

## О ТЕПЛОТЕ ВЗРЫВА ПРОМЫШЛЕННЫХ И БРИЗАНТНЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

В. И. Пепекин, С. А. Губин

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 117977 Москва, kors@polymer.chph.ras.ru

Рассмотрены методики определения теплоты взрыва взрывчатых веществ (ВВ) с идеальным и неидеальным процессами взрывного разложения. Показано, что теплота взрыва имеет существенное значение для оценки эффективности промышленных ВВ и входит в энергетическое определение работоспособности. Теплота взрыва бризантных ВВ является лишь частью фугасной теплоты взрыва и теплосодержанием газообразных продуктов детонации при их изоэнтропическом расширении из начального состояния до определенной (условиями эксперимента) степени расширения. Термодинамический расчет на основе физически обоснованных уравнений состояния флюидов (газообразных продуктов детонации, находящихся в зоне химических реакций детонационной волны в сверхкритическом состоянии), а также конденсированных фаз нанюглерода (нанографита, наноалмаза и жидкого углерода) позволяет рассчитать теплоту взрыва. Приведены экспериментальные и расчетные значения теплоты взрыва. Термодинамический расчет неприменим к промышленным ВВ ввиду неидеальности детонации. Теплота взрыва промышленных ВВ может быть вычислена по закону Гесса. Теплота взрыва бризантных ВВ не является мерилем мощности. Мощность ВВ характеризуют метательной способностью. Показано, что даже скорость детонации не может характеризовать мощность ВВ. Мощность бризантных ВВ и его параметры детонации определяются плотностью энерговыделения в единице объема зоны химической реакции детонационной волны и мощностью энерговыделения ударного фронта, а не теплотой взрыва, которая не может считаться универсальной характеристикой.

Ключевые слова: теплота взрыва, промышленные и бризантные ВВ, термодинамика.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ВЗРЫВА ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ

Широкое использование взрывчатых композиций в тридцатые и сороковые годы прошлого столетия в народном хозяйстве обусловило необходимость создания экспериментальных методов определения теплот взрыва и объема газообразных продуктов взрывного разложения. Экспериментально определяемые характеристики (теплота взрыва и объем газа) промышленных взрывчатых веществ (ВВ) служили основанием для их практического применения. Актуальны эти характеристики и в настоящее время, поскольку являются основой оценки работоспособности (фугасности) реальных промышленных ВВ. Промышленные ВВ (обычно на основе аммиачной селитры), по современной научной терминологии, относят к взрывчатым системам с неидеальным режимом детонации. Значимость теплоты взрыва

и объема газообразных продуктов для оценки практической применимости промышленных ВВ привела к необходимости развития экспериментальных методов их определения.

Для непосредственного определения были созданы и применялись установки больших размеров и повышенной прочности, позволяющие подрывать значительные заряды с помощью капсуля-детонатора.

А. Ф. Беляев [1] использовал для определения теплоты взрыва толстостенную бомбу с внутренним объемом 4.75 л. В ней взрывались заряды массой 50 ÷ 100 г в свинцовой оболочке. Температура измерялась тремя термометрами, помещаемыми после подрыва в специальные «карманы», расположенные по окружности на поверхности бомбы. По мнению авторов [1], погрешность измерения составляла 1 ÷ 2 %. Бомба Бихеля имела еще больший объем — 26 л. Она позволяла испытывать заряды значительного диаметра массой свыше 100 г. Это в наибольшей степени приближало условия подрыва к практическим, особенно при помещении заряда в свинцовую оболочку, замедляющую разлет продуктов взрыва. В ан-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 04-03-32873).

глейских исследовательских лабораториях использовался жидкостный калориметр с бомбой для подрыва объемом  $124 \text{ см}^3$ , что позволяло испытывать заряды массой до 15 г. Начиная с 1930 г. аналогичные исследования проводились в Германии известными в 20–30-е годы учеными Хайдом и Шмидтом.

