

УДК 622.235.2

## СКОРОСТЬ ДЕТОНАЦИИ ВЫСОКОДИСПЕРСНОГО ПЕРХЛОРАТА АММОНИЯ И ЕГО СМЕСЕЙ С ВЗРЫВЧАТЫМИ ВЕЩЕСТВАМИ

А. А. Котомин, С. А. Душенюк, М. А. Илюшин

СКТБ «Технолог», 192076 Санкт-Петербург, akotomin@mail.ru

Проведено измерение близких к идеальным скоростей детонации относительно больших зарядов высокодисперсного перхлората аммония (ПХА) и его смесей с различными взрывчатыми веществами (ВВ) в толстостенных стальных трубах. Найдены зависимости скорости детонации ПХА от его плотности и скорости детонации смесей от соотношения компонентов и кислородного коэффициента смесей. Впервые предложен расчет скорости детонации трехкомпонентных составов ПХА/ВВ/Al.

Ключевые слова: перхлорат аммония, скорость детонации, дисперсность, кислородный коэффициент.

DOI 10.15372/FGV20170314

В последнее время возрос интерес к энергетическим конденсированным системам, содержащим перхлорат аммония (ПХА). Введение ПХА в состав современных взрывчатых композиций позволяет существенно повысить параметры ударных волн при воздушном и подводном взрывах.

Анализ литературы выявил недостаточное количество работ по исследованию скоростей детонации ПХА различной дисперсности и его смесей с различными взрывчатыми веществами (ВВ), а также неоднозначность известных экспериментальных скоростей детонации чистого ПХА. Так, согласно Касту [1] в стальной трубе диаметром 35 мм при плотности заряда  $\rho_0 = 1.17 \text{ г/см}^3$  скорость детонации ПХА равна 2.50 км/с, а согласно Эвансу [2] — 3.75 км/с при  $\rho_0 = 1.0 \text{ г/см}^3$ .

В работе [3] приведены скорости детонации ПХА с размером частиц 10 мкм для зарядов без оболочек диаметром 50 мм: 3.40 км/с при  $\rho_0 = 1.0 \text{ г/см}^3$ , 4.2 км/с при  $\rho_0 = 1.26 \text{ г/см}^3$ , 4.4 км/с при  $\rho_0 = 1.40 \text{ г/см}^3$ ; для зарядов без оболочек диаметром 76 мм: 3.78 км/с при  $\rho_0 = 1.0 \text{ г/см}^3$ , 4.79 км/с при  $\rho_0 = 1.26 \text{ г/см}^3$ . При  $\rho_0 > 1.4 \text{ г/см}^3$  скорость детонации ПХА падает [3].

В данной работе исследовались близкие к идеальным скорости детонации относительно больших зарядов высокодисперсного ПХА и его

смесей с различными ВВ, а также составов, содержащих алюминий, в толстостенных стальных трубах.

Скорости детонации измерялись ионизационными датчиками и регистрировались цифровым осциллографом с разрешающей способностью 5 нс. Для обеспечения режима детонации, близкого к идеальному, ПХА и смеси с ним подпрессовывали в стальных трубах диаметром 20 и 40 мм, с толщиной стенок 2.7 и 3.2 мм, длиной 150 и 200 мм соответственно. Трубы диаметром 20 мм использовались для смесей, содержащих более 50 % ВВ. Контрольные опыты показали, что скорости детонации таких смесей практически одинаковы в трубах диаметром 20 и 40 мм. Для индивидуального ПХА использовались трубы диаметром только 40 мм. Надежность получаемых экспериментальных данных обеспечивалась двукратным повторением эксперимента, в каждом из которых регистрировалось пять значений скорости детонации, соответствующих пяти участкам заряда. Результаты каждого эксперимента осреднялись методом наименьших квадратов.

