

# ВЛИЯНИЕ ПОРОШКОВ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГОРЮЧИХ НА ТЕПЛОТУ ВЗРЫВА И РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВЗРЫВЧАТЫХ СОСТАВОВ

И.Н. Сурначев, Д.В. Пушкин, Е.А. Петров, В.А. Беляев, М.А. Чеканов

АО «Федеральный научно-производственный центр «Алтай», г. Бийск

В статье приведены результаты исследования характеристик высокоплотных литевых взрывчатых составов (ВС) с высокоэнергетическими металлическими добавками (алюминием, магнием, бериллием), которые представляют повышенный интерес для использования на практике, так как обладают высокой теплотой взрыва и работоспособностью.

Представлены расчетные и опытные термодимические и энергетические характеристики ВС с высокоэнергетическими добавками. Наилучшей работоспособностью обладают ВС с добавками алюминия. Оптимальное содержание алюминия составляет около 30 %. Предложены варианты фугасных ВС повышенной работоспособности.

*Ключевые слова:* алюминийсодержащий взрывчатый состав, высокоэнергетическая добавка, теплота взрыва.

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для повышения фугасного действия взрыва во взрывчатые составы (ВС) добавляют порошки алюминия с микронными размерами частиц, обладающие высокой теплотой сгорания ( $Q_{\text{на}} \sim 7400$  ккал/кг), что позволяет увеличить теплоту взрыва ВС в примерно 1,5 – 2,0 раза. Однако известны вещества, например, бор, бориды алюминия, бериллий с более высокой теплотой сгорания ( $Q_{\text{на}} \sim 10000 \dots 16000$  ккал/кг). Такие высокие энергетические параметры порошков металлов вызывают практический интерес к ним как к высокоэнергетическим добавкам (ВЭД) в ВС для возможно большего повышения их теплоты взрыва и фугасного действия.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Нами исследованы высокоплотные литевые ВС на основе СННО-ВВ с ВЭД как представляющие наибольший интерес для практического использования.

В табл. 1 приведены термодимические характеристики нескольких высокоэнергетических порошков металлов и их соединений типа боридов алюминия.

Табл. 1. Термодимические характеристики ВЭД

ВЭД	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Относительная молекулярная масса ВЭД	Оксид	$Q_{\text{обр}}$ , кДж/моль	$Q_{\text{ст}}$ , ккал/кг
Mg	1,74	24,3	MgO	600	5950
Al	2,72	27,0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1670	7400
B	2,33	10,8	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1260	13500
AlB <sub>10</sub>	2,50	135,0	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1670 + 1260	12000
AlB <sub>2</sub>	2,84	48,6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1670 + 1260	9550
Be	1,85	9,0	BeO	600	

Примечание.  $Q_{\text{обр}}$  – теплота образования. Для AlB<sub>10</sub>  $Q_{\text{обр}} = 184$  кДж/моль; для AlB<sub>2</sub> – 82 кДж/моль.

Проверялось также влияние на теплоту взрыва и фугасность применение ВЭД в виде механической смеси Al/B (90/10, %), дающей повышение энергии подводного взрыва ВС [1].

Известно, что фугасность зависит не только от теплоты взрыва, но и от объема газообразных продуктов взрыва (ПВ), которые, расширяясь, и производят работу.

В работе [2] предлагается оценивать фугасность ВС по относительной работоспособности  $f$  (зависимость проверена на большом количестве ВС):

$$f = (Q_{\text{вз}}/1031)^{0,75} (V_0/893)^{0,25}, \quad (1)$$

где  $V_0 = N \cdot 22,4$  – объем;  $N$  – число молей газообразных ПВ;  $Q_{\text{вз}}$  – теплота взрыва ВС; 1031 ккал/кг и 893 л/кг – теплота и объем газообразных ПВ эталонного ВС – аммонита БЖВ.

Сравнение проводилось на литевом ВС: ТНТ + ВЭД высокой плотности. Оптимальная массовая доля ВЭД определялась при условии достижения максимального значения максимальной теплоты взрыва  $Q_{\text{max}}$  при реализации образования высших оксидов горючих элементов, содержащихся в ВС, когда кислород расходуется последовательно на окисление ВЭД, водорода, углерода, оставшиеся выделяются в свободном виде (молекулярный водород, твердый углерод) и максимального значения  $f$ . При избытке Al учитывалась возможность образования AlN [3] с теплотой образования  $Q_{\text{ид}} = 346$  кДж/моль.

