

УДК 662.215.12

## О МЕТОДАХ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРОТИЛОВОГО ЭКВИВАЛЕНТА ВОДОНАПОЛНЕННОГО ГЕКСОГЕНА ПО УТОЧНЕННЫМ МЕТОДИКАМ

*А.Л. Кривченко<sup>1</sup>, И.А. Клюстер<sup>2</sup>, О.М. Васильева<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> Самарский государственный университет путей сообщения  
Россия, 443066, г. Самара, 1-й Безымянный пер., 18

*Рассмотрены вопросы работоспособности сухих и водонаполненных ВВ. Показано изменение значений тротилового эквивалента водонаполненного гексогена плотностью 1,43 г/см<sup>3</sup> и насыщенного гексогена плотностью 1,03 г/см<sup>3</sup> соответственно на всем участке расширения. Показано, что максимальный рост работоспособности конденсированных ВВ приходится на начало адиабатического расширения, а именно на первые 10 % расширения ПД, далее идет плавное снижение роста работоспособности. Зафиксировано, что максимальное значение тротилового эквивалента приходится не к нулевой плотности расширения ПД, а к плотности расширения  $p_2/p_1 = 0,9$ . Определены значения тротилового эквивалента водонаполненной системы. Исходя из рассмотренных методик определения работоспособности и тротилового эквивалента предложена формула для определения тротилового эквивалента конденсированных ВВ.*

**Ключевые слова:** гексоген, водонаполненные взрывчатые системы, работа взрыва, теплота взрыва, тротилового эквивалент.

Важной энергетической характеристикой взрывчатых веществ (ВВ), определяющей их бризантность, является механическая работа, которую совершает взрыв в плотных средах. Мерой идеальной работоспособности ВВ может служить максимальная работа, которую совершают продукты взрыва (ПВ) при своем адиабатическом расширении до давления окружающей среды [1, 2]. В работе [3] А.Ф. Беляев дал определение работоспособности ВВ и предложил определять идеальную работу взрыва с помощью следующего выражения:

$$A = Q[1 - (v_1 / v_2)^{n-1}]. \quad (1)$$

Фактическая величина работы, совершаемой продуктами взрыва в плотных средах, всегда меньше, чем идеальная величина, из-за химических и термодинамических потерь энергии взрыва. К.К. Шведов [4] для приближенного вычисления работы, совершаемой ПВ при их расширении до не слишком малых давлений, когда еще возможно пользоваться политропой вида  $pv^n = \text{const}$ , предложил пользоваться следующим выражением:

$$A = u_1^2 n / (n - 1) [1 - (p_2 / p_1)^{n-1}], \quad (2)$$

---

*Александр Львович Кривченко (д.т.н., проф.), профессор.*

*Иван Александрович Клюстер, аспирант.*

*Ольга Михайловна Васильева (к.т.н.), доцент.*

где  $u_1$ ,  $u_1^2$ ,  $p_1$  – соответственно массовая скорость, полная энергия единицы массы ПВ, плотность ПВ в точке Жуге;  $p_2$  – плотность ПВ к концу расширения.

Данное уравнение пригодно для описания поведения ПВ на всех стадиях расширения и имеет общий для конденсированных ВВ вид. К.К. Шведов в качестве критерия работоспособности ВВ предлагает использовать величину  $A_{0,5}$ , при которой происходит двукратное расширение ПВ ( $v_2/v_1 = 2$ ), составляющее 60–70 % полной работы расширения ( $A_0$ ).

Представляет интерес подробно рассмотреть изменение работы взрыва ПД взрывчатого вещества из точек Жуге до степени расширения  $p_2/p_1$  и проследить изменение тротилового эквивалента исследуемых ВВ в разных точках расширения ПД. Данным вопросам посвящена настоящая работа.

### Расчет работоспособности ВВ

На рис. 1 приведены зависимости работы взрыва ПД гексогена плотностью заряда  $1,44 \text{ г/см}^3$  (1), системы «гексоген – вода»  $0,75/0,25$  плотностью заряда  $1,43 \text{ г/см}^3$  (2), насыпного гексогена плотностью  $1,03 \text{ г/см}^3$  (3) и тротила плотностью  $1,0 \text{ г/см}^3$  (4), рассчитанные по (2). Видно, что все кривые сухих конденсированных ВВ подобны. На всем участке расширения ПД конденсированных ВВ наблюдается постоянный рост значений работы взрыва. В случае водонаполненной системы рост наблюдается при 85%-м расширении ПД и достигает  $3,53 \text{ кДж/г}$ , при дальнейшем расширении ПД водонаполненной системы значение работы взрыва не растет.

