

В. Ю. Давыдов, Л. В. Дубнов, А. М. Гришкин

## УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЙ КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВВ

Предложен критерий эффективности ВВ, основанный на термодинамической модели работы, совершаемой расширяющимися продуктами детонации. Критерий позволяет оценивать эффективность ВВ при различных степенях расширения продуктов взрыва или в пересчете при различных временах отбора энергии от ПВ в процессе совершения ими механической работы.

Для оценки эффективности взрывчатых веществ (ВВ), применяемых в пародном хозяйстве, предложен ряд критериев в виде отдельных энергетических характеристик, параметров детонации или их комбинаций [1]. Общий недостаток этих критериев состоит в том, что они замыкаются на собственных свойствах ВВ и не включают каких-либо перемещенных величин, отражающих условия взаимодействия продуктов взрыва (ПВ) с объектом взрывного нагружения, например времени воздействия или энергообмена, вид взаимодействия и др. Поэтому на практике относительные показатели эффективности различных ВВ могут сильно меняться в зависимости от характера взрывных работ и не соответствовать выбранному расчетному критерию. В отдельных случаях ВВ могут даже меняться местами в рядах относительной эффективности.

Для устранения этого противоречия ограничивают область применения того или иного критерия или пользуются эмпирическими формулами с переменными коэффициентами [1]. Так, для работы взрыва в форме дробления горной массы или упрочнения металлических изделий, при котором реализуется лишь головная часть импульса взрыва, вводят критерий в виде давления детонации ( $\sim \rho D^2$ ) или импульса детонационной волны ( $\rho D$ ); при работе взрыва на сдвиг, выброс и т. п., где реализуется большая часть импульса взрыва, — общей энергией ВВ  $Q$  или производными величинами, например работоспособностью ВВ  $\eta Q$  и др.

Между тем имеется возможность выбора универсального критерия, который бы откликался на переменные условия взаимодействия ПВ с объектом взрывного нагружения, хотя бы по одному параметру. В качестве такого предлагается критерий эффективности ВВ, основанный на термодинамической модели работы взрыва, совершаемой ПВ в процессе их расширения. Как будет показано ниже, этот критерий позволяет создать скользящую шкалу эффективности ВВ, связанную со степенью расширения продуктов взрыва.

Рассмотрим работу, совершаемую расширяющимися ПВ, как адиабатический процесс. Тогда из закона сохранения энергии имеем

$$dA = - du = \int_{v_1}^{v_2} p(v) dv, \quad (1)$$

где  $A$  — работа, производимая ПВ;  $u$  — внутренняя энергия ПВ;  $v_1$  — начальный объем ПВ;  $v_2$  — объем ПВ к моменту завершения работы;  $p$  — давление ПВ. Если принять политропический закон расширения ПВ вида  $p v^n = \text{const}$  и постоянство этого закона в достаточно широких пределах по давлению (до  $p_2 = 100$  МПа), то получим выражение для идеальной работы взрыва при произвольной степени расширения ПВ  $v_2/v_1$ :

$$A_n = \int_{v_1}^{v_2} p_1 \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n dv = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right]. \quad (2)$$

Величина  $A_n$  характеризует поршневое действие ПВ, способность их производить работу сдвига (горной массы, контактного тела и др.), ча-

сто пазываемую метательной способностью ВВ (МС). В этом смысле она может служить критерием эффективности ВВ, который условно назовем термодинамическим. Значение  $A_n$  возрастает с повышением начального давления ПВ  $p_1$ , их плотности  $1/v_1$ , пропорциональной плотности ВВ  $\rho_0$  и зависит от химического состава ПВ через показатель политропы  $n$ . При желаниии величину  $p_1 v_1 / (n - 1)$  можно заменить на теплоту взрывчатого превращения ВВ  $Q$ , и тогда  $A_n$  становится пропорциональной энергетическому потенциалу ВВ.  $A_n$  можно отнести к единице массы ВВ, как это сделано в выражении (2), или к единице объема ВВ, помножив ее на  $\rho_0$ . В последнем случае получаем

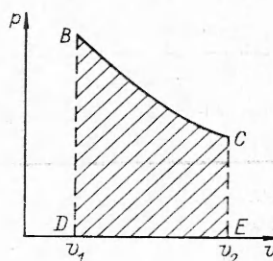


Рис. 1.

$$(A_n)_v = \frac{p_1 n}{n^2 - 1} \left[ 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right], \quad (3)$$

принимая  $\rho_0 = \frac{1}{v_1} \frac{n}{n+1}$ .