Зависимость скорости детонации высокодисперсного ПХА с размером частиц 7 мкм от плотности заряда определена в широком диапазоне  $\rho_0 = 0.70 \div 1.58 \text{ г/см}^3$  (плотность кристалла ПХА —  $\rho_k = 1.95 \text{ г/см}^3$ ). Следует отметить, что ПХА с размером частиц 160 мкм в данных условиях детонирует с загущением. Данные экспериментов для частиц ПХА раз-

Таблица 1  
Плотность зарядов и скорость детонации  
перхлората аммония (7 мкм)

$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$D$ , км/с
0.705	2.79
0.958	3.67
1.108	4.24
1.110	4.08
1.285	4.76
1.387	4.85
1.393	4.92
1.394	5.00
1.398	4.87
1.400	4.92
1.406	4.76
1.527	4.09
1.555	3.46
1.578	3.34

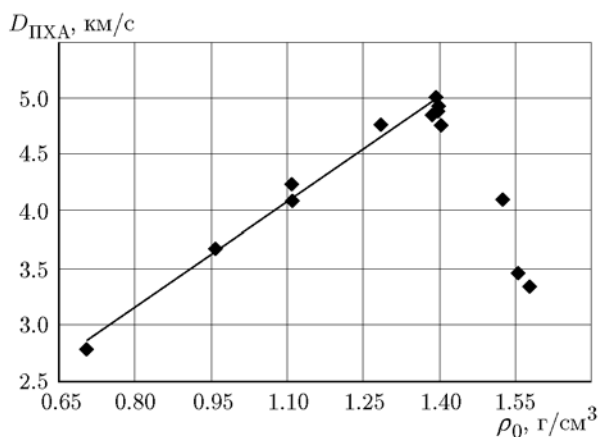


Рис. 1. Зависимость скорости детонации ПХА (7 мкм) от плотности заряда

мером 7 мкм приведены в табл. 1 и на рис. 1.

Скорость детонации ПХА  $D_{\text{ПХА}}$  линейно возрастает при повышении плотности заряда от 0.700 до 1.394 г/см<sup>3</sup>. Предельное ее значение составляет  $4.97 \pm 0.03$  км/с. С дальнейшим увеличением плотности скорость детонации ПХА резко падает, что согласуется с результатами работы [3]. Линейный участок полученной зависимости аппроксимируется следующим соотношением:

$$D = 2.85 + M(\rho_0 - 0.7),$$

$$M = 3.07 \text{ (км/с)/(г/см}^3\text{)}. \quad (1)$$

Как видно из уравнения (1), при указанном значении коэффициента  $M$  для ПХА скорость его детонации при  $\rho_0 = 0.7$  г/см<sup>3</sup> равна 2.85 км/с.

Проведено исследование зависимости скорости детонации смесей тэн/ПХА (7 мкм) и гексоген/ПХА (7 мкм) от содержания ВВ ( $C_{\text{ВВ}}$ ) в смесях. Смесей готовили путем тщательного механического перемешивания с выборочным контролем состава. Средний размер частиц ВВ составлял 50 мкм для тэна и 30 мкм для гексогена. Плотность зарядов большинства этих смесей находилась в относительно небольшом интервале:  $\rho_0 = 1.13 \div 1.27$  г/см<sup>3</sup>. Для сравнения исследовались аналогичные смеси с крупными частицами ПХА (160 мкм).

Средние значения измеренных скоростей детонации всех исследованных смесей  $D_{\text{см}}$  приведены в табл. 2.

Далее экспериментальные скорости детонации были приведены к одной плотности зарядов ( $\rho_0 = 1.20$  г/см<sup>3</sup>) по коэффициенту  $M$  для смеси, рассчитанному аддитивно по коэффициентам  $M$  для тэна ( $M = 3.25$  (км/с)/(г/см<sup>3</sup>)), гексогена ( $M = 3.33$ ) и ПХА ( $M = 3.07$ ). На рис. 2 и 3 представлены полученные результаты для смесей ВВ/ПХА с размером частиц ПХА 7 мкм, а также построены аналогичные зависимости для смесей с размером частиц ПХА 160 мкм.

Из рис. 2, 3 видно, что смеси с крупными частицами ПХА в условиях экспериментов детонируют в неидеальном режиме, поэтому данные для смесей ВВ/ПХА с размером частиц ПХА 160 мкм не подходят для создания корректной методики расчета скорости детонации.

Представленные на рис. 2, 3 зависимости скорости детонации от содержания различных ВВ в смеси имеют сходный характер. Нелинейность графиков связана с вкладом ПХА не только как ВВ, но и как сильного окислителя, продукты разложения которого химически взаимодействуют с продуктами разложения ВВ.

При сравнении зависимостей скорости детонации и кислородного коэффициента  $\alpha$  смесей от содержания в них различных ВВ (рис. 4, 5) становится очевидной взаимосвязь этих параметров смесей.

