

## ВЛИЯНИЕ ДАВЛЕНИЯ ДЕТОНАЦИИ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ НА ТЕПЛОТУ ВЗРЫВА

И.Н. Сурначёв<sup>1</sup>, Б.В. Певченко<sup>1</sup>, А.В. Курбатов<sup>1</sup>, Д.В. Пушкин<sup>1</sup>, М.А. Чеканов<sup>1</sup>,  
В.А. Беляев<sup>1,2</sup>, Е.А. Петров<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г.Бийск

<sup>2</sup>Бийский технологический институт (филиал) АлтГТУ им. И.И. Ползунова, г.Бийск

К настоящему времени накоплен большой объём калориметрических данных о теплоте (энергии) взрыва  $Q$  различных взрывчатых веществ (ВВ) и взрывчатых составов (ВС). Получены зависимости  $Q$  от начальной плотности ВВ  $Q(\rho_0)$ . Однако, на практике давление детонации в основном заряде можно менять, вызывая пересжатую детонацию, за счёт инициирования основного заряда мощным ВВ, поэтому практический интерес представляют зависимости теплоты взрыва от давления детонации  $Q(P)$ , которые можно получить на основе имеющихся зависимостей  $Q(\rho_0)$  для индивидуальных ВВ, распространив их на ВС.

Приведена методика определения зависимостей для расчёта теплоты взрыва различных ВС, включая алюминийсодержащие, как при нормальной так и при пересжатой детонации

*Ключевые слова:* взрывчатые вещества (составы), давление продуктов детонации, скорость детонации, массовая скорость, пересжатая детонация, кислородный коэффициент, теплота взрыва, дисперсный алюминий.

### ВВЕДЕНИЕ

Одной из важнейших характеристик ВВ (ВС), определяющих эффективность их применения при решении различных практических задач, является удельная теплота взрыва  $Q$ , которую определяют при подрыве навесок ВВ в калориметрических бомбах и приводят в справочниках по ВВ (ВС) вместе с другими характеристиками, такими как плотность  $\rho_0$  и скорость детонации  $D_0$ .

Многочисленные экспериментально-теоретические исследования СННО - ВВ, получивших наибольшее практическое применение, обобщенные в [1, 2], показали, что величина теплоты взрыва (ТВ) таких ВВ с кислородным коэффициентом  $\alpha < 1,0$  зависит не только от кислородного коэффициента и плотности ВВ, но и от условий проведения эксперимента, массы заряда, материала и толщины оболочки ампулы, степени расширения продуктов детонации (ПД).

Универсальной термодинамической характеристикой ВВ (ВС), независимой от условий проведения эксперимента, является максимальная теплота взрыва  $Q_{\max}$ , которая определяется только химическим составом ВВ (ВС) и достигается при образовании высших оксидов входящих в ВВ горючих элементов. Так как величина  $Q_{\max}$  зависит от теплоты образования продуктов взрыва и ВВ, то роста ТВ можно достичь за счёт увеличения теплоты образования разрабатываемых ВВ. Однако, как показано в [3 – 5], повышение  $Q_{\max}$  до  $\sim 2000$  ккал/кг за счёт «накачки» энергии в молекулы ведёт к увеличению чувствительности ВВ к внешним воздействиям и невозможности использования их на практике.

Для повышения ТВ ВС без «накачки» энергии в молекулы широко используются высокоэнергетические добавки в виде порошка Al микронных размеров. Так, благодаря его использованию удалось резко повысить ТВ ВС до  $\sim 2250$  ккал/кг.

Исследованию детонационных характеристик таких ВС с Al посвящено много работ [6 – 16], которые показали, что Al окисляется за плоскостью Чепмена–Жуге, и с увеличением процентного содержания Al ТВ растёт, а скорость детонационной волны  $D$  падает.

Считается, что еще увеличить энергию взрыва алюминийсодержащего ВС можно, добавив в него порошок бора, горению которого способствует высокая температура образования  $Al_2O_3$  [17].

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Но наиболее эффективным способом повышения детонационных характеристик ВС является возбуждение в нем пересжатой детонации [18 – 25] подрывом более мощного инициирующего заряда [20] либо ударом высокоскоростной пластины [24].

В свою очередь, повышение скорости и давления детонации ведёт к повышению теплоты взрыва, как и при повышении плотности ВВ [2].

Наибольший интерес для практики представляют ВС с высокой плотностью ( $\rho_0 > 0,95\rho$ ) и вариант с использованием мощных ВВ в качестве инициирующих зарядов (например, гексоген, октоген, гексанитрогексазаизовюрцитан), детонационные характеристики ( $D, p$ ) которых заметно различаются. Поэтому появилась необходимость установить зависимости  $Q(p)$ , которые позволяют проводить сравнительные оценки различных пар ВС (основной

заряд + инициирующий заряд) как при нормальной, так и при пересжатой детонации в основном заряде.

