

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ ВЗРЫВЕ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ С РАЗЛИЧНЫМИ ДЕТОНАЦИОННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

Эффективность разрушения горных пород при взрыве ВВ зависит также и от энергии диссипации. При применении ВВ с различными детонационными характеристиками энергия диссипации существенно изменяется в зоне дробления, что в свою очередь влияет на общую эффективность разрушения.

Efficiency of destruction of rocks at explosion BB depends as well on energy dissipation. At application BB with various detonation characteristics energy dissipation essentially changes in a zone of crushing, that in turn influences general efficiency of destruction.

Разрушение горных пород происходит в результате появления наведенных микротрещин, увеличения их количества в единице объема, слияния и уплотнения трещин, а также из-за увеличения размеров естественных и вновь созданных трещин. При слиянии трещин могут образовываться куски разрушенной породы, но могут также образовываться изолированные трещины внутри кусков. На образование таких трещин затрачивается энергия диссипации, а их наличие приводит к снижению прочности.

Существенная часть энергии (от 10 до 70 %) при взрывном разрушении необратимо расходуется на нагревание частиц породы в ближней зоне и представляет собой диссипативные потери. Следствием интенсивных диссипативных процессов является повышение температуры и развитие наведенной микротрещиноватости в деформируемой взрывом среде [1, 3].

Существенная доля энергии остается в полости взрыва в виде внутренней энергии продуктов детонации и тоже может быть отнесена к диссипативным потерям. Таким образом, на формирование механических возмущений расходуется только часть энергии взрыва. Поэтому, решая задачи об обра-

зовании и распространении волн напряжений, необходимо иметь в виду эффекты диссипации энергии.

При действии волн напряжений на некоторый выделенный объем, нагрузка носит динамический характер до достижения максимальных значений напряжений, после чего происходит статическая разгрузка до нормальных напряжений. Вследствие разности кривых нагрузки и разгрузки в частицах остается часть энергии.

При ударном сжатии параметры состояния среды изменяются от начальных P_0 и ρ_0 до фронтовых P_Φ , где $D_0 = 1/V_0$. На графике (рис.1) эти состояния обозначены соответственно точками A и A' . В соответствии с уравнением Гюгонио внутренняя энергия частиц на фронте

$$e_\Phi - e_0 = \frac{1}{2}(D_\Phi + D_0)(V_0 - V_\Phi),$$

т.е. приращение энергии равно площади треугольника $AA'B$. После прохождения фронта происходит разгрузка частиц, и давление снова уменьшается от P_Φ до P_0 . Такое уменьшение давления происходит адиабатически, адиабата разгрузки описывается некоторой кривой $A'SA$, всегда расположенной ниже прямой AA' .

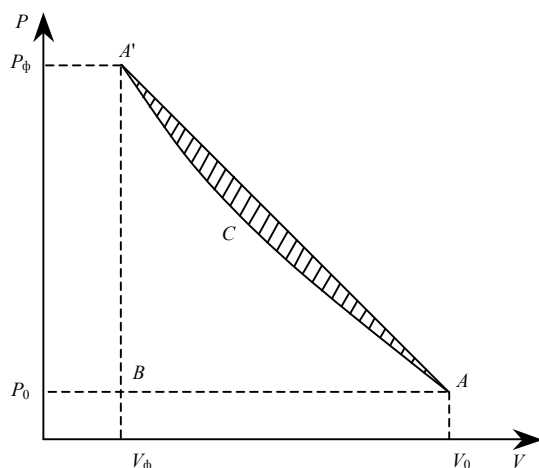


Рис.1. Статическая и ударная адиабаты

Энергия разгрузки определяется соотношением

$$e_{\phi} - e_0 = \int_{V_{\phi}}^{V_0} p dV$$

и равна площади, заключенной между отрезками AB и $A'B$ и кривой $A'CA$.

Таким образом, существует разность между энергией, запасенной на фронте, и энергией разгрузки. Разность энергии равна площади, ограниченной прямой AA' и кривой $A'CA$ (рис.1, заштрихованная область), и называется энергией диссипации. Она является остаточной внутренней энергией частиц после прохождения фронта и восстановления давления до невозмущенного состояния. Температура таких частиц выше невозмущенных.

Площадь увеличивается при увеличении отклонения кривой разгрузки от прямой и уменьшается при приближении кривой разгрузки к линейной. Таким образом, в линейно-упругих средах, где нагрузка и разгрузка подчиняются одному и тому же линейному закону, тепловые потери при прохождении возмущений отсутствуют. После снятия нагрузки идеально-упругая среда возвращается в исходное состояние без повышения температуры и внутренней энергии.

Зависимость $p(V)$ на адиабате разгрузки тем больше отличается от линейной, чем больше пористость среды. Поэтому тепловые потери при распространении волн на-

пряжений увеличиваются вместе с пористостью. Тепловые потери существенно растут с увеличением давления (или напряжения) на фронте ударной волны или максимальных нагрузок в волне напряжений.

В дальнейшем диссипированная энергия не участвует в формировании механических возмущений, что приводит к снижению параметров волн напряжений. С другой стороны, запасенная в частицах энергия расходуется вначале на повышение температуры среды и по мере остывания – на возникновение трещин и увеличение их размеров.