Отличие предлагаемого термодинамического критерия от других состоит главным образом в том, что помимо собственных характеристик ВВ ( $p_1$ ,  $v_1$ ,  $n$ ) он включает переменную величину  $v_2$ , определяющую степень расширения ПВ на момент завершения данного вида работы взрыва. Если известна скорость расширения ПВ  $\frac{dv}{dt}$ , становится возможным определить эффективность ВВ и в зависимости от временного параметра взаимодействия, т. е. от характерного времени энергообмена между ПВ и объектом воздействия (времени отбора энергии). На рис. 1 в координатах  $p-v$  величина  $A_n$  выражена заштрихованной площадью.

Выражением (2) можно пользоваться, если вдоль всей кривой  $BC$  на рис. 1 сохраняется общее уравнение состояния ПВ. Если же последнее меняется в ходе расширения ПВ, то  $A_n$  вычисляется как сумма работ  $\sum a_n$  на соответствующих участках расширения с известными и постоянными уравнениями состояния или находится графоаналитически как площадь  $BCDE$ , ограниченная экспериментально найденной кривой расширения ПВ.

При решении практических задач в большинстве случаев пользуются не абсолютными, а относительными показателями эффективности ВВ ( $\epsilon$ ), соотнося действие нового ВВ к действию широко апробированного ВВ, принимаемого за эталон. Если для расчета  $\epsilon$  пользоваться  $A_n$  ( $\epsilon = \frac{A_n}{(A_n)_{эт}}$ ), то получим важный результат: относительные показатели эффективности ВВ будут постоянными для всех степеней расширения ПВ только в том случае, если равны показатели политропы  $n$  для эталона и сравниваемого ВВ. При разных значениях  $n$  становится функцией степени расширения газов, т. е. будет разной для различных видов взрывных работ.

Часто при приближенных расчетах параметров детонации величину  $n$  для используемых ВВ в уплотненном состоянии ( $\rho_0 > 1$  г/см<sup>3</sup>) принимают одинаковой и равной 3. На самом деле инструментальные определения показывают, что  $n$  в зависимости от плотности ВВ и его химического состава меняется в достаточно широких пределах [2]. Поэтому в ряде случаев изменения в показателях относительной эффективности ВВ могут быть существенными.

Для проверки правомерности оценки эффективности ВВ с помощью предложенного критерия были сопоставлены показатели метательного действия взрыва, оцениваемого по скорости расширения медной трубки  $W$ , внутри которой взорван заряд ВВ («цилиндр — тест») [3].

Таблица 1

## Расширение медной трубки

ВВ*	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$D_{\text{эксп}}$ , мм/с	$W$ , мм/мкс	$\bar{W}^2$	$n$	$\rho, D_{\text{эксп}}$ , мм/г/л	$p_1$ , кбар	$(\bar{A}_n)_e$ , ккал/л	$(\bar{A}_n)_v$	$\bar{\rho D^2}$	$\bar{p}_1$
Октоген	1,19	6,67	1,36	0,70	2,58	52,9	145	1507	0,61	0,48	0,53
Октоген	1,89	9,11	1,86	1,30	3,09	156,9	392	3327	1,34	1,43	1,43
Состав В	1,72	7,99	1,63	1,0	2,92	109,8	274	2478	1	1	1
Циклотол	1,75	8,25	1,70	1,09	2,96	119,1	299	2663	1,07	1,08	1,09
Октол	1,81	8,48	1,75	1,15	2,99	130,2	322	2836	1,14	1,19	1,18
Состав LX-14	1,84	8,83	1,79	1,21	3,03	143,5	351	3045	1,23	1,31	1,28
БТФ	1,86	8,49	1,83	1,26	2,96	134,1	341	3038	1,23	1,22	1,24
Состав LX-11	1,88	8,32	1,66	1,04	3,0	130,1	328	2878	1,16	1,18	1,20
ТНТ	1,63	6,94	1,40	0,74	2,80	78,5	202	1916	0,77	0,71	0,74

\* Состав В: 60,4 % гексогена + 37,8 % тротила + 1,8 % воска; циклотол: 73,2 % гексогена + 26,8 % тротила; октол: 72,4 % октогена + 27,6 % тротила; состав LX-14: 93 % октогена + 7 % эстана; состав LX-11: 80 % октогена + 20 % витана.