Такие зависимости можно получить, используя имеющиеся для теплоты взрыва от начальной плотности  $Q(\rho_0)$  для индивидуальных ВВ [2], распространив их на ВС, включая алюминийсодержащие, и в область повышенных давлений, характерных для пересжатой детонации.

Так как при детонации ВС с АІ основная доля тепла выделяется за пределами плоскости Чепмена–Жуге при окислении АІ при давлениях  $p < p_n$  ( $p_n$  – давление в плоскости Чепмена–Жуге), то рассчитывалось давление мгновенной детонации:  $p = 1/2 p_n$ ,  $p_n = \rho_0 D u$ , а  $Q$  по зависимостям  $Q(\rho_0)$  [2].

Исходные данные для расчёта  $p$  и  $Q$ , а также кислородные коэффициенты  $\alpha$  и  $Q_{max}$  для нескольких распространённых ВВ приведены в табл. 1 и 2.

Табл. 1. Зависимости детонационных характеристик от плотности ВВ

ВВ	$\alpha$	$Q_{max}$ , ккал/кг	$D=a+v \cdot \rho_0$	$D=a+v \cdot u$	$Q=A+B \cdot \rho_0$
ГНТ	0,367	1290	$D=1,775+3,225\rho_0$	$D=-3,70+6,60U^1$	$Q=580+281\rho_0$
Гексоген	0,667	1480	$D=2,11+3,70\rho_0^1$	$D=-4,94+6,35U^1$	$Q=990+172\rho_0$
Октоген	0,667	1475	$D=2,51+3,49\rho_0^2$	$D=-6,00+6,80U^2$	$Q=990+172\rho_0$
ТЭН	0,855	1525	$D=2,36+3,50\rho_0^3$	$D=-1,14+4,42U^3$	$Q=1250+56\rho_0$
БТНЭН	1,40	1251	$D=1,41+3,80\rho_0^4$	–	$Q=1250+0\rho_0$

Примечание. <sup>1,2,3,4</sup> – данные работ [1, 27]; [28], [26, 27] и [29] соответственно.

Результаты расчётов  $Q(p)$  приведены на рис. 1 и в табл. 2, где также представлены калориметрические значения  $Q_{cal}$  для нормальной детонации для высоких плотностей ВВ, рассчитанных по зависимости  $Q_{cal} = 0,31\alpha^{0,25} Q_{max}$  (1), аналогичной предложенной Г.А. Авакяном [30] для  $Q$  образования продуктов детонации, где  $\alpha$  – кислородный коэффициент, %.

Табл. 2. Зависимости для расчёта теплоты взрыва от давления детонации

ВВ	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$Q_{cal}$ , ккал/кг	$0,5P_n$ , кбар	$Q=A_1 + B_1 \cdot p$ , ккал/кг	$Q_{cal} = 0,31\alpha^{0,25} Q_{max}$
ТНТ	1,0	860	33	$Q = 750 + 3,25 \cdot p$	990
	1,6	1030	89		
Гексоген	1,1	1190	60	$Q = 1110 + 1,23 \cdot p$	1300
	1,7	1290	148		
Октоген	1,3	1210	95	$Q = 1090 + 1,22 \cdot p$	1300
	1,8	1300	172		
ТЭН	0,9	1300	37	$Q = 1270 + 0,53 \cdot p$	1440
	1,7	1350	152		
БТНЭН	1,0	1240	–	$Q \approx 1250 + 0,00 \cdot p$	1330
	1,6	1250	–		

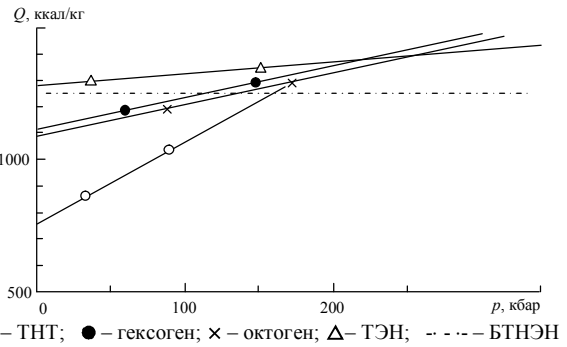


Рис. 1. Зависимость теплоты взрыва от давления в ПД

Анализ рис.1 и табл.1, 2 показывает, что коэффициенты  $A_1$  и  $B_1$  можно выразить через взрывчатые характеристики ВВ, а именно

$$A_1 = 0,875\alpha^{0,4} Q_{max} \quad (2)$$

$$B_1 = (1 - 0,875\alpha^{0,4}) \frac{Q_{max}}{p_{max}} \quad (3)$$

т.е. зависимость для оценки удельной ТВ от давления с учётом только собственного окислителя будет следующей:

$$Q = Q_{max} \left[ 0,875\alpha^{0,4} + (1 - 0,875\alpha^{0,4}) \frac{p}{p_{max}} \right] \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \quad (4)$$

где  $p_{max}$  соответствует  $Q_{max}$  определяется экстраполяцией  $Q(p)$  и может быть рассчитано по зависимости:

$$p_{max} = p_0 \frac{Q_{max} - A_1}{Q_{cal} - A_1} \quad (5)$$

если известно значение  $Q_{cal}$ , полученное при  $p_0$ , соответствующем  $\rho_0$  ( $Q$  и  $\rho_0$  указываются в справочниках по ВС либо рассчитываются).

