

УДК 536.8

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ В ИСПЫТАНИЯХ В ОТКРЫТОМ И ЗАМКНУТОМ ПРОСТРАНСТВЕ

Q.-P. Xu^{1,2}, Zh.-R. Li², X.-J. Wang¹, J.-J. Su², Y. Liu¹, F.-L. Huang¹¹State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081
P. R. China, wangxinjie@bit.edu.cn²Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065, P. R. China, sjj3582@sina.com

В статье развиваются методы количественного тестирования эффективности взрыва тротила и термобарических взрывчатых веществ (ТБВВ) на основе литого октогена в полевых условиях и замкнутом пространстве. Полевые тесты показали, что при взрыве ТБВВ в неограниченном пространстве избыточное давление при маховском отражении Δp и импульс I значительно больше, чем при взрыве тротила на том же самом относительном расстоянии от центра взрыва. На основе экспериментальных измерений получены полуэмпирические формулы для расчета избыточного давления на разных дистанциях от зарядов тротила и ТБВВ. Наблюдалось существенное увеличение как температуры огненного шара, так и продолжительности периода с температурой выше 1500 °С для ТБВВ. Сравнение измеренного пикового давления при нормальном отражении при взрыве двух ВВ во взрывной камере с результатами расчетов в рамках модифицированной вычислительной модели показало соответствие расчета эксперименту. Квазистатическое давление, генерируемое ТБВВ во взрывной камере, на 30.9 % выше, чем создаваемое тротилом, что, очевидно, обусловлено термобарическими эффектами при взрыве ТБВВ. С использованием данных по избыточному давлению и вычислительной модели квазистатического давления выполнены расчеты тротиловых эквивалентов для ТБВВ, что позволило корректно оценить его эффективность. Полученные результаты могут служить руководством для разработки составов и оценки эффективности ТБВВ.

Ключевые слова: термобарический открытый взрыв, взрыв в замкнутом пространстве, давление при отражении, термический эффект, квазистатическое давление.

DOI 10.15372/FGV20220110

ВВЕДЕНИЕ

Появившиеся в последние годы термобарические взрывчатые вещества (ТБВВ) представляют собой разрушительные боеприпасы, очень эффективные в плане горения и создания ударной волны. Их бо́льшая по сравнению с традиционными ВВ разрушительная сила обусловлена совместным действием теплового эффекта и давления [1–3]. Особенно в замкнутом или квазизамкнутом пространстве отраженные ударные волны вызывают интенсивное поствзрывное горение металлического порошка в продуктах детонации, что может поддерживать огненный шар и высокотемпературные тепловые потоки в течение порядка десятков миллисекунд. Такое продолжительное горение вызывает резкий рост давления и тем-

пературы в замкнутом пространстве. Сохранение уровня квазистатического давления также играет важную роль в разрушении всей структуры. Термобарические ВВ могут применяться для атак на такие цели, как места подземных работ, здания, корабли и другие конструкции, включая жилое и военное оборудование в космосе [4–6].

Исследования ТБВВ проводятся в двух направлениях: разработка состава и эффективность взрыва. По составу композитные ТБВВ чаще всего состоят из нитраминового ВВ (1,3,5-тринитропергидро-1,3,5-триазингексоген, 1,2,5,7-тетранитро-1,3,5,7-тетразоцин-октоген, (3-нитрофуразан-4-ил)фуроксан-DNTF и др.), горючего вещества (металлический порошок, обычно алюминий или смесь нескольких металлических порошков, чтобы усилить эффект взрыва), полимерного связующего (стабилизатор, пластификатор, связу-

ющий агент и антиоксидантный компонент) и иногда окислителя [7, 8]. Для получения более сильного разрушающего действия и более полного и целенаправленного выделения энергии ТБВВ исследовано влияние размера и количества частиц Al на взрывную эффективность ТБВВ. Использование микрометрового порошка Al привело к недостаточному горению [9], отчасти это можно исправить, заменив микропорошок наноразмерным Al [10], хотя надо заметить, что не всегда меньший размер частиц означает лучшую эффективность взрыва. Применение наноразмерного порошка Al незначительно увеличивает мощность детонации пластических ВВ. Размер частиц Al следует выбирать, исходя из совместимости с другими составляющими и из целей использования ВВ. Обычно в композитных ВВ используется бор-алюминиевый порошок, причем большое его количество распределено по поверхности сферических частиц Al, что увеличивает количество металлических частиц, участвующих в детонации. Об улучшении детонационных характеристик алюминизированных ВВ сообщалось в [11]. Добавление жидкого перфторполиэфирного окислителя к порошку Al заметно усилило степень реагирования порошка Al, что привело к значительному увеличению скорости тепловыделения [12]. Добавление связующего вещества может, очевидно, улучшить чувствительность, возможность формовки, легкость обработки и безопасность алюминизированных ВВ [13]. Для улучшения детонационных характеристик и уменьшения чувствительности композитных ВВ всё больше внимания уделяют энергетическим связующим [14, 15]. В работах [16, 17] проведены эксперименты по изучению влияния связующих и окислителей на параметры ударной волны и термическое действие алюминизированных ВВ, а также эксперименты по определению состава и доли связующего в ВВ. Многие имеющиеся исследования подтверждают, что высокая плотность и сбалансированное по кислороду связующее увеличивают энергетическую эффективность алюминизированного ВВ.

В последние несколько лет появился ряд работ по взрывным свойствам ТБВВ. В [18] были исследованы во взрывной камере взрывные характеристики одного сорта многослойных ТБВВ, изготовленных с использованием процессов прессования и литья зарядов. Ре-

зультаты показали значительное увеличение как избыточного, так и квазистатического давления. В [19–21] изучали, как изменяются характеристики энергосодержания ТБВВ в зависимости от условий проведения экспериментов. Например, на открытом пространстве, помимо сильной ударной волны, размер огненного шара от взрыва ТБВВ больше и процесс длится дольше, чем для традиционного ВВ тротила, а поверхностная температура огненного шара находится в диапазоне очень высоких значений. Тем не менее сильный тепловой эффект ТБВВ все еще используется в основном только для внутреннего взрыва — после того, как головная часть боеприпаса проникает глубоко внутрь цели [22–24].

В данной работе тестируются характеристики ТБВВ на основе октогена и характеристики тротила при взрыве на открытом воздухе и во взрывной камере. Для ТБВВ выполнены расчеты давления при нормальном отражении с использованием относительной массы заряда, рассчитанной на основе теплоты детонации и давления отражения от земли. Проанализированы также некоторые другие вопросы. Настоящее исследование позволило получить более глубокое представление о разработке эффективных составов ТБВВ.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ

1.1. Характеристика образца и измерительные приборы

В состав ТБВВ входят октоген, алюминиевый порошок, связующее (чаще всего полибутадиеновый полимер с концевыми гидроксильными группами и небольшим количеством технологических добавок) в примерном соотношении 58 : 28 : 14 %. Все исходные материалы произведены в Сяньском исследовательском институте современной химии, за исключением алюминиевого порошка (Angang Group Aluminum Powder Co., Ltd, Liaoning, China). Средний размер частиц октогена ≈ 30 мкм. На рис. 1 показана фотография, полученная с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ), сферических частиц алюминия диаметром 5 мкм. Составы ТБВВ готовили по технологии литья смесей на основе октогена, их плотность была около 1.81 г/см^3 . Остаточная пористость заряда равнялась примерно 1.09 %. Теплота детонации

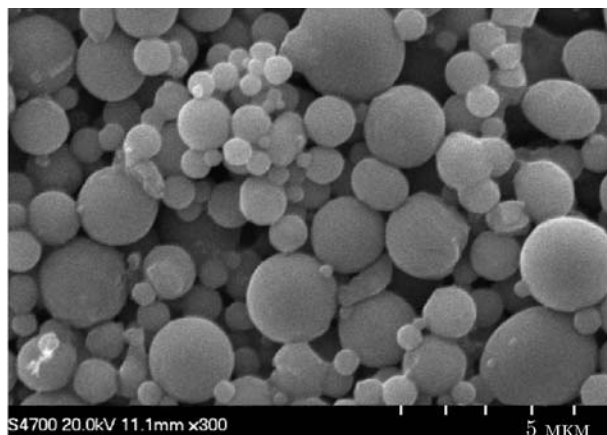


Рис. 1. СЭМ-фотография частиц Al

ТБВВ при взрыве детонационной калорической бомбы в 1.8 раза была выше, чем у тротила. В опытах на открытом воздухе использовались цилиндрические заряды массой 5 кг, в опытах в закрытом объеме — цилиндрические заряды массой 80 г. Отношение длины к диаметру для всех зарядов равнялось 1 : 1. Для обеспечения достоверности данных для каждого состояния выполнено по два теста.

