

ГОРЕНИЕ, ВЗРЫВ И УДАРНЫЕ ВОЛНЫ

УДК 534.222.2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОТЫ ВЗРЫВА АЛЮМИНИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

© 2020 г. М. Н. Махов*

*Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова
Российской академии наук, Москва, Россия*

**E-mail: MNM17@yandex.ru*

Поступила в редакцию 25.09.2019;
после доработки 25.09.2019;
принята в печать 21.10.2019

Результаты исследования теплоты взрыва индивидуальных и алюминизированных взрывчатых веществ показали, что при испытаниях зарядов, не ограниченных оболочкой, продукты взрыва подвергаются интенсивному вторичному нагреву при достижении стенки во внутренней полости калориметрической бомбы. Вследствие вторичного нагрева в продуктах возобновляется протекание химических реакций, и конечный состав продуктов соответствует “закалке” в условиях медленного охлаждения и низкого давления. Инертная металлическая оболочка, окружающая заряд, ослабляет вторичный нагрев, так как значительная часть энергии продуктов преобразуется в кинетическую энергию оболочки. Эффект заполнения калориметрической бомбы инертным газом подобен действию металлической оболочки. В этом случае понижение температуры вторичного нагрева происходит за счет затрат тепла на нагрев инертного газа. При испытаниях алюминизированных композиций для ослабления вторичного нагрева целесообразно использовать массивную оболочку вместе с заполнением бомбы инертным газом (под давлением). Значение теплоты взрыва, полученное в условиях, когда температура вторичного нагрева не достигает “пороговой” величины, можно рассматривать в качестве универсального параметра, характеризующего энергосодержание взрывчатого материала.

Ключевые слова: взрывчатое вещество, алюминий, композиция, теплота взрыва, кислородный баланс.

DOI: 10.31857/S0207401X20090083

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что применение дисперсного алюминия в качестве горючей добавки значительно повышает работоспособность взрывчатого вещества (ВВ). Это обусловлено высоким тепловым эффектом окисления Al продуктами взрывчатого разложения ВВ. В настоящее время алюминий широко используется для создания высокоэффективных энергетических материалов, в частности промышленных ВВ.

Основополагающим параметром, характеризующим потенциальные возможности продуктов взрыва (ПВ) совершать работу при расширении, является теплота взрыва (ТВ). Поэтому при рассмотрении перспектив использования ВВ на практике необходимо знание этой характеристики, что непосредственно относится к алюминизированным составам. Кроме того, до настоящего времени отсутствует единый взгляд на механизм окисления Al при детонации. Задача создания оптимальной модели, описывающей поведение Al в детонационной волне, требует знания комплекса

параметров, характеризующих процесс детонационного превращения алюминизированных композиций в широком диапазоне времени и степени расширения продуктов. Теплота взрыва является одним из таких параметров и соответствует стадии завершения химических реакций при взрыве.

Для определения ТВ используются специальные калориметрические установки с бомбами, во внутренней полости которых подрывается исследуемый заряд. При этом известно, что измеряемое значение ТВ зависит от условий проведения эксперимента (массивности оболочки заряда, характера среды в калориметрической бомбе).

Согласно методике, принятой в ФИЦ химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН, заряд ВВ помещается в массивную металлическую оболочку (медь, нержавеющая сталь). Роль оболочки прежде всего сводится к увеличению глубины протекания реакций во внешних слоях заряда. Другая функция оболочки заключается в снижении вторичного нагрева ПВ при их остановке в результате заполнения полости бомбы. На эту роль обо-

лочки впервые указал Орнеллас, который изучал теплоту взрыва такого вещества пентаэритриттетранитрат (ТЭН) [1]. К сожалению, автор выбрал неудачное ВВ для исследования, так как разница значений теплоты взрыва ТЭНа, соответствующих зарядам без оболочки и в массивной золотой оболочке, оказалась сопоставимой с экспериментальной ошибкой. В дальнейшем для таких ВВ, как тринитротолуол (ТНТ), циклотетраметилентетранитрамин (октоген) и бензотрифуроксан, были получены более существенные различия в значениях ТВ при наличии и отсутствии оболочки у заряда [2, 3]. Однако основные выводы были сделаны Орнелласом на основании данных для ТЭНа. В частности, это относится к некоторым рекомендациям по термодинамическому расчету состава ПВ [1].

В результате исследований, проведенных ранее в ФИЦ ХФ РАН, впервые была получена зависимость теплоты взрыва ТНТ от величины “нагрузки” (отношения масс оболочки и ВВ) [4]. Дополнительно к этому в работе [5] изучалось влияние нагрузки на ТВ октогена. В [5] представлена также зависимость теплоты взрыва ТНТ от количества инертного газа, заполняющего полость калориметрической бомбы. Основные выводы, сформулированные на основе результатов этих исследований, заключаются в следующем.