Значения  $Q_{\text{max}}$  рассчитывали по закону Гесса как разницу между теплотой образования ПВ  $\sum Q_{\text{иА}}$  и суммарной теплотой образования ВС  $Q_{\text{АН}}$  и боридов Al  $Q_{\text{АУА}}$ , т.е.

$$Q_{\max} = \sum Q_{iA} - (Q_{AN} - Q_{AY\bar{A}}).$$

Значения кислородного коэффициента  $\alpha$  рассчитывали по зависимости  $\alpha = d(2a + b/2 + 3e/2)$  для  $C_aH_bN_cO_dAl_e(B_e)$  и  $\alpha = d(2a + b/2 + e)$  – для магний- и бериллийсодержащих ВС  $C_aH_bN_cO_dMg_e(B_e)$ .

Значения теплоты образования ВВ и ПВ заимствованы из работы [4].

Как отмечено в [5], теплота взрыва растет при увеличении содержания алюминия в ВС до 40 %, однако объем газообразных ПВ при этом уменьшается, т.е. существует оптимальное соотношение  $Q_{\text{аэо}}$  и  $V_0$ , когда работоспособность ВС максимальна.

Теплоту взрыва  $Q_{\text{аэо}}$ , входящую в формулу (1), рассчитывали по зависимости, хорошо описывающей теплоту взрыва высокоплотных ВС с плотностью  $\rho > 0,9 \rho_{\max}$ , где  $\rho_{\max}$  – максимальная плотность ВС:

$$Q_{\text{аэо}} = 0,31\alpha^{0,25} Q_{\max}.$$

Логично предположить, что зависимости для оценки объема  $V_0$  газообразных ПВ также должны включать в себя фундаментальные характеристики ВС.

Так как термодинамические методы расчёта параметров детонации неприменимы к промышленным ВВ ввиду неидеальности режимов [6], использовались экспериментальные данные по  $V_0$ , в которых указаны значения плотности  $\rho_0$  и скорости детонации  $D$  (либо детонационные адиабаты) ВС, при которых они были получены [4, 7 – 12].

Так как  $V_0$  уменьшается с ростом  $\rho_0$  (т.е. с ростом давления  $p$ ) из-за увеличения в ПВ количества высших оксидов (например,  $CO_2$  вместо  $CO$  [10]), объём ПВ достигнет минимального значения  $V_{0\min}$  при реализации  $Q_{\max}$  (при  $p_{\max}$ ), так как при этом образуются только высшие оксиды, поэтому  $V_{0\min}$  можно считать фундаментальной характеристикой ВС, как  $Q_{\max}$ . В табл. 2 – 4 приведены характеристики индивидуальных ВВ, ВС, алюминийсодержащих взрывчатых составов (АВС) и экспериментальные значения  $V_0$ , а также рассчитанные значения фундаментальных характеристик ( $\alpha, Q_{\max}, p_{\max}, V_{0\min}$ ). Из рис. 1, 2 видно, что зависимости  $V_0(p)$  – линейные, объём газообразных ПВ минимален при  $p_{\max}$ , которое соответствует  $Q_{\max}$ , и максимален при  $p$ , стремящемся к нулю. Приведённые на рисунках 1 и 2 экспериментальные данные хорошо описываются зависимостью

$$V_0 = V_{0\max} - (V_{0\max} - V_{0\min}) p / p_{\max}, \quad (2)$$

Табл. 2. Фундаментальные характеристики для индивидуальных ВВ

ВВ	$\alpha$	$Q_{\max}$ , ккал/кг	$p_{\max}$ , кбар	$V_{0\min}$ , л/кг	$\rho_0/D$ , (г/см <sup>3</sup> )/(км/с)	$V_{0\text{экс}}$ , л/кг	$V_{0\text{расч}}$ , л/кг
ТНТ	0,367	1290	170	570	1,5/6,6	1,64/7,0	750 690 740 700
Тет.	0,483	1430	215	610	1,0/4,5	1,55/7,1	840 740 820 750
Гекс.	0,667	1480	300	760	1,0/5,8	1,78/8,7	890 820 890 830
Окт.	0,667	1475	320	760	1,89/9,1		800 820
ТЭН	0,855	1525	450	710	1,65/7,95		790 780
«С»	1,000	1820	–	580	–		600 580
«В»	1,400	1260	–	690	–		680 690

Примечание. Тет. – Тетрил; Гекс. – Гексоген; Окт. – Октоген; «С» – Вещество «С»; «В» – Вещество «В».

