

СТЕПЕНЬ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В МЕТАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ

М.В. Казутин¹, В.Ф. Комаров¹, Н.И. Попок¹, А.Г. Князева²

¹ Учреждение Российской академии наук Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ СО РАН)

² Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Томский государственный университет» (ТГУ)

В материале приведен анализ степени реализации энергетического потенциала взрывчатого вещества (ВВ) в метательное действие продуктов детонации, и показана возможность повышения метательной способности за счет лучшего использования энергозапаса алюминизированного ВВ.

Ключевые слова: взрывчатые вещества, формы работы взрыва, термодинамика взрыва, метательная способность, детонация.

Метательная способность (МС), согласно ряду источников [1-3], определяется скоростью детонации ВВ D и его плотностью ρ . Наибольшей МС обладают рецептуры, практически на 100% состоящие из гексогена, октогена, CL-20 и других мощных ВВ, высокие детонационные параметры которых обусловлены большой энергоемкостью молекулярного строения. Возможности увеличения МС за счет синтеза все более мощных индивидуальных ВВ практически исчерпаны – повышение энергоемкости молекулы, как правило, сопровождается несовместимым с технологической переработкой повышением чувствительности [4,5,6].

Энергоемкость смесевых и, в первую очередь, алюминизированных ВВ значительно превосходит предельные значения таковой для однокомпонентных ВВ. Количественно энергоемкость или энергетический потенциал ВВ выражается через величину теплоты взрыва Q . Экспериментально измеренное значение Q октогена ~5400 кДж/кг; его смеси с 20 масс% алюминия (Al) (размер частиц ~15 мкм) – уже 7500 кДж/кг (расчетное ~8100 кДж/кг [7]).

При введении алюминия в состав ВВ повышение Q благоприятно отражается на фугасной форме работы взрыва, тогда как скорость детонации и бризантное действие снижаются [8]. Относительно же эффективности применительно к МС в научной среде существует ряд разных мнений: так, авторы [6] полностью отрицают возможность повышения МС при введении в рецептуру алюминия; в других работах [9,10] показано значительное (до 15%) повышение скорости радиального метания при содержании 10÷15 масс% Al в октогене или гексогене.

Исследователями делались попытки связать энергетический потенциал ВВ Q с метательной способностью, выраженной в единицах энергии или скорости. В одной из таких работ [11] приведена зависимость скорости разлета оболочки по методу «cylinder-test» ω от Q при семикратном расширении продуктов детонации (ПД):

$$\omega^2 = 1,33Q\rho, \quad (1)$$

где ω – скорость расширения оболочки, км/с; ρ – плотность ВВ, г/см³, Q – калориметрически измеренная теплота взрыва, кал/г. Авторами [11] приводятся следующие значения: для октогена ($\rho=1,902$ г/см³) $Q=1365$ кал/г, для тротила ($\rho=1,654$ г/см³) $Q=1020$ кал/г. Эти значения хорошо согласуются с рассчитанными по упрощенным методикам [11], что позволяет использовать выражение (1) для априорного прогноза МС.

Вместе с тем, корреляция (1) справедлива только для индивидуальных ВВ или их смесей (октоген, гексоген, октолы, сплавы ТГ и т.п.). Попытка оценить по выражению (1) метательную способность вышеупомянутой смеси октогена с 20% масс Al (подстановкой значения $Q=1790$ кал/г, $\rho\sim 1,88$ г/см³) даст завышенное значение $\omega=2,12$ км/с, тогда как экспериментально измеренное – 1,81 км/с [9].

Более универсальные расчетные соотношения представлены в [12,13]. Основываясь на экспериментальных данных, авторы полагают, что МС непосредственно связана с объемной теплотой взрыва $Q\rho$ через коэффициент отбора энергии, который определяется количеством газообразных продуктов:

$$E \sim KQ\rho, \quad (2)$$

$$K \sim (N\rho)^\alpha, \quad (3)$$

СТЕПЕНЬ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В МЕТАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ

где E – кинетическая энергия метаемого тела; ρ – плотность заряда; N – количество газообразных продуктов (моль) на единицу массы смесового ВВ; α – коэффициент, учитывающий расстояние, пройденное телом.

Результаты расчетов и экспериментов из [7,12] показывают, что предельному увеличению МС при введении в октоген Al отвечает содержание последнего ~10-15% – скорость метания возрастает при этом на 2÷4%, тогда как прирост теплоты взрыва составляет 25÷30%.