При условии, что температура вторичного нагрева ПВ при заполнении ими полости калориметрической бомбы превышает некоторое “пороговое” значение, в ПВ возобновляется протекание химических реакций, и конечный состав продуктов соответствует “закалке” в условиях медленно-го охлаждения и низкого давления. При использовании массивных оболочек значительная часть энергии ПВ переходит в кинетическую энергию оболочки, в результате чего температура вторичного нагрева снижается. Однако проведенные тогда исследования касались только индивидуальных ВВ. Предлагаемая работа посвящена изучению влияния экспериментальных условий на ТВ как индивидуальных, так и алюминизированных ВВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Измерения ТВ осуществлялись с применением двух калориметров с бомбами внутренним объемом 1.7 и 5 л. В качестве калориметрической жидкости использовалась дистиллированная вода. Мониторинг температуры калориметра осуществлялся измерительной системой с термометром сопротивления. Анализ газообразных ПВ проводился для индивидуальных ВВ с использованием откалированного ИК-спектрофотометра. Для изучения зависимости ТВ от условий проведения экспе-

римента рассматривались как ранее полученные результаты [5], так и новые данные.

При исследованиях теплоты взрыва ТНТ заряды имели диаметр 10, 15 и 20 мм. Плотность прессованных образцов составляла 1.60 г/см^3 . Испытывались также заряды с плотностью 1.0 г/см^3 . В основном использовались медные оболочки. Кроме того, проводились опыты с оболочками из нержавеющей стали и свинца. Исследовался также прессованный заряд в форме диска толщиной 2.3 мм, инициирование которого осуществлялось вдоль плоскости. Бомба с зарядом продувалась гелием или аргоном и откачивалась до остаточного давления 1–2 Торр (за исключением случаев, когда изучалось влияние среды инертного газа). Значения ТВ приведены к условию: H_2O – газ. Для пересчета использовался состав основных ПВ, определенный на основе результатов анализа.

Кривая с символами на рис. 1 отражает влияние нагрузки на теплоту взрыва ТНТ при плотности заряда 1.60 г/см^3 . Как следует из вида кривой, с повышением нагрузки ТВ возрастает, а при нагрузке, превышающей четырех-пятикратное значение, зависимость выходит на плато. Дальнейшее повышение нагрузки практически не влияет на ТВ. Анализ ИК-спектров газообразных ПВ показал, что в случае зарядов без оболочки в продуктах присутствует значительное количество энергетически невыгодной моноокси углерода при небольшой концентрации CO_2 . При наличии оболочки у заряда продукты содержат уже заметное количество CO_2 .

Следует отметить, что среднее значение теплоты взрыва ТНТ, соответствующее плато на зависимости, представленной на рис. 1, равно 4.36 МДж/кг . Это существенно ниже величины Q_{max} (5.42 МДж/кг). При отсутствии оболочки значение ТВ составляет 2.84 МДж/кг , что незначительно превышает величину Q_{min} (2.65 МДж/кг). Для расчета Q_{max} в случае индивидуальных ВВ с отрицательным кислородным балансом (КБ) используется следующий порядок образования кислородсодержащих ПВ: $\text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$. Последовательность образования продуктов при расчете Q_{min} подчиняется иному правилу, а именно: $\text{CO} - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$. В случае ТНТ Q_{min} соответствует образованию лишь одного кислородсодержащего продукта – CO .

Детонация открытых зарядов ТНТ из-за проникиания волн разрежения должна сопровождаться разбросом непрореагировавшего вещества из внешних слоев. Дореагирование происходит как в процессе разлета продуктов, так и, вероятно, при их вторичном нагреве. Из равенства значений ТВ при разной плотности и переменном диаметре открытого заряда (включая тонкий диск) следует, что конечный состав продуктов и вели-