Для регистрации давления в опытах на открытом воздухе и в закрытом объеме использовались датчики давления серии РСВ 113В (нелинейность $\leq 1\%$, погрешность в диапазоне $\pm 1.3\%$, время отклика ≤ 1 мкс, резонансная частота ≥ 500 кГц), для обработки данных использовалось программное обеспечение Genesis 986A05151. Размер и температуру огненного шара регистрировали соответственно высокоскоростной камерой Phantom V7.3 и инфракрасным пирометром SC7200 производства Mikron Corporation. Для регистрации эволюции квазистатического давления (КСД), генерируемого во взрывной камере после детонации, нами разработаны КСД-датчики (диапазон 6 МПа, чувствительность 5000 мВ/кПа).

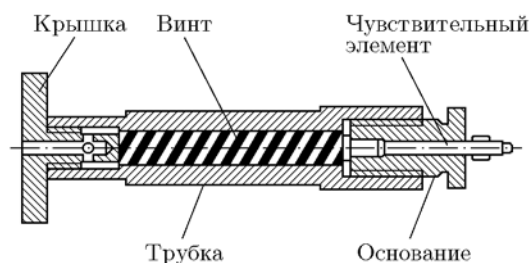


Рис. 2. Схема датчика КСД

КСД-датчик состоит из крышки, трубки, винта, чувствительного элемента и неподвижного основания (рис. 2). Ударная волна проникает в КСД-датчик через глухое отверстие в крышке, затем проходит через поперечное отверстие и попадает в канавку винта в трубке, где быстро затухает, достигая в конечном счете поверхности чувствительного элемента. Кривая КСД получается после усиления сигнала в адаптере.

1.2. Экспериментальное оборудование и методы

1.2.1. Взрывные тесты на открытом воздухе

Опыты на открытом воздухе проводились на ровной твердой поверхности земли. Экспериментальный образец размещался вертикально в деревянной раме. Центр заряда находился на высоте 1.5 м над землей, что можно рассматривать как взрыв в бесконечном воздушном пространстве. Все заряды инициировались с верхнего торца. В качестве активного заряда использовался ЖН-14 (96.5 % гексогена, 0.5 % графита и 3 % связующего) массой 100 г, а в качестве инициатора — стандартный электрический детонатор. Вокруг центра заряда под землей размещались детекторы давления для измерения параметров ударной волны, торцы их были параллельны поверхности земли. Расстояния от точек измерения до центра заряда приведены в табл. 1. Высокоскоростная камера и инфракрасный пирометр для регистрации изменений в центре заряда и температуры поверхности огненного шара устанавливались на расстоянии 100 м от центра заряда. Отметим, что при использовании инфракрасного пирометра необходимо заранее ввести в интерфейс системы ввода данных такие параметры,

Таблица 1
Положение точек измерения

Точки измерения	Расстояние, м
1	2.73
2	3.62
3	4.54
4	5.5
5	6.36
6	7.3
7	9.1



Рис. 3. Схема для испытания экспериментальной установки

как излучательная способность образцов (0.35), расстояние до детонирующего заряда, частота дискретизации (50 кадр/с), температура окружающей среды (30 °C), влажность (35 %), а также диапазон измерения температуры. Среди всех этих параметров наиболее важной является излучательная способность образца.

Устанавливая датчики на разных расстояниях и в разных направлениях в области, охваченной взрывом, мы провели большое количество экспериментов для получения данных о температуре огненного шара после взрыва, которые использовались для калибровки измерения излучательной способности образца по измерению температуры огненного шара инфракрасным пирометром. Если рассматривать продукты детонации тротила и ТБВВ как турбулентные газы сложного состава, различие в их излучательной способности невелико. Поэтому в настоящем исследовании используется одно и то же значение. Объектив линзы должен быть направлен в центр ядра взрыва, и фокусное расстояние необходимо подобрать так, чтобы получить четкое изображение. На рис. 3 показана схема тестирования экспериментальной установки.

1.2.2. Эксперименты в замкнутом пространстве

Эксперименты выполнялись во взрывной камере в виде цилиндра с фланцами на обоих торцах. Внутренний диаметр камеры 800 мм, толщина стенок 12 мм, длина 1 640 мм. На одном торце камеры была установлена толстая пластина толщиной 12 мм для герметизации

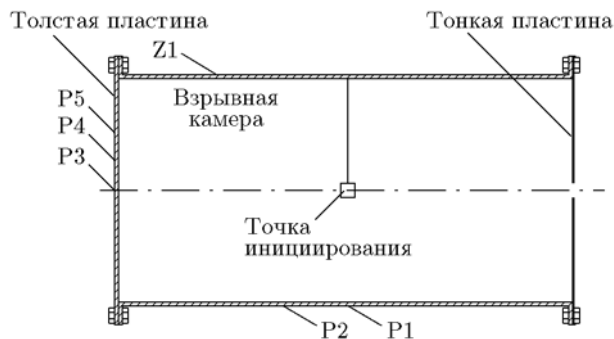


Рис. 4. Схема взрывной камеры для исследований в закрытом объеме

камеры, а на другом торце — пластина толщиной 2 мм с отверстием диаметром 20 мм в центре. Эти пластины крепились к фланцам камеры 16 болтами M20, как показано на рис. 4. Взрывная камера и пластины были выполнены из стали марки Q235. Пять датчиков давления размещали в положениях P1–P5 для мониторинга параметров ударной волны, а КСД-датчики устанавливали на цилиндрической стенке камеры в точке Z1. Датчик P1 находился в точке цилиндрической стенки напротив центра камеры, датчик P3 — в геометрическом центре толстой пластины. Расстояния между точками P3, P4 и P5 равны 100 мм, а между точками P1 и P2 — 200 мм. Заряд подвешивался в геометрическом центре взрывной камеры и инициировался стандартным электродетонатором и активным зарядом JH-14 массой 5 г с левого торца зарядов.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

2.1. Взрыв в открытом пространстве

2.1.1. Параметры ударной волны

С датчиков давления снималось электрическое напряжение ΔU , которое преобразовывалось в значения давления Δp по формуле

$$\Delta p = \Delta U / S, \quad (1)$$

и затем рассчитывался импульс I :

$$I = \int_{t_0}^{t_1} \Delta p dt. \quad (2)$$

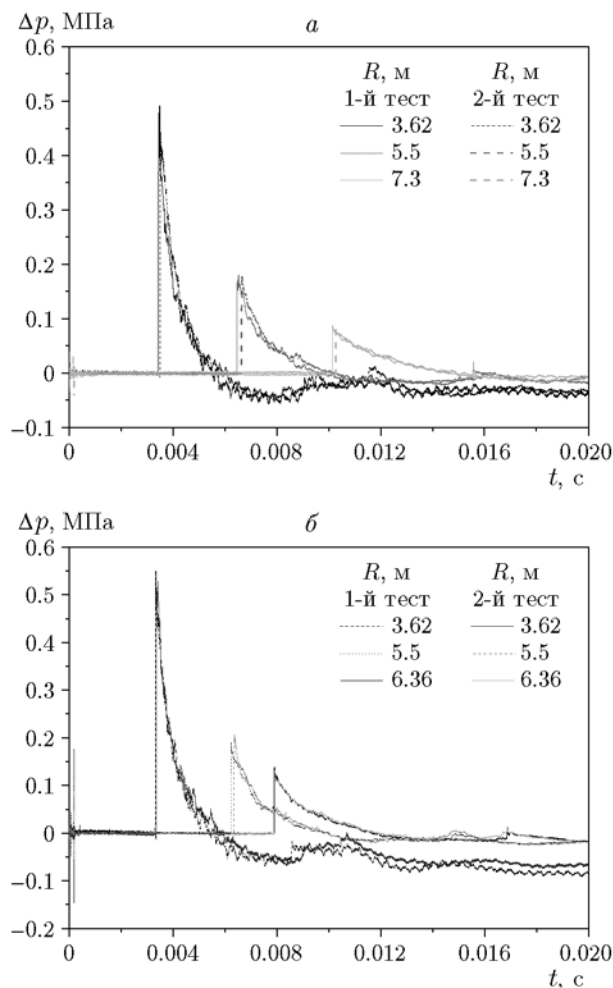


Рис. 5. Сигналы давления в опытах с тротилом (а) и ТБВВ (б) на разных расстояниях от центра взрыва в открытом пространстве

