

УДК 662.215

## ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИИ ПРЕССОВАННЫХ ЗАРЯДОВ БЕНЗОТРИФУРОКСАНА

А. Ю. Долгобородов, М. А. Бражников, М. Н. Махов, Н. Е. Сафронов,  
В. Г. Кириленко

Институт химической физики им. Н. Н. Семёнова РАН, 119991 Москва, aldol@chph.ras.ru

Пирометрическим методом проведены измерения яркостной температуры и профилей давления продуктов детонации прессованных зарядов бензотрифуроксана, экспериментально определены теплота взрыва и метательная способность. Температура продуктов детонации ( $4\,100 \pm 150$  К) оказалась существенно ниже расчетных значений, приведенных в большинстве опубликованных теоретических работ. Бензотрифуроксан имеет более высокую теплоту взрыва по сравнению с октогеном, но уступает ему по скорости разлета оболочки (методика Т-20) и по энергии Гарни.

Ключевые слова: бензотрифуроксан, детонация, оптическая пирометрия, температура, теплота взрыва, метательная способность.

### ВВЕДЕНИЕ

Таблица 1

Параметры детонации БТФ

$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$D$ , км/с	$p$ , ГПа	$T$ , К	$d_{cr}$ , мм
1.86	8.49 [3]	36 [3]	3 700 ÷ 5 000 [6]	0.5 ÷ 1.0* [9]
1.85	8.49 [4]	34 [4]	4 500 [7]	
—	—	33 [5]	5 100 [5]	
—	—		5 000 [8]	

БТФ — бензотрифуроксан (гексанитрозобензол),  $C_6N_6O_6$  — мощное безводородное взрывчатое вещество (ВВ) с плотностью монокристалла  $1.903$  г/см<sup>3</sup> [1], высокой скоростью детонации и малым критическим диаметром детонации. Энтальпия образования БТФ равна  $2.31$  МДж/кг [2], что выше, чем у большинства известных ВВ. Некоторые данные по параметрам детонации БТФ, имеющиеся в литературе, представлены в табл. 1, где  $\rho$  — плотность заряда,  $D$  — скорость детонации,  $p$  и  $T$  — давление и температура в точке Чепмена — Жуге ( $T$  — данные расчета по различным моделям),  $d_{cr}$  — критический диаметр детонации.

Параметры детонации БТФ определяют специфические направления его применения. Одно из них — составы для устройств пироавтоматики космических аппаратов [10], где требуется малый критический диаметр детонации. Другое применение БТФ связано с получением алмазов [7, 8, 11]. Алмазы, синтезируемые при детонации БТФ, имеют особую каплеобразную форму, что связывают с высокой температурой продуктов детонации (ПД). Однако до настоящего времени температура для БТФ экспериментально не определялась, что созда-

Примечания. Данные по давлению детонации получены на основе результатов испытаний по методу «цилиндр-тест», значения температуры и критического диаметра приведены без связи с плотностью заряда. \*По данным А. А. Котомина для высокоплотных зарядов при размере частиц БТФ  $1 \div 3$  мкм,  $d_{cr} = 0.06$  мм (цитируется по [9]).

ет существенную неопределенность уравнения состояния ПД этого ВВ. На фазовой диаграмме углерода состояния, приписываемые продуктам детонации БТФ, оказываются в разных областях, соответствующих как жидкой, так и алмазной фазе углерода [12]. В целом анализ литературных данных показывает, что, несмотря на интерес, проявляемый к БТФ, прямых измерений параметров на фронте детонационной волны для этого ВВ не проводилось. Восполнение этого пробела является одной из задач настоящей работы.

Кроме определения параметров детонационного фронта, проведены измерения теплоты взрыва и метательной способности. Теплота взрыва отражает потенциальный запас

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 12-03-00651) и программы Президиума РАН № 12 «Теплофизика и механика экстремальных энергетических воздействий и физика сильно сжатого вещества».

© Долгобородов А. Ю., Бражников М. А., Махов М. Н., Сафронов Н. Е., Кириленко В. Г., 2013.

энергии ВВ, а метательная способность характеризует эффективность ВВ при совершении одного из важнейших видов конкретного действия. В литературе имеется ряд сведений об этих характеристиках БТФ. Однако данные разных авторов не всегда согласуются между собой. Так, различие значений теплоты взрыва для пресованных зарядов БТФ достигает 10 % [2, 13]. Данные же по скоростям разлета оболочки (метод «цилиндр-тест») приведены лишь при двух степенях расширения ПД [3, 14]. Ограниченный объем и противоречивый характер имеющейся в литературе информации создают необходимость дальнейшего исследования указанных параметров БТФ.

### ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для определения характеристик детонационного фронта в БТФ использовалась электронно-оптическая регистрация излучения ПД на контактной границе зарядов с оптическими окнами из LiF и глицерина (многооконная методика для определения температуры ПД [15]). Применялась также регистрация излучения в жидкостях-индикаторах, находящихся в контакте с детонирующим зарядом (индикаторный метод для определения профиля давления ПД [16]).

Для пирометрических измерений использовались заряды БТФ диаметром и высотой 30 мм, которые состояли из двух таблеток, полученных односторонним холодным прессованием до давления  $\approx 1$  кбар. Плотность зарядов была  $1.82 \text{ г/см}^3$  (прессование без выдержки) или  $1.84 \text{ г/см}^3$  (прессование при добавлении 0.5 мл ацетона и выдержке под давлением в течение 10 мин). Инициирование осуществлялось плосковолновым генератором диаметром 40 мм через промежуточную таблетку флегматизированного гексогена (А-IX-1). Принципиальная схема сборки указана на рис. 1.

При измерении температуры в рамках оконной методики на контактную границу со свободной поверхностью заряда помещался LiF («жесткое» окно) или глицерин («мягкое» окно). При измерении давления индикатор ( $\text{СНВг}_3$  или  $\text{ССл}_4$ ) наливался на торец заряда БТФ, поверхность которого закрашивалась черным лаком для экранирования излучения ПД. Использовалась также постановка с тонким (0.77 мм) экраном из алюминиевого сплава (дюралюминия Д16) между зарядом БТФ и  $\text{СНВг}_3$ .

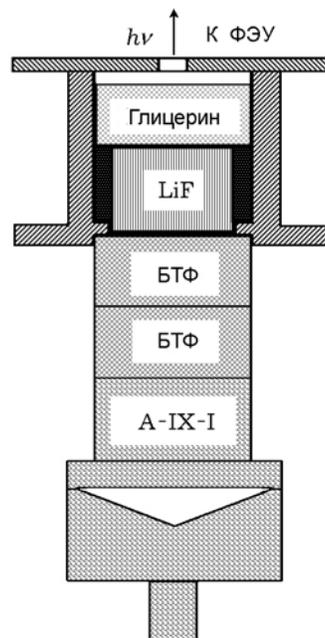


Рис. 1. Схема проведения опытов

Для регистрации применялся двухканальный пирометр с интерференционными светофильтрами с длиной волн 627 и 420 нм. В качестве приемников излучения использовались фотоэлектронные умножители ФЭУ-92 и ФЭУ-119, запись сигналов осуществлялась цифровым осциллографом В-423 с частотой дискретизации 200 МГц. Излучение регистрировалось из центральной части заряда через диафрагму диаметром 5 мм. Сигналы пересчитывались на температуру и давление с помощью стандартных процедур [15, 16]. Градуировка установки проводилась по регистрации излучения детонации химически чистого нитрометана, температура детонации которого принималась равной 3700 К. Ошибка определения температуры составляла  $\pm 150$  К, давления —  $\pm 1$  ГПа.

Теплоту взрыва БТФ определяли с помощью детонационного калориметра конструкции ИХФ РАН с бомбой внутренним объемом 1.7 л. Образцы диаметром 12 мм имели массу  $10 \div 12$  г. Заряд, состоящий из нескольких таблеток, полученных методом холодного прессования, помещался в оболочку из нержавеющей стали с толщиной стенки 10 мм. Бомба с прикрепленным по центру полости зарядом продувалась аргоном и опускалась в сосуд с калориметрической жидкостью — дистиллированной водой. Для уменьшения теплообмена использо-

вался теплоизолирующий кожух с воздушной прослойкой. Подъем температуры фиксировался измерительной системой с термометром сопротивления. Значение теплового эквивалента установки было определено сжиганием эталонной бензойной кислоты в избытке кислорода. Выполнена специальная серия экспериментов для измерения теплоты взрыва электродетонатора. Ее определяли осреднением данных четырех опытов. Отклонение значений в параллельных опытах от средней величины составляло около 1 %. Более подробное описание экспериментальной методики приведено в [2, 17, 18].

Для исследования метательной способности используются методы, в той или иной степени имитирующие реальные условия применения ВВ на практике. Эти методики в основном подразделяются на два типа: метание металлических пластин с торца заряда и расширение цилиндрических оболочек. К первому типу относится известный отечественный метод М-40 (аналог М-60), в котором исследуется процесс ускорения стальной пластины толщиной 4 мм, метаемой с торца цилиндрического заряда длиной и диаметром 40 мм [19]. Мерой метательной способности обычно служит скорость пластины на расстоянии 40 мм от ее первоначального положения. Базовый метод, используемый в России, принадлежит ко второму типу — это методика Т-20 [19, 20], которая отличается от прототипа — метода «цилиндр-тест», разработанного в США [21, 22], в основном несколько меньшим размером сборки.