Вместе с тем, в работе [1] нами описана взрывчатая композиция, включающая 10% масс Al, которая более чем на 10% (в единицах скорости) превосходит МС флегматизированного октогена. Расчетная теплота взрыва этой композиции меньше таковой для смеси октогена с 15% алюминия.

В аспекте вышеизложенного следует говорить о разной степени реализации потенциальной энергии в работу метания. Сравнение степени реализации (в том числе алюминированных ВВ) представляет определенный научный интерес.

Оценить степень преобразования энергетического потенциала в работу метания при испытаниях по методике «cylinder-test» можно по выражению:

$$K_m = \frac{E}{q}, \quad (4)$$

где K_m – коэффициент реализации энергетического потенциала в МС ВВ; E – кинетическая энергия метаемого элемента, кДж;

$$E = \frac{M\omega^2}{2}, \quad (5)$$

где M и ω – масса и скорость метаемого элемента, кг и м/с соответственно;

$$q = Q \cdot C, \quad (6)$$

C – масса заряда, участвующего в метании, кг; Q – энергетический потенциал ВВ, кДж/кг.

Оценка q по методам торцевого метания требует знания так называемой «активной» массы заряда ВВ, понятие о которой изложено в [2]:

$$C_a = \frac{2}{3} \pi r_0^3 = \frac{1}{12} \pi d^3 \rho_0, \quad (7)$$

где C_a – активная масса заряда; r_0 – радиус, l – длина и ρ_0 – плотность заряда.

Выражение (7) применимо для безоболочного заряда. Поскольку наличие массивной оболочки требует учета ее прочностных

свойств, расчет величин C_a и K_m из результатов испытаний по методам торцевого метания, в которых используется толстостенная стальная оболочка (М-40, М-60), затруднен. Для оценок величины K_m при торцевом метании нами использованы данные испытаний по методу [14], в котором стальной диск (диаметром 25 и толщиной 2,5 мм, массой в среднем $9,35 \pm 0,05$ г) метался от торца заряда диаметром 25 и длиной 50 мм. Безоболочный или заключенный в малопрочную оболочку заряд инициировался от шашки гексогена массой 10 г в направлении метаемого тела, скорость которого измерялась электроконтактным способом на базе 400-500 мм.

Теплота взрыва Q не является термодинамически определенной величиной, поскольку зависит от начальных параметров заряда (плотности, наличия оболочки и т.п.) и конечного состояния продуктов детонации. В качестве энергетического потенциала ВВ целесообразно использовать максимальную теплоту взрыва Q_{max} – величину энергии, отвечающую протеканию только наиболее теплотворных реакций при разложении ВВ и соответствующую максимуму энтропии. Q_{max} является константой ВВ, поскольку определяется только его химическим составом. Уравнения для расчета Q_{max} приведены в [2].

В таблице 1 мы приводим результаты оценок K_m по выражениям (4-7), исходя из данных упомянутых работ [1,7,12,14,15]. Условные обозначения в таблице: $св$ – связующее; $асв$ – активное взрывчатое связующее ($\rho_0=1,47$ г/см³, $D=7200$ м/с).

Представленные данные позволяют оценить «вклад» теплоты окисления алюминия в МС в единицах энергии. Для этого введем величину энергии метания Q_M :

$$Q_M = K_m \cdot Q_{max}, \quad (8)$$

где Q_M – энергия метания ВВ – т.е. часть энергетического потенциала ВВ в удельном выражении, которую можно использовать на разгон метаемого тела.

Эффекты повышения МС ΔQ_M и энергетического потенциала ВВ ΔQ от введения Al могут быть представлены, как:

$$\Delta Q_M = Q_{M_{Al}} - Q_M, \quad (9)$$

$$\Delta Q = Q_{Amaxl} - Q_{max}, \quad (10)$$

где Q_M и $Q_{M_{Al}}$ – энергия метания базового ВВ и его же с добавкой Al.

Q_{max} и Q_{Almax} – максимальная теплота взрыва базового ВВ и его же с добавкой алюминия.

