

МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ И ИХ ПРЕДЕЛЫ ПО МОЩНОСТИ И СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ

В. И. Пепекин, С. А. Губин

Институт химической физики им. Н. Н. Семенова РАН, 119991 Москва, kors@polymer.chph.ras.ru

Рассмотрены методики определения метательной способности взрывчатых веществ (ВВ). Показаны общие и отличительные особенности методик по торцевому метанию пластин и разлету оболочки. Приведены экспериментальные данные по метательной способности индивидуальных ВВ. Рассмотрено влияние металлизированных добавок на бризантное (метательную способность) и фугасное действие взрывчатых композиций. Предложен теоретический метод оценки метательной способности, и рассчитана метательная способность безводородных ВВ на основе экспериментальных данных по энтальпиям образования и плотности монокристаллов. Обсуждены и оценены предельные возможности органических ВВ по мощности и скорости детонации. Рассмотрены перспективные направления в изучении свойств ВВ.

Ключевые слова: метательная способность, фугасность, скорость детонации, мощность, взрывчатые вещества.

ВВЕДЕНИЕ

Двумя основными факторами действия продуктов детонации (ПД) взрывчатых веществ (ВВ) на окружающую среду является их бризантное и фугасное действие. Под фугасным действием понимается совершение работы ПД в процессе разлета. Поэтому часто вместо термина «фугасность» применяется термин «работоспособность». Экспериментальное определение работоспособности ВВ представляет собой непростую задачу, поскольку конечные состояния ПД одного и того же ВВ в разных процессах совершения работы различаются и, кроме того, степени реализации максимальной полезной работы, которую могут совершать ПД, также отличаются в разных процессах. Поэтому существует несколько экспериментальных методов определения работоспособности ВВ, в том числе по увеличению объема свинцовой бомбы и по отклонению баллистического маятника. Бризантное действие ВВ определяется по обжатию медных крешеров на бризантометре. В последние годы используется понятие метательной способности, которое характеризует действие взрыва и определяет мощность ВВ. Метательную способность выражают в отношении скорости метания тела

ПД рассматриваемых ВВ к скорости метания тела ПД эталонного ВВ.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ ВВ

Метательная способность экспериментально определяется двумя общепринятыми способами: по торцевому метанию пластин и методом «цилиндр-теста», в котором фиксируется скорость разлета оболочки цилиндра. Экспериментальная схема установки «цилиндр-тест» приведена на рис. 1. О мощности ВВ судят по относительной метательной способности. В «цилиндр-тесте» за эталон принята кинетическая энергия оболочки, разгоняемой ПД состава тротил — гексоген (ТГ) 36/64. Экспериментальные данные показывают, что для большинства ВВ цилиндрическая

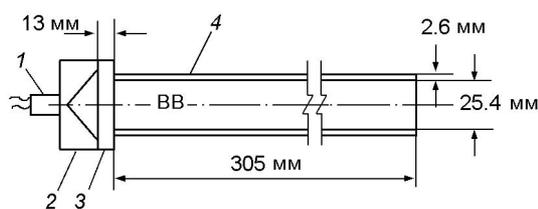


Рис. 1. Схема установки «цилиндр-тест»:

1 — детонатор, 2 — плоскостолбовая линза, 3 — тротил/гексоген 36/64, 4 — оболочка цилиндра из меди

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

оболочка около 75 % кинетической энергии приобретает на расстоянии $R = 1.33R_0$ (R_0 — внешний радиус метаемого цилиндра до взрыва ВВ) и около 90 % кинетической энергии — на расстоянии $R = 2R_0$ [1]. Экспериментальные результаты по скоростям разгона цилиндрической оболочки разными ВВ приведены в работах [1–3]. Эти данные не только характеризуют мощность ВВ, но и служат основой для нахождения коэффициентов уравнений, описывающих изоэнтропы расширяющихся ПД.

Отечественный аналог (методика Т-20), используемый при изучении метания цилиндрической оболочки, принципиально не отличается от «цилиндр-теста». Отличие связано лишь с регистрацией (фотохронографическая регистрация по отсечке на клине из оргстекла).

Схема установки для исследования метательной способности ВВ по торцевому метанию показана на рис. 2 на примере экспериментального узла методики М-40. В методике М-40 фиксируются диаграммы разгона стальных пластин диаметром 40 мм и толщиной 4 мм, метаемых с торца заряда цилиндрической формы размером 40×40 мм, помещенного в толстостенную стальную оболочку. От-

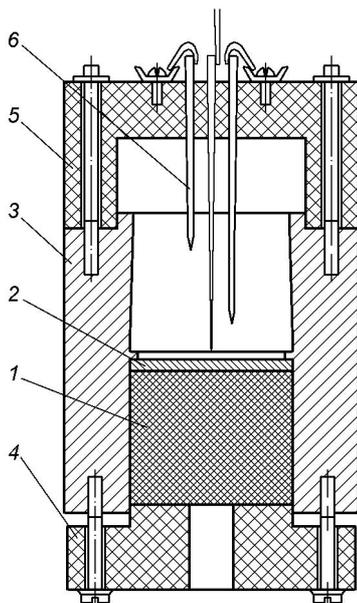


Рис. 2. Экспериментальный узел методики М-40: 1 — исследуемое ВВ, 2 — стальная пластина, 3 — корпус, 4 — поджим, 5 — фланец (измерительный блок), 6 — датчики-иглы

носительная метательная способность (η) ВВ определяется по найденным из эксперимента скоростям и вычисленным до опыта массам пластин, приходящимся на единичную поверхность ρH (ρ и H — плотность и толщина пластины). Сравнение метательной способности исследуемого ВВ с «эталоном» проводится с использованием пластин с одинаковыми значениями ρH при одинаковых температуре и базе (l_i) по формуле

$$\eta_{\text{ВВ}}^{l_i} = \sqrt{\frac{E_{\text{ВВ}}}{E_{\text{эт}}}} \cdot 100 \%,$$

$E_{\text{ВВ}}$ и $E_{\text{эт}}$ — кинетическая энергия единичной поверхности метаемой пластины для исследуемого ВВ и эталона соответственно, $l_i = 8 \div 40$ мм в зависимости от числа игл-датчиков. Эталоном в методике М-40 служит октоген плотностью 1.875 г/см^3 , стандартная база определения скорости метания пластин равна расстоянию 40 мм от торца заряда. Аналогом методики М-40 является методика М-60, детально описанная в [4]. Она отличается от М-40 тем, что исследуемый заряд имеет несколько большие размеры — диаметр 60 мм, длина 50 мм, толщина метаемой пластины 5 мм, а стандартная база определения скорости метания пластины составляет 52 мм от торца заряда. В техническом исполнении обе методики идентичны. В табл. 1 представлены полученные по методике М-40 экспериментальные данные по относительной метательной способности 12 различных ВВ. Из таблицы следует определяющая роль плотности ВВ: по мере ее увеличения мощность ВВ возрастает. Плотность заряда определяет плотность энерговыделения в единице объема и высокую мощность во фронте. Из-за высокой плотности энерговыделения в зоне химической реакции и большой мощности во фронте продукты детонации приобретают запас внутренней и кинетической энергии, который расходуется на метание пластин. Из газообразных ПД при метании основная роль принадлежит диоксиду углерода, обладающему среди прочих газообразных продуктов наибольшими молекулярной массой и энтальпией образования. Роль CO_2 наиболее наглядно прослеживается на метательной способности безводородных ВВ. Результаты термодинамических расчетов [5] показали, что температура ПД безводородных композиций превышает температуру ПД композиций с водородосодержащими горю-