В данной работе метательная способность БТФ определялась методом Т-20. Заряд ВВ диаметром 20 мм помещался в медную цилиндрическую оболочку длиной 180 мм с толщиной стенки 2 мм. Детонация в основном заряде инициировалась электродетонатором и плоско-волновой линзой. В опытах с помощью скоростного фоторегистратора фиксировалось свечение ударной волны при соударении оболочки с клином из оргстекла. Радиальная составляющая скорости разлета оболочки определялась расшифровкой фоторегистрограмм как функция приращения радиуса или времени. Параллельно измерялась скорость детонации с помощью датчиков, наклеенных на поверхность оболочки. Более подробное описание методики и способа обработки результатов приведено в [20].

## ПАРАМЕТРЫ ДЕТОНАЦИОННОГО ФРОНТА БТФ

Для измерения температуры на контактной границе с оконными материалами и профилями давления в индикаторах было выполнено по три эксперимента при двух плотностях заряда БТФ. Результаты показали, что яркостные температуры продуктов детонации в опытах в одинаковой постановке, измеренные на двух длинах волн (627 и 420 нм), не отличаются в пределах приборной ошибки ( $\pm 150$  К). В связи с этим в качестве конечного результата выбраны значения, осредненные по длинам волн. На рис. 2, а показаны профили яркостной температуры ПД на границе с окнами из LiF и глицерина. После выхода детонационной вол-

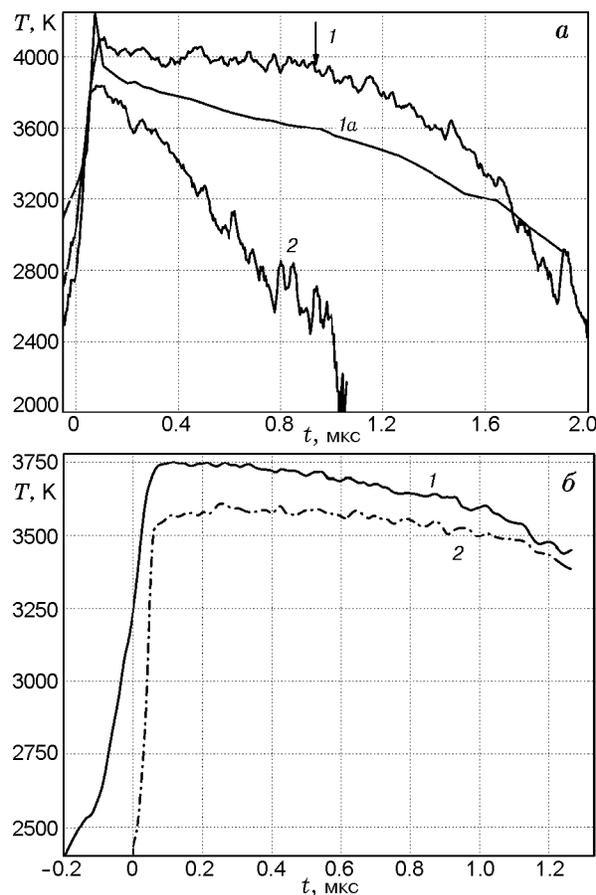


Рис. 2. Профили яркостной температуры продуктов детонации:

а — окно из LiF: 1 — БТФ,  $\rho_0 = 1.82$  г/см<sup>3</sup>, 1а — БТНЭН,  $\rho_0 = 1.88$  г/см<sup>3</sup>; окно из глицерина: 2 — БТФ,  $\rho_0 = 1.62$  г/см<sup>3</sup>; б — окно из LiF: 1 — ТНТ,  $\rho_0 = 1.62$  г/см<sup>3</sup>, 2 — ТНТ + 1 % сажи,  $\rho_0 = 1.62$  г/см<sup>3</sup>

ны на контактную границу температура падает. При этом для окна из «мягкого» глицерина снижение температуры в волне разрежения происходит значительно быстрее, чем в случае «жесткого» LiF, когда в продукты отражается ударная волна. Следует отметить существенное отличие профилей температуры продуктов детонации БТФ от профилей для октогена [23] и бис(тринитроэтил)нитрамина (БТНЭН) [24], полученных ранее при тех же условиях проведения опытов. В случае БТФ наблюдается более медленный спад температуры и отсутствует пик излучения на контактной границе с LiF. Так, если для октогена и БТНЭН в пределах 1 мкс яркостная температура снижается на 500 ÷ 600 К, то для БТФ — на 100 ÷ 200 К. На рис. 2,а приведены профили яркостной температуры для БТФ и БТНЭН, на рис. 2,б — для ТНТ и смеси ТНТ + 1 % сажи (профили температуры для ТНТ получены нами в середине 1990-х годов и ранее не были опубликованы). Видно, что для БТФ профиль температуры на контактной границе с LiF подобен аналогичному профилю для ТНТ с замедленным спадом и «плато» на первой микросекунде. Для других исследованных ВВ подобных особенностей ранее не наблюдалось.