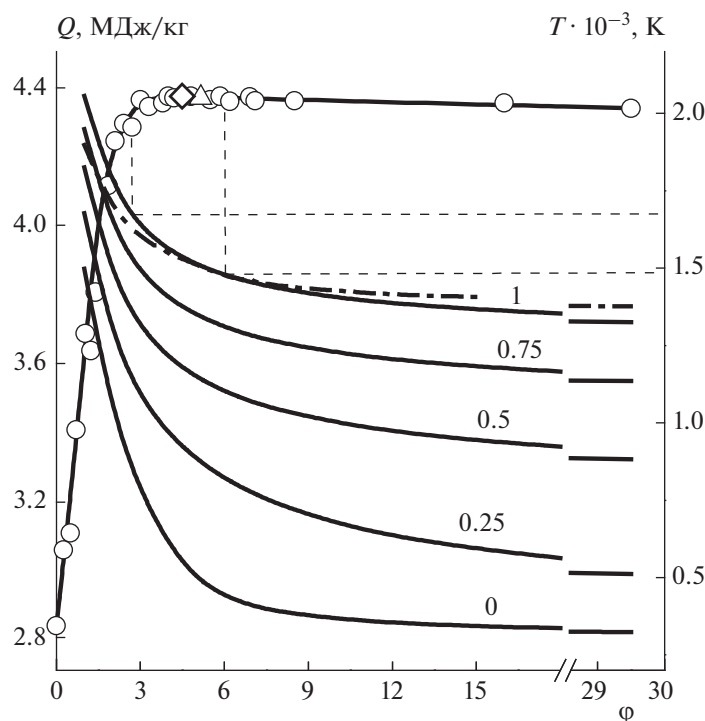


Рис. 1. Теплота взрыва и температура вторичного нагрева продуктов взрыва ТНТ в зависимости от величины нагрузки ϕ ; материал оболочки: кружки — медь, ромб — нержавеющая сталь, треугольник — свинец; штрих-пунктирная линия — температура при плотности заряда 1.0 г/см^3 .

чина теплоты взрыва ТНТ в этом случае не зависят от особенностей протекания химических процессов в детонационной волне и на начальных стадиях разлета ПВ, а определяются “закалкой” продуктов при их вторичном нагреве и медленном охлаждении в условиях низкого давления.

Термодинамический расчет равновесного состава продуктов, занимающих объем полости бомбы и охлаждающихся за счет теплообмена с материалом бомбы, выполнен в работах [4, 5] при условии участия в реакции всех образовавшихся ПВ (включая углерод). Сравнение экспериментальных данных для зарядов ТНТ без оболочки с результатами расчета показало, что “закалка” ПВ при охлаждении за счет теплообмена с материалом бомбы происходит при температуре, близкой к 1400 К . Из этого следует, что при температуре вторичного нагрева, превышающей указанное значение, в ПВ возобновляется протекание химических реакций с последующей “закалкой” в условиях медленного охлаждения и низкого давления.

Выход зависимости для ТВ на плато с повышением нагрузки (рис. 1) вызван тем, что температура вторичного нагрева ПВ уже не достигает пороговой величины. На рис. 1 представлена серия расчетных кривых для температуры вторичного нагрева ПВ. Сплошные линии соответствуют заряду плотно-

стью 1.60 г/см^3 . Зависимости получены следующим образом.

Известно, что одним из факторов, влияющих на процесс трансформации энергии при разлете ПВ, является различие температур газовой и конденсированной фаз. Цифры у температурных кривых на рис. 1 — значения эффективной доли конденсированной фазы, температура которой успевает выравниваться с температурой газовой фазы при расширении продуктов (предполагается, что теплообмен остальной части углерода с газообразными продуктами отсутствует). При оценке температур допускалось, что в связи с расширением ПВ до значительного объема удар о стенку бомбы является абсолютно “жестким” и вся энергия ПВ за вычетом кинетической энергии оболочки преобразуется в тепловую энергию. Значения температур при различной нагрузке оценивались на основе модели Гарни [6] с введением в расчет величины энергии медной оболочки, используемой при исследованиях процесса разлета ПВ по методике Т-20. В свою очередь, кинетическая энергия оболочки в рамках Т-20 рассчитывалась при семикратном расширении ПВ (конечная база измерений) по методу, изложенному в работе [7]. Величина этой энергии оказалась близкой к значению, оцененному в [5] с использованием уравнения состоя-

ния продуктов взрыва ТНТ в форме JWЛ (Jones—Wilkins—Lee) [8].

Штрих-пунктирная линия для температуры вторичного нагрева на рис. 1 получена для заряда плотностью 1.00 г/см^3 при условии теплового равновесия газовой и конденсированной фаз продуктов. Эта линия лежит вблизи кривой, соответствующей плотности в 1.60 г/см^3 . Причина близкого расположения указанных кривых заключается в следующем.

В случае зарядов в массивной оболочке экспериментальная величина теплоты взрыва ТНТ зависит от плотности. Как указано выше, значение ТВ при плотности 1.60 г/см^3 равно 4.36 МДж/кг . Измерения показали, что при уменьшении плотности заряда до 1.00 г/см^3 ТВ снижается до величины в 3.64 МДж/кг . С одной стороны, меньшей ТВ должна соответствовать и более низкая температура вторичного нагрева, а с другой — при снижении плотности заряда и ТВ уменьшается и скорость разлета оболочки. Последнее обстоятельство должно способствовать повышению температуры вторичного нагрева за счет понижения энергетических затрат на метание оболочки. В результате наблюдается слабая зависимость температуры вторичного нагрева ПВ от плотности заряда ТНТ.

