Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LII, вып. 1, 1966 г.

УДК 622.235.5

О ЗАТРАТАХ ЭНЕРГИИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ ВЗРЫВА

А. Н. Ханукаев, К. А. Долгов

Известно, что в ближней зоне взрыва затрачивается значительная часть энергии заряда взрывчатого вещества. Определение и расчет затрат энергии в этой зоне имеют важное значение, так как дают возможность управлять действием взрыва. В настоящей статье рассмотрены два способа определения затрат энергии — калориметрический и расчетно-экспериментальный. Рассматриваемый здесь калориметрический метод в отличие от уже существующих разработан применительно к горным породам и дает возможность определить затраты энергии на образование свободной поверхности и оценить затраты энергии, расходуемой в ближней зоне (зоне пластических деформаций). Расчетно-экспериментальный метод основан на определении ударной сжимаемости горных пород и требует применения сравнительно сложной аппаратуры, либо скоростного фоторегистра для определения скорости распространения ударной волны, либо пьезометрических датчиков и катодных осциллографов для замера высоких давлений.

Оба метода дополняют друг друга, позволяют рассчитать энергию, затрачиваемую на образование новой свободной поверхности, и общую энергию, затрачиваемую в зоне пластических деформаций.

Калориметрический метод определения затрат энергии на образование свободной поверхности. *Водяной эквивалент калориметра КЛ-1 вместе со взрываемым образцом* определяли сжиганием эталонной бензойной кислоты в кислороде и по формуле [Попов, 1954]

$$K = \frac{6329G' + Q_1G_1 + Q_2G_2 + 1{,}43\,V}{H\,[(t_n + h_n) - (t_0 + h_0) + \Delta t]}, \qquad (1)$$

где 6329 — теплота сгорания эталонной бензойной кислоты, *кал/г*;

G' — вес сожженной бензойной кислоты, *г*;

Q_1 — теплота сгорания запальной проволоки, *кал/г*;

G_1 — вес сгоревшей части проволоки, *г*;

Q_2 — теплота сгорания медной проволоки, на которой укреплялась навеска бензойной кислоты, *кал/г*;

G — вес сгоревшей части медной проволоки, *г*;

1,43 — теплота образования и растворения в воде азотной кислоты эквивалентной 1 *мл* 0,1 н. раствора едкого натра, *кал/см*^{3};

V — объем 0,1 н. раствора едкого натра, израсходованного на титрование смыва бомбы, *см*^{3};

t_n — конечная температура главного периода по шкале термометра Бекмана, град.;
h_n — поправка на калибр термометра по шкале термометра Бекмана, град.;
t_0 — начальная температура главного периода, град.;
h_0 — поправка на калибр термометра, град.;
Δt — поправка на теплообмен калориметра с окружающей средой, град.;
H — значение градуса по шкале термометра Бекмана в градусах 100-градусной шкалы.

Поправку Δt определяли в градусах по шкале термометра Бекмана

$$\Delta t = \frac{v+v'}{2} m + v'r, \qquad (2)$$

где v и v' — среднее изменение температуры за полуминутный промежуток соответственно в начальном и конечном периодах;
m — число полуминутных промежутков главного периода с подъемом температуры более 0,3°;
r — число остальных полуминутных промежутков главного периода.

В качестве водяного эквивалента калориметра приняли среднее арифметическое четырех определений, для которых расхождение между крайними значениями не превышало 10 *г*, т. е. не более 0,5%.

Теплоту взрывчатого превращения определяли с применением в качестве взрывчатого вещества тэнового заряда. Заряд состоял из двух склеенных между собой прессованных полушарий, внутри которых находилась капля-детонатор, изготовленная из азида свинца.

Заряд помещали в калориметрическую бомбу, из которой выкачивали воздух до давления 5—10 *мм рт. ст.* Заряд подрывали электрическим током. Теплоту взрывчатого превращения определяли по формуле

$$Q_v = \frac{KH\,[(t_n+h_n)-(t_0+h_0)+\Delta t]}{q}, \qquad (3)$$

где q — вес тэна, *г*.

Теплоту взрывчатого превращения тэна определяли как среднее четырех определений.