Для получения обобщенной зависимости скорости детонации смесей ВВ / ПХА от кисло-

Таблица 2

Плотность зарядов и скорость детонации смесей ВВ/ПХА

Содержание ВВ в смеси, %	ТЭН/ПХА при размере частиц ПХА				Гексоген/ПХА при размере частиц ПХА			
	160 мкм		7 мкм		160 мкм		7 мкм	
	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$D_{см}$ , км/с	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$D_{см}$ , км/с	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$D_{см}$ , км/с	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	$D_{см}$ , км/с
10	1.234	3.92	1.200	4.69	1.236	3.73	1.200	4.67
	1.238	3.81			1.251	3.72		
20	1.240	4.40	1.135	4.80	1.268	4.50	0.828	3.78
	1.225	4.35			1.267	4.52		
30	1.230	4.85	1.190	5.18	1.270	5.08	1.168	5.30
	1.228	4.83			1.285	5.08		
40	1.216	5.01	1.158	5.26	1.267	5.51	1.243	5.71
	1.215	5.05						
50	1.179	5.24	1.203	5.58	1.243	5.73	1.138	5.58
							1.242	5.83
60	1.111	5.23	1.148	5.52	1.284	6.05	1.211	6.07
	1.144	5.26			1.293	5.99		
70	1.125	5.45	1.197	5.79	1.235	6.08	1.240	6.38
	1.138	5.47			1.280	6.12		
80	1.064	5.36	1.136	5.82	1.278	6.41	1.158	6.21
	1.086	5.39			1.275	6.44		
90	0.998	5.38	1.200	6.15	1.283	6.70	1.272	6.77
					1.260	6.62		

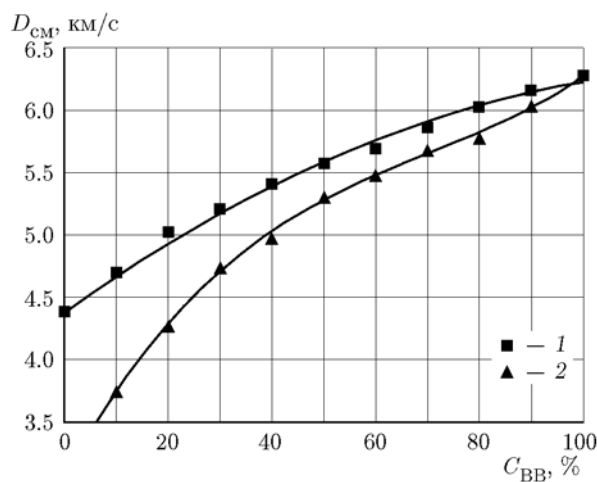


Рис. 2. Зависимость скорости детонации смесей тэн/ПХА от содержания тэна в них при  $\rho_0 = 1.20$  г/см<sup>3</sup>: размер частиц ПХА: 1 — 7 мкм, 2 — 160 мкм

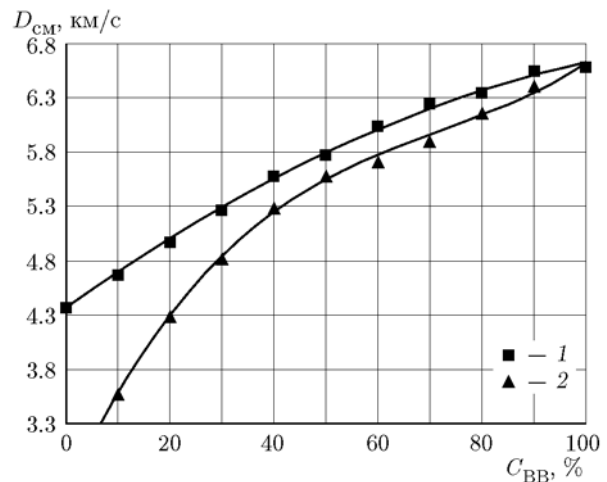


Рис. 3. Зависимость скорости детонации смесей гексоген/ПХА от содержания гексогена в них при  $\rho_0 = 1.20$  г/см<sup>3</sup>: размер частиц ПХА: 1 — 7 мкм, 2 — 160 мкм