На рис. 1 тонкими штриховыми линиями обозначены область выхода зависимости для теплоты взрыва ТНТ на плато (плотность — 1.60 г/см^3) и соответствующий диапазон для пороговой температуры при условии равенства температур газовой и конденсированной фаз. Нижняя граница этого диапазона близка к величине, равной 1500 К . Значения температур в обозначенном диапазоне сопоставимы с указанной выше температурой “закалки”, полученной путем сравнения экспериментальных и расчетных данных для заряда без оболочки. Допущение о различии фазовых температур сильно снижает расчетную температуру вторичного нагрева. При этом и диапазон значений для пороговой температуры, соответствующий области выхода экспериментальной кривой для ТВ на плато, должен лежать ниже. Однако в случае калориметрических испытаний индивидуальных ВВ, в ПВ которых углерод может присутствовать в виде наноразмерных частиц графита и алмаза [9], различие температур газовой и конденсированной фаз, вероятно, невелико. Этот вывод подтверждается данными, полученными для заряда без оболочки. Так, при условии, что углерод, образовавшийся при взрыве открытого заряда, охлаждается только за счет теплообмена с материалом бомбы и не участвует в реакциях, изменяющих состав ПВ при вторичном нагреве, величина ТВ должна быть близка к 4.28 МДж/кг (т.е. к значению Q_{min} для гипотетической молеку-

лы, состоящей из элементов только газообразных ПВ). Однако экспериментально полученная величина ТВ при нулевой нагрузке ниже указанного значения и близка к величине Q_{min} , рассчитанной для всей молекулы ТНТ.

Таким образом, из данных, полученных для ТНТ, следует, что наличие оболочки, масса которой превышает массу заряда в 4–5 раз, препятствует вторичному нагреву ПВ до пороговой температуры, а зависимость для ТВ выходит на плато. Значение ТВ, определяемое в условиях, исключающих изменение состава продуктов, уже не зависит от массивности оболочки, соответствует “закалке” ПВ за счет резкого охлаждения при разлете и может рассматриваться в качестве универсального параметра ВВ.

Рисунок 2 иллюстрирует зависимости ТВ и расчетной температуры вторичного нагрева продуктов взрыва ТНТ от количества гелия в бомбе (на единицу массы ВВ) в случае зарядов без оболочки. Треугольниками обозначены значения, полученные при комбинированном действии инертного газа и нагрузки, равной 0.6 . Из полученных данных следует, что инертный газ создает эффект, аналогичный действию оболочки, что происходит за счет затрат энергии на нагрев инертного газа. Температурные кривые вторичного нагрева на рис. 2 соответствует случаю отсутствия оболочки у заряда. При условии теплового равновесия конденсированной и газовой фаз диапазон для пороговой температуры близок к области, указанной на рис. 1, а также к температуре “закалки”, найденной путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных для открытого заряда (см. выше). Нижняя граница этого диапазона расположена вблизи 1300 К . При этом значения теплоты взрыва ТНТ, соответствующие плато на рис. 1 и 2, практически совпадают.

На рис. 3 для сравнения представлены экспериментальные зависимости ТВ от нагрузки и расчетные кривые для температуры вторичного нагрева продуктов взрыва ТНТ (перенесено из рис. 1) и октогена. Там же показаны два значения теплоты взрыва ТЭНа для зарядов без оболочки и помещенных в массивную оболочку. Эти точки (ромбы) соединены штриховой линией, условно выражающей зависимость ТВ от величины нагрузки. Кроме того, на рис. 3 темными символами обозначены значения ТВ, полученные Орнелласом с соавт. для зарядов в массивной золотой оболочке и без оболочки [1–3]. В скобках указана величина нагрузки, создаваемой оболочкой. Стрелки показывают, что в связи с высокими значениями нагрузки темные символы должны лежать правее.

Как следует из рис. 3, зависимости, полученные для октогена и ТНТ, однотипны. Однако для октогена значения ТВ на плато и для заряда без