Значения  $p_{max}$  для ВВ (см. табл. 1), кбар: ТНТ 167, гексоген 300, октоген 315, ТЭН 480.

Из зависимостей (2, 3) следует, что:

1) при  $\alpha \geq 1,40$  коэффициенты  $B_1 = 0$ ,  $A_1 = Q_{max}$ , т.е.  $Q = Q_{max}$ .

2) при  $p \geq p_{max}$  значение  $Q = Q_{max}$ .

В алюминийсодержащих ВС детонация распространяется по взрывчатой компоненте (ВК) плотностью  $\rho_{вк}$  со скоростью  $D_{вс} < D_{вк}$  (при  $\rho_{вк}$ ), так как часть энергии затрачивается на деформацию, разгон и разогрев частичек алюминия.

С учётом этого давление  $p_0$  в ПД взрывчатой компоненты рассчитывалось по зависимости

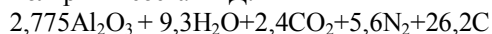
$$p_0 = \frac{\rho_{вк} \cdot D_{вс}^2}{2(\kappa + 1)} \quad (6)$$

где значение  $\kappa$  при  $\rho_{\text{ВК}}$ , близкой к  $\rho_{\text{max}}$ , принято равным трём, при этом  $\rho_{\text{ВК}}$  рассчитывалась по  $\rho_{\text{ВС}}$  с учётом массовых долей компонентов.

Величина  $Q_{\text{max}}$  ВС ( $C_aH_bN_cO_dAl_e$ ) рассчитывались по закону Гесса (теплота взрыва  $Q$  составляет разницу между теплотой образования ПД и теплотой либо энтальпией образования ВВ  $q_{\text{ВВ}}$ ,  $\Delta H^0$  ВВ) в предположении, что кислород последовательно расходуется на окисление алюминия до  $Al_2O_3$ , затем водорода до  $H_2O$  (пар) и углерода до  $CO_2$ . Оставшиеся количества горючих элементов выделяются в свободном виде (молекулярный водород, твёрдый углерод), при этом теплоты образования ВВ и продуктов детонации заимствованы из работы [31] и табл. 3.

В качестве примера ниже приведен расчёт  $Q_{\text{max}}$ ,  $Q_{\text{cal}}$  и  $Q(p)$  для смеси тротила (ТНТ) с алюминием (Al) ТА-15 (85%ТНТ + 15%Al): брутто-формула ТНТ  $C_7H_5N_3O_6$ , молекулярная масса (227), для Al молекулярная масса (27). Сначала рассчитывается элементный состав 1 кг ВС:

$850/227C_7H_5N_3O_6 + 150/27Al = C_{26,2}H_{18,6}N_{11,2}O_{22,4}Al_{5,55}$ , затем молярный состав ПД:



и с учётом теплот образования:  $Al_2O_3$  ( $q=1670$  кДж/моль),  $H_2O$  пар ( $q=240$  кДж/моль),  $CO_2$  ( $q=395,6$  кДж/моль), ТНТ ( $q=75$  кДж/моль) получим

$Q_{\text{max}} = 463, + 2230 + 950 - 280 = 7530$  кДж/кг = 1800 ккал/кг.

Кислородные коэффициенты алюминийсодержащих ВС рассчитывались как

$$\alpha = d / (2a + \frac{v}{2} + \frac{3}{2}e),$$

где  $a, v, d, e$  – количество грамм-атомов углерода, водорода, кислорода и алюминия соответственно. Для ТА-15  $\alpha \approx 0,30$ .

С учётом значения  $\alpha \approx 30,0\%$  по формуле (1) получим  $Q_{\text{cal}} \approx 1320$  ккал/кг. По формулам (2–5) определяем:  $A_1 = 1020$ ;  $B_1 = 300/p$  и для ТА-15 находим  $Q = 1020 + 780 p/p_{\text{max}}$ , где  $p_{\text{max}}$  рассчитывается по формуле (5), а  $p_0$  – по формуле (6), в которой  $D_{\text{ВС}}$  определяется экспериментально либо приближенно по формуле [31]:

$$D_{\text{ВС}} = (1 - \beta)D_{\text{ВК}} + \beta D_{\text{Al}}, \quad (7)$$

где  $D_{\text{ВК}}$  – скорость детонации ВК при  $\rho_{\text{ВК}}$  в смеси,  $\beta$  – доля Al,  $D_{\text{Al}}$  – скорость ударной волны в Al, которую можно оценить в акустическом