Теплоту, выделяемую в калориметре при взрыве заряда в образце, вычисляли по формуле

$$Q = KH\,[(t_n+h_n)-(t_0+h_0)+\Delta t]. \qquad (4)$$

Это определение производили также при абсолютном давлении в бомбе 5—10 *мм рт. ст.* Образцом служил мраморный цилиндр с глухим центральным отверстием для заряда. Все мраморные цилиндры имели наружный диаметр 32 *мм* и высоту 32 *мм*. Вес образцов 60 ± 1 *г*. Образцы отличались друг от друга только внутренним диаметром (11 и 16 *мм*) и глубиной (глухого) центрального отверстия, благодаря чему на разрушение образца и образование свободной поверхности затрачивалось различное количество энергии. В образцах с диаметром глухого центрального отверстия 11 *мм* (см. рисунок) зазора между зарядом и стенкой отверстия практически нет. Отметим, что поправка на теплообмен Δt определяется по формуле (2) достаточно точно лишь при небольшой разности температур между оболочкой калориметра и калориметрическим сосудом.

Количество энергии, затраченное на образование свободной поверхности, можно определять следующим образом. При взрыве заряда ВВ в об-

разце, помещенном в калориметрическую бомбу, выделяемая энергия $Q_{ВВ}$, расходуется на разрушение образца L_1 и сообщение частицам образца кинетической энергии при их разлете L_2

$$Q_{ВВ} = Q_1 + L_1 + L_2, \tag{5}$$

где Q_1 — тепловая энергия, оставшаяся в продуктах взрыва.

При ударе частиц о стенки бомбы часть кинетической энергии вновь идет на разрушение образца, а остальная часть переходит в тепловую энергию Q_2, т. е.

$$L_2 = Q_2 + L_3,$$

где L_3 — кинетическая энергия, расходуемая на образование новой поверхности.

Подставляя это равенство в (5), получим

$$Q_{ВВ} = Q_1 + Q_2 + L_1 + L_3.$$

Работа $L = L_1 + L_3$ затрачивается только на образование свободной поверхности, так как работа, расходуемая на упругие деформации и преодоление сил трения, преобразуется в тепловую энергию. Тепловая энергия $Q = Q_1 + Q_2$, выделяемая в калориметрической бомбе, определяется по формуле (4). Тепловую энергию $Q_{ВВ}$, выделяемую при взрыве заряда, можно рассчитать по известной теплоте взрывчатого превращения и веса взрываемого ВВ q,

$$Q_{ВВ} = Q_v q. \tag{6}$$

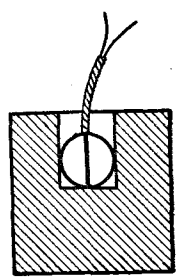


Схема расположения заряда в образце.

Таким образом,

$$Q_v q = Q + L,$$

откуда работа, расходуемая на образование свободной поверхности,

$$L = Q_v q - Q$$

или

$$L = 0{,}427\,(Q_v q - Q). \tag{7}$$

Удельную поверхностную работу разрушения определяли по вновь образованной поверхности разрушенного образца S и известной поверхностной работе разрушения L

$$l_S = \frac{L}{S} = \frac{Q_v q - Q}{S}$$

или

$$l_S = 0{,}427\left(\frac{Q_v q - Q}{S}\right). \tag{8}$$

Величина удельной поверхностной работы разрушения является физической характеристикой материала образца. На этом основании можно предложить к. п. д. для оценки работы, затраченной на разрушение,

$$\eta = \frac{S l_S}{0{,}427\,Q_{ВВ}}. \tag{9}$$

Вновь образованная при разрушении образца поверхность S определялась ситовым анализом

$$S = \frac{6}{\gamma} \sum_{i=1}^{n} \frac{p_i}{d_i}, \qquad (10)$$

где γ — удельный вес материала образца, $г/см^3$;
p_i — выход фракции, $г$;
d_i — средний диаметр фракции, $см$.

Поверхность, определяемая по фракции с наименьшим диаметром зерна, составила 1,3—22% от всей определяемой поверхности, поэтому точность определения S ситовым анализом достаточна. При известном радиусе R зоны пластических деформаций нетрудно найти количество энергии, затраченное на образование свободной поверхности в этой зоне и к. п. д. взрыва. Для этого определим поверхностную энергию, затраченную на разрушение единицы объема образца,

$$l_v = \frac{L}{G} \gamma, \; кал/см^3$$

или

$$l_v = 0{,}427 \frac{L}{G} \gamma, \; кГ \cdot м/см^3, \qquad (11)$$

где G — вес образца, $г$.