Регистрация температуры на контактной границе с двумя окнами позволяет определить температуру в точке Чепмена — Жуге (ЧЖ) по методике, описанной в [15]. Используя уравнение состояния ПД в форме Ми — Грюнайзена и принимая постоянным отношение коэффициента Грюнайзена к удельному объему ( $\Gamma/V = \text{const}$ ), можно получить соотношение, связывающее измеренную температуру ПД на изоэнтропе (или адиабате двукратного сжатия) с температурой  $T_{CJ}$  в точке ЧЖ:

$$T_i = T_{CJ} \exp\{\Gamma/V(V_{CJ} - V_i)\}, \quad (1)$$

где  $V_{CJ}$  и  $V_i$  — удельные объемы, соответствующие состояниям в точке ЧЖ и в отраженной волне. По измерениям температуры в двух состояниях с давлениями  $p_1$  и  $p_2$ , можно решить обратную задачу, т. е. оценить  $T_{CJ}$ :

$$\ln T_{CJ} = \{[(p_1 p_2)^{1/n} - (p_1 p_{CJ})^{1/n}] \ln T_1 - [(p_1 p_2)^{1/n} - (p_2 p_{CJ})^{1/n}] \ln T_2\} \times [(p_2 p_{CJ})^{1/n} - (p_1 p_{CJ})^{1/n}]^{-1}, \quad (2)$$

где  $n$  — показатель политропы ПД.

Для определения температуры в точке ЧЖ необходимо знать давление в состояниях, которым отвечают измеренные температуры. Эти значения определялись с привлечением результатов измерения давления по индикаторной методике. На рис. 3 показаны профили давления в индикаторах  $\text{CHBr}_3$  и  $\text{CCl}_4$ . На профилях наблюдается характерное изменение скорости спада давления (отмечено стрелками). Если предположить, что этот излом связан с «химпиком», то можно оценить время, соответствующее зоне химической реакции в детонационной волне  $\tau$ . Пересчет на время в ПД дает значения  $\tau = 60 \div 75$  нс.

Эксперименты по индикаторной методике

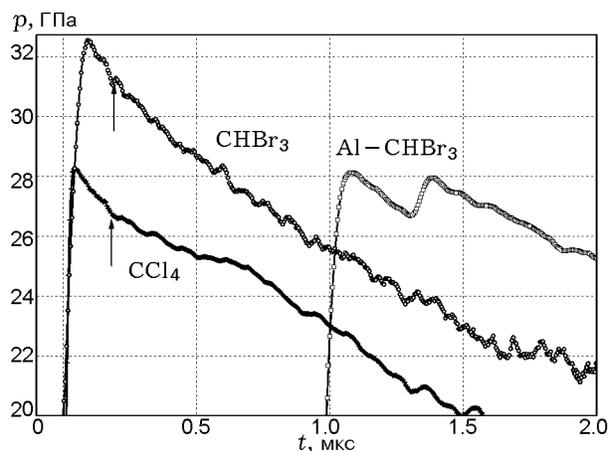


Рис. 3. Экспериментальные профили давления в индикаторах для зарядов БТФ плотностью 1.82 г/см<sup>3</sup>

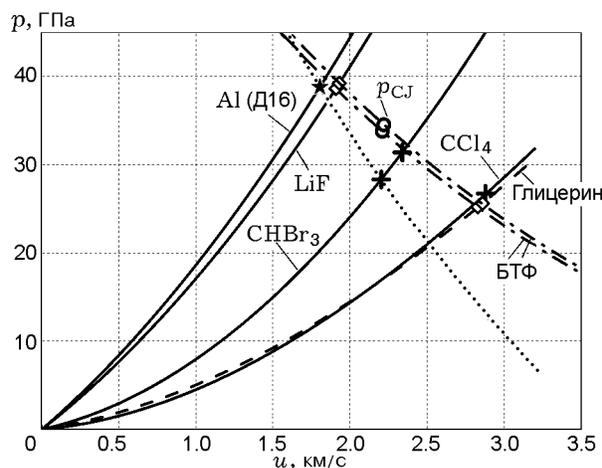


Рис. 4. Ударные адиабаты и экспериментальные данные по изоэнтропе продуктов детонации БТФ при плотности зарядов 1.82 и 1.84 г/см<sup>3</sup>

Таблица 2

Давление и температура на границе с оконными материалами,  
а также давление и температура в точке Чепмена — Жуге