Таблица 1

Степень реализации энергетического потенциала ВВ в работу метания

Взрывчатый состав, (%масс)	ρ_0 , г/см ³	Q_{max} , кДж/кг	ω , м/с	C^* , г	q^* , кДж	E^* , кДж	$K_m = \frac{E}{q}$
по методике Т-20 [7,12]							
1. Октоген (100)	1,91	6270	1910	6,00	37,6	22,5	0,60
2. Октоген/Al (88/12)	1,97	7920	1980	6,19	49,1	24,2	0,49
4. CL-20 (100)	2,04	6700	2040	6,42	43,0	25,7	0,60
5. CL-20/Al (90/10)	2,10	8040	2080	6,60	53,1	26,7	0,50
6. BTNEN (100)	1,96	5310	1790	6,16	32,7	19,8	0,61
7. BTNEN/Al (85/15)	2,04	9160	1940	6,41	58,7	23,2	0,39
по методу торцевого метания открытым зарядом [14]							
1. Октоген/св. (98/2)	1,84	6100	2350	7,52	45,9	25,8	0,56
2. Октоген/асв (78/22)	1,77	6150	2180	7,36	45,3	22,2	0,49
3. Октоген/асв/Al (70/20/10)	1,84	7540	2600	7,52	56,7	31,6	0,56
4. CL-20/св. (98/2)	1,96	6500	2600	8,01	52,1	31,6	0,61
5. Октоген** (100)	1,92	6270	2545	7,85	49,2	30,3	0,62

Примечания: * - для методики Т-20 величины относились к 1 см заряда, для торцевого метания – к расчетной (7) активной массе заряда; ** - приводятся прогнозируемые значения для монокристалла: ω - согласно [14], Q_{max} – согласно [15].

Таблица 2

Реализация энергии окисления алюминия в МС некоторых ВВ

№	Базовое ВВ	Q_M , кДж/кг	Добавка Al, масс%	Q_{MAl} , кДж/кг	ΔQ_M , кДж/кг	ΔQ , кДж/кг
1.	Октоген	3762	12	3883	121	1655
2.	CL-20	4020	10	4020	0	1340
3.	BTNEN	3237	15	3574	337	3858
4.	Октоген/асв	3014	10	4222	1208	1390

Таблица 2 составлена по результатам вычислений на основе данных таблицы 1 и выражений (8-10).

Результаты вышеприведенного анализа показывают, что заметного увеличения металлической способности в двухкомпонентных смесях ВВ - Al удастся достичь только при положительном кислородном балансе базового ВВ – как в случае BTNEN [7,12]. Максимальное же использование запаса энергии проявляется на трехкомпонентной рецептуре ВВ/асв/Al, содержащей большое количество активного связующего. В этом ВВ энергия окисления алюминия в значительной степени преобразуется в работу метания.

Объяснение результатов, на наш взгляд, лежит в особой структуре таких ВВ и обусловленном ей механизме выделения и передаче энергии метаемому телу. Ниже предлагается качественное описание процесса.

Ускорение метаемого тела возможно до момента, пока давление газа позади него выше, чем перед ним, т.е. определяется как величиной давления ПД, так и продолжительностью их действия. В детонационной волне и ближайшей к ней зоне ПД составных ВВ не смешиваются [16,17], а зона реакций

представляет собой кинетически неравновесный объем, в котором возникают градиенты массовых скоростей порядка нескольких сотен метров в секунду [18]. Выход «пиков» такой детонационной волны на границу с метаемым телом вызовет его ускорение до завершения основных реакций в массиве ВВ.

Это начальное ускорение, очевидно, будет меньшим, чем при подходе «плоского» фронта, но метаемое тело останется в зоне действия продуктов так называемых «вторичных реакций». Время разгона, таким образом, увеличивается и энерговыделение вторичных реакций окажет влияние на конечную скорость тела. Использование активного связующего в высокоэластическом состоянии, тесно контактирующего с частицами алюминия, ускоряет процесс окисления последних, поскольку эта система содержит достаточное количество окисляющих агентов до смешения с продуктами детонации базового ВВ.

Заключая, отметим, что путь повышения МС ВВ сводится не только к поиску новых энергонасыщенных молекул, но и к разработке механизмов управления кинетикой выделения энергии при детонационном превра-

СТЕПЕНЬ РЕАЛИЗАЦИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ВЗРЫВЧАТОГО ВЕЩЕСТВА В МЕТАТЕЛЬНУЮ СПОСОБНОСТЬ ПРОДУКТОВ ДЕТОНАЦИИ