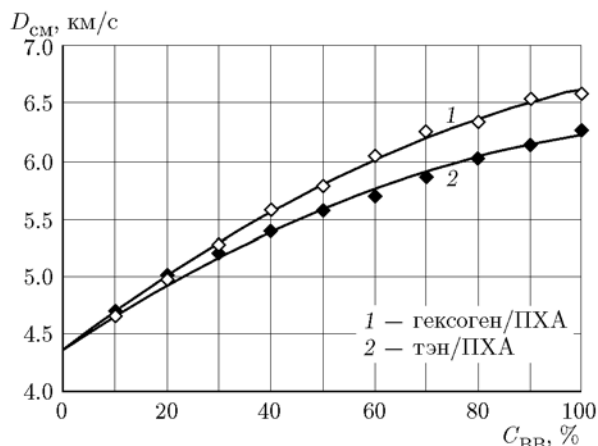


Рис. 4. Зависимость скорости детонации смесей ВВ/ПХА (7 мкм) от содержания ВВ в них при  $\rho_0 = 1.20 \text{ г/см}^3$

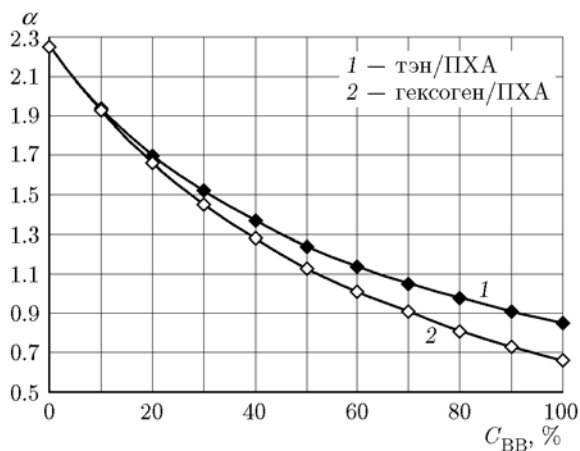


Рис. 5. Зависимость кислородного коэффициента смесей ВВ/ПХА от содержания ВВ в них

родного коэффициента смеси предложены следующие параметры:

$$D' = \frac{D_{см} - D_{ВВ}}{D_{ПХА} - D_{ВВ}}, \quad \alpha' = \frac{\alpha_{см} - \alpha_{ВВ}}{\alpha_{ПХА} - \alpha_{ВВ}},$$

где  $D_{см}$ ,  $D_{ВВ}$ ,  $D_{ПХА}$  — скорость детонации соответственно смеси, ВВ и ПХА при  $\rho_0 = 1.20 \text{ г/см}^3$ ;  $\alpha_{см}$ ,  $\alpha_{ВВ}$ ,  $\alpha_{ПХА}$  — кислородный коэффициент смеси, ВВ и ПХА соответственно.

Полученная обобщенная зависимость представлена на рис. 6. Она аппроксимируется соотношением

$$D' = 1.348\alpha' - 0.348(\alpha')^2 \quad (2)$$

с коэффициентом корреляции 0.99.

Формула (2) может быть использована для расчета скорости детонации смесей других ВВ

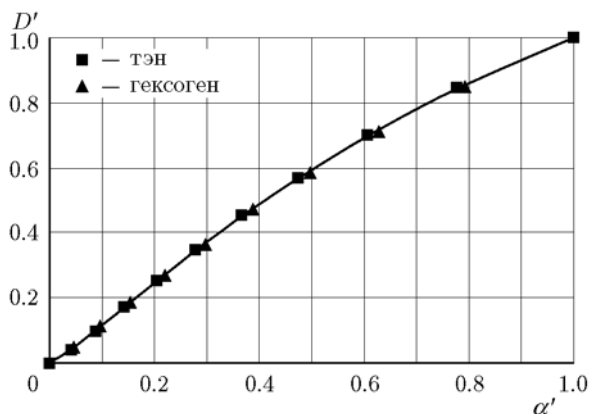


Рис. 6. Обобщенная зависимость скорости детонации смесей ВВ/ПХА от кислородного коэффициента смеси

с ПХА при  $\rho_0 = 1.20 \text{ г/см}^3$ . Вычисленную скорость детонации можно привести к заданной плотности смеси по ее коэффициенту  $M$ , рассчитанному аддитивно по  $M$  для ВВ и ПХА ( $M = 3.07 \text{ (км/с)/(г/см}^3)$ ). На основании полученных в работе результатов и известных экспериментальных данных в расчет вводится ограничение: для смесей, содержащих менее 20 % ВВ, расчет применим только для зарядов с пористостью не менее 20 %.

Предложенная методика расчета была проверена сопоставлением расчетных и экспериментальных данных для смесей ПХА (7 мкм) с октогеном и 3,4-бис(4-нитрофуразан-3-ил)фуросаном (DNTF) при их содержании 50 и 75 % соответственно. В целом отклонение от экспериментальных скоростей составило не более 0.8 %. При использовании в качестве ВВ тэна и гексогена результаты примерно такие же.