приближении по формуле 
$$p_{\text{Al}} = \frac{2 p_0}{1 + \frac{\rho_{\text{ВК}} \cdot D_{\text{ВК}}}{\rho_{\text{Al}} \cdot D_{\text{Al}}}},$$

используя ударную адиабату Al

$$D_{\text{Al}} = 5,33 + 1,35u_{\text{Al}}. \quad (9)$$

Если в ТА-15  $\rho_{\text{ВК}} = 1,6$ , то по формуле из таблицы 1  $D_{\text{ВК}} = 6,92$  км/с, а  $2p_0 = 192$  кбар и по формулам (8, 9)  $D_{\text{Al}} = 7,0$  км/с, тогда по формуле (7)  $D_{\text{ВС}} = 6,9$  км/с и по формуле (6)  $p_0 = 96$ кбар, а по формуле (5)  $p_{\text{max}} = 240$  кбар. Тогда окончательная зависимость  $Q(p)$  для ТА-15 будет следующая

$$Q = 1020 + 3,25p. \quad (10)$$

Исходные данные и полученные таким образом коэффициенты для зависимостей  $Q(p)$  нескольких бризантных и фугасных ВС приведены в табл. 3, там же представлены калориметрические значения  $Q_{\text{cal}}$ , рассчитанные для высокоплотных ВС по зависимости (1).

Табл. 3. Исходные данные и коэффициенты зависимости для расчёта теплоты взрыва от давления при нормальной и пересжатой детонации нескольких ВС

Показатели	ВС				
	ОКФО Л-3,5	ТГ-50	ТА-23	НТА-3 ТНТ/ОКТ/Al 29/45/26	ГС-2 * ГАВ/стеар. кислота/ 98/2
$\alpha$	0,570	0,480	0,296	0,376	0,740
$\rho_{\text{вс}}$ , г/см <sup>3</sup>	1,76	1,68	1,73	1,87	1,95
$\rho_{\text{вк}}$ , г/см <sup>3</sup>	1,76	1,68	1,60	1,68	1,95
$D$ , км/с	8,70	7,80	6,50	7,40	9,20
$0,5P_{\text{н}}$ , кбар	166	127	91	115	206
$P_{\text{max}}$ , кбар	287	258	280	310	325
$Q_{\text{cal}}$ , ккал/кг	1250	1140	1410	1680	1420
$Q_{\text{max}}$ , ккал/кг	1430	1390	2050	2250	1550
$A_1$ **	1000	900	1100	1340	1200
$B_1$ **	1,50	1,90	3,40	2,95	1,07
$Q_{\text{cal}} = 0,31 \cdot \alpha^{0,25} Q_{\text{max}}$	1230	1130	1480	1730	1410

Примечание: \* 98% гексанитрогексаазоизовюрцитан (ГАВ) + 2% стеариновая кислота, \*\* – коэффициенты для расчёта  $Q = A_1 + B_1 p$ .

Судя по данным табл. 2, 3, расчёты по зависимости (1) близки к экспериментальным значениям  $Q_{\text{cal}}$  при нормальной (непересжатой) детонации высокоплотных индивидуальных ВВ и ВС с  $\alpha < 0,8$ .

По данным табл. 1–3 на рис. 2 приведена зависимость коэффициента реализации  $Q/Q_{\text{max}}$  от кислородного коэффициента  $\alpha$  для высокоплотных

ВВ (ВС), позволяющая более точно проводить оценки  $Q_{cal}$  при  $0,8 < \alpha < 1,4$ .

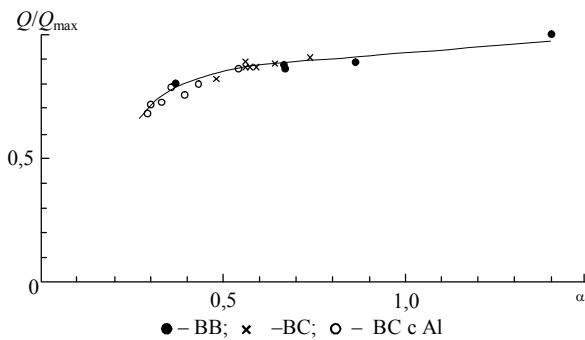


Рис. 2. Зависимость коэффициента реализации от кислородного коэффициента

Полученные зависимости  $Q(p)$  позволяют проводить оценку теплоты взрыва заряда при возбуждении в нём мощным инициирующим зарядом пересжатой детонации с давлением  $p$ . При этом  $p$  можно оценить в акустическом приближении по зависимости

$$p = \frac{2p_{из}}{1 + \frac{\rho_{из} \cdot D_{из}}{\rho_{O_2} \cdot D_{O_2}}}$$

где  $\rho_{из}$ ,  $D_{из}$ ,  $p_{из}$  – детонационные характеристики инициирующего заряда,  $\rho_{O_2}$ ,  $D_{O_2}$  – характеристики основного заряда.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для СННО - ВВ и ВС на их основе, включая алюминийсодержащие с кислородным коэффициентом меньше единицы, при нормальной стационарной детонации зависимости теплоты взрыва от давления детонации близки к линейным, что с учетом неизменности механизма нормальной и пересжатой детонационных волн позволяет с помощью линейной экстраполяции распространить эти зависимости в область давлений, характерных для пересжатой детонации.