Табл. 3. Фундаментальные характеристики для смесевых ВВ

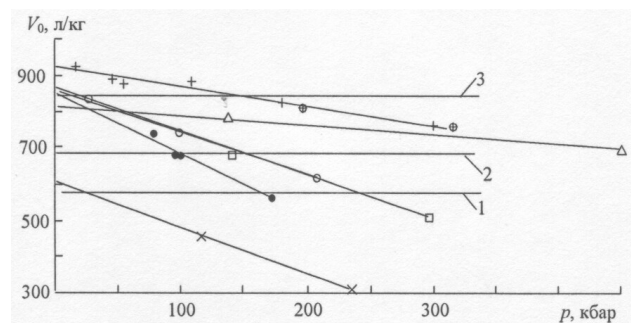
ВС	Состав, %	$\alpha$	$Q_{\max}$ , ккал/кг	$p_{\max}$ , кбар	$V_{0\min}$ , л/кг	$\rho_0/D$ , (г/см <sup>3</sup> )/(км/с)	$V_{0\text{экс}}$ , л/кг	$V_{0\text{расч}}$ , л/кг
ПГ-50	50ТНТ/50гекс	0,472	1400	260	665	1,65/7,65	825	825
	21,3ТНТ/78,7АС	1,0	1030	–	890	–	904	890
Аммотол	50ТНТ/50АС	0,657	1225	185	775	1,69/6,8	900	880
	80ТНТ/20АС	0,454	1220	220	650	1,67/6,9	830	810
А-IX-1	94гекс/6фл.	0,51	420	275	760	1,65/8,12	900	910

Примечание. АС – аммиачная селитра; фл. – флегматизатор.

Табл. 4. Фундаментальные характеристики и полученные значения  $V_0$  для различных АВС

Состав АВС, %	$\alpha$	$Q_{\max}$ , ккал/кг	$p_{\max}$ , кбар	$V_{0\min}$ , л/кг	$\rho_0/D$ , (г/см <sup>3</sup> )/(км/с)	$V_{0\text{экс}}$ , л/кг	$V_{0\text{расч}}$ , л/кг	$V_{0\text{макс}}$ , л/кг
ПГФА-13М 20Т/62Г/ 13АI/5фл	0,38	1800	280	560	1,7/7,73	770	780	940
ГА-20 80Г/20АI	0,5	2140	370	480	1,8/8,18	690	700	840
ГЭНА-30 70ТЭН/30АI	0,56	2560	240	310	1,8/7,4	465	470	670
Окфал-20 80окфол- 3,5/20АI	0,432	2070	360	510	1,85/8,23	755	770	990
Аммонал 12Т/83АС/5АI	1,06	1086	–	850	–	850	850	850
Нитрат №30 11Т/80АС/9АI	1,2	1300	–	790	–	790	790	790

Примечания. Т – тротил; А, АI – алюминий.



● – ТНТ; ○ – тетрил; + – гексоген; ⊕ – октоген; △ – ТЭН;  
1 – вещество «С»; 2 – вещество «В»; □ – ГА-20;  
× – ТЭНА-30; 3 – аммонал

Рис. 1. Зависимость объема газообразных ПВ от давления мгновенной детонации

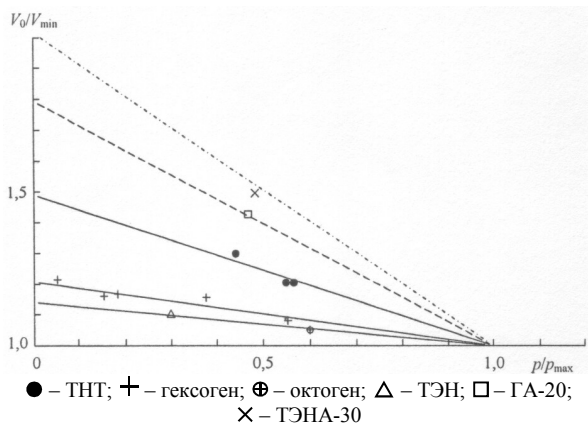


Рис. 2. Зависимость относительного объема газообразных ПВ от относительного давления мгновенной детонации