Данные по теплоте взрыва, экспериментально полученные по этим методикам, некорректно сравнивать. Теплота взрыва — величина непостоянная и сильно зависит от условий эксперимента (наличия оболочки, степени расширения продуктов взрыва, критического диаметра). Несомненно, что данные, полученные по одной методике, позволяли достаточно правильно судить об энерговыделении конкретного промышленного вещества. Для оценки теплоты взрыва и объема газов промышленных ВВ вполне оправданно и целесообразно применение приближенных правил написания уравнения взрывного разложения типа Малаяра — Ле Шателье и Бринкли — Вильсона (с точностью  $10 \div 20 \%$ ). На основании уравнения взрывчатого распада рассчитываются теплота взрыва, объем газообразных продуктов и оценивается работоспособность (фугасность). При этом погрешность не имеет принципиального значения и не актуальна, так как работоспособность проверяется относительно работоспособности эталона. Принципиальное значение для промышленных ВВ имеют детонационная способность, доступность сырья, стоимость и автоматизация работ. Из всех проблем, стоящих при выборе промышленных ВВ, научный интерес представляет только вопрос о детонационной способности (снижение критического диаметра), который решается для эмульсионных ВВ введением газообразующих добавок (типа  $\text{NaN}_2\text{O}_2$ ) или пустотелых стеклянных сфер, образующих пузырьки газа при разложении и увеличивающих детонационную способность ВВ.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОТЫ ВЗРЫВА БРИЗАНТНЫХ ВВ

Развитие средств вооружения в период Второй мировой войны показало высокую эффективность применения более мощных ВВ, чем широко применявшийся тротил и его смеси с аммиачной селитрой. Развернутые во время Второй мировой войны и в последующий

период беспрецедентные по широте и объему работы по созданию специальной техники потребовали применения ВВ с максимальной на тот период мощностью. Этим веществом стал гексоген и его взрывчатые составы с тротилом в различных соотношениях (ТГ 20/80, ТГ 36/64, ТГ 50/50) в зависимости от требуемой мощности. Достигнутый за короткий период прогресс в создании новых средств поражения оказался столь впечатляющим, что определил вплоть до настоящего времени постоянный интерес к поиску мощных ВВ. Взрывчатые вещества не имеют аналогов по простоте, надежности и управляемости импульсными источниками энергии с экстремальной мощностью. Широкие исследования в области ВВ привели к разработке методов исследования быстропротекающих процессов, физико-химических и взрывчатых свойств, химической и физической стойкости, детонационной способности и параметров детонации. В СССР и США (Ливермор) были также созданы установки для исследования теплоты взрыва бризантных ВВ в целях получения информации об энергетике и мощности ВВ. Большие надежды возлагались на информативность методики определения теплоты взрыва, поскольку в основе детонации лежит выделение энергии при распаде ВВ, а по классической теории детонации  $D \sim Q^{1/2}$  и  $p \sim Q$ , где  $D$  и  $p$  — скорость и давление детонации,  $Q$  — энергия, выделяемая в плоскости Чепмена — Жуге, которая определяет параметры детонации и бризантность. Само ВВ является источником энергии с экстремальной мощностью.

В ИХФ РАН были сконструированы и изготовлены жидкостные калориметры с бомбами объемом 2 и 5 л, описанные в [2]. Наибольшее применение в лабораторных условиях нашла калориметрическая установка с бомбой объемом 5 л, выполненная из орудийного ствола. Калориметрическая бомба, предназначенная для исследования зарядов бризантных ВВ массой до 100 г, изображена на рис. 1, а детальное описание экспериментов дано в [3]. По мере эксплуатации установки с бомбой объемом 5 л в нее были внесены методические изменения, связанные с автоматизацией опытов с выдачей на компьютер полного протокола опыта [4]. При этом исключалось перемешивание жидкости мешалкой, что позволило уменьшить тепловой эквивалент установки.

В Ливерморской национальной лабора-

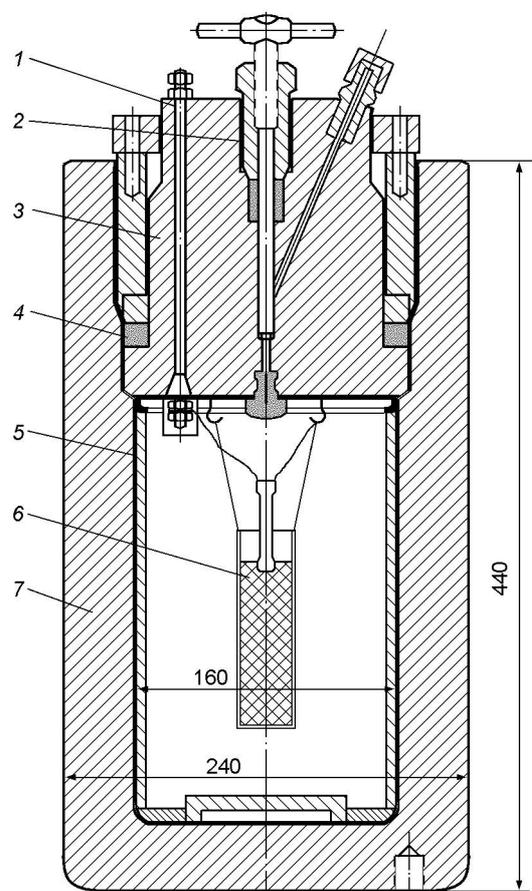


Рис. 1. Калориметрическая бомба для исследования теплоты взрыва зарядов ВВ массой до 100 г (разработка ИХФ РАН):