Здесь S — чувствительность датчиков давления, t_0 и t_1 — начальный и конечный моменты времени, между которыми проводится интегрирование давления в ударной волне.

На рис. 5,а показана динамика давления при взрыве тротила на расстояниях 3.62, 5.5 и 7.3 м от центра взрыва, на рис. 5,б — динамика давления в ударной волне от ТБВВ на расстояниях 3.62, 5.5 и 6.36 м. Для каждого ВВ проводилось по два опыта. Данные датчиков давления в двух тестах для одного и того же ВВ и на одном и том же расстоянии хорошо согласуются между собой, что подтверждает надежность наших результатов. Кроме того, видно, что во всех опытах ударные волны похожи: после резко нарастающего фронта пиковое давление вначале быстро уменьшается до отрицательных значений, а затем возвращается

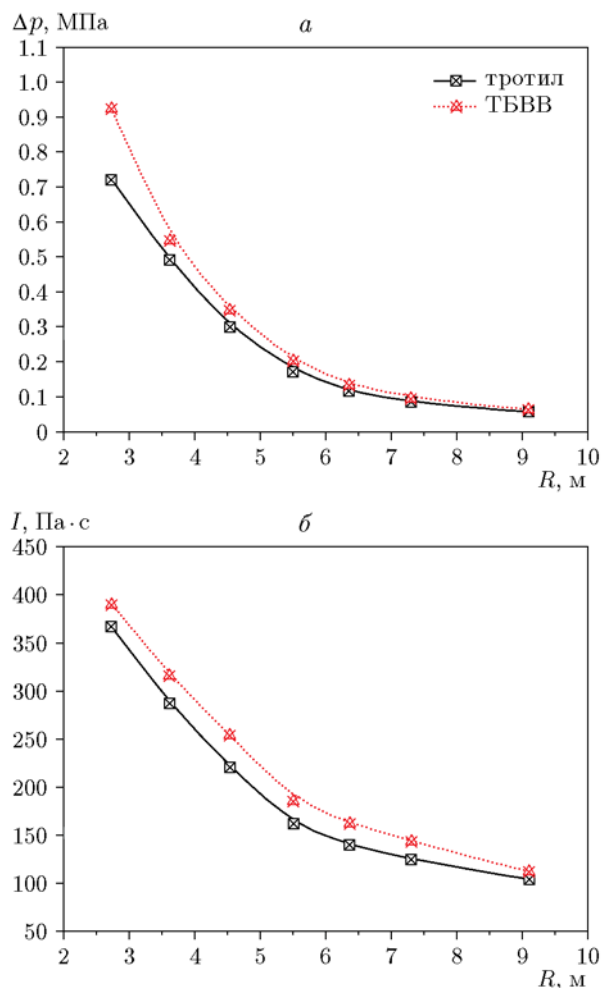


Рис. 6. Параметры ударной волны в зависимости от расстояния от центра взрыва

к атмосферному давлению [25].

Высота, на которой располагалась взрывчатка, во всех экспериментах равнялась 1.5 м, расстояние между первым датчиком давления и проекцией центра заряда на поверхность земли составляло 2.73 м. Можно считать, что измеренное давление отражения от поверхности земли во всех точках измерения является маховским давлением отражения [26, 27]. (Обсуждение условий формирования маховского давления отражения выходит за пределы настоящей статьи.) Окончательные данные об ударной волне, полученные осреднением двух наборов данных измерений на одном и том же расстоянии, представлены на рис. 6: изменение маховского давления отражения с расстоянием R и зависимость импульса I от расстояния R . Видно, что избыточное давление Δp и импульс I в случае ТБВВ выше таких же

параметров для тротила вблизи места взрыва (≤ 5.5 м). Наибольшее превышение по давлению Δp составило 23.4 % на расстоянии 2.73 м, в то время как по импульсу I наибольшее превышение на 16.1 % зарегистрировано на расстоянии 6.36 м. Расхождение становится менее заметным с увеличением расстояния. Однако все еще остается различие в характере затухания Δp и I с расстоянием: импульс имеет явные отличия на расстояниях меньше 7.3 м, в то время как избыток давления в основном ведет себя одинаково на расстояниях более 5.5 м. Причина, по которой максимальное различие импульсов и избыточного давления появляется на разных расстояниях, — догорание порошка Al в ТБВВ, которое обеспечивает более высокое значение импульса на больших дистанциях.

В пределах параметров ударной волны зависимости $\Delta p(R)$ для двух ВВ ведут себя похоже, соответственно закону подобия при взрыве. Пиковое давление воздуха, производимое зарядом тротила, может быть вычислено по формуле [28]

$$\Delta p = \frac{\Delta_1}{\bar{R}} + \frac{\Delta_2}{\bar{R}^2} + \frac{\Delta_3}{\bar{R}^3} \text{ [кПа]}, \quad 1 \leq \bar{R} \leq 10, \quad (3)$$

где $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3$ — постоянные, требующие определения; $\bar{R} = R/\sqrt[3]{M}$ — относительное расстояние, м/кг^{1/3}, M — масса ВВ, кг; R — расстояние от центра заряда.

Для конкретного расчета давления на разных расстояниях от заряда используются следующие формулы: для тротила

$$\Delta p = \frac{-0.7072}{\bar{R}} + \frac{5.4235}{\bar{R}^2} - \frac{3.7841}{\bar{R}^3}, \quad 1.6 \leq \bar{R} \leq 5.32, \quad (4)$$

для ТБВВ

$$\Delta p = \frac{-0.5883}{\bar{R}} + \frac{4.898}{\bar{R}^2} - \frac{2.5403}{\bar{R}^3}, \quad 1.6 \leq \bar{R} \leq 5.32. \quad (5)$$

Результаты аппроксимации приведены на рис. 7.

При подстановке в уравнение (4) данных по пиковому маховскому давлению отражения на разных расстояниях от точки взрыва ТБВВ можно рассчитать относительную массу заряда ТБВВ $M_{\text{TNT},p}$ в соответствующей точке.

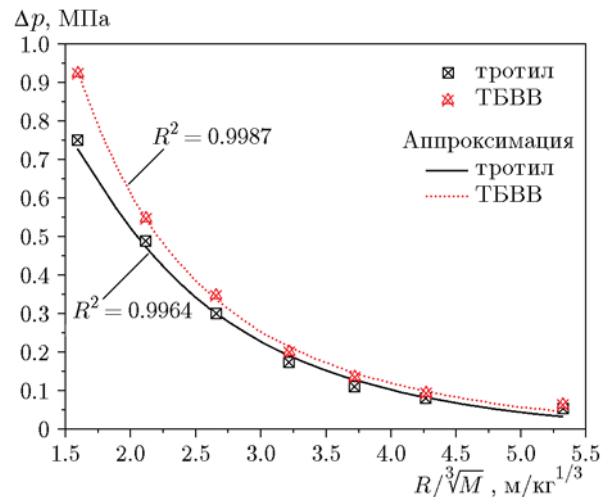


Рис. 7. Аппроксимация зависимости $\Delta p(\bar{R})$ для ВВ

Результаты расчета представлены в табл. 2. Видно, что относительная масса заряда ТБВВ уменьшается с расстоянием от центра заряда вплоть до расстояния 6.36 м, кроме двух последних точек, где она больше, чем в предыдущих точках. Причина в том, что на расстоянии больше 7.3 м значения маховского избыточного давления отражения очень малы (0.094 МПа при $R = 7.3$ м и 0.062 МПа при $R = 9.1$ м), и в случае таких малых давлений догорание порошка Al приводит к увеличению давления.