где  $V_{0max} = V_{0min} \cdot [1 + k(1 - \alpha)]^8$ ,  $k = 0,08 + \beta^{1,67}$ ,  $\beta$  – массовая доля Al. При  $\alpha \geq 1,0$  и при  $p \geq p_{max}$   $V_{0max} = V_{0min} = V_0$ .

Расчитанные по зависимости (2) значения  $V_{0\text{д\text{ан}}}$  приведены в табл. 2 – 4 в сравнении с экспериментальными  $V_{0\text{д\text{ан}}}$  при конкретных значениях  $\rho_0$ , которые подтверждают хорошую сходимость расчёта с экспериментом при

$$(0,08 + \beta^{1,67})(1 - \alpha) < 0,1 \text{ и } \alpha \leq 1,0. \quad (3)$$

Из табл. 2 – 4 выбраны несколько ВС, для которых определены  $f$  (с использованием  $Q_{\text{д\text{д}}}$  и  $V_0$ ) и  $f_{max}$  (с использованием  $Q_{max}$  и  $V_{0min}$ ). Из табл. 5 видно, что с ростом  $Q_{\text{д\text{д}}}$ , несмотря на уменьшение  $V_0$ ,  $f$  растёт и достигает  $f_{max}$  при  $Q_{max}$  и  $V_{0min}$ , а последовательность возрастания  $f(Q_{\text{д\text{д}}}, V_0)$  и  $f_{max}(Q_{max}, V_{0min})$  сохраняется, т.е. сравнительные качественные оценки работоспособности различных ВС можно проводить по  $f_{max}$  с использованием  $Q_{max}$  и  $V_{0min}$ . Такие параметры можно получить при пересжатой детонации.

Табл. 5. Полученные значения  $f_{min}, f$  и  $f_{max}$

ВС	$f(Q, V_0)/\rho_0$	$f(Q_{max}, V_{0min})$
ТНТ	0,94/1,6	1,07
ГГ-50	1,06/1,65	1,17
Гексоген	1,19/1,78	1,24
Токаф	1,16/1,7	1,35
ГА-20	1,46/1,8	1,48
ТЭН-30	1,50/1,8	1,52

По зависимостям (1) и (2) проведены сравнительные оценки  $f_{max}$  ВС с различными ВЭД. Результаты приведены в табл. 6, где указано процентное содержание ВЭД, при котором достигается максимальное значение  $Q_{max}$  и соответственно  $V_{0min}$ .

Табл. 6. Расчитанные значения работоспособности  $f_{max}$  для ВС с различными ВЭД

ВС Состав, %	$\alpha$	$Q_{max}$ , ккал/кг	$Q_{cal}$ , ккал/кг	$V_{0min}$ , л/кг	$f_{max}$
ТНТ/AlB <sub>10</sub> 82/18	0,265	2060	1460	320	1,3
ТНТ/Mg 61/39	0,265	2270	1600	240	1,30
ТНТ/B 84/16	0,26	2130	1500	330	1,36
ТНТ/Al/B 72/25,2/2,8	0,27	2270	1620	285	1,35
ТНТ/AlB <sub>2</sub> 78/22	0,27	2100	1480	310	1,35
ТНТ/Al 70/30	0,266	2320	1640	270	1,37
ТНТ/Be 81/19	0,266	2970	2100	320	1,72

Судя по данным табл. 6, кроме бериллия, который проблематично использовать в существующих технологиях из-за его высокой токсичности, все рассмотренные ВЭД в составе ВС при использовании их в боеприпасах по теплоте взрыва и работоспособности проигрывают алюминию даже без учёта затруднительного применения потенциальной энергии бора по причинам, отмеченным в [1, 13], включая высокую температуру воспламенения бора.