щении. Один из таких вероятных механизмов и описан выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комаров В.Ф., Сакович Г.В., Казутин М.В., Попок Н.И. // Изв. вузов. Физика. – 2006. – № 6. – Приложение. – С. 81 - 84.
2. Физика взрыва Под ред. Л.П. Орленко Т.1,2. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 1488 с.
3. Давыдов В.Ю., Дубнов Л.В., Гришкин А.М. // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т.28, № 4. – С. 102 - 107.
4. Овчинников И.В., Махова Н.Н., Хмельницкий Л.И., Кузьмин В.С., Акимова Л.Н., Пепекин В.И. // ДАН СССР. – 1988. – Т.359, №4. – С. 499-502.
5. Талавар М.Б., Сивабалан Р., Астана С.Н., Сингх Х. // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т.41, № 3. – С. 29-45.
6. Пепекин В.И., Губин С.А. // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т.43, № 1. – С. 99-111.
7. Makhov M. N. // 36th Inter. Annual Conf. of ICT on Energetic Materials «Performance and Safety». – Karlsruhe, 2005. – P. 122-1-12.
8. Гришкин А.М., Дубнов Л.В., Давыдов В.Ю., Левишина Ю.А., Михайлова Т.Н. // Физика горения и взрыва. – 1993. – Т. 29, № 3. – С. 115-117.
9. Давыдов В.Ю., Козмерчук В.В., Мурышев Е.Ю., Головлев И.Д. // Физика горения и взрыва. – 1988. – Т. 24, № 3. – С. 96-98.
10. Давыдов В.Ю., Гришкин А.М., Мурышев Е.Ю. // Физика горения и взрыва. – 1993. – Т. 29, №3. – С. 109-115.
11. Irving B. Akst Heat of Detonation, The Cylinder Test, and Performance Munitions: Report LA-UR-89-1345 /Los Alamos National Laboratory. – Los Alamos, New Mexico, 1989. – P.16.
12. Makhov M. N., Arkhipov V.I. // 38th International Annual Conference of ICT on Energetic Materials «Characterisation and Performance of Advanced Systems». – Karlsruhe, 2007. – P. 118-1-11.
13. Ritter H., Braun S. // Propellants, Explosives, Pyrotechnics. – 2001. – V.26. – P. 311-314.
14. Komarov V.F., Sakovich G.V., Kazutin M.V., Popok N.I. // 37th Intern. Annual Conf. of ICT on Energetic Materials «insensitivity, Ageing, Monitoring». – Karlsruhe, 2006. – P. 101-1-8.
15. Makhov M.N. // 37th Intern. Annual Conf. of ICT on Energetic Materials «Insensitivity, Ageing, Monitoring». – Karlsruhe, 2006. – P. 100-111.
16. Козырев Н.В., Брыляков П.М., Сен Чел Су, Штейн М.А. // ДАН СССР. – 1990. – Т.314, №4. – С. 889-891.
17. Ершов А.П., Сатонкина Н.П. // V Забалахинские научные чтения. – Снежинск, 1999. – С. 127-132.
18. Медведев Д.А., Ершов А.П., Куперштох А.Л. // Динамика сплошной среды. – 2002. – Вып. 120. – С. 93-103.

УДАРНО-ВОЛНОВАЯ ГЕНЕРАЦИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ ЖИДКОКАПЕЛЬНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

О.Б. Кудряшова, Б.И. Ворожцов, Е.В. Муравлев, А.Н. Ишматов, А.А. Павленко

Учреждение Российской академии наук Институт проблем химико-энергетических технологий Сибирского отделения РАН (ИПХЭТ СО РАН)

В работе представлены результаты исследования образования высокодисперсного аэрозоля с использованием модели взрывного распылителя на основе гидродинамической ударной трубки. Показана роль кавитации в получении высокодисперсного жидкокапельного аэрозоля. Предложена математическая модель, описывающая процессы генезиса аэрозольного облака.

Ключевые слова: жидкокапельный аэрозоль, кавитация, распределение по размерам, испарение.

Распыление очень малых количеств жидкости требуется достаточно часто. Например, при быстром испарении криогенных жидкостей, при генерировании аэрозолей или туманов в замкнутом объеме климатических камер в практике лабораторных исследований. Создать распылитель, который бы обеспечивал однородное распределение частиц при очень малых расходах жидкости на основании традиционных методов, чрезвычайно

ПОЛЗУНОВСКИЙ ВЕСТНИК № 4-1 2010

сложно. Обычно, чтобы распылить жидкость до размеров частиц около 100 мкм требуется избыточное давление около 1-1,5 МПа, а до 50 мкм – 3-4 МПа, при этом диаметр сопла должен быть менее 0, 25 мм, а КПД доходит до тысячных долей процента [1].

Использование высокоэнергетических материалов (ВЭМ) предоставляет большие и зачастую единственные возможности для решения задач, которые требуют либо выде-