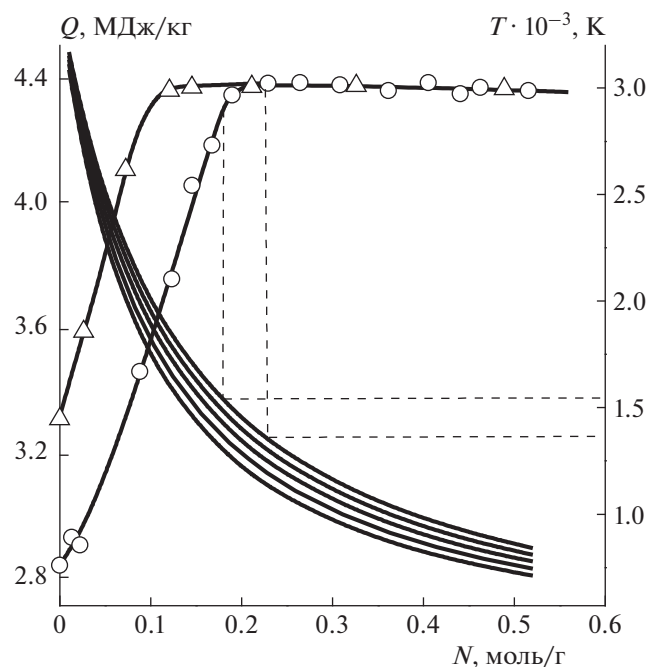


Рис. 2. Теплота взрыва и температура вторичного нагрева продуктов взрыва ТНТ в зависимости от количества N инертного газа: кружки – гелий, треугольники – гелий + $\phi = 0.6$ (медь).

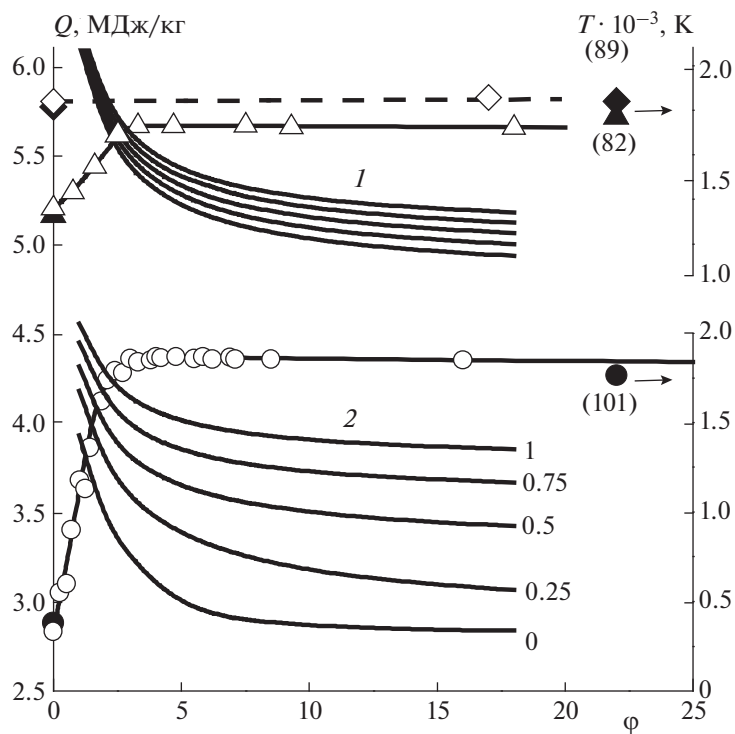


Рис. 3. Теплота взрыва и температура вторичного нагрева продуктов взрыва в зависимости от величины нагрузки ϕ для следующих ВВ: 1, Δ – октоген; 2, $\circ$ – ТНТ; $\diamond$ – ТЭН; темные символы – данные работ [1–3].

оболочки различаются в меньшей степени, чем в случае ТНТ. Причина заключается в том, что октоген обладает более высоким КБ (–21.6%) по

сравнению с ТНТ (–74%), и диапазон возможных значений ТВ, определяемый разницей Q_{max} и Q_{min} , у октогена существенно уже, чем у ТНТ. В связи с

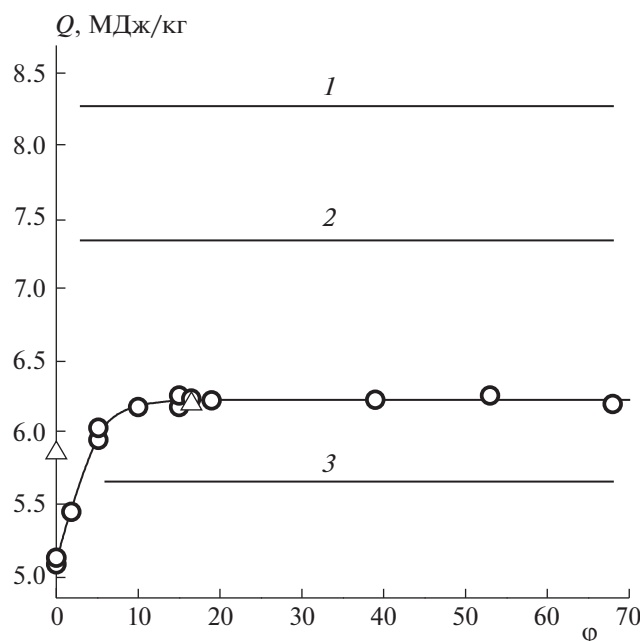


Рис. 4. Теплота взрыва смеси ТНТ/Ал состава 80/20 в зависимости от величины нагрузки ϕ ; материал оболочки — медь; $\circ$ — бомба вакуумировалась, $\triangle$ — взрыв в среде аргона; 1 — Q_{max} , 2 — Q_1 , 3 — Q_2 .