На основании приведённых расчётов можно сделать вывод, что в силу различной молекулярной массы ВЭД, расхода окислителя на образование оксидов, теплоты образования оксидов и ВЭД, применение бора и боридов алюминия не приводит к увеличению теплоты взрыва и работоспособности по сравнению с АВС и наибольшей энергией взрыва обладают боеприпасы, снаряжённые АВС.

На рис. 3 представлены зависимости  $Q_{\text{д\text{д}}}$  и  $f_{max}$  для алюминийсодержащих ТНТ и гексогена от содержания Al, которые показывают, что  $Q$  растёт до максимального значения при  $\beta = 40\%$ , а  $f_{max}$  становится максимальным при  $\beta = 0,3$ . Таким образом, наибольшей фугасностью обладают АВС с содержанием порошка Al  $\approx 30\%$ .

Для таких АВС (с массовой долей алюминия  $\beta = 0,3$ ) коэффициент  $k = 0,214$ ; тогда условие (3) выполняется при  $\alpha > 0,53$ . При меньших значениях  $\alpha$  приближенные значения  $V_{0\text{д\text{д}}}$  можно получить в предположении, что при стремлении  $\rho_0$  и  $p$  к нулю образуется CO, затем H<sub>2</sub>O, оставшиеся выделяются в свободном виде (молекулярные водород, азот, твердый углерод, Al). Такая оценка для состава ТЭНА-30 ( $\beta = 0,3$  и  $\alpha = 0,56$ ) дает значение  $V_{0\text{д\text{д}}} = 620$  л/кг, что совпадает со значением  $V_{0\text{д\text{д}}}$ , полученным по формуле (2) и рисунку 1.

В табл. 7 приведены сравнительные оценки относительной работоспособности  $f_{max}$  нескольких перспективных и штатных ВС, которые показывают, что значительно повысить работоспособность АВС

можно за счёт использования такого ВВ, как АДНА, производство которого освоено в АО «ФНПЦ «Алтай».

Табл. 7. Полученные значения  $f_{max}$  для фугасных АВС

ВС	$\rho_0/D$	$\alpha$	$Q_{max}$ ккал/кг	$Q$ ккал/кг	$V_{0min}$ л/кг	$f_{max}$
АДНА/ФТ/ Al (65/5/30)	2,0/6,2	0,750	2330	2130	515	1,59
ТГ-50/Al (70/30)	1,93/7,5	0,333	2330	1740	250	1,47
Фох-7/НГЦ/МПВТ/ Al (50/17/3/30)	1,96/8,0	0,44	2250	1800	400	1,48
ПХА/НГЦ/МПВТ/ Al (50/17/3/30)	2,0/6,5	0,735	2360	2170	390	1,51

Примечание. ФТ – фторкаучук ( $C_{2,3}H_{1,4}F_{3,2}$ ) с  $\Delta H_f = -670$  кДж/моль; НГЦ – нитроглицерин; Фох-7-диаминодинитроэтилен ( $C_2H_4N_4O_4$ ), МПВТ –  $C_4H_6N_4$ , ПХА – перхлорат аммония.

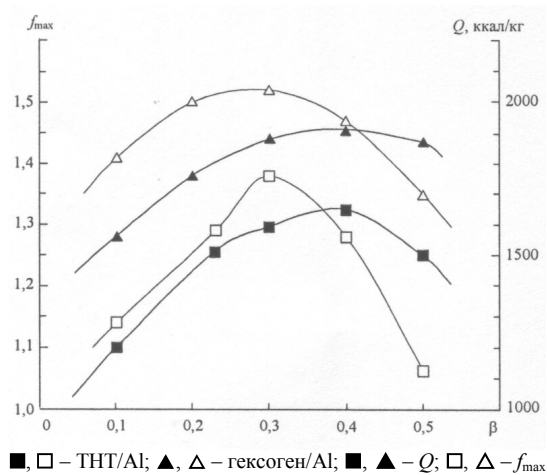


Рис. 3. Зависимость Q и f от содержания Al

На практике  $Q_{max}$  и  $f_{max}$  можно достичь (либо приблизиться к ним) при пересжатой детонации, используя в боеприпасе бинарный заряд (БЗ), состоящий из основного (ОЗ) фугасного и мощного инициирующего (ИЗ), при этом одновременно повышается и метательная способность АВС из-за роста скорости детонации.