При 10%-м расширении ПД рост кривых зарядов водонаполненной системы плотностью  $1,43 \text{ г/см}^3$  и гексогена плотностью  $1,44 \text{ г/см}^3$  совпадает, затем заряды гексогена «уходят в отрыв» и при расширении до нулевой плотности работа взрыва достигает максимального значения  $4,78 \text{ кДж/г}$ . При 75%-м расширении ПД значение работы взрыва водонаполненной системы плотностью  $1,43 \text{ г/см}^3$  превышает значение работы взрыва насыпного гексогена плотностью  $1,03 \text{ г/см}^3$ , затем идет затухание роста работы взрыва водонаполненной системы, тогда как значение работы взрыва насыпного гексогена плотностью  $1,03 \text{ г/см}^3$  продолжает расти и при нулевой плотности достигает максимального значения  $3,79 \text{ кДж/г}$ .

Мера максимального роста работоспособности исследуемых ВВ приходится на начало адиабатического расширения, а именно на первые 10% расширения ПД, далее идет плавное снижение роста работоспособности. Вероятно, это связано с физическими свойствами ВВ.

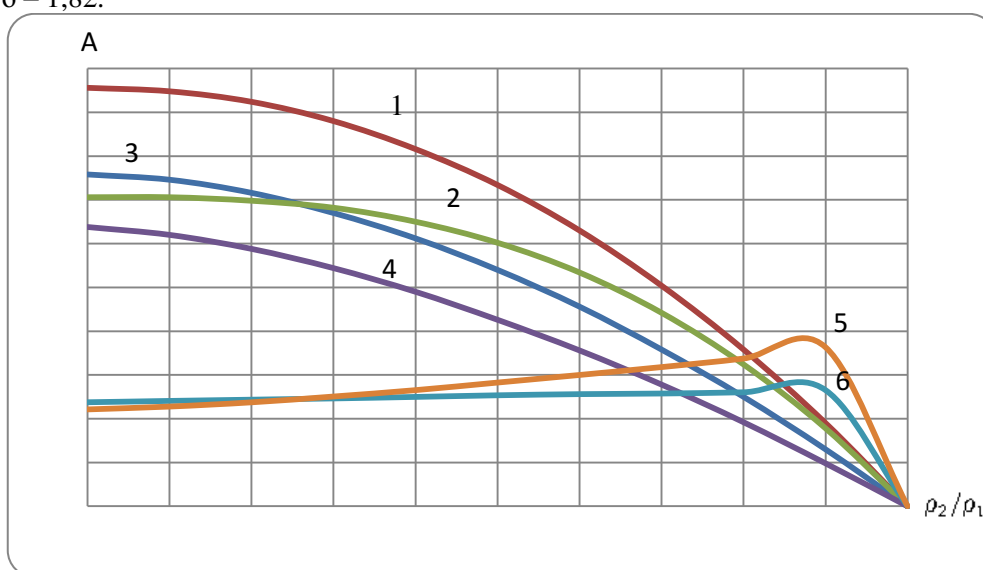
При наличии значений работы взрыва ПД конденсированных ВВ на всех стадиях расширения из точек Жуге до расширения нулевой плотности представляет интерес определить максимальное значение работоспособности конкретного ВВ через показатель работоспособности тротила – другими словами, через тротиловый эквивалент. Согласно [5] значение тротилового эквивалента может быть рассчитано по следующим выражениям:

$$a_{T1} = A_{\text{гг}} / A_T; \quad (3)$$

$$a_{T2} = (\eta_u Q_{\text{взр}}) / 4186 \eta_m, \quad (4)$$

где  $a_{T1,2}$  – эквивалент;  $A_{BB}$  – работа взрыва ПД исследуемого ВВ;  $A_T$  – работа взрыва ПД тротила;  $Q$  – удельная теплота взрыва исследуемого ВВ;  $\eta_u, \eta_m$  – термодинамические коэффициенты взрыва исследуемого ВВ и тротила соответственно.

На рисунке кривыми 5 и 6 показаны значения отношений работоспособности водонаполненного гексогена плотностью  $1,43 \text{ г/см}^3$  и насыпного гексогена плотностью  $1,03 \text{ г/см}^3$  соответственно к работоспособности тротила. Как видно на рисунке, максимальное значение тротилового эквивалента приходится не к нулевой плотности расширения ПД, а к плотности расширения  $p_2/p_1 = 0,9$ , и в случае насыпного гексогена достигает значения 1,33, а в случае водонаполненного – 1,82.



Зависимость работы взрыва ПД исследуемых ВВ от плотности расширения ПД

Согласно выражению (4) значение тротилового эквивалента напрямую зависит от значения выделенной энергии при взрыве. Авторами работы [6] был проведен ряд экспериментов по определению теплоты взрыва водонаполненного гексогена в зависимости от содержания воды и дисперсности порошка. Так, в данной работе было экспериментально показано, что теплота взрыва на единицу веса гексогена различной степени дисперсности линейно возрастает при увеличении содержания воды в заряде от 0 до 24 %, а введение в заряд ВВ воды более 24 % не приводит к дальнейшему увеличению теплоты взрыва. На основе данных по теплоте взрыва системы «гексоген – вода» с пропорциональным соотношением 75/25 был определен тротильный эквивалент данного продукта по (4). Результаты вычислений приведены в таблице.