Таблица 1

Относительная метательная способность исследованных ВВ

Соединение	Брутто-формула	ρ , г/см ³	η , %
Октоген	$C_4H_8O_8N_4$	1.875	100
Гексанитробензол	$C_6N_6O_{12}$	1.97	106
Бис(дифтораминодинитроэтил)нитрамин	$C_4H_4O_{10}N_8F_4$	1.995	105.2
Динитрогуанидин	$CH_3O_4N_5$	1.843	95.6
Бис(фтординитроэтил)нитрамин	$C_4H_4O_{10}N_6F_2$	1.87	94.6
Тэн	$C_5H_8O_{12}N_4$	1.738	93.9
Бис(тринитроэтил)нитрамин	$C_4H_4O_{14}N_8$	1.90	93.1
Тетрил	$C_7H_5O_8N_5$	1.693	87.1
Бис(фтординитроэтил)формаль	$C_5H_6O_{10}N_4F_2$	1.60	82.6
Нитрогуанидин	$CH_4O_2N_4$	1.695	76.0
Тротил	$C_7H_5O_6N_3$	1.596	74.0
Динитропиперазин	$C_4H_4O_4N_4$	1.491	72.1

чими примерно на 500 К. С ростом начальной плотности взрывчатых безводородных составов высокое давление в точке Чепмена — Жуге подавляет диссоциацию газообразных продуктов. При этом в ПД повышается концентрация CO_2 . В результате этого давление ПД безводородных ВВ с плотностью, соответствующей плотности монокристалла, оказывается достаточно высоким (превышает 40 ГПа). Возможность образования диоксида углерода в ПД определяется не только химическим элементарным составом ВВ, но и его кислородным балансом.

Общим для методик по метанию пластин и разлета оболочки является получение экспериментальных данных в условиях, когда химические реакции при взрывчатом разложении индивидуальных ВВ и их смесей полностью завершаются в зоне химической реакции до начала ускорения пластины или оболочки. Запас внутренней и кинетической энергии ПД при этом расходуется на ускорение пластины или оболочки.

В работе [6] приведен альтернативный метод определения скорости метания пластины после пролета базы 10 ÷ 15 мм, схема которого изображена на рис. 3. Детонация заряда ВВ диаметром 20 или 40 мм и высотой 10 мм инициировалась ударом алюминиевой пластины толщиной 1 мм. На торец заряда, противоположный месту инициирования, помещалась стальная (толщина 1 мм) или алюминиевая

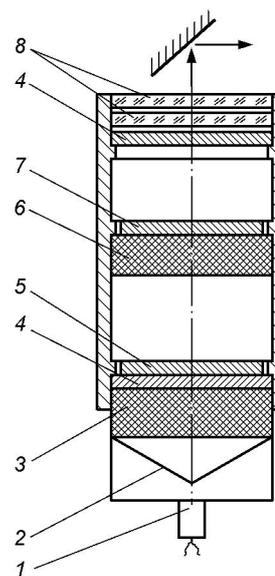


Рис. 3. Схема испытаний по методу [6]:

1 — капсюль-детонатор, 2 — плосковолновая линза, 3 — дополнительное ВВ, 4 — медная пластина, 5 — алюминиевая пластина, 6 — исследуемое ВВ, 7 — стальная пластина (или алюминиевая), 8 — набор пластин из плексигласа

пластина (толщина 1.44 мм). В опыте регистрировались скорости ударных волн в наборе плексигласовых пластин, по которому ударяла металлическая пластина. Для того чтобы вести измерения в диапазоне давлений, где ударные адиабаты стали и плексигласа наиболее достоверны, перед плексигласовыми пла-

стинами помещалась медная пластина толщиной 1 мм. Искомая скорость метания находилась из известной скорости ударной волны в плексиглазе в ходе совместного рассмотрения ударных волн в плексиглазе, меди и материале пластин. Фиксация велась оптическим методом по высвечиванию воздушных зазоров в измерительной сборке из медной и плексиглазовых пластин. В экспериментах [6], проведенных по этой методике, установлено увеличение скорости метания пластины для смеси гексогена с порошком алюминия. Недостатком метода является то, что не обеспечивается плоский фронт детонационной волны из-за деформации в блоке инициирования и действия боковой волны разгрузки и, как следствие, наблюдается значительный разброс результатов при проведении серии опытов. Измерения по этой методике в [7] при исследовании влияния инертных добавок на скорость метания пластин показали, что снижение скорости определяется плотностью добавки. В отличие от работы [6], эффект введения порошка алюминия в заряды гексогена был отрицательным, наблюдалось уменьшение скорости метания. В работе [7] осуществлялся контроль целостности метаемой пластины. Методика, описанная в [6], не получила развития и применения.

МЕТАТЕЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ И ФУГАСНОСТЬ МЕТАЛЛИЗИРОВАННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ КОМПОЗИЦИЙ

Введение высококалорийных металлизированных добавок в заряд ВВ рассматривается как один из возможных путей повышения мощности ВВ. Этот путь не новый и был применен более 100 лет назад, когда началось исследование и применение аммоналов — взрывчатых систем на основе аммиачной селитры и алюминия. Введение алюминия в аммиачную селитру (аммонал 80/20) позволило повысить скорость детонации до 4000 м/с при плотности ВВ 1.0 г/см³. Это значительно превышает возможную скорость детонации аммиачной селитры (2500 м/с). Аммоналы по бризантности уступали таким уже известным в то время ароматическим нитросоединениям, как пикриновая кислота и тротил. Однако фугасное действие аммоналов значительно выше.