Тротиловый эквивалент (TNT_e) взрывчатого вещества рассчитывается по формуле [20, 29]

$$\text{TNT}_e = \langle M_{\text{TNT},p} \rangle / M_e, \quad (6)$$

где $\langle M_{\text{TNT},p} \rangle$ — средняя относительная масса заряда ТБВВ, вычисленная с использованием маховского давления согласно (4) и приведенная в табл. 2; M_e — фактическая масса ТБВВ. Тротиловый эквивалент для ТБВВ равен 1.28.

2.1.2. Поверхностная температура огненного шара

Для регистрации поверхностной температуры огненного шара использовался инфракрасный пирометр Mikron SC7200. Пирометр включался в момент инициирования ВВ. На рис. 8 показана эволюция температуры (выше 1000 °C) поверхности огненного шара после обработки изображений с помощью специализированного программного обеспечения. Для ТБВВ наибольшая температура поверхности

Таблица 2
Относительная масса заряда согласно пику маховского давления,
генерируемого ТБВВ

Образец	$\langle M_{\text{TNT},p} \rangle$, кг, на расстоянии R , м							
	2.73	3.62	4.54	5.5	6.36	7.3	9.1	Среднее
Тротил	5	5	5	5	5	5	5	5
ТБВВ	8.59	6.29	6.12	5.32	5.27	5.57	7.58	6.39

Примечание. $\langle M_{\text{TNT},p} \rangle = \sum_1^N M_{\text{TNT},p}/N$, где N — число точек измерения.

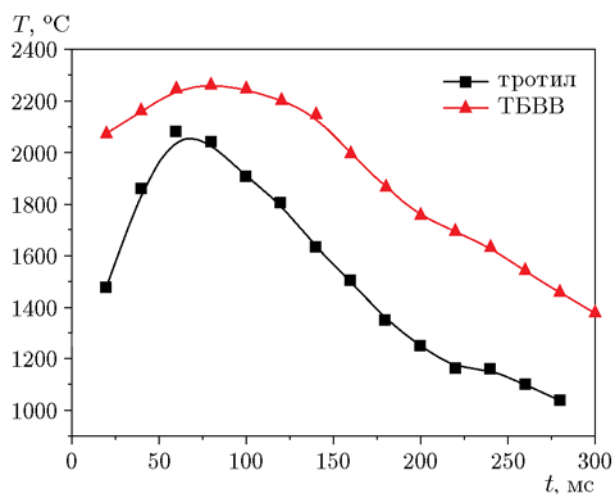


Рис. 8. Эволюция максимальной температуры поверхности огненного шара

2263 °C достигнута примерно через 80 мс после взрыва, тогда как для тротила она составила 2079 °C и была достигнута за более короткое время — 60 мс. Кроме того, из хронологии ясно видно, что по достижении максимального значения поверхностная температура в случае

ТБВВ затухает медленнее, чем у огненного шара от тротила. Для ТБВВ интервал времени, в течение которого температура сохраняется выше 1500 °C, равен 260 мс, а для тротила — только 160 мс. Тепловой эффект ТБВВ в зоне высокой температуры очевидно сильнее, чем у тротила.

Вообще говоря, благодаря высокой температуре плавления и инерции частиц порошка Al, последующее горение частиц Al в ТБВВ протекает медленнее, чем детонация, и потому в ТБВВ позднее достигается высокая температура по сравнению с тротилом. Кроме того, из-за горения Al с продуктами детонации высокая температура огненного шара от взрыва ТБВВ сохраняется дольше, чем у тротила. Это также видно на кадрах, полученных с помощью высокоскоростной камеры. На рис. 9 показана эволюция огненного шара до момента времени 120 мс. Контур огненного шара от ТБВВ более плоский и больше, чем создаваемый тротилом, и все температуры на поверхности огненного шара имеют высокие значения в центре и низкие на периферии, однако имеются и исключения — несколько областей высо-

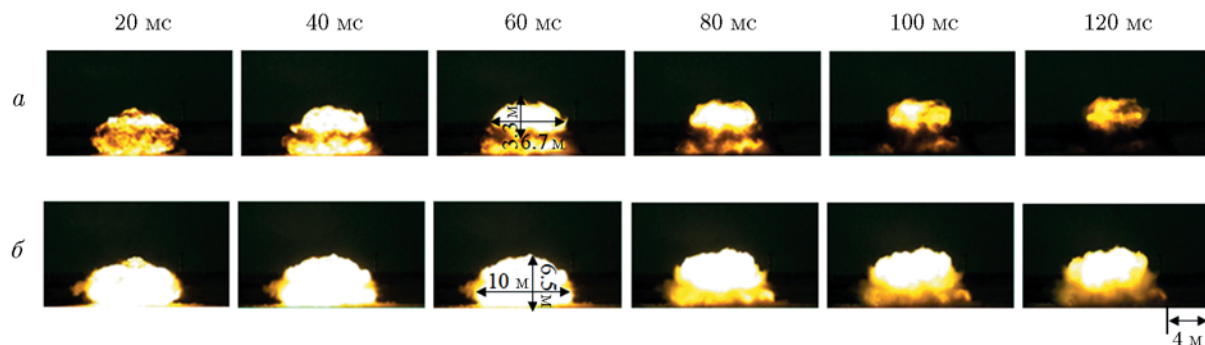


Рис. 9. Эволюция огненного шара от взрыва тротила (а) и ТБВВ (б) до момента времени 120 мс

кой температуры, распределенных внутри огненного шара вследствие диффузии и горения порошка Al. Температура огненного шара от тротила также уменьшается монотонно от центра к периферии. С появлением волны разрежения объем огненного шара достигает своего максимального диаметра (10 м в горизонтальном и 6.5 м в вертикальном направлении для ТБВВ, 6.7 м в горизонтальном и 3.3 м в вертикальном направлении для тротила) и начинает деформироваться и слабеть. Тем не менее огненный шар от ТБВВ больше и ярче, чем шар от тротила.

2.2. Взрыв в замкнутом пространстве

2.2.1. Параметры ударной волны

Хронология давления при взрыве тротила во взрывной камере в точках измерения P1, P2 и P4 представлена на рис. 10, а при взрыве ТБВВ в тех же точках — на рис. 11. На каждом рисунке приведены для сравнения результаты двух параллельных опытов с одним и тем же ВВ. Можно заметить, что измерения в разных точках дают похожие результаты, что подтверждает эффективность нашей экспериментальной установки и выполненных тестов. Кроме того, подобно взрыву на открытом воздухе, пик давления в ударной волне при взрыве в замкнутом пространстве также значительно больше для ТБВВ, чем для тротила, например, в точке P1, ближайшей к центру взрыва, — на 21.9 %. Однако есть некоторое различие между взрывами в разных условиях. Давление ударной волны во взрывной камере имеет несколько пиковых значений, отличных от единственного пикового значения при взрыве на открытом воздухе, как показано на рис. 5. Это происходит вследствие сложного взаимодействия ударной волны и взрывной камеры, а именно фокусирования, сжатия и расширения ударной волны из-за ограничений в замкнутом пространстве [30]. Более того, значения первых пиков давления при взрыве тротила и ТБВВ в точках P1 и P2 (на цилиндрических стенках взрывной камеры) также максимальны, в отличие от полученных в точках P3 и P4 (на торцевой поверхности взрывной камеры). В точках P3 и P4 давление во втором пике значительно больше, чем в первом пике. Это происходит по следующим причинам. Точки P1 и P2 на цилиндрических стенках расположены ближе к центру