ВВ	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	Оконный материал	$p_i$ , ГПа	$T_i$ , К	$p_{СЛ}$ , ГПа	$T_{СЛ}$ , К
БТФ	1.82	LiF	38.6	4 060	33.8	3 990
		Глицерин	25.2	3 840		
БТФ	1.84	LiF	39.2	4 250	34.5	4 170
		Глицерин	25.6	4 000		
Гексоген [15]	1.71	LiF	37.5	3 850	31.4	3 740
		H <sub>2</sub> O	20.3	3 450		
Октоген [15]	1.80	LiF	42.0	3 800	36.1	3 700
		H <sub>2</sub> O	22.6	3 380		

позволили определить состояния при разгрузке ПД в СНВг<sub>3</sub>, СС<sub>4</sub> и сжатии в отраженной от дюралюминия ударной волне (рис. 4). Крестиками на графике показаны экспериментальные значения давления в индикаторах, звездочкой — состояние, рассчитанное в предположении «зеркальности» ударной адиабаты и энтропии разгрузки дюралюминия (пунктирная линия). При обработке экспериментальных данных проводились расчеты состояния в исследуемых материалах, при этом использовались стандартные соотношения, данные по ударным адиабатам (база данных [25]), а также зависимость скорости детонации БТФ от плотности заряда  $D = 4.265 + 2.27\rho$  [3] и значения скорости детонации, полученные по методике Т-20.

Экспериментальные данные в исследованном диапазоне давления наилучшим образом описываются при показателе политропы ПД  $n = 2.8$ . Результаты измерения температуры и значения параметров состояния ПД в точке ЧЖ, рассчитанные по экспериментальным данным, представлены в табл. 2. Там же для сравнения приведены данные [15] по температуре ПД прессованных зарядов гексогена и октогена. Значения давления согласуются с данными табл. 1 (с учетом поправки на начальную плотность зарядов).

С учетом приборных погрешностей осредненное значение температуры продуктов при двух близких плотностях прессованных зарядов БТФ можно оценить как  $4100 \pm 150$  К. Температура продуктов детонации БТФ оказалась выше, чем при использовании октогена и гексогена, при этом, однако, существен-

но ниже (на  $500 \div 1000$  К) результатов расчетов, опубликованных в большинстве известных работ. Это означает, что существующие теоретические модели, описывающие поведение продуктов детонации БТФ, могут быть существенно уточнены. Как правило, физико-математические модели разрабатываются для расчета параметров в точке ЧЖ. Однако на сегодняшний день мы располагаем данными по динамике температуры в пределах первой микросекунды (или чуть более) после прохождения детонационного фронта, что позволяет провести уточнение расчетных схем.

В начале статьи речь шла о том, что БТФ является перспективным ВВ для синтеза алмазов. Проведенные исследования заметно сузили область состояний, приписываемых продуктам детонации БТФ.

Представления о механизме зарождения и росте детонационных наноалмазов в настоящее время находятся в стадии становления. Так, в [8] указано, что образование ультрадисперсного алмаза наблюдается через 500 нс после прохождения фронта. Этот вывод базируется на результатах измерения удельной электрической проводимости ПД. Позже, применяя метод малоуглового рентгеновского рассеяния, авторы [26] исследовали прессованные заряды БТФ диаметром 20 мм и длиной 30 мм, которые иницировались зарядом на основе пластифицированного тэна (постановка опыта близка к используемой в настоящей работе). Согласно выводам авторов [26], практически на фронте детонации БТФ присутствуют наночастицы алмаза размером  $\approx 2.0$  нм, через 0.5 мкс их размер достигает  $\approx 6$  нм, еще через 1.5 мкс — пример-

Таблица 3

## Теплота взрыва и число молей газообразных ПД

ВВ	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$Q$ , МДж/кг	$Q\rho$ , 10 <sup>3</sup> МДж/м <sup>3</sup>	$N\rho$ , 10 <sup>3</sup> моль/м <sup>3</sup>	$Q$ , МДж/кг [13]
БТФ	1.82	5.80	10.56	55.9	5.90 (1.86)
Октоген	1.81	5.61	10.15	67.6	5.71 (1.89)

но 30 нм, а за время  $3 \div 4$  мкс размер увеличивается до  $\approx 70$  нм. Для смеси ТНТ — гексоген (ТГ) в пределах 1 мкс размер частиц наноалмаза равен  $5 \div 6$  нм, а через 4 мкс — около 7 нм, т. е. размеры в случае БТФ и ТГ различаются на порядок. Можно предположить, что процесс агломерации частиц, если он имеет место, влияет на динамику изменения температуры в ПД.