Энергия, затраченная на образование свободной поверхности в зоне пластических деформаций,

$$E = l_v V' = l_v \frac{4}{3} \pi R^3, \qquad (12)$$

где V' — объем зоны пластических деформаций, $см^3$;
R — радиус зоны пластических деформаций, $см$.

К. п. д. взрыва для этой зоны

$$\eta = \frac{E}{0{,}427\, Q_{ВВ}}.$$

Получены следующие результаты определения общей поверхностной работы разрушения, удельной поверхностной работы и к. п. д. взрыва для мраморных образцов (опыты I—IV):

	I	II	III	IV
Вес тэна, $г$	0,698	0,694	0,692	0,739
Вес образца, $г$	60,8	60,5	60,9	60,8
Диаметр внутреннего отверстия, $мм$	11	11	16	16
Тепловая энергия, выделяемая при взрыве заряда $Q_{ВВ}$, $кал$	976	970	967	1033
Тепловая энергия, выделяемая в калориметре при разрушении образца, Q, $кал$	949	938	943	1007
Количество энергии, израсходованное на образование свободной поверхности, $кГ \cdot м$	11,5	13,7	10,25	11,1
К. п. д. взрыва $1 - \frac{Q}{Q_{ВВ}}$, %	2,77	3,31	2,49	2,47
Вновь образованная поверхность, * $м^2$	1,26	1,082	0,816	0,935
Удельная поверхностная работа разрушения, $кГ \cdot м/м^2$	9,14	12,65	12,56	11,88

* Сюда же входит величина начальной поверхности, которой можно пренебречь ввиду малости.

Как следует из приведенных данных, энергия, расходуемая на образование свободной поверхности, пропорциональна вновь образованной поверхности. Сравним полученные результаты с данными об удельной поверхностной работе при механических способах разрушения образцов на копре. Согласно Л. И. Барону [1963], для мрамора эта величина составляет 68 ÷ 99 $кГ \cdot м/м^2$, что значительно больше удельной поверхностной работы (9,12 ÷ 12,65 $кГ \cdot м/м^2$), полученной при разрушении мраморных образцов взрывом в калориметрической бомбе. Расхождение объясняется тем, что в удельную работу на образование свободной поверхности при механическом способе разрушения входит не только работа на преодоление сил сцепления при разрушении образца, но и работа на упругие деформации и преодоление сил трения.

В таблице приведены результаты определения гранулометрического состава разрушенных образцов. При подсчете энергии, расходуемой на образование свободной поверхности в зоне пластических деформаций, радиус свободной поверхности R принимался равным трем радиусам заряда. Величина энергии, затраченной на образование свободной поверхности в этой зоне, согласно расчету, оказалась равной 6,08 $кГ \cdot м$.

Определение вновь образованной поверхности при разрушении образца взрывом в калориметрической бомбе

Опыт	Вес фракции при среднем ее диаметре (см), г											Вновь образованная поверхность *, $см^2$
	0,2085	0,0885	0,0455	0,0255	0,0180	0,0125	0,0094	0,0081	0,00635	0,0048	0,00215	
I	0,03	0,11	6,46	12,32	9,99	8,41	6,54	1,38	11,41	2,21	1,94	12 600
II	0,12	0,425	5,02	14,91	9,66	8,26	6,70	0,835	13,99	0,436	0,111	10 820
III	4,81	2,18	12,61	12,20	10,06	6,81	3,07	1,23	6,63	0,782	0,486	8 160
IV	1,873	0,808	11,66	13,56	11,12	79,53	3,09	1,52	4,53	3,02	2,09	9 350

* Сюда же входит величина начальной поверхности, которой можно пренебречь ввиду малости.

При известной теплоте взрывчатого превращения ВВ нет необходимости в установлении водяного эквивалента калориметра. В этом случае удельную поверхностную работу разрушения определим следующим образом.

1. Величина удельной поверхностной работы разрушения

$$l_S = \frac{\Delta Q}{S}, \tag{13}$$

где ΔQ — поглощенное количество тепловой энергии при взрывании ВВ в образце горной породы;
S — вновь образованная поверхность.

2. К. п. д. взрыва

$$\eta = \frac{\Delta Q}{Q_{ВВ}} = 1 - \frac{Q}{Q_{ВВ}}, \tag{14}$$

где Q и $Q_{ВВ}$ — теплота, выделяемая в калориметре соответственно при разрушении и без разрушения образца, определяемая по формуле (4) [Попов, 1954].