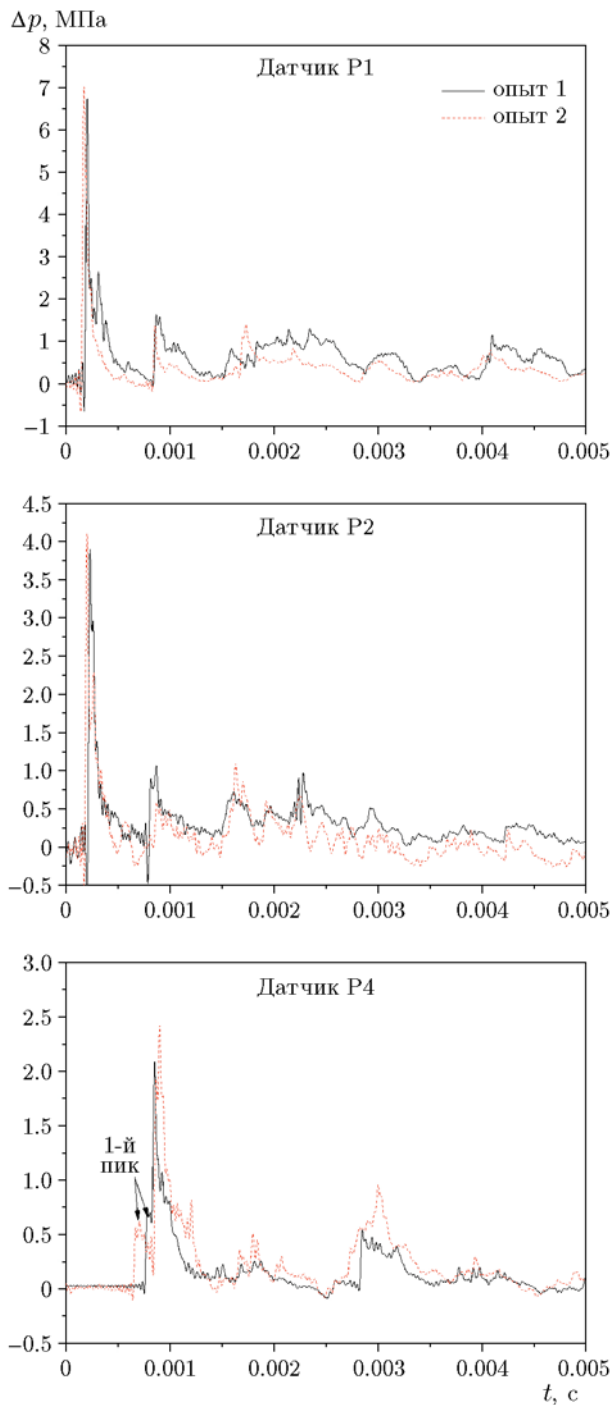


Рис. 10. Эволюция давления в камере при детонации тротила

взрыва, и при распространении ударной волны в сторону торцов камеры на цилиндрической стенке вдали от центра взрыва постепенно формируется волна Маха. Волна Маха действует на датчики давления (P3–P5) на торцевых поверхностях взрывной камеры сразу же после

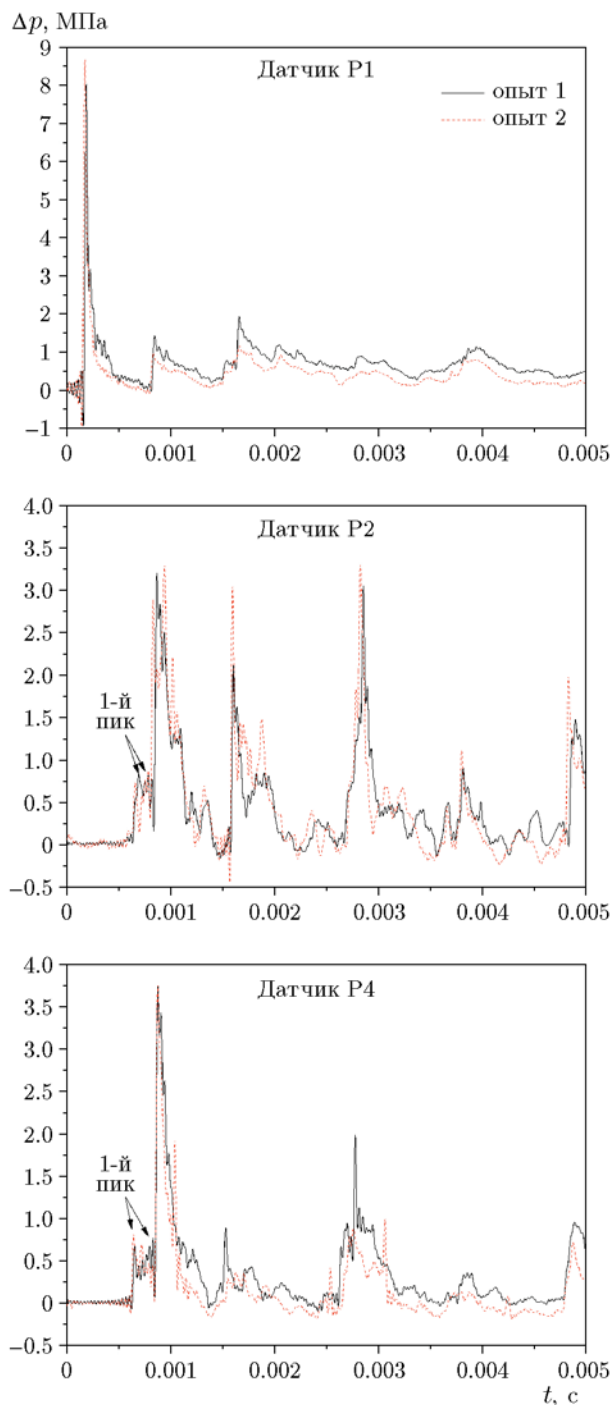


Рис. 11. Эволюция давления в камере при детонации ТБВВ

падающей волны. После этого ударная волна отражается от стенок взрывной камеры много раз, в результате чего формируются последующие пики давления. После нескольких отражений волны от стенок энергия взрыва постепенно трансформируется во внутреннюю энергию

продуктов взрыва в камере и в итоге формирует КСД.

Если соотнести положение датчиков давления с положением центра заряда, согласно § 1.2.2, становится ясно, что все первые пики давления в точках измерения соответствуют нормальному, а не маховскому давлению отражения. Условия формирования маховской ударной волны находятся за рамками данного исследования. Для детонации зарядов тротила во взрывной камере давление падающего на стенку первого пика p_{ic} и соответствующее давление нормального отражения p_{rc} могут быть рассчитаны по формулам [26, 31]

$$p_{ic} = 0.082 \left(\frac{\sqrt[3]{M_{TNT}}}{R} \right) + 0.265 \left(\frac{\sqrt[3]{M_{TNT}}}{R} \right)^2 + 0.686 \left(\frac{\sqrt[3]{M_{TNT}}}{R} \right)^3, \quad (7)$$

$$p_{rc} = (1 + \cos \theta_i) p_{ic} + \frac{6p_{ic}^2}{p_{ic} + 7p_0} \cos \theta_i^2. \quad (8)$$

Для других ВВ с теплотой детонации Q_e относительная масса заряда обычно рассчитывается в виде [26, 32]

$$M_{TNT} = \frac{Q_e}{Q_{TNT}} M_e, \quad (9)$$

где θ_i — угол падения ударной волны, приходящей на поверхность датчика, рад; p_0 — локальное атмосферное давление, которое обычно берется равным 0.101 МПа; Q_{TNT} — теплота детонации тротила, примерно равная 4250 кДж/кг. Результаты вычислений первого пика избыточного давления в падающей и отраженной волнах для тротила и ТБВВ приведены в табл. 3. Для сравнения в табл. 3 показаны также экспериментальные данные. Следует заметить, что экспериментальные значения получены путем осреднения двух измерений на одном и том же расстоянии.