2. Коэффициенты корреляции в зависимостях теплоты взрыва от давления определяются взрывчатыми характеристиками ВС.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Физика взрыва/Под ред. Л.П. Орленко.– М.: Физматлит, 2004.
2. Пепекин, В.И., Теплоты взрывчатого разложения индивидуальных ВВ / В.И. Пепекин, М.Н. Махов, Ю.А. Лебедев // ДАН СССР.– 1977. – Т. 232.– № 4. – С. 853–855.
3. Пепекин, В.И. Пределы органических взрывчатых веществ по скорости детонации и мощности // Доклады АН. – 2007. – Т. 414.– №6. – С. 781 – 783.
4. Пепекин, В.И. Возбуждение взрыва твердых взрывчатых веществ при механическом воздействии / В.И. Пепекин, Б.Л.

Корсунский, А.А. Денисаев //Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44.– № 5. – С. 101 – 105.

5. Богданова, Ю.А. Детонационные характеристики мощных и малочувствительных взрывчатых веществ/ Ю.А. Богданова, С.А. Губин, Б.Л. Корсунский и др. // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45.– № 6. – С. 115 – 121.

6. Дремин, А.Н. Влияние алюминия на параметры детонации тротила / А.Н. Дремин, П.Ф. Похил, М.И. Арифов // Доклады АН СССР. – 1960. – Т. 131.– № 5. – С. 1140 – 1142.

7. Анискин, А.И. Влияние алюминия и магния на детонационные характеристики в смесях с гексогеном / А.И. Анискин, К.К. Шведов // Детонация. Критические явления. Физико – химические превращения в ударных волнах.– Черноголовка, 1978. – С. 26 – 30.

8. Воскобойников, И.М. Расчет параметров детонации смесей ВВ с инертными добавками/ И.М. Воскобойников, А.А. Котомин // Физика горения и взрыва. – 1985. – № 5. – С.93 – 97.

9. Анискин, А.И.. Детонация смесей взрывчатых веществ с алюминием // Детонация и ударные волны. Материалы VIII Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву.– Черноголовка. 1986. – С. 26 – 32.

10. Воскобойников, И.М. Влияние сжима-емости материала добавки на скорости детонации смесевых зарядов / И.М. Воскобойников, М.Ф. Гоголя, Г.В. Гимза // Физика горения и взрыва. – 1987. –№ 5. – С. 86 – 89.

11. Давыдов, В.Ю. Экспериментально-теоретическое исследование окисления алюминия в детонационной волне / В.Ю. Давыдов, А.М. Гришкин, И.И. Федоритов // Физика горения и взрыва. – 1992. – Т. 28.– № 5. – С. 124 – 128.

12. Гришкин, А.М. Влияние добавок порошкообразного алюминия на параметры детонации мощных ВВ / А.М. Гришкин, Л.В. Дубнов, В.Ю. Давыдов и др. // Физика горения и взрыва. – 1993. – Т. 29.– № 2. – С. 115 – 117.

13. Гоголя, М.Ф. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ / М.Ф. Гоголя, М.Н. Махов, А.Ю. Долгобородов и др. // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т.40. № 4. – С. 82 – 95.

14. Гоголя, М.Ф. Алюминизированные литевые взрывчатые вещества (обзор) / П.П. Вадхе, Р.Б. Павар, Р.К. Синха и др. //Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44.– № 4. – С. 98 – 113.

15. Давыдов, В.Ю. Зависимости скорости детонации и метательной способности металлизированных взрывчатых веществ от плотности заряда и содержания добавки / В.Ю. Давыдов, А.С. Губин //Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50.– № 5. – С. 123 – 133.

16. Махов М.Н. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ/ М.Н. Махов, М.Ф. Гоголя, А.Ю. Долгобородов и др.// Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40.– № 4. – С. 96 – 105.

17. Сюй, С. Теплота сгорания порошка Al/V и эффективность его применения в металлизированных взрывчатых веществах при подводном взрыве/ С. Сюй, Ю.Чень, С. Чень и др. // Физика горения и взрыва. – 2016. – Т. 52.– № 3.

18. Чельшев, В.П. К вопросу о параметрах фронта пересжатой детонационной волны / В.П. Чельшев, Б.И. Шехтер // Физика горения и взрыва. – 1966. – № 4. – С. 68 – 74.

19. Альтшулер, Л.В. Пересжатые детонационные волны в конденсированных ВВ / Л.В. Альтшулер, В.Н. Зубарев, Г.С. Телегин // Физика горения и взрыва. – 1974. – Т. 10, №5. – С. 728 – 732.