Введение металлизированных добавок в бризантные ВВ уменьшает скорость детонации и не увеличивает мощность (метательную спо-

собность). Введение добавок в мощные ВВ приводит к спаду давления во фронте детонации, причем более пологому, что увеличивает время воздействия давления и повышает фугасность. Кроме времени воздействия давления фугасность зависит также от объема и состава газообразных ПД — рабочего тела, совершающего фугасное действие. На практике объем газов и калорийность металлизированных добавок качественно оценивают исходя из уравнения взрывчатого разложения с максимальным энерговыделением — константой металлизированной композиции. Термин «теплота взрыва» имеет смысл и значение только для промышленных и суррогатных ВВ, когда происходит не детонация в идеальном режиме, а взрывчатый распад, нередко с разбросом непрореагировавшего вещества. В этом случае химическую реакцию распада и объем газов записывают и оценивают по приближенному правилу Бринкли — Вильсона с точностью около 30 %.

Для бризантных ВВ или композиций термин «теплота взрыва» не отражает сути процесса детонации и правильнее пользоваться термином «химическая теплота ПД», которая рассчитывается как разность энтальпий образования исходного вещества и продуктов химических реакций. В книге [4] для бризантных ВВ используется термин «теплота взрыва», а сама теплота взрыва делится на детонационную ($Q_{\text{дет}}$) и фугасную ($Q_{\text{фуг}}$). Обе эти величины представляют собой химическую теплоту ПД при разной степени их расширения.

Для бризантных ВВ и композиций химическая теплота ПД при изоэнтропическом расширении рассчитывается путем решения термодинамической задачи для разных степеней расширения. При степени расширения $V/V_0 = 2$, где V — текущий, а V_0 — начальный объем ПД, рассчитанное значение химической теплоты равно экспериментальной «теплоте взрыва», или $Q_{\text{дет}}$ (заряд в оболочке), с погрешностью менее 4 % [5].

Фугасная теплота взрыва $Q_{\text{фуг}}$ — это химическая теплота ПД, когда их расширение ограничено стенками калориметрической бомбы (заряд без оболочки свободно подвешен в бомбе). В этом случае $V_6/V_3 \approx 160 \div 200$, где V_6 — объем бомбы, а V_3 — объем заряда. Расчет осложняется тем, что происходят удар и отражение ПД от стенок бомбы и возрастает температура ПД. Реальная фугасная химическая теплота соответствует условиям, когда

ПД при расширении достигают температуры и давления окружающей среды. Экспериментальные значения теплоты взрыва [8] являются только частью фугасной химической теплоты. Эффективность действия металлизированных композиций в реальной жизни характеризуют другими параметрами, а не энерговыделением. Экспериментальные данные по теплотам взрыва, а также эмпирический метод их расчета [8, 9] лишь создают видимость их необходимости и значимости, поскольку на практике и в расчетах не используются. В фугасных боеприпасах (осколочного действия, подводного взрыва и т. п.) бризантное действие усиливается фугасным (разрушающим) эффектом за счет меняющегося давления при изоэнтропическом расширении ПД.

В практических целях введение металлизированных добавок не всегда оправдано. Оно не только увеличивает фугасное действие, но и снижает мощность (метательную способность) и скорость детонации. Экспериментально показано, что введение таких добавок, как ультрадисперсный алюминий, $TiH_{1.98}$, диборид алюминия и интерметаллид Al_3Mg_4 , не приводит к увеличению метательной способности относительно базового ВВ. Установлено также снижение метательной способности при введении наноразмерного алюминия (40, 60 и 200 нм) в октоген (состав РАХ-3) и гексоген (состав РАХ-28) [10]. Введение металлизированных добавок в состав мощных ВВ делает задачу повышения мощности нереальной.

Из всех металлизированных добавок наиболее высококалорийной является алюминий в предположении образования оксида алюминия в процессе взрыва. Однако при температурах детонации в зоне химических реакций газообразный оксид алюминия существовать не может, образуется его субоксид [11, 12]. Химический анализ газов над поверхностью кипящего оксида алюминия и спектральный анализ газообразных продуктов при горении алюминия в кислороде свидетельствуют о том, что оксид алюминия в газообразном виде не существует, распадаясь на низшие субоксиды [13]. Исследование механизма горения алюминия позволило О. И. Лейпунскому с сотрудниками, исходя из факта отсутствия Al_2O_3 в газообразном виде, предложить оригинальную теорию, учитывающую образование конденсированного оксида алюминия путем химической конденсации газообразных субоксидов алюминия, оттекающих

с поверхности частицы алюминия. Термодинамика процесса горения алюминия изложена в экспериментальных работах [14, 15].

Введение алюминия повышает мощность, если базовое ВВ содержит активный фтор, что характерно для дифтораминополинитросоединений [16]. В зоне химической реакции алюминий образует газообразный устойчивый трифторид алюминия с энтальпией образования $\Delta H_f^0(AlF_3)_{газ} = 1350$ кДж/моль. Экспериментально установлено, что введение ультрадисперсного алюминия существенно увеличивает метательную способность бис(дифтораминодинитроэтил)нитрамина до 109.5 % [17]. Этот результат ненамного уступает (всего ≈ 2 %) метательной способности гексанитрогексаазаизовюрцитана [18], самого мощного ВВ на данный момент.

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕТАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ

Термодинамический анализ позволяет оценить метательную способность ВВ, для которых отсутствуют экспериментальные данные. При этом необходимо знать химический состав ВВ, его энтальпию образования и плотность. Термодинамическая модель оценки метательной способности ВВ строится на следующих предположениях:

- 1) процесс метания адиабатичный;
- 2) увеличение внутренней энергии метаемого тела пренебрежимо мало;
- 3) в каждый момент времени массовая скорость ПД, соответствующая установившемуся течению на поздних стадиях процесса метания, пропорциональна лагранжевой (массовой) координате в степени, обратной размерности процесса разлета ПД, т. е.

$$w \sim m^{1/n} \quad \text{или} \quad m = A + Bw^n, \quad (1)$$

где $n = 1$ в случае одномерного, $n = 2$ в случае цилиндрически-симметричного и $n = 3$ в случае сферически-симметричного течения ПД;

- 4) скорость в каждой точке метаемого тела однородна и равна скорости этого тела.

В [19] вместо предположения 3 при оценке скорости метаемого тела используются два предположения: об однородности плотности ПД и линейной зависимости массовой скорости ПД от эйлеровой координаты в каждый момент времени. Там же показано, что допущения эквивалентны предположению о линейной зависимости скорости ПД от лагранжевой

координаты при одномерном течении. Можно доказать, что предположения об однородности плотности ПД и линейной зависимости массовой скорости ПД от эйлеровой координаты эквивалентны предположению 3 не только в одномерном случае. Действительно, в одномерном случае лагранжева и эйлерова координаты связаны соотношением

$$dm = \rho S dx. \quad (2)$$

Из (1) связь лагранжевой координаты и скорости получается в виде

$$dm = B dw. \quad (3)$$

Выражая плотность из (2) и (3), получаем

$$\rho = \frac{B}{S} \frac{dw}{dx}, \quad (4)$$

где B/S — константа в конкретный момент времени.