Ранее [15] были выполнены измерения температуры в прессованных зарядах ВВ с добавлением сажи ( $0.5 \div 1.0$  %). Сажа вводилась с целью отсечь нетепловую составляющую излучения фронта детонации. Для зарядов ТНТ плотностью 1.62 г/см<sup>3</sup> получена запись (см. рис. 2, б), которая на сегодняшний день может быть интерпретирована с точки зрения динамики агломерации частиц наноалмазов. На фоне небольшого снижения наблюдается «плато» с замедлением спада температуры. Причем в [15] отмечается, что через первые 0.2 мкс профиль выходит на уровень температур, характерных для плотности заряда 1.60 г/см<sup>3</sup>. В какой мере частицы сажи становятся, и становятся ли, центрами агломерации наночастиц и соответствует ли это процессу фазового перехода — вопросы, требующие дальнейшего экспериментального исследования. Если в [26] речь идет о формировании конденсированного углерода вблизи фронта детонационной волны, то в [8] утверждается, что детонационная волна лишь создает реакционную смесь (плазму), из которой затем в ходе химических реакций образуются наноалмазы.

Таким образом, несмотря на то, что профили яркостных температур, полученные с использованием LiF, характеризуют динамику температуры в отраженной волне, а не в прямой, можно предположить, что появление «плато» на профилях температур таких ВВ, как ТНТ и БТФ, связано с фазовым переходом и агломерацией наночастиц алмаза в ПД. Мы полагаем, что это предположение заслуживает внимания, а также теоретической и экспериментальной проверки.

## ТЕПЛОТА ВЗРЫВА

В табл. 3 приведено измеренное значение теплоты взрыва БТФ ( $Q$ ) и для сравнения — октогена, одного из наиболее распространенных мощных ВВ (значение соответствует условию: H<sub>2</sub>O в продуктах детонации — газ). Последняя графа содержит данные по теплоте взрыва, полученные в [13] (в скобках указана плотность). Число молей газообразных продуктов взрыва ( $N\rho$ ), рассчитанное по методу [27], также приведено в табл. 3. Известно, что для ВВ с отрицательным кислородным балансом теплота взрыва возрастает с увеличением плотности заряда [28]. С учетом этой зависимости и исходя из данных табл. 3 можно констатировать, что измеренные значения теплоты взрыва близки к приведенным в [13]. При этом БТФ превосходит по теплоте октоген, хотя это преимущество и невелико. Образцы БТФ и октогена имели близкую плотность. В связи с этим и объемные значения теплоты взрыва ( $Q\rho$ ) также выше у БТФ. Однако октоген имеет преимущество по количеству молей газообразных ПД, что в общем случае создает более благоприятные условия для трансформации энергии ВВ в работу при расширении ПД. Приведенные ниже данные позволяют сопоставить БТФ и октоген по метательному действию.

## МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ

Результаты исследования процесса расширения оболочки по методу Т-20 приведены в табл. 4. Кроме скорости внешней поверхности оболочки ( $W$ ), рассматриваемой в зависимости от приращения внешнего радиуса ( $R - R_0$ ), табл. 4 содержит измеренные значения скорости детонации ( $D$ ). Степень расширения ПД в диапазоне регистрации движения оболочки меняется от двукратной до семикратной. Скорость  $W_1$  относится к центральной поверхности стенки и учитывает угол разворота обо-

Таблица 4  
Скорость расширения оболочки (Т-20)  
и энергия Гарни

$R - R_0$ , мм	$W$ , км/с	$W_1$ , км/с	$E_G$ , МДж/кг
БТФ, $D = 8.41$ км/с			
4	1.53	1.58	3.32
5	1.60	1.64	3.58
7	1.67	1.70	3.83
10	1.73	1.75	4.06
12	1.77	1.78	4.18
15	1.81	1.81	4.34
Октоген, $D = 8.78$ км/с			
4	1.59	1.64	3.60
5	1.65	1.69	3.83
7	1.72	1.75	4.08
10	1.77	1.79	4.27
12	1.80	1.81	4.36
15	1.83	1.83	4.47

лочки. Способ расчета  $W_1$  при известной скорости внешней поверхности оболочки приведен, например, в [22].