тем, что продукты взрыва октогена содержат меньшее количество свободного углерода, чем ПВ ТНТ, кривые для температуры вторичного нагрева у октогена лежат ближе друг к другу. Однако выход зависимостей для ТВ на плато в случае октогена и ТНТ происходит при близких значениях нагрузки. Близки и определенные по верхней кривой температурного спектра области вторичного нагрева, соответствующие выходу зависимостей для ТВ на плато. Это объясняется однотипностью реакций, протекающих при взрыве ТНТ и октогена. Равновесие реакции $2CO \rightarrow CO_2 + C_{sol}$ сильно зависит от давления. Поэтому состав продуктов ТНТ и октогена меняется при их вторичном нагреве выше пороговой температуры с последующей “закалкой” в условиях низкого давления.

В случае ТЭНа наличие оболочки практически не влияет на ТВ (см. рис. 3). Кислородный баланс этого ВВ равен -10.1% , что выше, чем у октогена и ТНТ. Различие возможных значений теплоты взрыва ТЭНа невелико. Продукты взрыва этого ВВ содержат лишь незначительное количество свободного углерода, и указанная выше реакция в данном случае не является определяющей. Повидимому, ТВ индивидуальных ВВ с положительным КБ также не зависит от наличия оболочки.

Теплота взрыва взрывчатых композиций с горючими добавками еще в большей степени зависит от условий проведения эксперимента. При калориметрических измерениях ТВ таких систем, как и в случае индивидуальных ВВ, также суще-

ствует опасность изменения состава ПВ в результате вторичного нагрева. Однако имеющиеся в литературе данные по ТВ таких композиций часто соответствуют различным экспериментальным условиям, причем выбор этих условий, как правило, не аргументируется. Это непосредственно касается составов, содержащих порошкообразный Аl. Вторая часть предлагаемой работы посвящена исследованию влияния нагрузки на ТВ алюминизированных ВВ. С этой целью испытывалась смесь ТНТ/Ал состава 80/20.

В смеси с ТНТ использовался порошок Аl с размером частиц 15 мкм. Диаметр прессованных зарядов составлял 15 мм. Бомба с зарядом вакуумировалась. Кроме того, проводились испытания при заполнении бомбы аргоном (под давлением). На рис. 4 представлена экспериментальная зависимость ТВ композиции от величины нагрузки. Как следует из рис. 4, при увеличении нагрузки ТВ возрастает, и так же, как и в случае чистого ТНТ, зависимость выходит на плато. Область выхода на плато соответствует нагрузке, равной 10–15, что существенно выше диапазона значений, зафиксированных для ТНТ и октогена (см. рис. 1, 2). Состав ПВ с учетом значений ТВ рассчитывался с помощью разработанного ранее метода [10]. Тринитротолуол содержит достаточное количество кислорода для полного окисления Аl. Однако по оценке степень окисления Аl для среднего значения ТВ на плато равна ~ 0.72 . Поэтому плато на рис. 4 расположено ниже значения теплового эффекта (Q_1), отвечающего полному окислению Аl,

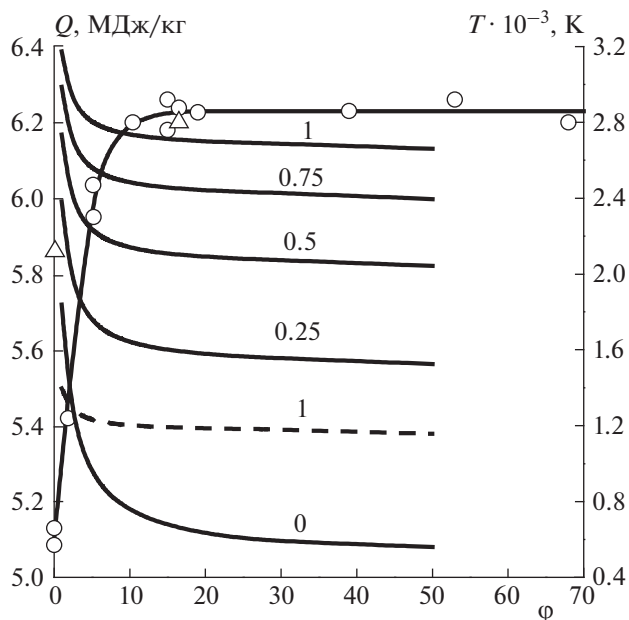


Рис. 5. Теплота взрыва и температура вторичного нагрева продуктов взрыва смеси ТНТ/Ал состава 80/20 в зависимости от величины нагрузки ϕ ; $\circ$ и $\triangle$ — то же, что и для рис. 4; цифры у температурных кривых обозначают то же, что и на рис. 1; штриховая линия — температура при взрыве в среде аргона.