Энергия диссипации может реализоваться в конкретном виде как остаточная тепловая энергия, поверхностная энергия вновь образовавшихся микротрещин и магистральных трещин, энергия пластического течения, трения между частицами и т.д. Каждый из этих процессов влияет, прежде всего, на ход кривой разгрузки [2].

В ближней зоне взрыва процесс нагрузки может быть описан в гидродинамическом приближении, и удельная энергия нагрузки в i -м слое на основании условий динамической совместности

$$e_{n(i)} = \frac{1}{2} P_{(i)} \frac{1}{\rho_0} \left(1 - \frac{1}{\bar{\rho}_{(i)}} \right).$$

Удельная энергия разгрузки в этом же слое определяется уравнением

$$e_{p(i)} = - \int_{\rho}^{\rho_0} \frac{P_{(i)} d\rho}{\rho^2}.$$

В качестве функциональной зависимости между давлением и плотностью на кривой разгрузки используем формулу Тэта:

$$P_{(i)} = \frac{\rho_0 a_v^2}{m} (\bar{\rho}_{(i)}^m - 1). \quad (1)$$

Тогда

$$e_{P(i)} = \frac{a_v^2}{m} \left(\frac{\bar{\rho}_{(i)}^{m-1} - 1}{m-1} - 1 + \frac{1}{\bar{\rho}_{(i)}} \right), \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность невозмущенной среды; $\bar{\rho} = \rho / \rho_0$ – относительная плотность; a_v –

скорость распространения объемной волны сжатия.

Из соотношения (1) следует

$$\bar{\rho}_{(i)} = \left(\frac{P_{(i)} m}{\rho_0 a_v^2} + 1 \right)^{\frac{1}{m}}. \quad (3)$$

Удельная энергия диссипации представляет собой разность удельных энергий нагрузки и разгрузки:

$$e_{\text{дисс}(i)} = e_{\text{н}(i)} - e_{\text{р}(i)}. \quad (4)$$

Полная энергия диссипации, определяемая по всем частицам внутри возмущенной области для цилиндрического заряда,

$$E_{\text{дисс}(i)} = \frac{1}{2} \pi \rho_0 e_{\text{дисс}} (r_i^2 - r_{i-1}^2) + \sum_1^{i-1} E_{\text{дисс}(k)}. \quad (5)$$

При преломлении детонационной волны в горной породе формируется ударная волна. Давление на фронте ударной волны P_{Φ} определяется через давление в детонационной волне P_d . При отсутствии энергии диссипации зависимость $\sigma_{r \max}(\bar{r})$ определяется формулой

$$\sigma_{r \max}(\bar{r}) = \frac{P_{\Phi}}{\bar{r}^{1,1}}. \quad (6)$$

При наличии энергии диссипации вводится понятие эффективного радиуса. Для цилиндрического заряда

$$R_{\text{оз}}^{\text{эф}} = R_{\text{оз}} \sqrt{1 - \frac{E_{\text{дисс}}}{E_0}}.$$

Полная выделившаяся энергия при взрыве цилиндрического заряда

$$E_0 = \pi R_{\text{оз}}^2 \rho_{\text{ВВ}} Q_{\text{ВВ}}.$$

Тогда максимальное напряжение с учетом введения эффективного радиуса

$$\sigma_{r \max}(\bar{r}_{\text{ср}(i)}) = \frac{P_{\Phi}}{\bar{r}_{\text{ср}(i)}^{1,1}} \left(\frac{R_{\text{оз}}^{\text{эф}}(i)}{R_{\text{оз}}} \right)^{1,1},$$

$$\text{где } \bar{r}_{\text{ср}(i)} = \frac{r_{(i)} + r_{(i-1)}}{2}.$$

Исходные данные для примерного расчета энергии диссипации (см. таблицу) при взрыве цилиндрических зарядов: $R_{\text{оз}} = 0,125$ м; порода: гранит ($\rho = 2770$ кг/м³; $C_p = 4400$ м/с).

Детонационные параметры

Взрывчатое вещество	Параметры используемых ВВ				
	P_d , ГПа	ρ , г/м ³	Q , кДж/кг	D , км/с	P_{Φ} , ГПа
ТЭН	18,7	1500	5860	7,42	22,4
Аммонит 6ЖВ	7,66	1000	4450	4,6	11,4
Аммонит ПЖВ-20	6,3	1000	4450	4,54	10
Граммонит 79/21	3,4	950	4450	3,32	6,41
Игданит	2,4	900	3810	2,8	4,77

Игданит как ВВ с наиболее низкими детонационными характеристиками (рис.2) меньше всего теряет энергию взрыва, что и отражено на графиках (кривая расположена ниже остальных типов ВВ).

На рис.3 показаны максимальные тангенциальные напряжения для различных типов ВВ. Графики свидетельствуют о том, что, чем слабее ВВ (имеет меньшие

детонационные характеристики), тем меньше энергия диссипации на начальной стадии взрыва и тем больше энергии останется на полезную работу по разрушению массива горных пород на следующих стадиях взрыва.