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Использование в ВС в качестве высокоэнергетической добавки бора и боридов алюминия вместо алюминия не приводит к увеличению их теплоты взрыва и объёма газообразных ПВ, которые определяют фугасное действие взрыва боеприпаса.

2. Оптимальное процентное содержание алюминия в ВС, обеспечивающее максимальную работоспособность боеприпаса, составляет  $\approx 30\%$ .

3. Предложено несколько вариантов литевых фугасных ВС с повышенной относительной

работоспособностью до значений 1,48 – 1,59 по сравнению с эталонным ВС (БЖВ).

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

- 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. – N 3. – С. 97 – 104.
- Афанасенков, А.Н. О работоспособности промышленных взрывчатых веществ / А.Н. Афанасенков, Л.И. Котова, Б.Н. Кукиб // Физика горения и взрыва. – 2001. – Т. 37. – N 3. – С. 115 – 129.
- Вадхе, П.П. Алюминизированные литевые взрывчатые вещества (обзор) / П.П. Вадхе, Р.Б. Павар, Р.К. Синха, С.Н. Астана, А. Субханада Рао // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44. – N 4. – С. 98 – 113.
- Дубнов, Л.В. Промышленные взрывчатые вещества / Л.В. Дубнов, Н.С. Бахаревич, А.И. Романов. – М.: Недра, 1988 .
- Решетов, А.А. Фазовый состав продуктов детонации смесевых ВВ // XI Симпозиум по горению и взрыву. – Черноголовка, 1996. – Т. 11.
- Пепекин, В.И. О теплоте взрыва промышленных взрывчатых веществ / В.И. Пепекин, С.А. Губин // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т. 43. – N 2. – С. 100 – 107.
- Апин, А.Я. О взрывчатом разложении гексогена / А.Я. Апин, Ю.А. Лебедев // Доклады АН СССР. – 1957. – Т. 114. – № 4. – С. 819 – 821.
- Индивидуальные и смесевые взрывчатые вещества военного назначения: Справочник. – Дзержинск, 2011 .
- Апин, А.Я. Экспериментальное определение теплоты взрыва / А.Я. Апин, А.Ф. Беляев, В.С. Соснова // Физика взрыва. – 1953. – N 2. – С. 3 – 26.
- Юхансон, К.; Персон, М. Детонация взрывчатых веществ / К. Юхансон, М. Персон. – М.: Мир, 1973 .
- Авакян, Г.Н. Методы расчёта характеристик взрывчатых веществ / Г.Н. Авакян, Ю.М. Ким, А.А. Мельников. – ЦНИИИТИ, 1980.
- Махов, М.Н. Теплота и состав продуктов взрыва алюминизированных ВВ // Химическая физика процессов горения и взрыва. XII симпозиум по горению и взрыву, Черноголовка, 2000. – Ч. 11 С. 151 – 152.
- Вагин, А.В. Энергетические характеристики и компоновка взрывчатых составов «ВВ-активный металл-окислитель» фугасно-осколочных боеприпасов / А.В. Вагин, М.И. Сидоров // Боеприпасы и спецхимия. – 2014. – N 1.

Сурначев Иван Никифорович – кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, АО «ФНПЦ «Алтай», тел. (3854) 30-18-73, e-mail: post.@frpc.secna.ru

Пушкин Дмитрий Валерьевич – начальник лаборатории, АО «ФНПЦ «Алтай» тел. (3854) 30-18-73, e-mail: post.@frpc.secna.ru

Петров Евгений Анатольевич – доктор технических наук, главный научный сотрудник, АО «ФНПЦ «Алтай», тел. (3854) 30-59-20, e-mail: post.@frpc.secna.ru

Беляев Вячеслав Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «ФНПЦ «Алтай», тел. (3854) 30-18-73, e-mail: post.@frpc.secna.ru

Чеканов Максим Анатольевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, АО «ФНПЦ «Алтай», тел. (3854) 30-18-73, e-mail: post.@frpc.secna.ru

# INFLUENCE OF POWDERS OF HIGH-ENERGY METALLIC FUELS ON THE EXPLOSION HEAT AND THE PERFORMANCE OF EXPLOSIVE COMPOSITIONS

I.N. Surnachev, D.V. Pushkin, E.A. Petrov, V.A. Belyaev, M.A. Chekanov

JSC «Federal Research and Production Center «Altai», Biysk

The article presents the results of studying the characteristics of high-density cast explosive compositions (EC) with high-energy metal additives (aluminum, magnesium, beryllium), which are of increased interest for the practical use since they have a high heat of explosion and a high performance. Design and trial thermochemical and energy characteristics of EC with high-energy additives are presented. EC with aluminum additives have the best performance. The optimum aluminum content is around 30%. Variants of high-explosive EC of increased efficiency are proposed.