В табл. 1 приведены результаты измерения  $W$ , скорости детонации  $D$  [3] и расчета  $(\bar{A}_n)_v$ ,  $p_1$ ,  $\rho D^2$  для разных ВВ и составов. Опыты выполнялись на трубке диаметром 25 мм при толщине стенок ~5 мм. Точка измерения  $W$  отвечала отношению радиусов трубки до и после расширения  $r/r_0 = 2,24$  ( $\Delta r = 19$  мм), что соответствует приближению степени расширения ПВ  $v_2/v_1 = 7$  [4]. Показатель политроны, необходимый для расчета величины  $(\bar{A}_n)_v$ , вычислялся по формуле

$$n = \frac{10\rho_0(4,2 + 2\varphi\rho_0)^2}{40 + 75\varphi\rho_0^2} - 1,$$

выведенной из полуэмпирических уравнений, приведенных в [5], где  $\varphi = mQ^{1/2}$ ;  $m$  — число молей газообразных ПВ на 1 г ВВ.

По данным табл. 1 были составлены уравнения регрессии, показывающие степень корреляции между расчетными показателями относительной эффективности ВВ и экспериментальными, выраженными через отношение квадратов скоростей расширения стенок трубки  $\bar{W}^2 = W^2/W_{\text{эт}}^2$  (за эталон принят состав В):

$$\bar{W}^2 = 0,118 + 0,882(\bar{A}_n)_v, \quad R = 0,972, \quad \sigma = 4,8 \%;$$

$$\bar{W}^2 = 0,270 + 0,729p_1, \quad R = 0,963, \quad \sigma = 5,4 \%;$$

$$\bar{W}^2 = 0,323 + 0,686\rho D^2, \quad R = 0,963, \quad \sigma = 5,5 \%.$$

Здесь и в дальнейшем  $(\bar{A}_n)_v$ ,  $p_1$ ,  $\rho D^2$  — отношения соответствующих величин к эталонным. Видно, что термодинамический критерий относительной эффективности  $(\bar{A}_n)_v$  описывает метательную способность ВВ при данной степени расширения ПВ несколько лучше, чем два других ( $p_1$ ,  $\rho D^2$ ), включающих только параметры детонации ВВ.

Аналогичные результаты получены при обсчете экспериментальных данных по торцевому метанию пластины открытым зарядом [6]. С учетом большого отношения диаметра к толщине метаемой пластины поток ПВ приближенно приравнен к одномерному, к моменту измерения скорости пластины принято  $v_2/v_1 = 2$ . В табл. 2 приведены исходные экспериментальные и расчетные данные.

При выводе уравнений регрессии для оценки относительной эффективности ВВ в качестве эталона принят состав ТГ-40. Получены следующие уравнения:

$$\bar{W}^2 = -0,641 + 1,580(\bar{A}_n)_v, \quad R = 0,984;$$

$$\bar{W}^2 = -0,507 + 1,440p_1, \quad R = 0,982;$$

Таблица 2

## Торцевое метание

ВВ	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\bar{W}$ , мм/мкс	$\bar{W}^2$	$n$	$\rho D^2$ , мДж/л	$\overline{\rho D^2}$	$p_1$ , кбар	$\overline{p_1}$	$(A_{II})_v$ , ккал/л	$(\overline{A_{II}})_v$
ТГ 40/60	1,64	1,66	1,00	2,87	93,8	1,00	247	1,00	1700	1,00
ТОК 20/80	1,76	1,85	1,24	2,97	120,8	1,29	310	1,26	2094	1,23
Гексоген	1,68	1,80	1,18	2,96	115,7	1,23	298	1,21	2017	1,19
Октоген	1,78	2,05	1,53	3,02	134,7	1,44	340	1,38	2275	1,34
Тэн	1,67	1,75	1,11	2,90	105,7	1,13	271	1,10	1854	1,09
Тротил	1,60	1,29	0,60	2,79	73,3	0,78	194	0,79	1355	0,80

$$\overline{W}^2 = -0,379 + 1,301\overline{\rho D^2}, \quad R = 0,985.$$

Видно, что и в данном случае (при малой степени расширения ПВ) коэффициент корреляции между экспериментальными и расчетными показателями относительной эффективности ВВ (метательной способности) для термодинамического критерия не хуже, чем для критериев, основанных на параметрах детонации ВВ. Однако наиболее важной для подтверждения преимуществ предлагаемого термодинамического критерия была бы иллюстрация того, насколько адекватно данный критерий откликается на изменение внешних условий метательного действия взрыва.