и еще ниже величины Q_{max} , рассчитанной с учетом следующего порядка образования ПВ: $Al_2O_3 - H_2O - CO_2$. Значение Q_2 , также представленное на рис. 4, оценивалось из условия, что степень окисления Al соответствует значениям ТВ на плато, а газовый состав ПВ претерпевает изменение за счет вторичного нагрева с преимущественным образованием CO. Величина Q_2 представляет собой минимальный тепловой эффект при заданной степени окисления Al. Как следует из рис. 4, значение ТВ в случае зарядов без оболочки ниже Q_2 . Наиболее вероятная причина этого — снижение степени окисления Al в периферийных слоях открытого заряда. Так, оценка показывает, что даже в случае образования только одного кислородсодержащего газообразного продукта — CO, полнота окисления Al, отвечающая величине ТВ для открытого заряда, равна ~ 0.60 . Это ниже, чем значения на плато зависимости для ТВ.

На рис. 5, кроме экспериментальной зависимости ТВ от величины нагрузки, перенесенной из рис. 4, приведены расчетные кривые для температуры вторичного нагрева. Оценка осуществлялась так же, как и в случае ТНТ и октогена. Цифры у температурных кривых обозначают то же, что и на рис. 1, т.е. эффективную долю конденсированной фазы, температура которой равна температуре газовой фазы. Из рис. 5 следует, что температура вторичного нагрева на сплошной кривой 1, соответствующая выходу зависимости для ТВ на плато, может достигать 2700 К. Это выше пороговой температуры,

найденной для ТНТ (см. рис. 1). Кроме того, согласно расчету температура остается высокой и при значительной нагрузке. Другими словами, при условии равенства температур конденсированной и газовой фаз должно происходить изменение состава ПВ данной смеси в результате вторичного нагрева. Однако характер зависимости ТВ от величины нагрузки (в частности, выход на плато) сохраняется таким же, как и в случае индивидуальных взрывчатых веществ — ТНТ и октогена. Полученный результат можно объяснить тем, что при испытаниях алюминизированных композиций, образующих при взрыве значительное количество конденсированных веществ, температура вторичного нагрева ПВ снижается в связи с различием температур конденсированной и газовой фаз. Это подтверждается данными, полученными при заполнении бомбы аргоном.

Использование дополнительного “охлаждителя” в виде инертного газа могло бы привести к повышению ТВ из-за снижения температуры вторичного нагрева. Однако точка, соответствующая значению ТВ при нагрузке, равной 17, и при заполнении бомбы аргоном в количестве 0.2 моль/г заряда также лежит на плато (рис. 5). Оценка температуры вторичного нагрева (штриховая линия на рис. 5) показала, что в этом случае изменения состава ПВ не должно происходить даже при условии равенства температур конденсированной и газовой фаз. Идентичность значений ТВ при подрывах в разреженной атмосфере и в среде аргона свиде-

тельствует об отсутствии эффекта перезакалки ПВ в обоих случаях, несмотря на существенную разницу расчетных температур вторичного нагрева.

Из рис. 4 и 5 также следует, что и при отсутствии оболочки у заряда заполнение бомбы аргоном в указанном выше количестве приводит к увеличению ТВ (символ в виде треугольника на оси ординат). В данном случае температура вторичного нагрева по оценке, проведенной при условии равенства температур конденсированной и газовой фаз, близка к 1700 К. Эта величина находится вблизи верхней границы диапазона для пороговой температуры (см. рис. 1–3). Однако при условии различия фазовых температур вторичный нагрев должен быть более умеренным, при этом изменения состава ПВ может и не происходить. Тем не менее, значение ТВ не достигает точки на плато, что, вероятно, также является следствием снижения степени окисления Al во внешних слоях открытого заряда.

Необходимо отметить, что с увеличением массивности оболочки продукты расширяются медленней, что в случае алюминизированного ВВ повышает время наиболее интенсивного контакта Al с ПВ. В связи с этим вместо выхода на плато зависимость для ТВ могла бы и дальше идти вверх, стремясь к величине Q_1 , соответствующей полному окислению Al. Однако этого не происходит. Наличие плато свидетельствует о постоянстве степени окисления Al при изменении нагрузки в широком диапазоне значений. Для объяснения этого факта следует обратиться к результатам, представленным в работах [11, 12].