20. Л.В. Альтшулер, В.К. Параметры и режимы детонации конденсированных ВВ/ Л.В. Альтшулер, В.К. Ашаев, В.В. Балалаев и др. // Физика горения и взрыва. – 1983. – Т. 19.– № 4. – С. 153 – 158.

21. Альтшулер, Л.В. Пересжатые детонационные режимы и «сверхдетонация» / Л.В. Альтшулер, В.С. Жученко, Е.А. Кузьменков// Физика горения и взрыва. – 1988. – Т. 24.– № 1. – С. 92 – 95.

22. Авенян, В.А. О структуре пересжатой детонационной волны в литом тротиле / В.А. Авенян, В.К. Ашаев, Г.С. Доронин //

Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация и ударные волны. – Черноголовка, 1986. – С. 50 – 52.

23. И.Ф. Садыков, Г.П. Фролов. Поведение ВВ в условиях пересжатой детонации // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация. Черноголовка, 1992. – с. 43 – 44.

24. Имховик, Н.А. Влияние состава и энергетических характеристик взрывчатых веществ на скорость метания плоских ударников в двухступенчатой каскадной схеме / Н.А. Имховик, И.П. Мачнева, В.С. Соловьев // Химическая физика. – 1998. – Т. 17/– № 1. – С. 83 – 95.

25. Кузьмицкий, И.В. Структура зоны химической реакции в стационарной пересжатой волне детонации/И.В. Кузьмицкий // Химическая физика процессов горения и взрыва. XII Симпозиум по горению и взрыву.– Черноголовка. – 2000. – Ч. II. –С. 144 – 145.

26. Альтшулер, Л.В. Режимы детонации и параметры Жуге конденсированных взрывчатых веществ / Л.В. Альтшулер, Г.С. Доронин, В.С. Жученко // Физика горения и взрыва. – 1989. – Т. 25.– № 2. – С. 84 – 103.

27. А.Н. Дремин, С.Д. Детонационные волны в конденсированных средах/ А.Н. Дремин, С.Д. Савров, В.С. Трофимов и др.– М.: Наука, 1970. – 164 с.

28. Давыдов, В.Ю. Универсальный термодинамический критерий эффективности ВВ / В.Ю. Давыдов, Л.В. Дубнов, А.М. Гришкин. // Физика горения и взрыва. – 1992. – №4. – С. 102 – 107.

29. Гоголя, М.Ф. Скорость детонации композиции БТНЭН/Аℓ. / М.Ф. Гоголя, М.Н. Махов, М.А. Бражников и др. // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т. 42.– №4. – С. 125 – 130.

30. Авакян, Г.А. Расчет энергетических и взрывчатых характеристик ВВ / Г.А. Авакян // ВИА им. Дзержинского. – 1964. – С. 107.

31. Дубнов, Л.В. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов, Н.С. Бахаревиц, А.И. Романов.– М.: «Недра», 1988.

32. Имховик, Н.А. Термодинамическое моделирование особенностей детонации флегматизированных ВВ / Н.А. Имховик, В.С. Жученко, В.С. Соловьев // Химическая физика процессов горения и взрыва. XI Симпозиум по горению и взрыву.– Черноголовка, 1996.– Т.2.

33. Дремин, А.Н. Параметры детонационной волны тротила, гексогена, нитроглицерина и нитрометана / А.Н. Дремин, П.Ф. Похил // Доклады АН СССР. – 1959. – Т. 128.– № 5. – С. 989 – 991.

# INFLUENCE OF DETONATION PRESSURE OF EXPLOSIVE COMPOSITIONS ON HEAT OF EXPLOSION

I.N. Surnachev<sup>1</sup>, B.V. Pevchenko<sup>1</sup>, A.V. Kurbatov<sup>1</sup>, D.V. Pushkin<sup>1</sup>, M.A. Chekanov<sup>1</sup>,  
V.A. Belyaev<sup>1,2</sup>, E.A. Petrov<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>JSC "Federal Research and Production Center "Altai", Biysk

<sup>2</sup>Biysk Technological Institute (branch) of the AltSTU

A large volume of calorimetric data on the heat energy  $Q$  of explosion for various explosives (Es) and explosive compositions (EC) has been accumulated by now. The dependences of  $Q$  on the initial ES density  $Q(\rho_0)$  are obtained. However, the detonation pressure in the base charge can be changed in practice causing super compressed detonation, due to the initiation of the base charge by a powerful explosive; therefore, the dependences of the explosion heat on the detonation pressure  $Q(P)$ , which can be obtained on the basis of the available dependences  $Q(\rho_0)$  for individual explosives is of practical interest as they can be applied to EC.

A method to determine the dependences for calculating the heat of explosion of various aircraft, including aluminum-containing ones, both during normal and super compressed detonation is presented.