Keywords: aluminum-rich explosive composition, high-energy additive, heat of explosion

## REFERENCES

1. Xu S., Y. Chen, S. Chen, D. Wu, D.-B. Liu. Combustion Heat of Al / B powder and the efficiency of its use in metallized explosives in an underwater explosion / S. Xu, Y. Chen, S. Chen, D. Wu, D.-B. Liu // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. –2016.– Vol. 52– No. 3.– P. 97 – 104.
2. Afanasenkov, A.N. On the performance of industrial explosives/ A.N. Afanasenkov, L.I. Kotova, B.N. Cookib // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. –2001.– Vol. 37.– No. 3.– P. 115 – 129.
3. Wadhe, P.P. Aluminized cast explosives (review) / P.P. Wadhe, R.B. Pavar, R.K. Sinha, S.N. Astana, A. Subhanada Rao // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – 2008.– Vol. 44.– No. 4.– P. 98 – 113.
4. Dubnov, L.V. Industrial explosives / L.V. Dubnov, N.S. Bakharevich, A.I. Romanov. –Moscow: Nedra, 1988.
5. Reshetov, A.A. Phase composition of detonation products of the mixed explosives // XIth Combustion and Explosion Symposium.– Chernogolovka.– 1996.– Vol.11.
6. V.I. Pepekin, S.A. Gubin. On the explosion heat of industrial explosives / V.I. Pepekin, S.A. Gubin // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. –2007.– Vol. 43.– No. 2.– P. 100 - 107.
7. Apin A.Ya., Yu.A. Lebedev. On Explosive Decomposition of RDX / A. Ya. Apin, Yu.A. Lebedev // Reports of the USSR Academy of Sciences.– 1957.– Vol. 114.– No. 4.– P. 819-821.
8. Individual and mixed military explosives: Book of reference.– Dzerzhinsk.– 2011.
9. Apin, A.Ya. Experimental determination of the explosion heat / A.Ya. Apin, A.F. Belyaev, V.S. Sosnova // *Explosion physics*. –1953.– No. 2.– P. 3 – 26.
10. Johansson, K. Detonation of explosives / K. Johansson, M. Person.–M.: Mir, 1973.
11. Avakyan, G.N. Methods to calculate performance characteristics of explosives / G.N. Avakyan, Yu.M. Kim, A.A. Melnikov.– TsNIINTI, 1980.
12. Makhov, M.N. Heat and composition of the explosion products of aluminized explosives // Chemical physics of combustion and explosion processes. XIIth Symposium on Combustion and Explosion.– Chernogolovka, 2000.– Vol. 11.– P. 151 - 152.
13. Vagin, A.V. Energetic characteristics and layout of explosive compositions «explosive-active metal-oxidizer» of high-explosive fragmentation ammunition / V. Vagin, M.I. Sidorov // *Ammunition and special chemicals*.– 2014.– No. 1.

Ivan N. Surnachev has Ph.D. in Engineering Sciences. He is a Leading Researcher at JSC "Federal Research and Production Center «Altai», tel. (3854) 30-18-73, e-mail: post @ frpc.secna.ru.

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

Evgeny A. Petrov is a Doctor of Engineering. He is the Chief Researcher at JSC "Federal Research and Production Center «Altai», tel. (3854) 30-59-20, e-mail: post @ frpc.secna.ru

Vyacheslav A. Belyaev has Ph.D. in Engineering. He is a Senior Researcher at JSC "Federal Research and Production Center "Altai", tel. (3854) 30-18-73, e-mail: post @ frpc.secna.ru.

Maksim A. Chekanov has Ph.D. in Engineering. He is a Senior Researcher at JSC "Federal Research and Production Center «Altai» (3854) 30-18-73, e-mail: post @ frpc.secna.ru.