На рис. 2, заимствованном из работы [7], видно, что относительная эффективность ВВ, выраженная через отношение кинетических энергий, набранных материалом стенки медной трубки при ее расширении, меняется с изменением степени расширения ПВ, т. е. на разных участках расширения трубки. Для одних ВВ (БТФ, тротил) с увеличением  $v_2/v_1$  эффективность по отношению к октогену возрастает, для других (RX-23-AA) — падает.

На примере БТФ проверялось, как термодинамический критерий правильно прослеживает указанную тенденцию. На рис. 3 приведена кривая относительной эффективности БТФ, выраженная через отношение идеальных работ БТФ и октогена. При расчетах в качестве исходных принимались экспериментальные данные, приведенные в работе [7]:

	$\rho_0$ , кг/м <sup>3</sup>	$D$ , км/с	$p$ , кбар
Октоген	1890	9,11	39
БТФ	1859	8,48	36

Показатель политроны рассчитывали по формуле  $n = \rho_0 D^2 / p - 1$ . Как и на рис. 2, эффективность БТФ, выраженная в данном случае через отношение величин идеальной работы, на начальной стадии расширения ПВ оказалась ниже, чем у октогена, но затем, начиная с  $v_2/v_1 \approx 3$ , стала выше, чем у октогена.

Аналогичные результаты получены и при обработке экспериментальных данных [4]. Результаты расчета приведены в табл. 3 (эталон —

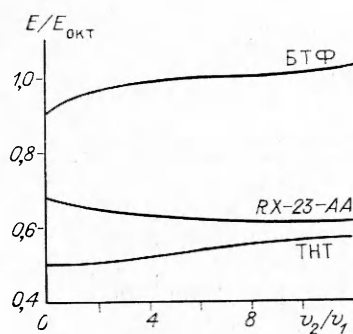


Рис. 2.

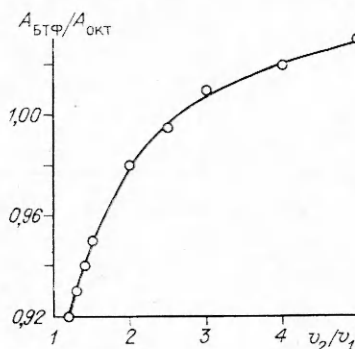


Рис. 3.

Относительные показатели эффективности ВВ \*

ВВ	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$W$ , мм/мкс	$W^2$	$n$	$\rho D^2$ , мДж/л	$p$ , кбар	$(A_{II})v$ , ккал/л	$\overline{\rho D^2}$	$\overline{p_1}$	$(\overline{A_{II}})v$
Октоген	1,891	1,87 (1,69)	1 (1)	3,09	159,2	393	3335 (2596)	1	1	1 (1)
ТНТ	1,630	1,41 (1,23)	0,57 (0,53)	2,80	76,6	202	1916 (1408)	0,48	0,51	0,57 (0,54)
Тэн	1,765	1,79 (1,60)	0,92 (0,90)	2,96	121,4	311	2770 (2105)	0,76	0,79	0,83 (0,81)
БТФ	1,852	1,84 (1,62)	0,97 (0,92)	2,96	133,3	337	3002 (2281)	0,84	0,86	0,90 (0,88)

\* Цифры в скобках для  $v_2/v_1 = 2$ , без скобок для  $v_2/v_1 = 7$ .

октоген). При степенях расширения ПВ 2 и 7 в условиях «цилиндр-теста» имеется сходство между экспериментальными и расчетными показателями относительной эффективности разных по химическому составу ВВ. Это еще раз подтверждает способность термодинамического критерия правильно описывать изменения эффективности ВВ в переменных условиях совершения работы метания.

Таким образом, термодинамический критерий учитывает влияние на эффективность ВВ не только их энергетического потенциала и плотности, но и химических составов ВВ и ПВ.

Из выражения (2) следует, что при равном энергетическом запасе ВВ и степени расширения ПВ эффективность выше у веществ с большим значением  $n$ . Это объясняется тем, что на начальной стадии расширения ПВ, описываемой политропой, эта величина физически зависит от сил упругого взаимодействия молекул, т. е. в первом приближении пропорционально уплотнению молекул в ПВ. Последнее можно оценивать по отношению собственного объема молекул к объему, занимаемому ПВ, или более приближенно — по количеству молей ПВ в единице объема. При больших степенях расширения, когда процесс определяется «тепловыми» силами, эффективность будет тем выше, чем ниже теплоемкость ПВ. Причем преимущество по метательному действию будут иметь те ВВ, продукты взрыва которых будут состоять из малоатомных газов. Формально это выражается в том, что показатель адиабаты расширения ПВ при больших степенях расширения газов возрастает с уменьшением средней атомности ПВ.