Результаты исследования по методике расширения оболочек служат не только для сопоставления ВВ по метательной способности, но и используются для построения уравнения состояния ПД (например, в форме JWL [6]), а также для нахождения зависимости энергии Гарни ( $E_G$ ) от степени расширения ПД [21]. Величина  $E_G$  по физическому смыслу характеризует уменьшение внутренней энергии продуктов при их расширении до определенного объема. Именно за счет этой части энергии ПД и совершается механическая работа. Энергия Гарни рассчитывается на основе допущения об однородности плотности ПД и выражается формулой

$$E_G = \frac{W^2}{2} \left[ \mu + \frac{k}{k+2} \right]. \quad (3)$$

Здесь  $W$  — скорость метаемого тела,  $\mu$  — отношение масс метаемого тела и ВВ,  $k = 1, 2, 3$  для плоского случая, цилиндрической и сферической симметрии соответственно. Знание  $E_G$  позволяет в рамках модели проводить оценку метательной способности при различной геометрии метания и разных значениях  $\mu$ . Несмотря на то, что данный подход предло-

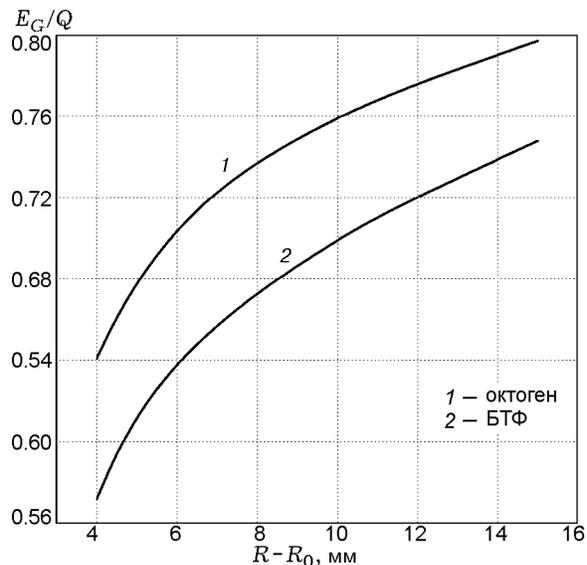


Рис. 5. Отношение значений энергии Гарни и теплоты взрыва в зависимости от приращения внешнего радиуса оболочки (Т-20)

жен несколько десятилетий назад, он и в настоящее время активно используется, причем не только для экспресс-оценок, но и для расчетов с применением сложных термодинамических программ [29, 30]. В табл. 4 приведена величина  $E_G$ , рассчитанная по формуле (3) с использованием значений  $W_1$ .