Из (4) следует, что предположение о линейности зависимости скорости от эйлеровой координаты приводит к однородности плотности во всем объеме ПД и, наоборот, предположение об однородности плотности приводит к линейной зависимости скорости от эйлеровой координаты.

Для процессов, рассматриваемых в цилиндрических и сферических координатах, получаются следующие соотношения:

при $n = 2$

$$dm = \rho 2\pi l r dr, \quad \rho = \frac{B}{\pi l} \frac{w}{r} \frac{dw}{dr}, \quad (5)$$

при $n = 3$

$$dm = 4\pi r^2 dr = 3Bw^2 dw, \quad (6)$$

$$\rho = \frac{3B}{4\pi} \frac{w^2}{r^2} \frac{dw}{dr}.$$

Закон сохранения энергии (с учетом предположений 1 и 2) для замкнутой системы, состоящей из ВВ и метаемого тела в начальный момент времени и из ПД и метаемого тела в последующие моменты, имеет вид

$$U_{ВВ} = U_{ПД} + E_{ПД} + E_{МТ}, \quad (7)$$

где $U_{ВВ}$ — внутренняя энергия исходного ВВ; $U_{ПД}$ — внутренняя энергия ПД в данный момент времени; $E_{ПД}$ — кинетическая энергия

ПД в данный момент времени; $E_{МТ}$ — кинетическая энергия метаемого тела в данный момент времени.

Кинетическая энергия метаемого тела записывается как

$$E_{МТ} = m_{МТ} w_{МТ}^2 / 2. \quad (8)$$

Масса ПД равна массе ВВ. Поэтому, деля члены уравнения сохранения энергии (7) на массу ВВ и переходя к удельным значениям внутренней энергии, с учетом (8) можем записать:

$$2(u_{ВВ} - u_{ПД}) = \frac{2}{m_{ВВ}} E_{ПД} + \frac{m_{МТ}}{m_{ВВ}} w_{МТ}^2, \quad (9)$$

где $u_{ПД}$ — среднее значение удельной внутренней энергии ПД.

Из закона сохранения энергии (7) следует, что кинетическая энергия ПД и метаемого тела определяется разностью внутренних энергий ВВ и ПД в данный момент. Разность внутренних энергий ВВ и ПД характеризует максимальную работу, которую может совершить 1 кг ПД над окружающей средой в адиабатическом процессе, т. е. характеризует максимальную работоспособность ВВ. Поэтому разность удельных внутренних энергий ВВ и ПД при расширении можно назвать характеристической энергией при данной степени расширения ПД. Характеристическая энергия равна химической теплоте, выделившейся в ПД, за вычетом тепловой и упругой составляющих внутренней энергии ПД. В этом смысле характеристическая энергия представляет собой максимальную, полезно реализованную часть химической теплоты, т. е. ту часть теплоты, которая перейдет в окружающую среду в виде работы в адиабатическом процессе расширения ПД. Поэтому отношение характеристической энергии к химической теплоте на изоэнтропе можно назвать коэффициентом максимальной полезной реализации химической теплоты в процессе разлета ПД.

На основании характеристической энергии можно ввести понятие характеристической скорости ПД при изоэнтропическом расширении:

$$w_* = \sqrt{2(u_{ВВ} - u_{ПД})}, \quad (10)$$

которая зависит от тех же параметров, что и характеристическая энергия.

Используя характеристическую скорость ПД и определение коэффициента нагрузки

$$Z = m_{\text{МТ}}/m_{\text{ВВ}}, \quad (11)$$

перепишем уравнение (9) в виде

$$2E_{\text{ПД}}/m_{\text{ВВ}} + Zw_{\text{ПД}}^2 = w_*^2, \quad (12)$$

где

$$E_{\text{ПД}} = \frac{1}{2} \int_0^{m_{\text{ВВ}}} w^2 dm. \quad (13)$$

При рассмотрении метания вводят коэффициент отбора энергии, определяющий часть характеристической энергии, которая идет на метание тела, т. е. переходит в кинетическую энергию метаемого тела:

$$K_1 = \frac{E_{\text{МТ}}}{U_{\text{ВВ}} - U_{\text{ПД}}} = Z \frac{w_{\text{МТ}}^2}{w_*^2}. \quad (14)$$

Коэффициент отбора энергии определяет часть максимальной, полезно реализованной химической теплоты, а произведение коэффициента отбора энергии на коэффициент максимальной полезной реализации химической теплоты дает коэффициент действительной полезной реализации химической теплоты.

Можно также ввести коэффициент распределения энергии, который показывает, в каком отношении распределяется характеристическая энергия между кинетической энергией метаемого тела и кинетической энергией ПД:

$$K_2 = \frac{E_{\text{МТ}}}{E_{\text{ПД}}} = \frac{K_1}{1 - K_1} = \frac{Zw_{\text{МТ}}^2}{w_*^2 - Zw_{\text{МТ}}^2}. \quad (15)$$

В одномерном плоском случае метания тела в жестком канале от закрытого жесткого торца кинетическая энергия ПД рассчитывается с учетом предположения 3 следующим образом. Лагранжеву массовую координату ПД будем отсчитывать от закрытого торца. Тогда из формулы (1) при $n = 1$ получаем граничные условия для определения коэффициентов A и B :

$$m = 0: \quad w = 0, \quad A = 0;$$

$$m = m_{\text{ВВ}}: \quad w = w_{\text{МТ}}, \quad B = m_{\text{ВВ}}/w_{\text{МТ}}.$$

Заменяя переменную интегрирования в (13) с учетом того, что $dm = (m_{\text{ВВ}}/w_{\text{МТ}}) dw$, получаем

$$E_{\text{ПД}} = \frac{1}{2} \frac{m_{\text{ВВ}}}{w_{\text{МТ}}} \int_0^{w_{\text{МТ}}} w^2 dw = \frac{m_{\text{ВВ}}w_{\text{МТ}}^2}{6}.$$

Подставляя последнее выражение для кинетической энергии ПД в уравнение (12) и решая его относительно скорости метаемого тела, находим окончательное выражение для расчета скорости тела, метаемого зарядом ВВ в жестком канале от закрытого жесткого торца:

$$w_{\text{МТ}} = (Z + 1/3)^{-1/2} w_*. \quad (16)$$

Коэффициенты отбора и распределения энергии в этом случае выражаются как

$$K_1 = Z/(Z + 1/3), \quad K_2 = 3Z. \quad (17)$$

Аналогично рассмотренному выше случаю одномерного метания можно получить формулы для скорости метаемого тела и коэффициентов отбора и распределения энергии в случае симметричного метания бесконечно длинной цилиндрической оболочки зарядом ВВ, находящимся внутри оболочки, и в случае симметричного метания сферической оболочки зарядом ВВ, расположенным внутри сферы. При этом оказалось, что симметричное метание описывается едиными зависимостями для скорости метаемого тела и коэффициентов K_1 и K_2 при любых n :

$$w_{\text{МТ}} = \left(Z + \frac{n}{n+2} \right)^{-1/2} w_*, \quad (18)$$

$$K_1 = \frac{Z}{Z + n/(n+2)}, \quad (19)$$

$$K_2 = \frac{n+2}{n} Z. \quad (20)$$

Значение скорости метаемого тела определяется, как следует из формулы (18), только тремя параметрами: характеристической скоростью ПД, коэффициентом нагрузки и геометрией процесса разлета ПД. Коэффициент отбора и распределения зависит только от геометрии и коэффициента нагрузки и не зависит от свойств ВВ или ПД.