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, 7 — корпус бомбы

тории (США) примерно в те же годы, что и в ИХФ РАН, был сконструирован и использован для исследований теплоты взрыва бризантных ВВ жидкостный калориметр со сферической бомбой объемом 5.24 л [5], схема которого изображена на рис. 2. Для исследования фторсодержащих ВВ (имеющих в молекуле группы  $-\text{C}(\text{NO}_2)\text{F}$  и  $-\text{NF}_2$ ) в бомбе Ливерморской лаборатории подрыв производился в оболочке из золота, а в бомбе ИХФ РАН — в латунной оболочке, в которую наряду с ВВ помещалось небольшое количество КОН. Вводилась поправка на взаимодействие агрессивных продуктов детонации с КОН. Эта поправка получена и обоснована

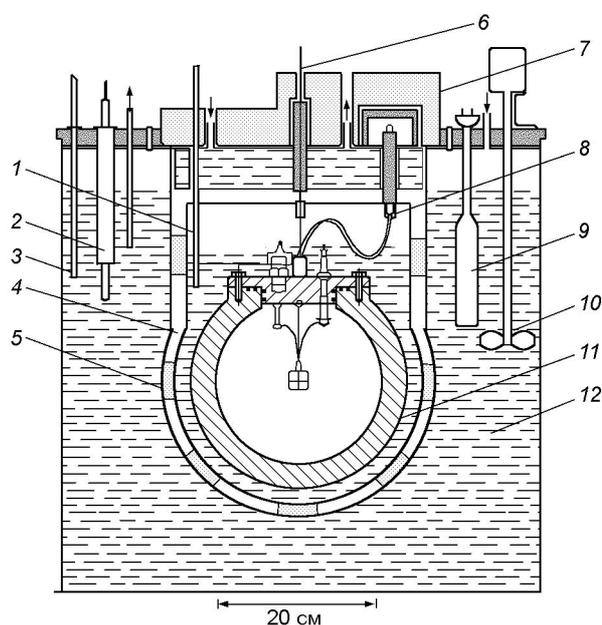


Рис. 2. Калориметрическая бомба (разработка Ливерморской национальной лаборатории):

1 — термисторный датчик, 2 — термометр сопротивления, 3 — ртутно-стеклянный термометр, 4 — стакан калориметра с кромкой, 5 — пенополистирольные распорки, 6 — трос подводки, 7 — изолятор из пенополистирола, 8 — электрод, 9 — нагреватель ножевого типа, 10 — мешалка, 11 — бомба, 12 — рубашка постоянной температуры

при исследовании системы  $\text{CH}_3\text{NO}_2 + \text{XeF}_2$ , проведенном в стальной бомбе и в бомбе, внутренняя поверхность которой была покрыта платиной. Калориметрические установки ИХФ РАН и Ливермора близки по условиям испытаний, сопоставимы по точности измерений и дают близкие по теплотам взрыва экспериментальные данные. В работе [5] приведены результаты калориметрических измерений теплоты взрыва тэна и газового анализа продуктов его детонации, полученные на установке Ливерморской лаборатории. Для чистоты эксперимента (это очень важный методический момент) детонатор также содержал таблетку тэна большой плотности и 150 мг порошкообразного тэна вокруг проводочного моста. В ИХФ аналогичная проблема решалась проведением холостого опыта подрывом связки капсулей-детонаторов (не менее 30 штук), вводилась поправка на использование одного капсуля. В отдельных опытах (для практически интересных ВВ) инициирование осуществлялось азидом свинца, который во влажном виде (недетонационноспособном)