Кроме смесей ПХА с различными ВВ, в вышеуказанных условиях были экспериментально исследованы близкие к идеальным скорости детонации тройных смесей ВВ/ПХА (7 мкм)/Al (10 ÷ 20 мкм). На основе полученных результатов предложена эмпирическая экспресс-методика расчета скорости детонации стехиометрических тройных смесей, кислородный баланс которых равен нулю:

$$\begin{aligned} \frac{D_{ВВ/ПХА/Al}}{D_{ВВ/ПХА}} &= \\ &= \left( \frac{n_{ВВ/ПХА/Al}}{n_{ВВ/ПХА}} \right)^{1.20} \sqrt{\frac{Q_{ВВ/ПХА/Al}}{Q_{ВВ/ПХА}}}, \quad (3) \end{aligned}$$

где  $D_{ВВ/ПХА}$  — скорость детонации двойной смеси при пористости, равной пористости тройной смеси;  $n_{ВВ/ПХА/Al}$ ,  $n_{ВВ/ПХА}$  — число молей газообразных продуктов взрыва тройной и двойной смесей, моль/кг;  $Q_{ВВ/ПХА/Al}$ ,  $Q_{ВВ/ПХА}$  — теплота взрыва тройной и двойной смесей, кДж/кг.

Средняя относительная погрешность данной методики расчета составила 1.5 %. В методике допускается упрощенная схема взрывчатого превращения смесей, не претендующая на расчет точного состава продуктов взрыва.

В табл. 3 приведены экспериментальные скорости детонации некоторых стехиометрических тройных смесей.

Приведем расчет скорости детонации тройной смеси тэн/ПХА/Al 20/59.5/20.5 при  $\rho_0 = 1.402 \text{ г/см}^3$ .

Характеристики компонентов смеси:

тэн,  $C_5H_8O_{12}N_4$ :  $\mu_{ВВ} = 316.135$ ,  $\rho_k = 1.77 \text{ г/см}^3$ ,  $M = 3.25 \text{ (км/с)/(г/см}^3)$ ,  $Q_{вобр} = 481.8 \text{ кДж/моль}$ ,  $\alpha_{ВВ} = 0.857$ ,  $D_{1.20} = 6.27 \text{ км/с}$ ;

ПХА,  $NH_4ClO_4$ :  $\mu_{ВВ} = 117.488$ ,  $\rho_k = 1.95 \text{ г/см}^3$ ,  $M = 3.07 \text{ (км/с)/(г/см}^3)$ ,  $Q_{вобр} = 284.0 \text{ кДж/моль}$ ,  $\alpha_{ВВ} = 2.25$ ,  $D_{1.20} = 4.39 \text{ км/с}$ ;

Al:  $\mu = 26.982$ ,  $\rho_k = 2.70 \text{ г/см}^3$ .

Молярные доли компонентов в 1 кг тройной смеси:

$200/316.135 + 595/117.488 + 205/26.982 = 0.6327C_5H_8O_{12}N_4 + 5.0644NH_4ClO_4 + 7.5977Al$ .

Кислородные коэффициенты для тройной и двойной смесей:

$\alpha_{тр} = (12 \cdot 0.6327 + 4 \cdot 5.0644 + 0.5 \cdot 5.0644)/(10 \cdot 0.6327 + 4 \cdot 0.6327 + 2 \cdot 5.0644 + 3/2 \cdot 7.5977) = 1.00$ ;

$\alpha_{дв} = (12 \cdot 0.6327 + 4 \cdot 5.0644 +$

$0.5 \cdot 5.0644)/(10 \cdot 0.6327 + 4 \cdot 0.6327 + 2 \cdot 5.0644) = 1.60$ .