Подставляя равенство (4) в (14), получим выражение для определения к. п. д. взрыва

$$\eta = 1 - \frac{H\left[(t_n + h_n) - (t_0 + h_0) + \Delta t\right]}{H'\left[(t'_n + h'_n) - (t'_0 + h'_0) + \Delta t'\right]},$$

где все обозначения без штриха — при разрушении образца, со штрихом — без разрушения образца.

3. Количество поглощенной энергии

$$\Delta Q = \eta Q_{\text{ВВ}} = \eta q Q_v. \tag{15}$$

4. Удельная поверхностная работа по формуле (13) с учетом (15)

$$l_S = \frac{\eta q Q_v}{S}.$$

Этот метод определения l_S по сравнению с методом, изложенным выше, менее трудоемок, так как не требует знания водяного эквивалента калориметра при разрушении образцов различных горных пород.

По данным четырех опытов получены следующие значения к. п. д. и l_S для диабаза:

η	0,037	0,042	0,048	0,043
ΔQ, *кал*	67,0	76,1	87,0	77,9
S, $м^2$	1,122	1,305	1,383	1,480
l_S, $кГ \cdot м/м^2$	25,6	24,9	26,8	22,5
$l_{S\text{ср}}$, $кГ \cdot м/м^2$	24,95			

Определение затрат энергии по ударной сжимаемости. Затраты энергии в зоне пластических деформаций можно рассчитать, если из эксперимента известны: радиус зоны пластических деформаций $R_{\text{пласт}}$, предел прочности материала $\sigma_{\text{сж}}$ на границе зоны пластических деформаций и зоны трещинообразования (в условиях всестороннего сжатия) и модуль всестороннего сжатия K_p. Тогда затраты энергии в зоне пластических деформаций вычислим по известной формуле [Ханукаев, 1962]

$$E_{\text{пласт}} = \frac{(\sigma_{\text{сж}})^2}{2K_p} V'. \tag{16}$$

Как известно из экспериментов, радиус зоны пластических деформаций для многих твердых пород и материалов не превышает 2—3 радиусов заряда. Он незначителен по сравнению с радиусом зоны трещинообразования, что объясняется высокой сопротивляемостью пород и материалов сжатию в условиях всестороннего нагружения.

Предел прочности материала сжатию на границе зоны пластических деформаций и зоны трещинообразования $\sigma_{\text{сж}}$ равен величине давления p на фронте волны, перешедшей в зону трещинообразования. Это давление можно определить экспериментально (с помощью пьезоэлектрических датчиков или других методов измерений).

По известному значению p находим ударную сжимаемость породы или материала [Баум, Бержец, 1962]

$$\left[\frac{\varrho}{\varrho_0}\right]^4 = \frac{p}{B} + 1, \tag{17}$$

где $B = \frac{\varrho_0 c^2}{4}$, c — скорость звука или скорость продольной волны;

ϱ_0 — массовая плотность породы или материала;

ϱ — массовая плотность материала после воздействия давления.

Отношение $\frac{\varrho}{\varrho_0}$ характеризует ударную сжимаемость пород и материалов при высоких давлениях.

Модуль всестороннего сжатия K_p в зоне высоких давлений — величина переменная и зависит от абсолютной величины давления в материале [Броберг, 1959]

$$K_p = \varrho \frac{dp}{d\varrho}. \tag{18}$$

После подстановки p из (17) в (18) и дифференцирования получим

$$K_p = 4B\left(\frac{\varrho}{\varrho_0}\right)^4. \tag{19}$$

Таким образом, величину модуля всестороннего сжатия легко вычислить, если известны величина B и ударная сжимаемость.

Объем зоны пластических деформаций V', как указано выше, определяется экспериментально по величине радиуса зоны пластических деформаций. Для сферического заряда

$$V_{\text{пласт}} = \frac{4}{3}\pi R^3_{\text{пласт}} = \frac{4}{3}\pi (2 - 3R_0)^3, \tag{20}$$

где R_0 — радиус заряда, *см*.

В качестве примера расчета затрат энергии в зоне пластических деформаций приведем результаты опытов с органическим стеклом при взрывании сферических зарядов весом 0,6 *г*, $R_0 = 0{,}5$ *см*.