помещался на торец заряда прессованного ВВ и в дальнейшем при откачке воздуха из бомбы и ее вакуумировании терял влагу и инициировал заряд. Экспериментальные данные для тэна были интерпретированы авторами [5] путем численных гидродинамических и термодинамических расчетов и позволили количественно решить вопрос о распределении энергии в условиях опыта. При детонации зарядов без оболочки выделяющаяся энергия остается преимущественно в продуктах, которые сжимаются ударной волной при отражении от стенок бомбы, и их состояние после сжатия сильно отличается от состояния в точке Чепмена — Жуге. При детонации зарядов в массивных оболочках энергия переходит в кинетическую и внутреннюю энергию оболочки, а продукты расширяются вдоль изоэнтропы Чепмена — Жуге без сжатия ударной волной. Так как продукты детонации, образующиеся из зарядов в массивной оболочке, не нагружаются ударной волной, то конечный состав продуктов близок к составу при изоэнтропическом расширении продуктов детонации до температуры «замораживания»  $1500 \div 1800$  К. В дальнейшем эти выводы были подтверждены в работах [6, 7] при исследовании представителей различных классов ВВ — обычных  $\text{CHON}$ -нитросоединений (нитрометан, тротил и октоген при трех плотностях),  $\text{CHONF}$ -фторнитросоединений (бисфтординитроэтилформаль),  $\text{CHNF}$ -дифтораминосоединений (1,2-дифтораминопропан),  $\text{CNO}$ -безводородных (бензотрифуроксан) и  $\text{HNO}$ -безуглеродных (система гидразиннитрат/гидразин) веществ. Последняя система (известная под названием Астролиты) с различным содержанием гидразина может иметь различную плотность и, соответственно, скорость детонации.

Фундаментальные исследования [5–7] показали, что теплота взрыва бризантных ВВ — величина непостоянная и зависит от того, при какой степени расширения газов выполнены экспериментальные измерения. Экспериментальные значения теплоты взрыва промышленных и бризантных ВВ отражают разные процессы. Теплота взрыва бризантных ВВ, отдаваемая через стенки бомбы калориметрической жидкости, — это фиксируемое экспериментально теплосодержание расширившихся до определенной степени газообразных продуктов детонации. В работе [8] даны прибли-

женные методы расчета теплоты взрыва бризантных ВВ, в которых используется стандартная термохимическая программа с применением уравнения состояния идеального газа. Точность этих приближенных методов расчета существенно уступает точности эмпирического метода [9], погрешность которого составляет 1.8 %.

Энергетическим параметром ВВ является максимальная теплота взрыва, которая отражает строение ВВ через энтальпию образования и его химический элементный состав. По максимальной теплоте следует оценивать предельные возможности конкретного ВВ в процессе превращения химической энергии в тепловую. Максимальная теплота взрыва отвечает максимальному тепловому эффекту, возможному при взрыве данного ВВ.

В работе [10] Камлет и Джекобс предложили метод расчета скорости и давления детонации бризантных ВВ с использованием максимальной теплоты взрыва. Авторы статистически обработали результаты термодинамических расчетов детонации различных ВВ. Анализ расчетных составов позволил сформулировать обобщенное правило оценки состава продуктов детонации в точке Чепмена — Жуге: основными продуктами являются вода, азот, диоксид углерода и конденсированный углерод. По этому правилу оценивается состав и определяется число молей газовой фазы продуктов детонации на 1 г ВВ ( $N$ ), средняя молярная масса продуктов детонации ( $M$ ) и максимально возможная теплота взрыва ( $Q_{\max}$ ). Параметры  $Q_{\max}$ ,  $N$  и  $M$  — константы для данного ВВ — комбинируются в обобщенном параметре, который наряду с плотностью ВВ является параметром регрессии скорости и давления. Выбор параметров  $Q_{\max}$ ,  $N$  и  $M$  вполне разумен. Метод Камлета и Джекобса наиболее точный и отличается простотой и скоростью получения результатов. Сравнительные показатели его точности приведены в [11].

Применение правила Бринкли — Вильсона к оценке скорости детонации бризантных ВВ приводит к большим погрешностям. Использование этого правила наряду с эмпирическим соотношением, полученным статистической обработкой небольшого числа данных, связывающих давление, удельный объем и температуру, приводит к большим погрешностям в методе Воскобойникова [12]. При оценке скорости детонации ВВ аномального элементно-

го состава (безводородных, фторсодержащих, безуглеродных) абсолютное значение почти в 1.5 раза превышает экспериментальное.