Среднее значение удельной внутренней энергии ПД на изоэнтропе, которое используется в определении характеристической энергии и характеристической скорости, вычисляется по формуле

$$u_{\text{ПД}} = \frac{1}{m_{\text{ВВ}}} \int_0^{m_{\text{ВВ}}} u \, dm, \quad (21)$$

где $u_{\text{ПД}}$ — удельная внутренняя энергия ПД в точке. Состояния ПД в процессе изоэнтропического разлета различаются от точки к точке в один и тот же момент времени, и соответственно изменяется внутренняя энергия ПД. Непосредственное вычисление интеграла в (21) представляет трудности, связанные в основном с определением пределов интегрирования при переходе к другим переменным интегрирования, тогда как получающуюся подынтегральную функцию можно аппроксимировать на основании термодинамических расчетов.

Однако существует другая возможность определения удельной внутренней энергии ПД, которая требует привлечения опорных экспериментальных данных. Действительно, внутренняя энергия ПД при изоэнтропическом расширении изменяется непрерывно от значения в точке Чепмена — Жуге до значения для полностью расширившихся ПД. Поэтому существует некоторая степень расширения $\bar{V} = V/V_0$, при которой удельная внутренняя энергия ПД равна среднему значению удельной внутренней энергии ПД, определяемой формулой (21). Сопоставление результатов термодинамической оценки метательной способности, рассчитанной с разными значениями эффективной степени расширения \bar{V} для определения характеристической скорости w_* , с имеющимися экспериментальными данными позволяет выбрать наилучшее значение \bar{V} для данной конкретной экспериментальной методики определения метательной способности, поскольку средние значения удельной внутренней энергии ПД при степени расширения \bar{V} могут различаться в разных методиках. На рис. 4 представлена рассчитанная с помощью уравнения состояния ВКВ–RR зависимость характеристической скорости w_* от степени расширения $\bar{V}_{\text{окт}}$ октогена. На этом же графике штриховой линией параллельно оси абсцисс показано значение характеристической скорости $w_{* \text{эксп}} = 2970$ м/с [19], полученное по формуле (18) из экспериментальных данных по метанию цилиндрической оболочки. В [19] из сопоставления с экспериментальными данными по метанию цилиндрической оболочки для нескольких ВВ выбрано значение $\bar{V} = 3$ при расчетах характеристической скорости с использованием уравнения состояния JCZ3. В данной работе

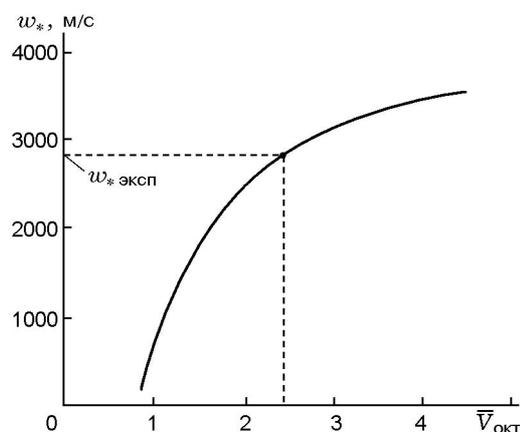


Рис. 4. Зависимость характеристической скорости w_* от степени расширения ПД октогена при $\rho = 1.890$ г/см³ (рассчитана с использованием уравнения состояния ВКВ–RR)

для вычисления характеристической скорости использовалось значение $\bar{V} = 2.5$. Как видно из рис. 4, при $\bar{V} = 2.5$ значение характеристической скорости, рассчитанное с использованием уравнения состояния ВКВ–RR, отличается от экспериментальной величины на 31 м/с, или на 1.04 %.

В табл. 2 представлены значения характеристической скорости нескольких индивидуальных и смесевых ВВ состава СННО, вычисленные по уравнениям состояния ВКВ–RR и JCZ3 [20]. В таблице приведены также экспериментальные [19] значения характеристической скорости и абсолютные и относительные отклонения расчетных значений от экспериментальных. Среднеквадратичные значения этих отклонений составили: по уравнению ВКВ–RR при $\bar{V} = 2.5$ для девяти ВВ — 54.1 м/с и 2.11 %, по уравнению JCZ3 при $\bar{V} = 3$ для шести ВВ — 76.0 м/с и 2.96 %.

В табл. 3 представлены значения относительной метательной способности нескольких индивидуальных и смесевых ВВ состава СННО, рассчитанные по формуле (18) с использованием уравнения состояния ВКВ–RR при $\bar{V} = 2.5$, а также результаты экспериментальных измерений при метании медной цилиндрической оболочки с внутренним диаметром 25.4 и толщиной стенки 2.6 мм. Относительная метательная способность η определялась как отношение скорости оболочки, метаемой рассматриваемым ВВ, к скорости оболочки, метаемой эталонным ВВ (выражено в про-

Таблица 2

Экспериментальные и рассчитанные по уравнениям состояния ВКВ-RR и JCZ3 характеристические скорости ВВ

ВВ	ρ , г/см ³	$w_{* \text{эксп}}$, м/с	ВКВ-RR, $\bar{V} = 2.5$			JCZ3, $\bar{V} = 3$		
			w_* , м/с	Δw_* , м/с	δw_*	w_* , м/с	Δw_* , м/с	δw_*
Октоген	1.89	2970	3001	31	1.04	2980	10	0.34
Гексоген	1.77	2930	2937	7	0.24	2900	-30	-1.02
Тэн	1.70	2930	2896	-34	-1.16	2850	-80	-2.73
Октол	1.821	2830	2867	37	1.31	—	—	—
Циклотол	1.754	2790	2829	39	1.40	—	—	—
Состав «В»	1.717	2710	2752	42	1.55	—	—	—
Тетрил	1.600	2500	2626	126	5.04	2660	160	6.40
Нитрометан	1.140	2410	2468	58	2.41	2420	10	0.41
Тротил	1.630	2440	2423	-17	-0.70	2400	-40	-1.64