#### Результаты вычислений

ВВ/система	$\rho, \text{ г/см}^3$	$Q, \text{ Дж/г}$	$a_{T1} (3)$	$a_{T2} (4)$	$a_T (5)$
Гексоген	1,03	5 422	1,33	1,33	1,33
Гексоген – вода 0,75/0,25	1,43	6 552	1,82	1,76	1,82

В таблице приведены значения тротилового эквивалента насыпного и водонаполненного гексогена, рассчитанные по (3) и (4). Видно неплохое совпадение полученных результатов. Так как выше уже было отмечено, что максимальное значение тротилового эквивалента приходится не к нулевой плотности расширения ПД, а к плотности расширения  $p_2 / p_1 = 0,9$ , и при этом расширении работа взрыва тротила составляет 0,49 кДж/г, то представляется возможным расчет тротилового эквивалента вести по следующему выражению:

$$a_T = [u_1^2 n / (n - 1)(1 - 0,9^{n-1})] / 0,49, \quad (5)$$

где  $a_T$  – эквивалент;  $u_1, u_1^2$  – соответственно массовая скорость, полная энергия единицы массы ПВ; 0,49 кДж/г – работа ПД тротила при  $p_2 / p_1 = 0,9$ .

Максимальное значение тротилового эквивалента в точке расширения ПД исследуемых ВВ, равной 0,9, подтверждает максимальный рост работоспособности ВВ на данном участке и может служить критерием работоспособности исследуемого ВВ.

### Выводы

1. В работе подробно рассмотрено изменение работы взрыва ПД взрывчатого вещества из точек Жуге до степени расширения  $p_2 / p_1$ .
2. Показано изменение значений тротилового эквивалентов водонаполненного гексогена плотностью 1,43 г/см<sup>3</sup> и насыпного гексогена плотностью 1,03 г/см<sup>3</sup> соответственно на всем участке расширения.
3. Показано, что максимальное значение тротилового эквивалента приходится не к нулевой плотности расширения ПД, а к плотности расширения  $p_2 / p_1 = 0,9$ .
4. Исходя из рассмотренных методик определения работоспособности и тротилового эквивалента предложена формула для определения тротилового эквивалента конденсированных ВВ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.

1. Дубнов Л.В., Бахаревиц Н.С., Романов А.И. Промышленные взрывчатые вещества: 3-е изд. – М.: Недра, 1988.
2. Балаганский И.А., Мержиевский Л.А. Действия средств поражения и боеприпасов. – Новосибирск: НГТУ, 2004.
3. Беляев А.Ф. О полной работе взрыва // А.Ф. Беляев. Физика взрыва. – М.: Изд. АН СССР, 1953. – Сб. № 2. – С. 27.
4. Шведов К.К. Об определении работоспособности ВВ // Физика горения и взрыва. – 1984. – Т. 20. – № 3. – С. 60–64.
5. Кривченко А.Л., Клюстер И.А. Расчет параметров взорвавшихся остатков пропано-воздушной смеси вагона цистерны // Вестник Института проблем естественных монополий. Техника железных дорог. – 2014. – № 3 (27). – С. 59–61.
6. Ващенко В.И., Матюшин Ю.Н., Пепекин В.И., Апин А.Я. Энергия взрыва водонаполненного гексогена // Физика горения и взрыва. – 1971. – Т. 3. – С. 429–432.

Статья поступила в редакцию 5 марта 2015 г.

## ON THE METHODS OF DETERMINATION OF TNT RDX WATER-FILLED ACCORDING TO SPECIFIED PROCEDURES

*A.L. Krivchenko<sup>1</sup>, I.A. Klyuster<sup>2</sup>, O.M. Vasilieva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

<sup>2</sup> Samara State University of Transport  
18, 1 Bezimyanii per., Samara, 443066, Russian Federation

*The issues of efficiency and dry water-filled explosives. Shows the change in the values of TNT equivalent water-filled RDX density of  $1.43 \text{ g / cm}^3$  and a bulk density of RDX  $1.03 \text{ g / cm}^3$ , respectively in the whole area of expansion. It is shown that the maximum growth performance of condensed explosives occurs at the beginning of adiabatic expansion, namely the first 10% expansion of the detonation products, followed by a gradual decline in growth performance. Stipulates that the maximum value of TNT is necessary not to zero density expansion of the detonation products and to expand density  $p_2 / p_1 = 0,9$ . The values of TNT equivalent water-filled system. Based on the discussed methods for determining the health and TNT, proposed a formula for determining the TNT equivalent of condensed explosives.*

**Keywords:** *RDX, explosives, water-system, the work of the explosion, the heat of the explosion of TNT.*

---

*Alexander L. Krivchenko (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*

*Ivan A. Klyuster, Postgraduate Student.*

*Olga M. Vasilieva (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*