Противоречий здесь нет. Суть явления состоит в том, что физические свойства молекул ПВ по-разному влияют на эффективность процесса метания в зависимости от того, какая составляющая в уравнении состояния — упругая или тепловая — преобладают. По указанной причине возможна такая пара ВВ, где, начиная с некоторой степени расширения ПВ, меняются местами в ряду относительной эффективности, как, например, октоген и БТФ (см. рис. 2). Расчетный состав ПВ этих двух ВВ приведен в табл. 4, откуда видно, что количество молей ПВ в единице объема и собственный объем молекул выше у октогена, в то время как средняя атомность молекул  $a_{ср}$  ниже у БТФ. Этим и объясняется перемена мест в ряду относительной эффективности для этих двух ВВ, начиная с некоторой степени расширения ПВ.

Таблица 4

Состав продуктов взрыва

ВВ	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Состав ПВ, моль/л						$\Sigma N$ , моль/л	$a_{ср}$
		H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	CO	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C		
Октоген	1,89	21,420	7,297	12,336	2,755	24,175	4,542	72,525	2,33; 2,42 *
БТФ	1,859	0	7,577	29,087	0	22,121	7,577	66,363	2,00; 2,13 *

\* Без учета C.

Таким образом, предложенный термодинамический критерий эффективности правильно учитывает особенности энергообмена между метаемым телом и ПВ различного химического состава. Отметим, что предложенная методика допускает как приближенные, так и более точные оценки эффективности ВВ в зависимости от поставленной задачи (например, приближенного или точного расчета заряда при переходе от одного ВВ на другое) и наличия исходных данных.

При приближенных расчетах можно пользоваться пзоэнтропической моделью расширения ПВ и полуэмпирическими формулами для расчета величин, входящих в уравнение (3). При этом следует заметить, что пзоэнтропическая модель в принципе малоприменима для взрывчатых смесей, содержащих алюминий (алюматол, аммоналы и др.), у которых значительная часть тепловыделения приходится на стадию расширения ПВ.

При точных расчетах необходимо, во-первых, учитывать возможные отклонения от идеального изозитропического расширения в результате вторичных или равновесных реакций в процессе расширения ПВ и теплообмена между ПВ и окружающей средой (что, например, вполне реально при взрывании в песчаных и других несвязанных грунтах). Кроме того, необходимо пользоваться точными термодинамическими методами расчета параметров детонации, состава ПВ и уравненном состоянии вдоль политропы расширения в заданном диапазоне изменения их давления или объема [8—10].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Дубнов Л. В., Бахаревич Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества.— М.: Недра, 1988.
2. Шведов К. К. О регистрации параметров Ченмена — Жуге при детонации конденсированных ВВ // ФГВ.— 1987.— 23, № 4.— С. 94—103.
3. Kury J. W., Horing H. S. Low detonation velocity — high energy explosives: Symp. H. D. P.— Paris, 1978.
4. Kamlet M. J., Short J. M., Finger M. et al. The chemistry of detonation. VIII. Energetics relationships on the detonation isentrope // Combust. Flame.— 1983.— 51, № 3.— P. 325—333.
5. Пепекин В. И., Кузнецов П. М., Лебедев Ю. А. О взаимосвязи параметров детонации с химическим составом ВВ // Докл. АН СССР.— 1977.— 234, № 1.— С. 105—108.
6. Воскобойников П. М., Воскобойникова И. Ф. Оценка метательного действия взрывчатых веществ // Детонация. Материалы II Всесоюз. совещания по детонации.— Черноголовка, 1981.— Вып. II.— С. 64—67.
7. Finger M., Lee E. et al. The effect of elemental composition on the detonation behavior of explosives: Proc. 6th Symp. (Int.) on Detonation.— Coronado (Calif.), 1976.— P. 172.
8. Губин С. А., Одинцов В. В., Пепекин В. И. Термодинамические расчеты детонации конденсированных веществ.— Черноголовка: ИХФ АН СССР, 1986.
9. Мейдер Ч. Численное моделирование детонации.— М.: Мир, 1985.
10. Имховик П. А., Соловьев В. С. Термодинамический расчет параметров детонации смесей взрывчатых веществ с алюминием // Химическая физика процессов горения и взрыва. Детонация.— Черноголовка: ИХФ АН СССР, 1989.

г. Москва

Поступила в редакцию 7/III 1991.  
после доработки — 10/VI 1991