Детонация — это сложный сверхзвуковой процесс распространения комплекса, состоящего из ударной волны и химической реакции за ней. Эксперимент по теплотам взрыва лишь фиксирует теплосодержание и состав газов на стадии их изоэнтропического расширения. Продукты детонации из-за высокой плотности энерговыделения приобретают запас внутренней и кинетической энергии, который расходуется на совершение работы. С точки зрения совершения работы газообразные продукты детонации передают значительную часть потенциальной химической энергии независимо от способа этой передачи — за счет ударной волны или за счет меняющегося давления при изоэнтропическом расширении. Для детонации характерен наиболее интенсивный ударно-волновой механизм передачи энергии. Не теплота взрыва, а доля энергии, выделяющейся в зоне реакции, является характеристикой процесса детонации, но ее невозможно определить экспериментально.

### ХИМИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТА И РАСЧЕТ ТЕПЛОТЫ ВЗРЫВА

Разработка и создание физически обоснованных уравнений состояния флюидов (газообразных продуктов детонации, находящихся в зоне химической реакции в сверхкритическом состоянии, когда исчезают различия между газом и жидкостью), а также конденсированных фаз наноуглерода (нанографита, наноалмаза и жидкого углерода) [13] и развитие на их основе методов термодинамических расчетов дают также информацию о химическом составе продуктов детонации в точке Чепмена — Жуге и на изоэнтропе. В свою очередь, знание химического состава продуктов позволяет рассчитывать теплоту взрывчатого разложения как разность химической составляющей энтальпии при определенной степени расширения и энтальпии образования исходного ВВ. Как известно, сам процесс детонации, а также работа продуктов детонации при разлете совершаются за счет той части внутренней энергии вещества, которая накоплена в химических связях молекул ВВ. Эта энергия, высвобождаясь в результате химического взаимодействия, переходит в кинетическую энергию, а также в тепловую и упругую составляющие внутренней

энергии продуктов детонации. Поэтому можно ввести понятие химической теплоты, которая определяется как разность химических составляющих энтальпий исходного вещества и текущего состояния продуктов детонации.

Химическая составляющая энтальпии конденсированного вещества включает, кроме внутриатомной энергии и энергии нулевых колебаний химических связей в молекуле, энергию нулевых колебаний межмолекулярных связей, которую обычно называют упругой энергией кристаллической решетки. Таким образом, химическая составляющая энтальпии конденсированного вещества равна энтальпии этого вещества при нулевом давлении окружающей среды и температуре 0 К. Однако не для всех веществ, а тем более ВВ существуют данные об энтальпии при нулевой температуре. Поэтому удельная химическая теплота рассчитывается как разность удельных энтальпий ВВ и продуктов в стандартном состоянии при давлении 101 325 Па и температуре 298.15 К, которая равна разности стандартных удельных энтальпий образования ВВ и продуктов:

$$q_x = \sum_i n_i (\Delta H_f^0)_i - \sum_j n_j (\Delta H_f^0)_j,$$

где индексы  $i$  и  $j$  относятся соответственно к реагентам и продуктам,  $n$  — число молей индивидуального вещества в 1 кг,  $\Delta H_f^0$  — энтальпия образования. Как следует из формулы, химическая теплота зависит только от состава реагентов и продуктов и, следовательно, может служить суммарной характеристикой состава продуктов. Поскольку внутренняя энергия продуктов детонации при изоэнтропическом расширении изменяется непрерывно, то существует некоторая степень расширения, при которой рассчитанное значение химической теплоты оказывается равным теплоте взрыва. Наилучшее согласие результатов расчета химической теплоты с экспериментальными теплотами взрывного разложения бризантных ВВ наблюдается при степени расширения  $V/V_0 = 2$ , где  $V$  — текущий, а  $V_0$  — начальный объем продуктов детонации. В таблице для сравнения приведены рассчитанные химические теплоты и экспериментальные теплоты взрыва.

