температуры окончания опыта;

$$\int_{T_n}^{T_{\text{пр}}} c_v dT = \sum_{i=1,k} \bar{c}_{vi} x_i (T_{\text{пр}} - T_n); \quad x_i — \text{мольная доля } i\text{-го компонента}$$

продуктов взрыва.

Как оказалось, вклад члена $nRT - (p_6 + p_{\text{атм}})/2(V_r - V_6/m)$, учитывающий расширение остывших газов от начального объема до объема бомбы, незначителен и не превышает 15 ккал/кг. Поэтому для простоты в расчетах показывать его не будем. Для иллюстрации расчета приводим два примера. Бензотрифуроксан: $Q = 1200$ ккал/кг, $\eta_{\text{кр}} = 1,48$, $v = 1880$ м/с, средняя суммарная теплоемкость продуктов взрыва 200 кал/(моль · К), $T_{\text{пр}} = 1820$ К. Тетрил: $Q = 1180$ ккал/кг, $\eta_{\text{кр}} = 1,44$, $v = 1810$ м/с, средняя суммарная теплоемкость продуктов взрыва 240 кал/(моль · К), $T_{\text{пр}} = 1750$ К.

Во всех остальных расчетах разница температур не превысила 70 К. Значение температуры, соответствующей окончанию вторичных реакций, для всех исследованных веществ лежит в интервале 1750—1820 К.

В результате исследования энергетических характеристик шести С, Н, N, O-содержащих веществ методами детонационной калориметрии и фоторегистрации процесса ускорения оболочки установлено, что время реализации калориметрической теплоты соответствует 5—6 мкс; критическое значение коэффициента нагрузки зависит от содержания углерода в исходном веществе; рассчитанная предельная температура, ниже которой вторичные реакции в продуктах взрыва не идут, для приведенного ряда веществ находится в интервале 1750—1820 К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пепекин В. И., Лебедев А. Ю. Критерий оценки параметров детонации ВВ // Докл. АН СССР.— 1977.— 234, № 6.— С. 750.
2. Физика взрыва/Под ред. К. П. Станюковича.— М.: Наука, 1975.
3. Пепекин В. И., Махов М. Н., Лебедев Ю. А. Теплота взрывчатого разложения индивидуальных ВВ // Докл. АН СССР.— 1977.— 232, № 4.— С. 852.
4. Махов М. Н., Архипов В. И. К расчету скорости разлета оболочки // ФГВ.— 1989.— 25, № 3.— С. 87.
5. Kamlet M. J., Dickonson C. // J. Chem. Phys.— 1968.— 48, N 8.— P. 43.
6. Kamlet M. J., Hurwitz H. // Ibid.— P. 3685.
7. Махов М. И., Пепекин В. И. К вопросу о калориметрическом определении теплоты взрывчатого разложения ВВ // Хим. физ. процессов горения и взрыва. Детонация: Материалы 9-го Всесоюз. симп. по горению и взрыву. Суздаль, 1989.— Черноголовка. 1989.— С. 23.
8. Лебедев Ю. А., Мирошниченко Е. А., Кнобель Ю. К. Термохимия нитросоединений.— М.: Недра, 1970.

9. Miller P. J., Carlson K. E. Determining JWL equation of state parameters using the Gurney equation approximation // 9th Symp. on Detonation, Portland, Oregon, USA. 1989.— Vol. 3.— P. 930.
10. Одинцов В. А. Расширение цилиндра с доньями под действием продуктов детонации // ФГВ.— 1991.— 27, № 1.— С. 100.

г. Дзержинск

Поступила в редакцию 1/XI 1991

УДК 536.46 + 662.3

*Б. Н. Кондриков, Ю. Д. Рябикин, С. П. Смирнов,
Л. К. Чекалина, Я. В. Алымова*

ПЕРЕХОД ГОРЕНИЯ В ДЕТОНАЦИЮ СЛОЯ ПОРОШКООБРАЗНОГО ВВ В ТРУБАХ БОЛЬШИХ РАЗМЕРОВ

Проведены опыты по переходу горения в детонацию свободно насыпанного слоя гексогена, октогена и тэна, а также смесей гексогена с концентрированной азотной кислотой и октогена с ацетоном в трубах длиной до 7 м и диаметром до 0,094 м. Проведен расчет и получено асимптотическое условие ПГД в виде предельной длины трубы, при которой скорость газового потока со взвешенными в нем горящими частицами ВВ устремляется в бесконечность. Определена величина критерия Рейнольдса на выходе из трубы при постоянной поверхности горения. Показано, что при $Re > 11500$ при достаточно большой толщине слоя ВВ переход происходит почти безотказно.

В работе [1] изучался переход горения в детонацию (ПГД) в стеклянных трубах небольшого диаметра (8—12 мм) и длины (до 300 мм), на внутренней поверхности которых находился скрепленный со стенками слой ВВ. Получены три детонационных режима: низкоскоростной (2—3 км/с), высокоскоростной (4—5 км/с) и сверхскоростной (>10 км/с). Теоретическое рассмотрение процесса позволило сформулировать дифференциальное уравнение, описывающее увеличение скорости потока газа, и получить простой, хорошо выполняющийся критерий ПГД. При воспламенении слоя порошкообразного ВВ, не скрепленного со стенкой, детонации не наблюдалось: порошок выдувался из трубы, процесс затухал.

В данной работе рассмотрен процесс ПГД свободно насыпанного слоя ВВ в трубах больших размеров — диаметром $d = 0,026 \div 0,094$ и длиной $l = 0,6 \div 7,1$ м (масса ВВ 0,1—14,5 кг). В этих условиях при определенных соотношениях между d и l трубы и площадью поперечного сечения канала, занятого ВВ, возникала детонация. Несмотря на существенные различия условий опытов, подход к построению критерия ПГД, реализованный в [1], оказалось возможным применить и в данном случае.

Методика проведения опытов

Для исследования взяты гексоген, октоген и тэн — стандартные технические продукты. В ряде опытов применялись смеси гексогена с концентрированной (98 %) азотной кислотой и октогена с ацетоном. Трубы стальные, бесшовные. Отношение толщины стенки к диаметру 0,05—0,1. Применялись также трубы из фторопласта ($d = 36 \div 66$ мм, $l = 1,0 \div 2,2$ м) со стенками толщиной 5—10 мм.

Открытую с обеих сторон трубу укладывали на стойки, помещали в нее некоторое количество порошкообразного ВВ и с помощью тефлонового шаблона в виде сегмента на длинном стержне разравнивали слой порошка в трубе, удаляя излишек через свободные торцы. Гексоген и октоген воспламеняли спиралью из нихромовой проволоки, нагреваемой электрическим током. В одних опытах она размещалась в торце заряда