Таблица 3

Экспериментальные и расчетные значения относительной метательной способности

ВВ	ρ , г/см ³	Z	w_{MT} , м/с	$\eta_{\text{эксп}}$, %	$\eta_{\text{расч}}$, %	$\Delta\eta$, %	$\sigma\eta$, %
Октоген	1.89	2.131	1850	100	100	0	0
Тэн	1.76	2.284	1736	95.3	93.8	-1.5	-1.57
Октол	1.821	2.213	1740	93.2	94.1	0.9	0.97
Циклотол	1.754	2.298	1691	92.1	91.4	-0.7	-0.76
Состав «В»	1.717	2.348	1631	87.4	88.2	0.8	0.92
Тротил	1.630	2.473	1405	75.4	75.9	0.5	0.66
Нитрометан	1.140	3.526	1230	67.0	66.5	-0.5	-0.75

центах). Экспериментальные данные по абсолютным значениям скорости оболочки на расстоянии $R - R_0 = 26$ мм заимствованы из [2]. За эталон принят октоген. Как следует из табл. 3, где приведены также абсолютные и относительные отклонения расчетных значений от экспериментальных, результаты расчетов по термодинамической модели оценки метательной способности ВВ очень хорошо согласуются с экспериментальными данными. Среднеквадратичные значения этих отклонений шести ВВ (без учета октогена) составили: для абсолютного отклонения — 0.88 %, для относительно — 0.99 %.

В работе [5] представлены параметры теоретически обоснованного уравнения состояния плотных флюидов (газообразных ПД, находящихся в сверхкритическом состоянии, когда пропадают различия между газом и жидкостью) и уравнений состояния для твердых и жидких наночастиц графита и алмаза, обра-

зующихся в ПД. Термодинамический код [20] на основе этих уравнений состояния позволяет с высокой степенью точности оценивать метательную способность смесевых и индивидуальных ВВ. Расчетные значения метательной способности и экспериментальные данные для ряда ВВ представлены в табл. 4. Следует отметить, что разработанная термодинамически

Таблица 4

Относительная метательная способность ВВ

ВВ	ρ , г/см ³	η , % ($V/V_0 = 2.85$)	$\eta_{\text{эксп}}$ [2]
Октоген	1.890	100	100
Октол	1.824	93.1	93.2
Циклотол	1.755	92.4	92.1
Состав «В»	1.717	88.6	87.4
Нитрометан	1.140	67.6	67.0
Тротил	1.630	74.1	75.4

Таблица 5
Относительная метательная способность
безводородных ВВ

ВВ	ρ , г/см ³	ΔH_f^0 , кДж/моль	η , %
C ₈ N ₁₂ O ₁₂	1.950	1145.6	105.97
C ₄ N ₈ O ₈	2.003	818.4	105.17
C ₄ N ₆ O ₆	2.020	634.7	109.83
C ₈ N ₁₄ O ₁₂	1.990	1317.5	107.69
C ₆ N ₁₀ O ₆	1.990	1159.4	106.54
C ₄ N ₆ O ₅	1.930	626.8	104.87

согласованная модель детонации ВВ позволяет оценивать их метательную способность с погрешностью менее 1 %. В табл. 5 на основе экспериментальных данных по энтальпиям образования и плотностям монокристаллов приведены результаты расчета относительной метательной способности для шести ВВ состава СНО (химические формулы ВВ из табл. 5 приведены в приложении).

О ПРЕДЕЛАХ ОРГАНИЧЕСКИХ ВВ ПО МОЩНОСТИ И СКОРОСТИ ДЕТОНАЦИИ. НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВВ

Как следует из табл. 5, метательная способность безводородных ВВ очень высока — $\eta = 104 \div 109$ %. Мощность безводородных ВВ близка к пределу мощности для органических ВВ. Экспериментальное исследование чувствительности безводородных ВВ (требующее для испытаний небольшого количества вещества — около 1.5 ÷ 2.0 г) показывает, что эти ВВ относятся к классу инициирующих ВВ как по возбуждению детонации, так и по детонационной способности (детонация распространяется по слою ВВ толщиной 7 мкм).

К предельным параметрам близки параметры динитродиазенофуросана C₄N₈O₆ со скоростью детонации $D \approx 10\,000$ м/с, полученной экстраполяцией экспериментальной зависимости $D(\rho)$ на плотность монокристалла [21], а также параметры гексанитрогексаазоизовюрцитана C₆H₁₂N₁₂O₁₂ (CL-20) со скоростью $D \approx 9\,900$ м/с, полученной экстраполяцией экспериментальных данных [18, 22] на плотность монокристалла ϵ -CL-20 2.044 г/см³ [18]. Близка к пределу органических ВВ по мощности смесевая система на основе ВВ-окислителя

бис(дифтораминодинитроэтил)нитрамина [17]. Что касается предельных по мощности возможностей органических ВВ, то термодинамические расчеты скорости детонации и эффективности действия виртуальных соединений, содержащих различные эксплозофорные группы, при максимально возможной плотности 2.06 г/см³ показали, что в пределе можно достичь скорости детонации 10 500 м/с и относительной метательной способности 112 ÷ 114 %. Априори виртуальное ВВ с такими характеристиками будет термически нестабильным, высокочувствительным и тем самым практически бесперспективным. Синтезированные к настоящему времени ВВ находятся рядом с границей предельных возможностей. Резерв составляет 1.5 ÷ 2 %.

К аналогичному выводу о пределе скорости детонации приводит оценка с физических и кинетических позиций. При детонации конденсированных ВВ импульс давления передается через возбуждение колебательных степеней свободы атомов в молекулах. Частоты этих колебаний варьируют в пределах $10^{13} \div 10^{14}$ с⁻¹. Даже очень высокое давление, развиваемое в детонационном режиме (максимум 40 ÷ 45 ГПа), не в состоянии деформировать структуру молекулы настолько, чтобы существенно изменить частоты этих колебаний. В этой связи возникает вопрос о пределе скорости распространения детонации: волна не может пройти расстояние порядка длины химической связи (несколько ангстрем) за время порядка периода одного колебания. Детонация — это сверхзвуковой комплекс, состоящий из ударной волны и зоны химических реакций, имеющий физическую и химическую составляющие. Передача энергии, давления и звуковых возмущений от движущегося комплекса окружающей среде определяется поступательными и колебательными движениями молекул газов среды (воздуха) и ими же ограничивается. Скорость фронта детонации лимитируется разложением ВВ. Оценки, проведенные исходя из частот колебаний атомов, длин химических связей и констант скоростей разложения ВВ, позволяют сделать вывод, что скорость детонации физически не может быть больше 11 000 м/с. Для органических ВВ режимы с параметрами, находящимися между детонацией и внутрядерными процессами, даже теоретически невозможны.