В известной монографии [14] теплота взрыва подразделяется на детонационную ( $Q_{дет}$ ) и фугасную ( $Q_{фуг}$ ). Обе эти величины представляют собой химическую теплоту (теплосодержание) продуктов детонации при

Сравнение рассчитанных значений теплоты взрыва с экспериментальными данными

ВВ	Формула	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$Q_{\text{эсп}}$ , кал/г [9]	$Q_{\text{хим}}$ , кал/г	$dq$ , %
Нитрогуанидин	$\text{C}_4\text{H}_4\text{N}_4\text{O}_2$	1.58	820	798	2.9
Тротил	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_3\text{O}_6$	1.60	1030	990	3.8
Октоген	$\text{C}_4\text{H}_8\text{N}_8\text{O}_8$	1.80	1300	1360	4.6
Гексоген	$\text{C}_3\text{H}_6\text{N}_6\text{O}_6$	1.70	1290	1260	2.4
Бензотрифуроксан	$\text{C}_6\text{N}_6\text{O}_6$	1.76	1290	1330	2.3
Тетрил	$\text{C}_7\text{H}_5\text{N}_5\text{O}_8$	1.69	1160	1200	3.4
Пикриновая кислота	$\text{C}_6\text{H}_3\text{N}_3\text{O}_7$	1.70	1010	1040	3.0
Диаминотринитробензол	$\text{C}_6\text{H}_5\text{N}_6\text{O}_6$	1.50	930	960	3.6

разной степени расширения. Детонационная теплота  $Q_{\text{дет}}$  соответствует степени расширения  $V/V_0 \approx 2$  (в опыте заряд помещен в цилиндрическую металлическую оболочку). Фугасная теплота взрыва  $Q_{\text{фуг}}$  — это химическая теплота продуктов детонации, расширение которых ограничено стенками калориметрической бомбы (в опыте заряд свободно подвешен к крышке бомбы). В зависимости от объема бомбы  $V_6/V_3 = 160 \div 200$ , где  $V_6$  — объем бомбы,  $V_3$  — объем заряда. Реальная же химическая фугасная теплота соответствует условиям, при которых продукты детонации при расширении достигают температуры и давления окружающей среды. Экспериментальные теплоты взрыва  $Q_{\text{дет}}$  и  $Q_{\text{фуг}}$  являются лишь небольшой частью реальной фугасной теплоты взрыва.

Методические исследования, а также эмпирический метод расчета теплоты взрыва [15–18] лишь создают видимость необходимости и значимости теплоты взрыва мощных ВВ, поскольку в расчетах она не используется. На практике для увеличения фугасного действия обычно вводят в состав ВВ высококалорийные металлические добавки (как правило, самый калорийный из всех металлов — алюминий). Введение металла в бризантные ВВ приводит к снижению давления во фронте детонации и более пологому его спаду, что увеличивает время воздействия давления и повышает фугасность. Кроме времени воздействия

давления, фугасность также зависит от объема и состава газообразных продуктов детонации — рабочего тела, совершающего фугасное действие. Качественно объем, состав газов и калорийность металлизированных добавок оценивают исходя из уравнения взрывного разложения с максимальным энерговыделением — константой металлизированной композиции. Эффективность действия металлизированных композиций на практике характеризуют не энерговыделением, а совсем другими общепринятыми параметрами. Металлизированные составы обычно используются в боеприпасах бризантно-фугасного действия (осколочные, подводный взрыв). При эксплуатации бризантное действие усиливается фугасным (разрушающим) эффектом за счет меняющегося давления при химическом взаимодействии металла с продуктами детонации при изоэнтропическом расширении.

Экспериментальные данные по теплотам взрыва бризантных ВВ малоинформативны при анализе быстропротекающих химических процессов.

## РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ПРОМЫШЛЕННЫХ И БРИЗАНТНЫХ ВВ

Действие взрыва подразделяют на фугасное и бризантное. Фугасное действие определяется как общая работоспособность. Определенные работоспособности ВВ было дано А. Ф. Беляевым [19]. Для расчета полной работы взрыва обычно используют формулу

$$A = Q \left[ 1 - \left( \frac{V_{\text{н}}}{V_{\text{к}}} \right)^{n-1} \right],$$

где  $V_{\text{н}}$  и  $V_{\text{к}}$  — начальный и конечный объемы продуктов взрыва,  $n$  — показатель политропы,  $A$  — полная работа,  $Q$  — теплота взрыва. Полную работу взрыва рассчитывали, используя табличные и рассчитанные значения  $Q$  и  $V_{\text{н}}$  и постоянное значение  $n = 1.25$ . Эта величина получила название «идеальная работа взрыва» и обозначается  $A_{\text{id}}$ . Она вошла в справочную литературу [20] и стала характеристикой работоспособности ВВ ( $A_{\text{id}}$  обязательно включается в технические условия на ВВ). Работоспособность ВВ характеризуется теплотой взрыва. В результате получается «энергетическое» определение работоспособности. В последние годы введено понятие относительной работоспособности  $f$ . Величина  $f$  определяется как отношение работы взрыва 1 кг нового