В статье [11] приведены данные по анализу газообразных и твердых ПВ композиции ТЭН/Al. Содержание Al изменялось от 0 до 20%. Подрыв зарядов осуществлялся как на открытом воздухе, так и в закрытой бомбе в среде инертного газа и воды. Полученные результаты позволили авторам работы [11] прийти к выводу о том, что при взрыве алюминий реагирует преимущественно в конденсированной фазе. Элементный анализ твердых продуктов после взрыва состава с 10% Al в среде воды показал, что частицы диаметром, превышающим 5 мкм, имеют ядро, состоящее в основном из Al. Ядро окружено слоем из оксида алюминия. Частицы размером менее 4 мкм не имели ядра и состояли преимущественно из оксида.

В работе [12] представлены данные по измерению электропроводности в детонационной волне и анализу ПВ алюминизированных ВВ. Исследовались составы на основе октогена и ТНТ. Частицы Al имели различную форму (сферы, чешуйки) и отличались по размеру. Содержание Al в смеси также было переменным: от 5 до 25%. После травления кислотами твердых продуктов авторы обнаружили в остатке сферические пустотелые частицы, состоя-

щие из оксида алюминия. В работе [12] отмечается: “Реакция алюминия с продуктами детонации протекает на поверхности частицы... Образующийся слой в основном блокирует поступление кислорода к внутренним слоям алюминиевой частицы...”. Измерения электропроводности продуктов в детонационной волне подтвердили выводы, сформулированные на основе результатов исследования ПВ.

С учетом выводов авторов работ [11, 12] можно предположить, что наличие плато на зависимости ТВ от величины нагрузки (см. рис. 4, 5) вызвано резким ограничением диффузии газов внутрь частицы Al при определенной толщине нарастающего на частице слоя из оксида алюминия. Толщина оксидного слоя, блокирующего процесс окисления Al, должна зависеть от таких параметров, как содержание и размер частиц Al, концентрация и вид кислородсодержащих продуктов взрывчатого разложения основного ВВ, давление и температура ПВ. Другими словами, для конкретного алюминизированного состава при фиксированной плотности заряда, вероятно, существует “предельное” значение степени окисления Al, которое должно сохраняться и в случае более крупных зарядов по сравнению с лабораторными образцами. В условиях, когда при калориметрических испытаниях реализуется “предельная” степень окисления Al, ТВ сохраняет постоянное значение и может рассматриваться как объективная характеристика алюминизированного ВВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, из полученных данных следует, что измерения теплот взрыва индивидуальных ВВ и композиций (в частности, алюминизированных ВВ) необходимо осуществлять в условиях, исключающих изменение состава продуктов в результате их вторичного нагрева. Наиболее благоприятные условия создаются при одновременном использовании массивной оболочки заряда и среды инертного газа, заполняющего полость калориметрической бомбы. При испытаниях систем, образующих значительное количество конденсированной фазы, сложно рассчитать температуру вторичного нагрева. В таких случаях необходимо экспериментально проверять, насколько выбранные условия проведения эксперимента обеспечивают постоянство измеряемой величины ТВ. Определяемое в таких условиях значение ТВ позволяет сравнивать взрывчатые материалы по энергосодержанию, сопоставлять горючие добавки по реакционной способности и решать другие задачи.

Работа выполнена за счет субсидии, выделенной ФИЦ ХФ РАН на выполнение государственного задания по теме “Создание высокоэнергетических материалов нового поколения и исследо-

вание их характеристик” (номер госрегистрации АААА-А18-118031490034-6).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ornellas D.L., Carpenter J.H., Gunn S.R.* // Rev. Sci. Instrum. 1966. V. 37. № 7. С. 907.
2. *Ornellas D.L.* // J. Phys. Chem. 1968. V. 72. № 7. P. 2390.
3. *Ornellas D.L.* // Combust. and Flame. 1974. V. 23. № 1. P. 37.
4. *Махов М.Н., Пепекин В.И.* // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка: ОИХФ АН СССР, 1989. С. 23.
5. *Махов М.Н.* // Хим. физика. 2000. Т. 19. № 6. С. 52.
6. *Hardesty D.R., Kennedy J.E.* // Combust. and Flame. 1977. V. 28. № 1. P. 45.
7. *Махов М.Н., Архипов В.И.* // Хим. физика. 2008. Т. 27. № 8. С. 36.
8. *Hornberg H.* // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. 1986. V. 11. P. 23.
9. *Титов В.М., Анисичкин В.Ф., Мальков И.Ю.* // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25. № 3. С. 117.
10. *Makhov M.N.* // Proc. 33rd Intern. Annual Conf. of ICT. Pfinztal: Fraunhofer Institute for Chemical Technology, 2002. P. 73.
11. *Deiter J.S., Wilmot G.B.* // Proc. 10th Sympos. (Intern.) on Detonation. Arlington: ONR 33395-12, 1993. P. 619.
12. *Гилев С.Д., Анисичкин В.Ф.* // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 1. С. 120.