Можно заметить, что вычисленные значения избыточного давления нормального отражения p_{rc} для тротила хорошо согласуются с данными экспериментов p_{re} , максимальная погрешность равна 6.72 %. Поэтому модель (7)–(9) может быть смело использована для расчета пика давления отраженной волны при взрыве заряда тротила во взрывной камере, но не подходит для расчета избыточного давления при отражении в случае взрыва ТБВВ с

Таблица 3

Сравнение данных экспериментов и результатов вычислений для детонации зарядов тротила и ТБВВ во взрывной камере

Точка измерения	Тротил			Погреш- ность, %	ТБВВ					Погреш- ность*, %	Погреш- ность#, %
	p_{re}	p_{ic}	p_{rc}		p_{re}	p_{ic}	p_{icp}	p_{rc}	p_{rcp}		
	МПа				МПа						
P1	6.85	1.25	7.31	6.72	8.53	2.11	1.55	13.67	9.52	60.26	11.61
P2	4.03	0.92	4.23	4.96	5.03	1.54	1.14	7.92	5.51	57.46	9.54
P3	0.76	0.22	0.73	−3.95	0.86	0.34	0.26	1.34	0.94	55.81	9.3
P4	0.7	0.21	0.71	1.43	0.83	0.33	0.25	1.3	0.91	56.63	9.64
P5	0.62	0.2	0.65	4.84	0.77	0.32	0.24	1.18	0.83	53.25	7.79

Примечание. Индексом e обозначены экспериментальные значения, индексом c — расчетные. Расчет погрешностей: * $(p_{rc} - p_{re})/p_{rc} \cdot 100$ %; # $(p_{rcp} - p_{re})/p_{rcp} \cdot 100$ %. Здесь p_{icp} и p_{rcp} — давление первого пика в падающей волне и соответствующее давление нормального отражения ТБВВ, вычисленные для относительной массы заряда на основе маховского давления отражения.

относительной массой заряда, рассчитанной на основе теплоты детонации с помощью уравнения (9). Все погрешности рассчитанных пиков давления по сравнению с экспериментальными оказались для ТБВВ больше 50 %. Несмотря на то, что механизм участия порошка Al в процессе детонации не ясен, и даже спорным остается вопрос о том, участвует ли он вообще в реакции, можно сказать, что энерговыделение при детонации ТБВВ включает в себя два этапа — саму детонацию и последующее горение. Постдетонационное горение порошка Al оказывает незначительное влияние на величину пика давления при отражении ударной волны, особенно в диапазоне больших давлений, характерных для детонации ТБВВ. Итак, упомянутый выше традиционный метод расчета, в котором используется относительная масса заряда, рассчитанная по теплоте детонации, может дать огромную ошибку в предсказании давления в ударной волне при детонации ТБВВ, как следует из табл. 3.

2.2.2. Квазистатическое давление

В замкнутом или частично замкнутом объеме эффект догорания ТБВВ, исключая ударную волну, реализующийся в виде высокой температуры и давления газа, продуцируемых продуктами детонации и горения металлических частиц, не может проявляться немедленно. Взаимодействие ударной волны и продуктов детонации, многократные отражения, сложение и фокусировка ударных волн в конечном

счете приводят к формированию квазистатического давления. Для идеального газа давление в замкнутом пространстве pV возрастает из-за удельного объема ВВ, и эта зависимость выражается формулой [33, 34]

$$pV = p_0 M(V_0/V). \quad (10)$$

Здесь p_0 — начальное давление в камере, Па; V_0 — удельный объем ВВ, м³/кг; V — объем взрывной камеры, м³.

Предполагаем, что теплота, выделяемая при взрыве, без потерь расходуется на нагрев газа в камере. Тогда рост температуры вследствие детонации равен

$$T = Mq_T/M_g c_V, \quad (11)$$

где q_T — теплота детонации ВВ, кДж/кг; M_g — масса газа в закрытом резервуаре, кг; c_V — удельная теплоемкость воздуха при постоянном объеме, кДж/(кг · К).

Рост давления в замкнутом объеме, вызванный ростом температуры, можно рассчитать из уравнения

$$p_T = \left(\frac{Mq_T}{M_g c_V} \right) \left(\frac{nR}{V} \right), \quad (12)$$

где n — количество молей воздуха, $R = 8.314$ Па · м³/(моль · К).

Поэтому при идеальных условиях квазистатическое давление p_s в замкнутом пространстве может быть рассчитано по формуле

$$p_s = p_V + p_T = \left(p_0 V_0 + \frac{n R q_T}{M_g c_V} \right) \left(\frac{M}{V} \right) =$$

$$= A \frac{M}{V} = G \left(\frac{M}{V} \right), \quad (13)$$

$$A = p_0 V_0 + \frac{n R q_T}{M_g c_V}.$$

При реальной детонации тротила изменение давления газа во взрывной камере — неизоэнтропический процесс и удельная теплоемкость воздуха зависит от температуры, так что значение постоянной A трудно определить. Однако мы можем быть уверены, что p_s является функцией M/V , т. е. $p_s = G(M/V)$, где параметр M/V определяется как плотность загрузки камеры. Выполнив большое количество взрывных экспериментов в камере с разными массами зарядов тротила и разными объемами, мы нашли наилучшую аппроксимацию между величинами p_s и M/V , которая имеет вид [35]

$$p_s = 1.394(M/V)^{0.679}, \quad 0.019 \leq M/V \leq 8.87. \quad (14)$$

Результаты расчета давления p_s по уравнению (14) вместе с данными по квазистатическому давлению при взрыве тротила в замкнутом объеме, взятыми из работ [34, 35], приведены на рис. 12 и хорошо согласуются между собой. Значения КСД, полученные в данной работе в опытах во взрывной камере, также приведены в табл. 4. Отклонение значений, вычисленных по уравнению (14) и измеренных экспериментально при детонации тротила, составляет 4 %. Поэтому мы считаем, что уравнение (14) подходит для предсказания КСД при детонации тротила в замкнутом объеме в данном диапазоне значений.

На рис. 13 представлены сигналы КСД во взрывной камере при детонации тротила

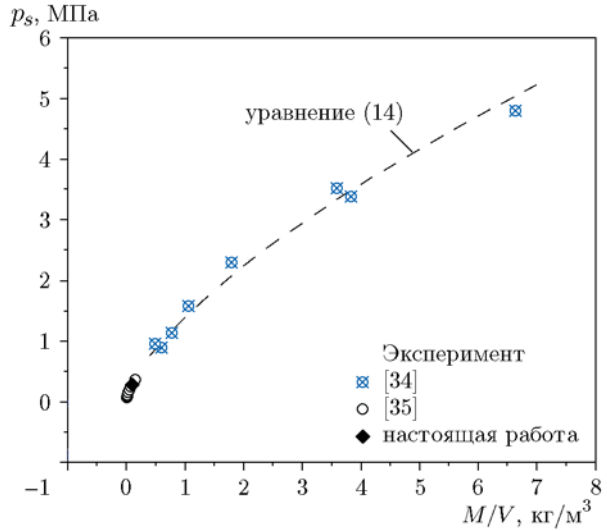


Рис. 12. Сравнение результатов расчета по уравнению (14) с данными из работ [34, 35] и настоящей работы

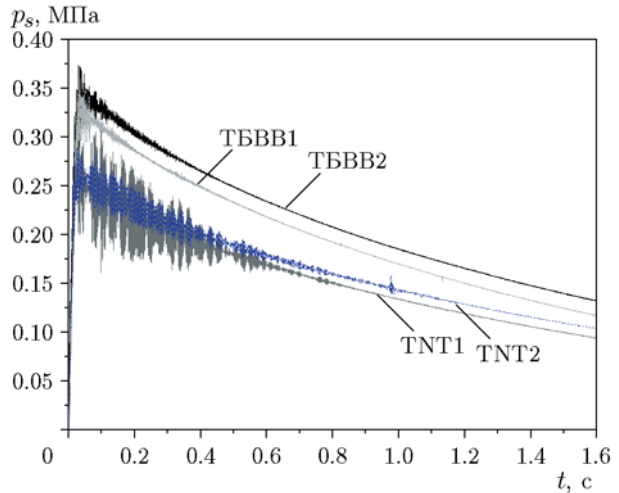


Рис. 13. Сигналы квазистатического давления во взрывной камере после детонации зарядов

Таблица 4
Значения квазистатического давления

Параметр	p_{s1} , МПа	p_{s2} , МПа	$\bar{p}_s$, МПа	$\Delta \bar{p}_s$, %
TNT	0.28	0.27	0.275	—
ТБВВ	0.37	0.35	0.36	30.9
Уравнение (14)	—	—	0.286	—

Примечания. p_{s1} и p_{s2} — КСД, измеренное в точке наблюдения Z1 в двух одинаковых параллельных тестах; $\Delta \bar{p}_s = (\bar{p}_{s, \text{ТБВВ}} - \bar{p}_{s, \text{TNT}}) / \bar{p}_{s, \text{TNT}}$.