ВВ к работе взрыва 1 кг эталонного ВВ аммонита 6ЖВ. При разработке нового ВВ теплота взрыва, давление и параметр  $f$  обычно рассчитываются заранее, а затем проверяются экспериментально. Поскольку термодинамические методы расчета параметров детонации и работоспособности неприменимы к промышленным ВВ ввиду неидеальности режимов, для расчета используются простые эмпирические экспресс-методы и приближенные правила записи уравнений распада ВВ Бринкли — Вильсона. На основании реакции распада ВВ рассчитываются величины  $Q$  и  $V_0 = 22.4N$ , где  $N$  — число молей газообразных продуктов. Применение приближенных правил распада ВВ для расчета работоспособности промышленных ВВ вполне оправданно и целесообразно, ибо новые ВВ проверяются экспериментально и сопоставляются с данными для эталонного ВВ — 6ЖВ. Следует отметить, что ошибка опыта (диаметр воронки, глубина заложения заряда, объем воронки, плотность грунта) сопоставима с погрешностью расчета. В работе [21] дана формула для оценки относительной работоспособности промышленных ВВ:

$$f = \left( \frac{Q}{1031} \right)^{0.75} \left( \frac{V_0}{893} \right)^{0.25},$$

где  $Q$  выражена в ккал/кг,  $V_0$  — в л/кг, 1031 и 893 — аналогичные табличные данные для эталонного ВВ — аммонита 6ЖВ.

Бризантное действие или, по терминологии Беляева и Садовского, местное (ближнее) действие взрыва оценивалось ими по обжатию медных крешеров на устройстве для измерения бризантности. В последние годы используется понятие метательной способности ВВ, которое непосредственно связано с действием взрыва. Метательная способность экспериментально определяется двумя общепринятыми методиками. Одна — по торцевому метанию пластин: фиксируются разгонная кривая полета пластины и скорость подлета к месту на строго фиксируемом расстоянии. В этом методе база измерений ограничена из-за искривления пластины при разгоне. Вторая — «цилиндр-тест» или отечественная методика Т-20: фиксируется скорость разлета оболочки цилиндра из обожженной меди на расстоянии 5 мм ( $R/R_1 = 1.33$ ) и 19 мм ( $R/R_1 = 2.24$ ). О мощности ВВ судят по относительной метательной способности. При торцевом метании в качестве эталона принят октоген и метательная способность его заряда при плотности 1.875 г/см<sup>3</sup>.

В «цилиндр-тесте» за эталон принята кинетическая энергия оболочки, разгоняемой продуктами детонации состава ТГ 36/64. Метательная способность — комплексная характеристика мощности ВВ, определяемая его строением через энтальпию образования, элементарным химическим составом и плотностью. Последняя характеристика очень важна, поскольку ей пропорциональны все параметры детонации. Плотность монокристалла ВВ зависит от элементного состава, строения, типа кристаллической решетки и коэффициента упаковки. Плотность же заряда ВВ определяет плотность энерговыделения в единице объема зоны реакции и высокую мощность энерговыделения во фронте. Обычно по скорости детонации судят о мощности ВВ. Исследования метательной способности показали, что скорость детонации не может быть мерилем мощности. Достаточно отметить, что такие ВВ, как метилендинитрамин (медина) и этилендинитрамин (эдна), при высокой скорости детонации ( $\approx 9000$  м/с) имеют невысокий уровень метательной способности. Такие ВВ, как гидразинитроформ и динитрогуанидин, по скорости детонации близкие к октогену и даже превосходящие его ( $D \approx 9200$  м/с), уступают ему по метательной способности. Измерения методом торцевого метания показали, что динитрогуанидин при плотности заряда 1.81 г/см<sup>3</sup> (плотность монокристалла 1.88 г/см<sup>3</sup>) имеет относительную метательную способность 95.3 %, что близко к значению метательной способности гексогена 95.7 %. Вопрос о метательной способности теоретически и особенно практически исключительно важен. Проблема метательной способности вкупе с вопросами мощности, взрывобезопасности и качества рабочего тела требует отдельного рассмотрения.

## ВЫВОДЫ

1. Проведен анализ методик определения теплоты взрыва промышленных и бризантных ВВ.
2. Показано, что теплота взрыва не является константой ВВ и зависит от степени расширения продуктов детонации.
3. Теплота взрыва рассчитывается решением термодинамической задачи для разных степеней расширения.
4. Проведено сравнение экспериментальных и расчетных значений теплоты взрыва бризантных ВВ.