Из полученных данных следует, что, несмотря на проигрыш в теплоте взрыва, октоген превосходит БТФ по метательной способности, определяемой по методике Т-20. Это свидетельствует о более высоком коэффициенте трансформации химической энергии в кинетическую в случае октогена. Рис. 5, на котором представлено отношение значений  $E_G$  и  $Q$  в зависимости от приращения радиуса, иллюстрирует данный факт. Однако различие скоростей оболочки (и  $E_G$ ) для БТФ и октогена хотя и слабо, но снижается по мере увеличения радиуса. Это прежде всего свидетельствует о более резком спаде давления при расширении ПД октогена. К сожалению, область регистрации скорости разлета ограничена началом разрушения оболочки. Основным фактором, определяющим работу взрыва при расширении продуктов до больших объемов, является общий запас энергии ВВ (т. е. теплота взрыва). Не исключено, что при более высокой степени расширения продуктов взрыва БТФ не будет уступать октогену по эффективности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе проведено комплексное исследование детонации прессованных зарядов БТФ, что позволило уточнить характеристики детонационного фронта и некоторые параметры мощности этого ВВ. Показано, что экспериментальные значения температуры ПД существенно ниже расчетных величин, приведенных в большинстве опубликованных теоретических работ. БТФ обладает более высокой теплотой взрыва по сравнению с октогеном, но уступает ему по скорости разлета оболочки (в условиях методики Т-20) и по энергии Гарни.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Энергетические** конденсированные системы: краткий энциклопедический словарь / под ред. Б. П. Жукова. — М.: Янус-К, 2000.
2. **Пепекин В. И., Махов М. Н., Лебедев Ю. А.** Теплота взрывчатого разложения индивидуальных ВВ // Докл. АН СССР. — 1977. — Т. 232, № 4. — С. 852–855.
3. **Dobratz В. М.** LLNL explosives handbook properties of chemical explosives and explosive simulants // Lawrence Livermore Laboratory, Rep. UCRL-52997. — March 1981.
4. **Fried L. E., Souers P. C.** BKWC: an empirical BKW parametrization based on cylinder test data // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. — 1966. — V. 21, N 4. — P. 215–223.
5. **Ершов А. П.** Взрыв // Сорос. образоват. журн. — 2000. — Т. 6, № 1. — С. 85–90.
6. **Finger M., Lee E., Helm F. H., et al.** The effect of elemental composition on the detonation behavior of explosives // Proc. Sixth Symp. (Intern.) on Detonation, Coronado, California. — ACR-221. — 1976. — P. 710–722.
7. **Викторов С. Б., Губин С. А., Маклашова И. В.** Прогнозирование детонационных свойств CNO-состава с учетом свойств ультрадисперсного углерода // Физика экстремальных состояний вещества — 2002 / ред. В. Е. Фортвов, В. П. Ефремов, К. В. Хищенко и др. — Черногоровка: ИПХФ РАН, 2002. — С. 88–90.
8. **Толочко Б. П., Титов В. М., Чернышев А. П. и др.** Физико-химическая модель детонационного синтеза наноалмазов. — Новосибирск: ИЯФ им. Г. И. Будкера, 2005.
9. **Целинский И. С.** Применение высокоэнергетических материалов в технике и народном хозяйстве // Сорос. образоват. журн. — 1997. — Т. 3, № 11. — С. 46–52.
10. **Котомин А. А., Душенок С. А., Ефанов В. В. и др.** Критические диаметры детонации взрывчатых материалов, используемых в системах разделения космических аппаратов // Вестн. ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. — 2010. — № 1. — С. 24–31.
11. **Титов В. М., Анисичкин В. Ф., Мальков И. Ю.** Исследование процесса синтеза ультрадисперсного алмаза в детонационных волнах // Физика горения и взрыва. — 1989. — Т. 35, № 3. — С. 117–126.
12. **Анисичкин В. Ф., Долгушин Д. С., Петров Е. А.** Влияние температуры на процесс роста ультрадисперсных алмазов во фронте ДВ // Физика горения и взрыва. — 1995. — Т. 31, № 1. — С. 109–112.
13. **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, N 1. — P. 37–46.
14. **Kamlet M. J., Short J. M., Finger M., et al.** The chemistry of detonations. VIII. Energetic relationships on the detonation isentrope // Combust. Flame. — 1983. — N 3. — P. 325–333.
15. **Гоголя М. Ф., Бражников М. А.** Температуры продуктов детонации конденсированных взрывчатых веществ. I. Твердые ВВ // Хим. физика. — 1994. — Т. 13, № 1. — С. 52–63.
16. **Гоголя М. Ф., Долгобородов А. Ю.** Индикаторный метод исследования ударных и детонационных волн // Хим. физика. — 1994. — Т. 13, № 12. — С. 118–127.
17. **Махов М. Н.** Определение энергосодержания индивидуальных ВВ // Хим. физика. — 2000. — Т. 19, № 6. — С. 52–56.
18. **Махов М. Н.** Определение теплоты взрыва алюминизированных ВВ // Горение и взрыв / под ред. С. М. Фролова. — М.: Торус пресс, 2011. — Вып. 4. — С. 307–312.
19. **Физика взрыва.** 3-е изд. / под ред. Л. П. Орленко. — М.: Физматлит, 2002. — Т. 1.
20. **Методы** исследования свойств материалов при интенсивных динамических нагрузках / под ред. М. В. Жерноклетова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003.
21. **Hardesty D. R., Kennedy J. E.** Thermochemical estimation of explosive energy output // Combust. Flame. — 1977. — V. 28, N 1. — P. 45–49.
22. **Hornberg H.** Determination of fume state parameters from expansion measurements of metal tubes // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. — 1986. — V. 11, N 1. — P. 23–31.
23. **Gogulya M. F., Dolgoborodov A. Yu., Brazhnikov M. A., et al.** Detonation waves in HMX/Al mixtures (pressure and temperature measurements) // Proc. Eleventh Symp. (Intern.) on Detonation, Snowmass, Colorado. — ONR 33300-5. — 1998. — P. 979–988.
24. **Gogulya M. F., Dolgoborodov A. Yu., Makhov M. N., et al.** Detonation performance of aluminized compositions based on BTNEN // Proc. Twelfth Symp. (Intern.) on Detonation, San

- Diego, California. — ONR 333-5-2. — 2002. — P. 249–255.
25. <http://teos.ficp.ac.ru/rusbank/>.
26. **Титов В. М., Тен К. А., Прууэл Э. Р., Толочко Б. П.** Синхротронная диагностика взрывных процессов // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны / под. ред. А. Л. Михайлова. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011.
27. **Makhov M. N., Perekin V. I.** Calculation of chemical composition of detonation products // Polish J. Chem. — 1981. — V. 55, N 6. — P. 1381–1385.
28. **Makhov M. N.** The effect of charge density on the explosion heat of high explosives // Proc. 33rd Intern. Annu. Conf. ICT, Karlsruhe, FRG. — 2002. — P. 73/1–73/13.
29. **Danel J.-F., Kazandjian L.** A few remarks about the gurney energy of condensed explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. — 2004. — V. 29, N 5. — P. 314–316.
30. **Пепекин В. И., Губин С. А.** Метательная способность органических взрывчатых веществ и их пределы по мощности и скорости детонации // Физика горения и взрыва. — 2007. — Т. 42, № 1. — С. 99–111.

*Поступила в редакцию 21/IX 2012 г.*

---