*Key words:* explosives (explosive compositions), pressure of detonation products, detonation velocity, mass velocity, super compressed detonation, oxygen coefficient, heat of explosion, dispersed aluminum

## REFERENCES

1. Orlenko L.P. Explosion Physics. - Moscow: Fizmatlit, 2004.
2. Pepekin V.I. Heat of explosion and decomposition of individual explosives / V.I. Pepekin, M.N. Makhov, Yu.A. Lebedev // Reports of the Academy of Sciences of the USSR. - 1977. - Vol. 232. - No. 4, pp. 852-855.
3. Pepekin V.I. Limits of organic explosives in terms of detonation velocity and power // Reports of the Academy of Sciences. - 2007. - Vol. 414. - No. 6. pp. 781 - 783.
4. Pepekin V.I. Excitation of the explosion of solid explosives under mechanical impact / V.I. Pepekin, B.L. Korsunsky, A.A. Denisayev // Physics of Combustion and Explosion. - 2008. - Vol. 44. - No. 5. pp. 101 - 105.
5. Bogdanova Yu.A. Detonation characteristics of powerful and insensitive explosives / Yu.A. Bogdanova, S.A. Gubin, B.L. Korsunsky et al. // Physics of Combustion and Explosion. - 2009. - Vol. 45. - No. 6, pp. 115 - 121.
6. Dremine A.N. Influence of aluminum on the parameters of TNT detonation / A.N. Dremine, P.F. Pohil, M.I. Arifov // Reports of the USSR Academy of Sciences. - 1960. - Vol. 131. - No. 5, pp. 1140 - 1142.
7. Aniskin A.I. Influence of aluminum and magnesium on detonation characteristics in hexogen mixtures / A.I. Aniskin, K.K. Shvedov // Detonation. Critical phenomena. Physical and chemical transformations in shock waves. - Chernogolovka, 1978. pp. 26 - 30.
8. Voskoboynikov I.M. Calculation of detonation parameters of explosive mixtures with inert additives / I.M. Voskoboynikov, A.A. Kotomin // Physics of Combustion and Explosion. - 1985. - No. 5. pp.93 - 97.
9. Aniskin A.I. Detonation of explosives and aluminum mixtures // Detonation and shock waves. Proceedings of the VIIIth All-Union Combustion and Explosion Symposium. - Chernogolovka. 1986, pp. 26 - 32.
10. Voskoboynikov I.M. Influence of the additive compressibility on the detonation velocity of the mixed charges / I.M. Voskoboynikov, M.F. Gogulya, G.V. Giezma // Physics of Combustion and Explosion. - 1987. - № 5, pp. 86 - 89.
11. Davydov V.Yu. Experimental and theoretical study of aluminum oxidation in a detonation wave / V.Yu. Davydov, A.M. Grishkin, I.I. Pheodoritov // Physics of Combustion and Explosion. - 1992. - Vol. 28. - No. 5, pp. 124 - 128.
12. Grishkin A.M. Influence of powdered aluminum additives on detonation parameters of high explosives / A.M. Grishkin, L.V. Dubnov, V.Yu. Davydov et al. // Physics of Combustion and Explosion. - 1993. - Vol. 29. - No. 2. pp. 115 - 117.
13. Gogulya M.F. Mechanical sensitivity and parameters of detonation of aluminized explosives / M.F. Gogulya, M.N. Makhov, A.Yu. Dolgoborodov, et al., Physics of Combustion and Explosion, 2004, vol. 40, no. 4, pp. 82 - 95.
14. Gogulya, M.F. Aluminized injection-molded explosives (review). / P.P. Wadhe, R.B. Pavar, R.K. Sinha et al. Physics of Combustion and Explosion, 2008, vol. 44, no. 4, pp. 98 - 113.
15. Davydov V.Yu. Dependence of the detonation velocity and propelling ability of metallized explosives on the charge density and additive content / V.Yu. Davydov, A.S. Gubin // Physics of Combustion and Explosion, 2014, vol. 50, no. 5, pp. 123 - 133.
16. Makhov M.N., Throwing ability and heat of explosive decomposition of aluminized explosives. Makhov M.N., Gogulya M.F., Dolgoborodov A. Yu. et al. // Physics of Combustion and Explosion, 2004, vol. 40, no. 4, pp. 96 - 105.
17. Xu S. Heat of combustion of Al / B powder and the effectiveness of its use in metallized explosives in an underwater explosion / S. Xu, Yu. Chen, S. Chen et al. // Physics of Combustion and Explosion, 2016, vol. 52, no. 3.
18. Chelyshev V.P. On the question of the front parameters of a super compressed detonation wave / V.P. Chelyshev, B.I. Schechter // Physics of Combustion and Explosion, 1966, no. 4, pp. 68 - 74.
19. Altshuler, L.V. Overcompressed detonation waves in condensed explosives / L.V. Altshuler, V.N. Zubarev, G.S. Telegin // Physics of Combustion and Explosion, 1974, vol. 10, no. 5, pp. 728 - 732.
20. L.V. Altshuler, Parameters and modes of detonation of condensed explosives / L.V. Altshuler, V.K. Ashaev, V.V. Balalaev et al. // Physics of Combustion and Explosion, 1983, vol. 19, no. 4, pp. 153 - 158.
21. Altshuler L.V. Over-compressed detonation modes and "super-detonation" / L.V. Altshuler, V.S. Zhuchenko, E.A. Kuzmenkov // Physics of Combustion and Explosion, 1988, vol. 24, no. 1, pp. 92 - 95.
22. Avenyan V.A. On the structure of the super compressed detonation wave in cast TNT / V.A. Avenyan, V.K. Ashaev, G.S. Doronin // Chemical physics of combustion and explosion processes. Detonation and shock waves. - Chernogolovka, 1986, pp. 50 - 52.
23. I.F. Sadykov, G.P. Frolov. Behavior of explosives under conditions of super compressed detonation // Chemical physics of combustion and explosion processes. Detonation. Chernogolovka, 1992, pp. 43 - 44.