и ТБВВ. Видно, что все кривые КСД имеют относительно резко возрастающий фронт перед максимумом и затем медленный спад из-за утечки продуктов детонации через отверстие в маленькой пластине. Следует заметить, что при взрыве тротила пиковое давление достигается быстрее (примерно через 60 мс), чем при взрыве ТБВВ (примерно через 80 мс), что согласуется с эволюцией температуры огненного шара, приведенной на рис. 8: наибольшая температура для тротила достигается примерно через 60 мс, а для ТБВВ — через 80 мс. Более поздний пик давления для ТБВВ указывает на

то, что реакции с участием порошка Al протекают в ТБВВ во взрывной камере интенсивнее и длятся дольше. Существует очень небольшое расхождение в данных, полученных в точке измерения Z1 в двух одинаковых параллельных тестах (см. табл. 4), которое только подтверждает стабильность показаний разработанных нами датчиков КСД. В качестве конечного измерения брали среднее значение, вычисляемое по двум пикам давления, измеренным в параллельных тестах. Очевидно, что КСД, генерируемое ТБВВ, выше, чем создаваемое тротилом, примерно на 30.9 % вследствие значительного роста температуры из-за горения порошкового Al. Скорость увеличения КСД значительно выше, чем у избыточного давления отражения, таким образом, КСД от ТБВВ является важнейшим фактором разрушения при взрыве в замкнутом пространстве, который нельзя игнорировать.

Подставляя значение КСД для ТБВВ в уравнение (14), можно рассчитать относительную массу заряда ТБВВ — 112.2 г. Согласно уравнению (6) тротиловый эквивалент, вычисленный на основе КСД, для ТБВВ равен 1.403.

2.3. Обсуждение избыточного давления отражения для ТБВВ во взрывной камере

В § 2.2.1 был сделан вывод о том, что результаты вычисления избыточного давления отражения для ТБВВ через относительную массу заряда, основанные на теплоте детонации, дают большие расхождения с экспериментальными данными. Для точного предсказания избыточного давления от взрыва ТБВВ в § 2.1.1 мы вычислили среднюю относительную массу заряда ТБВВ $M_{TNT,p}$ на основе давления маховского отражения в открытом пространстве. Подставляя среднее значение $M_{TNT,p}$ в уравнения (7), (8), можно рассчитать первый пик давления в падающей волне p_{icp} и соответствующее давление нормального отражения p_{rcp} для ТБВВ с относительной массой заряда, вычисляемой по давлению маховского отражения. Результаты этих расчетов приведены в табл. 3. Нормальное давление отражения p_{rcp} , вычисленное по тротиловому эквиваленту на основе модели избыточного давления, значительно ближе к экспериментальным значениям, чем давление, полученное через тротиловый эквивалент на основе теплоты детонации. При этом максимальная погрешность равна всего лишь 11.61 %. Поэтому для предска-

зания пика давления при взрыве ТБВВ в камере можно использовать относительную массу заряда, вычисленную по давлению маховского отражения в открытом пространстве.

Анализируя взрывы зарядов ТБВВ в открытом пространстве и во взрывной камере, мы установили, что как давление маховского отражения, измеренное в открытом пространстве, так и давление нормального отражения, записанное во взрывной камере, отражают эффективность детонации ТБВВ, в то время как данные об огненном шаре и КСД отражают характеристики последующего горения ТБВВ. Оценка производительности ТБВВ только по тротиловому эквиваленту, вычисленному по теплоте детонации, как это упоминалось в § 2.2.1, некорректна. Представлен новый метод расчета тротилового эквивалента на основе пикового давления отражения и КСД, который хорошо отражает обе стадии — детонацию и последующее горение ТБВВ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По сравнению с традиционными высокоэнергетическими ВВ, термобарические ВВ привлекают большее внимание из-за более сильного комплексного разрушающего эффекта ударной волны, более высоких значений квазистатического давления, параметров огненного шара и т. д. На основе взрывных экспериментов в открытом и замкнутом пространстве мы получили данные по ударной волне, температуре и размеру огненного шара и квазистатическому давлению. Результаты показывают, что при взрыве в открытом пространстве импульс ТБВВ очевидно не соответствует импульсу тротила на расстояниях до заряда меньше 7.3 м вследствие горения частиц Al, в то время как избыточное давление в основном то же самое на расстояниях больше 5.5 м. Действие импульса ТБВВ более явное. Избыточное давление при маховском отражении аппроксимируется взрывным законом, получены полуэмпирические формулы для расчета избыточного давления на разных расстояниях от зарядов тротила и ТБВВ в пределах условий эксперимента. Эволюция формы огненного шара и его поверхностной температуры показывает, что заряды ТБВВ генерируют больше тепла и процесс длится дольше по сравнению с зарядом тротила. Максимальные температуры для тротила и ТБВВ равны 2 079 и 2 263 °С. Протяженность во времени области с температурой

выше 1500 °С для ТБВВ составляет 260 мс, для тротила — 160 мс.

Существенно уточнены давление в ударной волне и квазистатическое давление при взрыве ТБВВ и тротила в замкнутом пространстве. Сравнение избыточного давления нормального отражения, вычисленного через относительную массу заряда на основе давления маховского отражения в открытом пространстве, с первым пиком избыточного давления, измеренного при взрыве ТБВВ и тротила в камере, показало хорошее согласие экспериментальных данных и результатов вычислений, что подтверждает точность модифицированной модели вычислений для ТБВВ в противоположность модели на основе теплоты детонации.

Наконец, чтобы количественно выразить эффективность ТБВВ, были независимо вычислены тротильные эквиваленты ТБВВ на основе избыточного давления в ударной волне и на основе экспериментальных данных по квазистатическому давлению. Они равны соответственно 1.28 и 1.403. Данное исследование позволит прояснить формулировку и метод оценки для количественного описания эффективности взрыва ТБВВ.