Рассчитаем скорость детонации двойной смеси при пористости, равной пористости тройной смеси. Для тройной смеси  $\rho_0 = 1.402 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_{max} = 2.024 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_0/\rho_{max} = 0.693$ . Для двойной смеси (25.15 % тэна + 74.85 % ПХА)  $\rho_{max} = 1.901 \text{ г/см}^3$ ,  $\rho_0 = 1.901 \cdot 0.693 = 1.317 \text{ г/см}^3$ . Согласно (2)  $(D_{см} - 6.27)/(4.39 - 6.27) = 1.348(1.60 - 0.857)/(2.25 - 0.857) - 0.348 \cdot \{(1.60 - 0.857)/(2.25 - 0.857)\}^2$ . Отсюда  $D_{см} = 5.10 \text{ км/с}$  при  $\rho_0 = 1.20 \text{ г/см}^3$ . Приведем  $D_{см}$  к значению  $\rho_0 = 1.317 \text{ г/см}^3$ :

$M_{см} = 0.2515 \cdot 3.25 + 0.7485 \cdot 3.07 = 3.12 \text{ (км/с)/(г/см}^3)$ ,  $D_{см} = 5.10 + 3.12(1.317 - 1.20) = 5.46 \text{ км/с}$  при  $\rho_0 = 1.317 \text{ г/см}^3$ .

Двойная смесь  $0.6327C_5H_8O_{12}N_4 + 5.0644NH_4ClO_4 \rightarrow 5.0644HCl + 10.1274H_2O_n + 3.1635CO_2 + 3.7976N_2 + 5.6978O_2$ ;

число молей продуктов взрыва  $n = 27.8507 \text{ моль}$ ;

теплота взрыва  $Q_{взр} = 92.35 \cdot 5.0644 + 240.7 \cdot 10.1274 + 393.5 \cdot 3.1635 - 481.8 \cdot 0.6327 - 284.0 \cdot 5.0644 = 2407.1 \text{ кДж}$  (на массу двойной смеси 795 г в 1 кг тройной смеси);

удельная теплота взрыва  $Q_{взр,уд} = (2407.1/795) \cdot 1000 = 3027.8 \text{ кДж/кг}$ ;

удельное число молей газообразных продуктов взрыва  $n_{уд} = (27.8507/795) \cdot 1000 = 35.03 \text{ моль/кг}$ .

Тройная смесь  $0.6327C_5H_8O_{12}N_4 + 5.0644NH_4ClO_4 + 7.5977Al \rightarrow 5.0644HCl + 10.1274H_2O_n + 3.1635CO_2 + 3.7976N_2 + 3.7988Al_2O_3$ ;

число молей газообразных продуктов взрыва  $n = 22.15 \text{ моль/кг}$ ;

теплота взрыва  $Q_{взр} = 2407.1 + 1672.0 \times 3.7988 = 8758.7 \text{ кДж/кг}$ .

Скорость детонации тройной смеси при  $\rho_0 = 1.402 \text{ г/см}^3$  вычисляем по формуле (3):

$$\frac{D_{ВВ/ПХА/Al}}{5.46} = \left(\frac{22.15}{35.03}\right)^{1.20} \sqrt{\frac{8758.7}{3027.8}} = 0.981.$$

Отсюда  $D_{ВВ/ПХА/Al} = 5.36 \text{ км/с}$ . Экспериментальное значение 5.41 км/с.

На основе результатов исследования близких к идеальным скоростей детонации высокодисперсного перхлората аммония и его смесей с различными ВВ установлены зависимости скорости детонации ПХА от его плотности (в широком диапазоне) и скорости детонации сме-

Таблица 3

Скорость детонации смесей ВВ/ПХА/Al

Состав, %	ПХА (160 мкм)		ПХА (7 мкм)	
	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	D, км/с	$\rho_0$ , г/см <sup>3</sup>	D, км/с
Тэн/ПХА/АСД-4 20/59.5/20.5	1.462	3.91	1.402	5.41
	1.468	3.85		
Гексоген/ПХА/АСД-4 40/50.4/9.6	1.337	5.32	1.123	5.18
	1.367	5.41		

сей от соотношения компонентов и кислородного коэффициента смесей. Предложена эмпирическая экспресс-методика расчета скорости детонации тройных стехиометрических смесей ПХА/ВВ/Al.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Encyclopedia** of Explosives and Related Items / В. Т. Fedoroff, Sheffield O. E. — New Jersey, USA: Piccatinny Arsenal Dover, 1978. — V. 8. — P. 145.
2. **Evans M. W., Reese B. O., Seely L. B., Lee E. L.** Shock initiation of low-density pressings ammonium perchlorate // Proc. of 4th Symp. on Detonation, October, 1965.
3. **Price D., Clairmont A. R., Jaffe I.** Explosive Behavior of Ammonium Perchlorate. — White Oak, Silver Spring, Maryland: U. S. Naval Ordnance Laboratory, 1967.

*Поступила в редакцию 4/VII 2016 г.,  
в окончательном варианте — 1/XII 2016 г.*

---