24. Imkhovik N.A. Influence of the composition and energy characteristics of explosives on the throwing speed of flat strikers in a two-stage cascade scheme. N.A. Imkhovik, I.P. Machnev, V.S. Soloviev // Chemical Physics, 1998, vol. 17, no. 1, pp. 83 - 95.
25. Kuzmitsky I.V. The structure of the chemical reaction zone in a stationary super compressed detonation wave / I.V. Kuzmitsky // Chemical Physics of Combustion and Explosion Processes. XII Symposium on Combustion and Explosion, Chernogolovka, 2000, Part II, pp. 144 - 145.
26. Altshuler L.V. Detonation Modes and Juge Parameters of Condensed Explosives / L.V. Altshuler, G.S. Doronin, V.S. Zhuchenko // Physics of Combustion and Explosion, 1989, vol. 25, no. 2, pp. 84 - 103.
27. A.N. Dremin. Detonation waves in condensed media / A.N. Dremin, S.D. Savrov, V.S. Trofimov et al., Moscow: Nauka, 1970, pp.164
28. Davydov V.Yu. Universal thermodynamic criterion of explosive efficiency / V.Yu. Davydov, L.V. Dubnov, A.M. Grishkin. // Physics of Combustion and Explosion, 1992, no. 4, pp. 102 - 107.
29. Gogulya M.F. Detonation velocity of the BTNEN / Al composition. / M.F. Gogulya, M.N. Makhov, M.A. Brazhnikov et al. // Physics of Combustion and Explosion, 2006, vol. 42, no. 4, pp. 125 - 130.
30. Avakyan G.A. Calculation of energy and explosive characteristics of explosives. Avakyan G.A.// RA named after Dzerzhinsky, 1964, pp. 107.
31. Dubnov L.V. Industrial explosives / L.V. Dubnov, N.S. Bakharevich, A.I. Romanov, Moscow: "Nedra", 1988.
32. Imkhovik N.A. Thermodynamic modeling of the detonation features of phlegmatized explosives. N.A. Imkhovik, V.S. Zhuchenko, V.S. Soloviev // Chemical Physics of Combustion and Explosion Processes. XI Symposium on Combustion and Explosion, Chernogolovka, 1996, vol.2.
33. Dremin A.N. Parameters of the detonation wave of TNT, RDX, nitroglycerin and nitromethane / A.N. Dremin, P.F. Pohil // Reports of the USSR Academy of Sciences, 1959, vol. 128, no. 5, pp. 989 - 991.

*Ivan N. Surnachev is a Candidate of Technical Sciences, a Leading Researcher, Federal Research and Production Center "Altai", tel. (3854) 30-18-73, e-mail: post@frpc.secna.ru*

*Boris V. Pevchenko is a Candidate of Technical Sciences, General Director, Federal Research and Production Center Altai, tel (3854) 30-18-93, e-mail: post@frpc.secna.ru*

*Andrey V. Kurbatov is a Deputy Director General, a Chief Designer for R&D, tel (3854) 30-58-26, e-mail: post@frpc.secna.ru*

*Dmitry V. Pushkin is a head of laboratory, JSC "Federal Research and Production Center "Altai", tel. (3854) 30-18-73, e-mail: post@frpc.secna.ru*

*Maxim A. Chekanov is a Candidate of Technical Sciences, a Senior Researcher, Federal Research and Production Center "Altai", tel. (3854) 30-18-73, e-mail: post@frpc.secna.ru*

*Vyacheslav A. Belyaev is a Candidate of Technical Sciences, a Senior Researcher, Federal Research and Production Center "Altai", tel. (3854) 30-18-73, e-mail: post@frpc.secna.ru*

*Evgeny A. Petrov is a Doctor of Technical Sciences, a Chief Researcher, Federal Research and Production Center "Altai", tel. (3854) 30-59-20, e-mail: post@frpc.secna.ru*