5. Теплота взрыва обоснованно входит в энергетическое определение работоспособности промышленных ВВ, но не имеет отношения к мощности бризантных ВВ, определяемой метательной способностью. Даже скорость детонации не является мерилем мощности ВВ.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Апин А. Я., Беляев А. Ф.** Экспериментальное определение теплоты взрыва // Физика взрыва. 1953. № 2. С. 3–26.
2. **Лебедев Ю. А., Липанин Г. Г., Пепекин В. И., Апин А. Я.** Термохимическое изучение индивидуальных взрывчатых веществ и их смесей // Взрывное дело. 1963. № 52/9. С. 80–90.
3. **Апин А. Я., Велина Н. Ф., Лебедев Ю. А.** О полном использовании энергии взрыва // ПМТФ. 1962. № 5. С. 96–106.
4. **Пепекин В. И., Смирнов А. С.** Теплоты взрывчатого разложения смесей, содержащих алюминий и энергетические вещества // Хим. физика. 2001. Т. 20, № 11. С. 78–80.
5. **Ornellas D. L., Carpenter J. H., Gunn S. R.** Detonation calorimeter and results obtained with pentaerythritol tetranitrate (PETN) // Rev. Sci. Instr. 1966. V. 37. P. 907.
6. **Ornellas D. L.** The heat and products of detonation of cyclotetramethylene-tetranitramine, 2,4,6-trinitrotoluene, nitromethane, and bis[2,2,2-dinitro-2-fluoroethyl]formal // J. Phys. Chem. 1968. V. 72. P. 2390.
7. **Ornellas D. L.** The heat and products of detonation in a calorimeter of CNO, HNO, CHNF, CHNO, CHNOF, and CHNOSi explosives // Combust. Flame. 1974. V. 23. P. 37–46.
8. **Fifer R. A., Morris J. B.** Approximate techniques for the calculation of heats of explosion using thermochemical computer codes // Themochim. Acta. 1994. V. 237, N 2. P. 375–389.
9. **Пепекин В. И., Махов М. Н., Лебедев Ю. А.** Теплоты взрывчатого разложения индивидуальных ВВ // Докл. АН СССР. 1972. Т. 232, № 4. С. 852–855.
10. **Kamlet M. J., Jacobs S. J.** Chemistry of detonation. Simple methods for calculation of detonation properties of CHNO-explosives // J. Chem. Phys. 1968. V. 48. P. 23.
11. **Пепекин В. И., Губин С. А.** Методы расчета параметров детонации взрывчатых веществ // Хим. физика. 2003. Т. 22, № 9. С. 72–97.
12. **Апин А. Я., Воскобойников И. М.** Расчет параметров детонационной волны конденсированных взрывчатых веществ // ПМТФ. 1960. № 4. С. 54–55.
13. **Викторов С. Б., Губин С. А., Маклашова И. В., Пепекин В. И.** Прогнозирование детонационных характеристик безводородных ВВ // Хим. физика. 2005. Т. 24, № 12. С. 22–45.
14. **Физика взрыва** / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2004.
15. **Махов М. Н.** Определение энергосодержания индивидуальных ВВ // Хим. физика. 2000. Т. 19, № 6. С. 52–56.
16. **Махов М. Н.** Теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Хим. физика. 2000. Т. 19, № 9. С. 83–87.
17. **Makhov M. N.** A simplified method for predicting the heat of explosion of aluminized high explosives // Proc. 35th Intern. Annu. Conf. ICT, Karlsruhe, FRG, 2004. P. 3/1–3/8.
18. **Махов М. Н.** Оценка теплоты взрывчатого разложения алюминизированных ВВ // Успехи в специальной химии и химической технологии. М.: Изд-во РГТУ им. Д. И. Менделеева, 2005. Ч. 2. С. 173–177.
19. **Беляев А. Ф.** О полной работе взрыва // Физика взрыва. 1953. № 2. С. 27–42.
20. **Перечень** рекомендуемых промышленных взрывчатых материалов, приборов взрывания и контроля. М.: Недра, 1987.
21. **Афанасенков А. Н., Котова Л. И., Кукиб Б. Н.** О работоспособности промышленных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2001. Т. 37, № 3. С. 115–125.

*Поступила в редакцию 4/IV 2005 г.,  
в окончательном варианте — 5/VII 2006 г.*