Работы по изысканию новых, все более мощных ВВ привели к пониманию того, что

рост энергетики ведет к повышению чувствительности и, как следствие, к снижению безопасности боеприпасов на всех этапах их жизненного цикла, начиная с изготовления и заканчивая боевым применением. Обеспечение мощности ВВ достигается за счет повышения энергонагруженности индивидуальных молекул эксплозифорными группами, что сопряжено с ослаблением химических связей и, следовательно, с уменьшением термостабильности и повышением чувствительности. С этим обстоятельством связана концепция повышения безопасности (как технологической, так и при обращении с ВВ) даже ценой снижения мощности [23].

В связи с проблемой повышения безопасности обращено внимание на класс высоководородных ВВ. Плотность соединений этого класса относительно невысока — $1.8 \div 1.9$ г/см³, скорость их детонации ≈ 9000 м/с, а уровень метательной способности $90 \div 95$ %. Типичным примером является триаминотринитробензол (ТАТБ) плотностью 1.938 г/см³, характеризующийся высокой стойкостью (физической и химической) и малой чувствительностью. ТАТБ обладает редким для ВВ графитоподобным строением кристаллов. Все названные свойства обусловлены внутри- и межмолекулярными взаимодействиями симметрично расположенных амино- и нитрогрупп [24]. Практический интерес к ТАТБ вызван его низкой чувствительностью к внешним воздействиям. Симметричное расположение амино- и нитрогрупп имеется также в 1,1-диамино-2,2-динитроэтилене $C_2H_4N_4O_4$ [25] (зарубежная аббревиатура FOX-7). Это соединение по мощности превышает ТАТБ и имеет чувствительность меньше гексогена и октогена [24]. Диаминодинитроэтилен, наряду с амино- и нитрогруппами, содержит двойную углерод-углеродную связь, практически не встречающуюся среди ВВ. Невысокая чувствительность ТАТБ и FOX-7 связана со стабилизацией молекул. Стабилизирующий эффект в этих соединениях обусловлен возникновением внутри- и межмолекулярных водородных связей и сопряжением аминогрупп с ароматической системой электронов в бензольном цикле ТАТБ и с двойной связью $C=C$ в диаминодинитроэтилене. В связи с концепцией безопасности проводится всестороннее исследование свойств диаминодинитроэтилена [24, 26–28].

Из направлений дальнейшего изучения ВВ необходимо выделить следующие.

1. Синтез и поиск высокоэнергетических ВВ со скоростью детонации ≈ 10000 м/с. Эти вещества имеют общий недостаток — высокую чувствительность. Типичным примером является динитродиазенофуросан $C_4N_8O_8$, имеющий скорость детонации ≈ 10000 м/с при плотности 2.00 г/см³ и высокую чувствительность, позволяющую отнести его к классу инициирующих ВВ как по возбуждению, так и по развитию детонации. Даже самое мощное из известных в настоящее время ВВ — гексанитрогексаазаизоворцитан $C_6H_6N_{12}O_{12}$ (CL-20) по сумме экспериментальных характеристик превосходит по чувствительности октоген, хотя в названии статьи [18] говорится о его умеренной чувствительности. Экспериментальные исследования чувствительности к удару (при размере частиц 100 мкм) и форм кристаллов CL-20 оставляют открытым вопрос о его умеренной чувствительности.

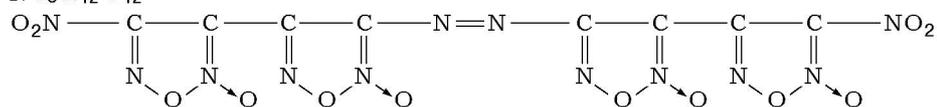
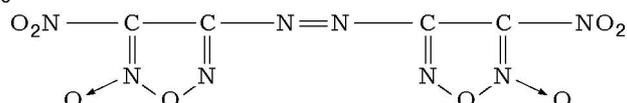
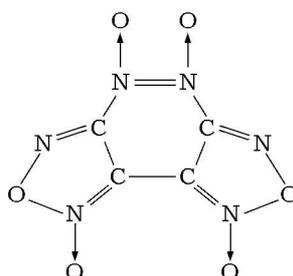
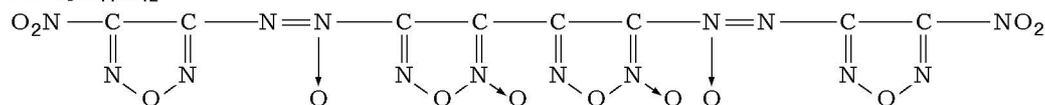
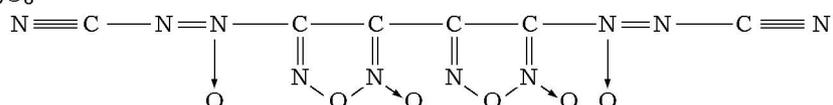
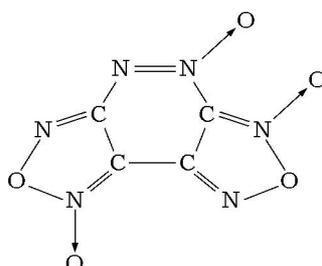
Несколько слов об октанитрокубане $C_8N_8O_{16}$, перспективном ВВ будущего [29]. Расчетная скорость детонации ≈ 10000 м/с, плотность монокристалла $2.1 \div 2.2$ г/см³. Экспериментальная же плотность 1.979 г/см³ существенно ниже расчетной. Это естественно, поскольку статистические и вычислительные методы не учитывают отталкивания электроотрицательных групп NO_2 в молекуле октанитрокубана.

Следует отметить, что согласно нашим представлениям и оценкам это направление синтеза и поиска не может дать ВВ со скоростью детонации выше 10500 м/с.

2. Синтез и поиск безопасных ВВ умеренной мощности (метательная способность 95 %) со скоростью детонации ≈ 9000 м/с и плотностью $1.8 \div 1.9$ г/см³, а также с приемлемым комплексом эксплуатационных свойств (чувствительности, термостабильности, прессуемости) — типа триаминотринитробензола, диаминодинитроэтилена, динитрогуанидина.

3. Синтез перспективных ВВ. Возможность их существования основана на теоретических расчетах, но пока они не синтезированы. Для решения задач будущего необходимы сверхмощные энергетические ВВ. Подробно и всесторонне перспективные новые вещества рассмотрены в обзоре [29].

Структурные формулы ВВ из табл. 5

I. $C_8N_{12}O_{12}$ II. $C_4N_8O_8$ III. $C_4N_6O_6$ IV. $C_8N_{14}O_{12}$ V. $C_6N_{10}O_8$ IV. $C_4N_6O_5$ 

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Приведены экспериментальные данные по относительной метательной способности 12 индивидуальных ВВ по методике М-40.

2. Рассмотрена проблема повышения мощности ВВ при введении металла.

3. Предложен теоретический метод расчета метательной способности, и оценена (исходя из экспериментальных данных по энтальпиям образования и плотности) метательная способность безводородных ВВ.