Заряды размещались в шпурах диаметром 10 *мм*. Для устранения влияния волн, отражающихся от боковых граней, на объем пластических деформаций размеры блоков органического стекла приняты равными 200—300 R_0. Удельный вес органического стекла $\varrho_0' = 1{,}17$ *г/см*^{3}.

Скорость распространения продольной (звуковой) волны 2700 *м/сек*. Радиус зоны пластических деформаций оказался равным $2R_0$ или 1 *см*. Замеренное экспериментально значение p на расстоянии $2R_0 = 32\,000$ *кГ/см*^{2}; $B = 21\,800$ *кГ/см*^{2}; $V = 4{,}2$ *см*^{3}.

По формуле (17)

$$\left(\frac{\varrho}{\varrho_0}\right)^4 = 2{,}46,$$

по формуле (19)

$$K_p = 2{,}15 \cdot 10^5 \text{ кГ/см}^2.$$

Затраты энергии по формуле (16) составили 9,95 *кГ·м*. По отношению к потенциальной энергии заряда весом 0,6 *г* (равной 327 *кГ·м*) затраты энергии в зоне пластических деформаций составили 27,8%. Энергия волны на границе зоны пластических деформаций и зоны трещинообразования, т. е. на расстоянии $2R_0$ от центра взрыва, вычисленная по осциллограмме $p = f(t)$, равна примерно 30% от потенциальной энергии заряда. Таким образом, общая энергия ударной волны в зоне пластических деформаций, составляет 57,8% от потенциальной энергии заряда, что находится в близком соответствии с общим количеством энергии, переходящим в ударную волну.

Аналогичные эксперименты и расчеты для цилиндрических зарядов тэна в блоках органического стекла показывают, что затраты энергии в зоне пластических деформаций составляют 20% от энергии заряда (при $R_{\text{пласт}} = 4R_0$, $p = 20 \cdot 10^3$ *кГ/см*^{2}, $\left(\frac{\varrho}{\varrho_0}\right)^4 = 1{,}9$ и $K_p = 1{,}66 \cdot 10^5$ *кГ/см*^{2}).

Следовательно, затраты энергии в зоне пластических деформаций весьма значительны и при определенных условиях взрывания зарядов — применение зарядов цилиндрической формы (вместо сферических), оптимальных зазорах между зарядом и породой (заполненных водой) и т. д., — можно повысить эффективность взрывных работ за счет перераспределения энергии в ближней и дальней зонах взрыва.

Выводы

1. Предлагаемый калориметрический метод определения затрат энергии при разрушении горных пород взрывом дает возможность определить работу, затраченную только на образование свободной поверхности.

2. Удельная поверхностная работа разрушения, определяемая калориметрическим методом, является физической характеристикой горной породы, зависящей от сил молекулярного сцепления частиц. Величина удельной поверхностной работы разрушения меньше при калориметрическом методе определения, чем при механическом.

3. Для оценки степени использования энергии при разрушении горных пород предлагается метод определения к. п. д. взрыва, основанный на работе, затраченной на образование свободной поверхности.

4. Энергия, расходуемая в зоне пластических деформаций непосредственно на образование свободной поверхности, составляет лишь 1,45% от потенциальной энергии заряда (для мрамора).

5. Для расчета затрат энергии в зоне пластических деформаций по ударной сжимаемости необходимы данные о величине давления на границе зоны пластических деформаций и зоны трещинообразования и данные о величине радиуса зоны пластических деформаций.

За счет уменьшения затрат энергии в зоне пластических деформаций можно повысить эффективность дробления пород, что достигается изменением условий взрывания заряда в шпурах и скважинах.

ЛИТЕРАТУРА

Барон Л. И., Коняшин Ю. Г., Курбатов В. М. Дробимость горных пород. Изд-во АН СССР, 1963.

Баум Ф. А., Бержец М. А. Определение начальных параметров ударных волн в горных породах в условиях контактного взрыва и закона сжимаемости пород при высоких давлениях. Взрывное дело, № 49/6, 1962.

Броберг К. Б. Ударные волны в упруго-пластической среде. Госгортехиздат, 1959.

Попов М. М. Термометрия и калориметрия. Изд-во МГУ, 1954.

Ханукаев А. Н. Энергия волн напряжений при разрушении горных пород взрывом. Госгортехиздат, 1962.