ЛИТЕРАТУРА

- Maiz L., Trzciński W. A., Paszula J. Semi-closed investigations of new aluminized thermobaric and enhanced blast composites // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2017. — V. 42, N 6. — P. 857–863. — DOI: 10.1002/prop.201700062.
- Maiz L., Trzciński W. A., Szala M. Preparation and testing of thermobaric composites // *New Trends Res. Energ. Mater.* — 2015. — V. 12, N 6. — P. 705–714.
- Trzciński W. A., Maiz L. Thermobaric and enhanced blast explosives-properties and testing methods // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2015. — V. 40, N 5. — P. 632–644.
- Türker L. Thermobaric and enhanced blast explosives (TBX and EBX) // *Defence Technol.* — 2016. — V. 12, N 6. — P. 423–445. — DOI: 10.1016/j.dt.2016.09.002.
- Вадхе П. П., Павар Р. Б., Синха Р. К., Астана С. Н., Субхананда Рао А. Алюминизированные литьевые взрывчатые вещества (обзор) // *Физика горения и взрыва.* — 2008. — Т. 44, № 4. — С. 98–115.
- Zhao N.-N., Wang B.-L., Li X. Effect of thermobaric explosive on strain rate // *Adv. Mater. Res.* — 2014. — V. 1081. — P. 348–352. — DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1081.348.
- Jiao Q. J., Wang Q., Nie J.-X., Guo X.-Y., Zhang W., Fan W. The effect of explosive percentage on underwater explosion energy release of hexanitrohexaazaisowurtzitane and octogen based aluminized explosives // *AIP Adv.* — 2018. — V. 8, N 3. — P. 1–7. — DOI: 10.1063/1.5023262.
- Xiang D.-L., Rong J.-L., Li J. Effect of Al/O ratio on the detonation performance and underwater explosion of HMX-based aluminized explosives // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2014. — V. 39, N 1. — P. 65–73. — DOI: 10.1002/prop.201300026.
- Geisler R. L. A global view of the use of Al fuel in solid rocket motors // 38th AIAA/ASME/ASE/ASEE Joint Propul. Conf. and Exhibit. — 2002. — P. 2002–3748.
- Terrence L. C., Richard A. Y., Grant A. R., et al. Enhancement of solid fuel combustion in a hybrid rocket motor using amorphous Ti—Al—B nanopowder additives // *J. Propul. Power.* — 2019. — V. 35, N 3. — P. 662–665. — DOI: 10.2514/1.B37330.
- White J. D. E., Reeves R. V., Son S. F., Mukasyan A. S. Thermal explosion in Al—Ni system: Influence of mechanical activation // *J. Phys. Chem. A.* — 2009. — V. 113, N 48. — P. 13541–13547.
- McCullum J., Pantoya M. L., Iacono S. T. Activating aluminum reactivity with fluoropolymer coatings for improved energetic composite combustion // *ACS Appl. Mater. Interfaces.* — 2015. — V. 7, N 33. — P. 18742–18749. — DOI: 10.1021/acsami.5b05238.
- Wen M.-P., Tang W., Dong P., Tang M.-F., Fu T., Zhan C.-H. Effect of binder content on residual stress of thermally compacted TATB based PBX // *Chin. J. Energ. Mater.* — 2017. — V. 25, N 8. — P. 661–666. — DOI: 10.11943/j.issn.1006-9941.2017.08.008.
- Jian X.-X., Song Y.-F., Zhao M.-H., et al. Preparation and performance of self-healing binder based on GAP // *Chin. J. Energ. Mater.* — 2019. — V. 27, N 2. — P. 131–136. — DOI: 10.11943/CJEM2018169.
- Ou Y.-P., Yan S., Jiao Q.-J., Guo X.-Y., Sun Y.-L. Design and application of binder system for castable polymer bonded explosive // *Acta Armamentar.* — 2018. — V. 39, N 1. — P. 63–70. — DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.01.007.
- Simić D., Sirovatka R., Andjelić U., Bogdanov J., Terzić S. Thermobaric effect comparison of cast thermobaric PBX and TNT in enclosure test // *New Trends Research Energ. Mater.* — 2016. — V. 16. — P. 948–953.
- Simić D., Andjelić U., Knežević D., et al. Thermobaric effects of cast composite explosives of different charge masses and dimensions // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2016. — V. 13, N 1. — P. 161–182. — DOI: 10.22211/cejem/64970.

18. **Xu Q.-P., Zhang Y.-L., Wang X.-J., Su J.-J., Liu Y., Huang F.-L.** Experimental performance assessment of layered thermobaric explosive in an explosion chamber // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2020. — V. 45, N 11. — P. 1729–1735. — DOI: 10.1002/prop.202000084.
19. **Zhao X.-Y., Wang B.-L., Li X.** Shock-wave characteristics of thermobaric explosive in free-field explosion // *Explos. Shock Waves.* — 2016. — V. 36, N 1. — P. 38–42.
20. **Chen Y., Xu S., Wu D.-J., Liu D.-B.** Experimental study of the explosion of aluminized explosives in air // *Centr. Eur. J. Energ. Mater.* — 2016. — V. 13, N 1. — P. 117–134. — DOI: 10.22211/cejem/64967.
21. **Mohamed A. K., Mostafa H. E., Elbasuney S.** Nanoscopic fuel-rich thermobaric formulations: Chemical composition optimization and sustained secondary combustion shock wave modulation // *J. Hazard. Mater.* — 2016. — V. 301. — P. 492–503. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2015.09.019.
22. **Kim C.-K., Lai M.-C., Zhang Z.-C., Cook G., Jr, Im K.-S.** Modeling and numerical simulation of afterburning of thermobaric explosives in a closed chamber // *Int. J. Precision Eng. Manuf.* — 2017. — V. 18, N 7. — P. 979–986. — DOI: 10.1007/s12541-017-0115-3.
23. **Cheng Y.-T.** Simulation and experimental study on the explosion shock wave of thermobaric explosives in different environments. — Nanjing: Nanjing Univ. of Sci. and Technol., 2016.
24. **Maiz L., Trzciński W. A., Paszula J.** Investigation of fireball temperatures in confined thermobaric explosions // *Propell., Explos., Pyrotech.* — 2017. — V. 42, N 2. — P. 142–148. — DOI: 10.1002/prop.201600150.
25. **Wu C.-Q., Hao H.** Numerical simulation of structural response and damage to simultaneous ground shock and airblast loads // *Int. J. Impact Eng.* — 2007. — V. 34, N 3. — P. 556–572. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2005.11.003.
26. **Wang S. S.** Terminal Effects. — Beijing: Science Press., 2019.
27. **Trélat S., Sochet I., Autrusson B., Cheval K., Loiseau O.** Impact of a shock wave on a structure on explosion at altitude // *J. Loss Prev. Process Ind.* — 2007. — V. 20, N 4-6. — P. 509–516. — DOI: 10.1016/j.jlp.2007.05.004.
28. **Kong X. S., Xiao L., Zheng C., Liu F., Wu W.-G.** Similarity consideration for scale-down model versus prototype on impact response of plates under blast loads // *Int. J. Impact Eng.* — 2017. — V. 101. — P. 32–41. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.11.006.
29. **Xiao W. F., Andrae M., Gebbeken N.** Air blast TNT equivalence factors of high explosive material PETN for bare charges // *J. Hazard. Mater.* — 2019. — V. 377, N 4. — P. 152–162. — DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.05.078.
30. **Yao S. J., Zhang D., Lu F. Y., Chen X. G., Zhao P. D.** A combined experimental and numerical investigation on the scaling laws for steel box structures subjected to internal blast loading // *Int. J. Impact Eng.* — 2017. — V. 102. — P. 36–46. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2016.12.003.
31. **Zhang Y. L., Li Z. R., Jiang H. Y., et al.** Experimental study of the characteristics of internal explosion pressure and power of thermobaric explosive // *Acta Armamentar.* — 2018. — V. 39, N 7. — P. 1333–1337. — DOI: 10.3969/j.issn.1000-1093.2018.07.011.
32. **Structures to resist the effects of accidental explosions.** — 2nd ed. — UFC 3-340-02. — US Army Corps of Engineers, 2014.
33. **Feldgun V. R., Karinski Y. S., Edri I., Yankelevsky D. Z.** Prediction of the quasi-static pressure in confined and partially confined explosions and its application to blast response simulation of flexible structures // *Int. J. Impact Eng.* — 2016. — V. 90. — P. 46–60. — DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2015.12.001.
34. **Wang D. W., Zhang D. Z., Li Y. R., Wang C. L., Liu W. X., Wang H.** Experiment investigation on quasi-static pressure in explosion containment vessels // *Acta Armamentar.* — 2012. — V. 33, N 12. — P. 1493–1497.
35. **Zhang Y. L., Su J. J., Li Z. R., et al.** Quasi-static pressure characteristic of TNT's internal explosion // *Explos. Shock Waves.* — 2018. — V. 38, N 6. — P. 1429–1433. — DOI: 10.11883/bzycj-2017-0170.

Поступила в редакцию 22.01.2021.

После доработки 12.03.2021.

Принята к публикации 21.04.2021.