4. Оценены предельные возможности орга-

нических ВВ по мощности и скорости детонации. Обсуждены перспективы развития ВВ.

Авторы выражают признательность В. И. Архипову за содействие в работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kury J. W., Hornig H. C., Lee L. C. // 4th Symp. (Intern.) on Detonation. Washington, 1965. P. 3-13.
2. Short J. M., Helm F. H., Finger M., Kamlet M. J. Chemistry of detonation. VII. A simplified method for predicting explosive performance

- in the cylinder test // *Combust. Flame*. 1981. V. 43, N 1. P. 99–109.
3. **Dobratz** // *LLNL Explosive Handbook DE 85-015961*. 1981.
 4. **Физика взрыва**. 3-е изд.: В 2 т. / Под ред. Л. П. Орленко. М.: Физматлит, 2004.
 5. **Викторов С. Б., Губин С. А., Маклашова И. В., Пепекин В. И.** Прогнозирование детонационных характеристик безводородных ВВ // *Хим. физика*. 2005. Т. 24, № 12. С. 22–45.
 6. **Воскобойников И. М., Воскобойникова Н. Ф.** Оценка метательного действия взрывчатых веществ // *Детонация: Материалы 2 Всесоюз. совещ. по детонации*. Черногоровка, 1981. Вып. 2. С. 64–67.
 7. **Воскобойников И. М., Котомин А. А., Воскобойникова Н. Ф.** Влияние инертных добавок на скорость метания пластин смесевыми взрывчатыми веществами // *Физика горения и взрыва*. 1982. Т. 18, № 6. С. 108–111.
 8. **Махов М. Н.** Теплоты взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // *Хим. физика*. 2000. Т. 19, № 9. С. 83–87.
 9. **Makhov M. N.** A simplified method for predicting the heat of explosion of aluminized high explosives // *Proc. 36th Intern. Annu. Conf. ICT. Karlsruhe, FRG, 2005*. P. 122/1–122/12.
 10. **Akester J., Braitwaite P., Nicolich S.** Influence of submicron particles on properties of energetic formulations // *Proc. 35th Intern. Annu. Conf. ICT. Karlsruhe, FRG, 2004*. P. 3/1–3/8.
 11. **Горение порошкообразных металлов в активных средах** / П. Ф. Похил, А. Ф. Беляев, Ю. В. Фролов, В. С. Логачев, А. И. Коротков. М.: Наука, 1972.
 12. **Cook M. A., Horsley D. F.** Detonation wave fronts in ideal and nonideal detonation // *J. Appl. Phys.* 1956. V. 27, N 3. P. 269–277.
 13. **Brewer J., Searcy A. W.** The gaseous species of the Al–Al₂O₃ system // *J. Amer. Chem. Soc.* 1951. V. 73, N 11. P. 5308–5314.
 14. **Гремячкин В. М., Истратов А. Г., Лейпунский О. И.** К вопросу о механизме горения капли алюминия в газе окислителя // *Archiwum termodynamiki i spalania*. 1977. V. 8, N 1. P. 13–25.
 15. **Гремячкин В. М., Истратов А. Г., Лейпунский О. И.** Зоны реакции при горении капли алюминия в условиях невесомости и свободного падения // *Archiwum termodynamiki i spalania*. 1979. V. 10, N 2. P. 221–225.
 16. **Пепекин В. И.** Термохимия (дифторамино)нитросоединений // *Хим. физика*. 1994. Т. 13, № 1. С. 42–51.
 17. **Литвинов Б. В., Файнзильберг А. А., Пепекин В. И. и др.** Повышение эффективности высокоэнергетических химических веществ: высокоэнергетические соединения, содержащие в молекуле активный фтор и кислород // *Докл. АН*. 1994. Т. 336, № 1. С. 67–68.
 18. **Simpson R. L., Urtiew P. A., Ornellas D. L., et al.** CL-20 performance exceeds that HMX and its sensitivity is moderate // *Propellants, Explosives, Pyrotechnics*. 1997. V. 22, N 5. P. 249–256.
 19. **Hardesty D. R., Kennedy J. E.** Thermochemical estimation of explosive energy output // *Combust. Flame*. 1977. V. 28, N 1. P. 45–59.
 20. **Victorov S. B., Gubin S. A., Maklashova I. V., Revyakin I. I.** Thermodynamic TDS code: application to detonation properties of condensed explosives // *Proc. 32nd Intern. Annu. Conf. ICT. Karlsruhe, FRG, 2001*. P. 69/1–69/15.
 21. **Акимова Л. Н., Афанасьев Г. Т., Пепекин В. И.** Взрывчатые свойства 4,4'-динитро-3,3'-диазенофуросана // *Хим. физика*. 2002. Т. 21, № 3. С. 93–96.
 22. **Наир У. Р., Сивабалан Р., Гор Г. М. и др.** Гексанитрогексаазаизовюрцитан (CL-20) и составы на его основе (обзор) // *Физика горения и взрыва*. 2005. Т. 41, № 2. С. 3–16.
 23. **Jalovy Z., Marecek P., Dudek K., Weidlich T.** Synthesis and properties of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene // *New Trends in Research of Energetic Materials*. Pardubice, Czech Republic, 2001. P. 151–161.
 24. **Афанасьев Г. Т., Лебедев В. П., Матюшин Ю. Н., Пепекин В. И.** Термохимические и взрывчатые свойства триаминотринитробензола и диаминодинитроэтилена // *Хим. физика*. 2003. Т. 22, № 12. С. 38–43.
 25. **Latypov N. V., Bergman A., Langlet A., et al.** Synthesis and reactions of 1,1-diamino-2,2-dinitroethylene // *Tetrahedron*. 1998. V. 54, N 38. P. 11525–11536.
 26. **Wild R., Teipel U.** Characterisation and explosive properties of FOX-7 // *Proc. 35th Intern. Annu. Conf. ICT. Karlsruhe, FRG, 2004*. P. 69/1–68/9.
 27. **Garmasheva N. N., Chemagin I. V., Filin V. P., et al.** Investigation of diaminodinitroethylene (DADNE) // *New Trends in Research of Energetic Materials*. Pardubice, Czech Republic, 2004. P. 116–122.
 28. **Ticmanis U., Kaiser M., Pantel G., et al.** Kinetics and chemistry of thermal decomposition of FOX-7 // *Proc. 35th Intern. Annu. Conf. ICT. Karlsruhe, FRG, 2004*. P. 70/1–70/13.
 29. **Талавар М. Б., Савабалан Р., Астана С. Н., Сингх Х.** Новые сверхмощные энергетические материалы // *Физика горения и взрыва*. 2005. Т. 41, № 3. С. 29–45.

Поступила в редакцию 20/XII 2005 г.