Динамический предел прочности для гранита $\sigma_{\text{отр}}^{\text{дин}} = 34,8$ МПа.

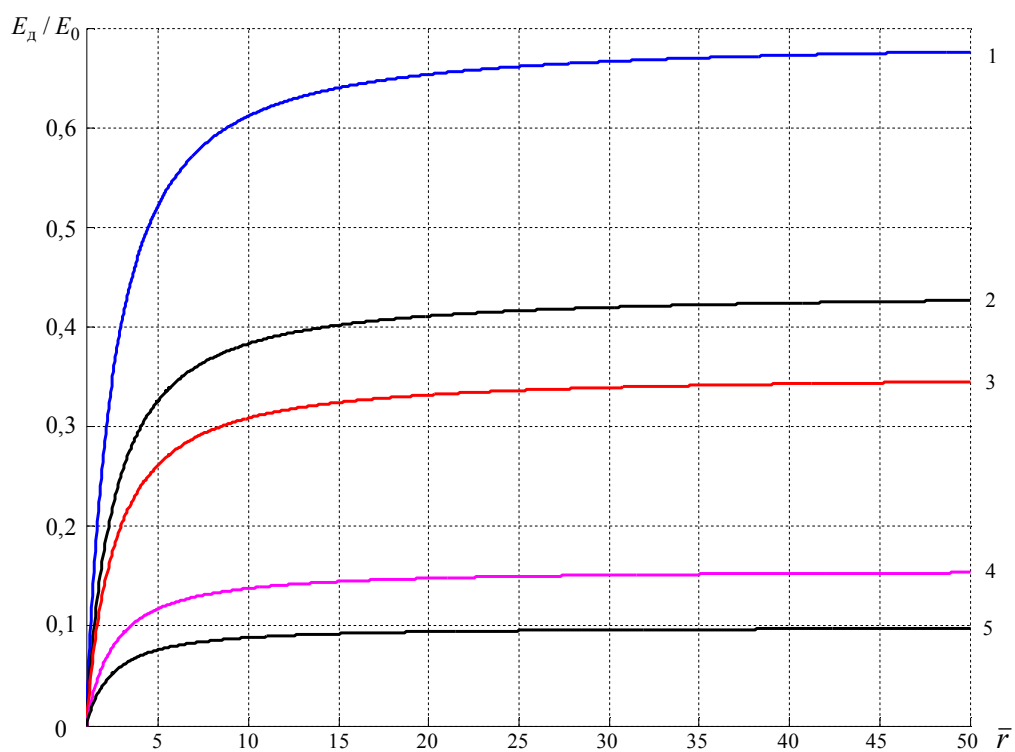


Рис.2. Энергии зависимости при распространении волны напряжений для различных типов ВВ
1 – ТЭН; 2 – аммонит 6ЖВ; 3 – аммонит ПЖВ-20; 4 – граммонит 79/21; 5 – игданит

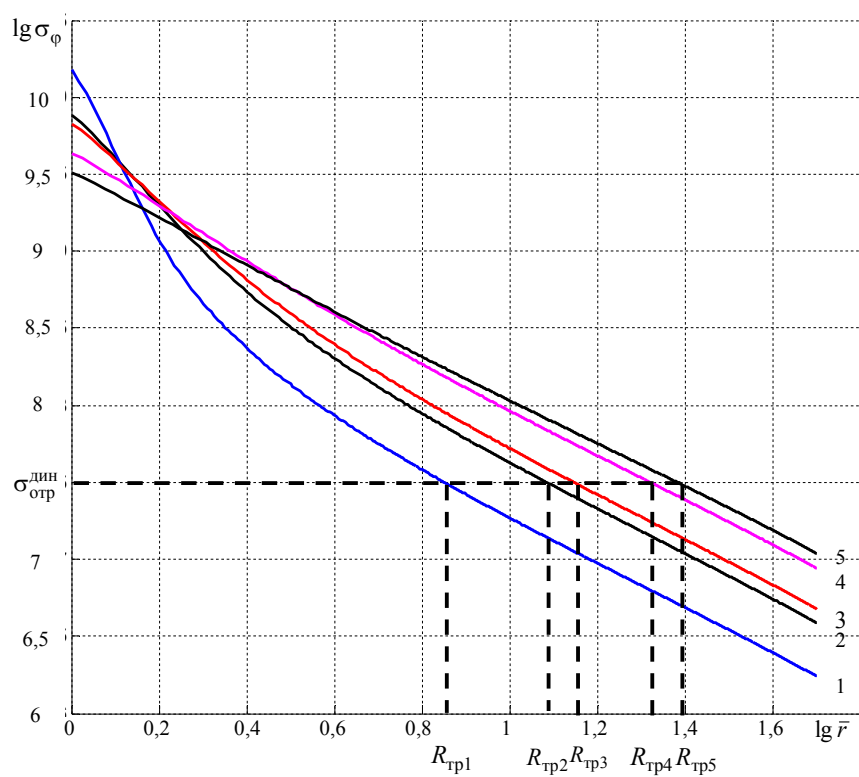


Рис.3. Зависимость максимального тангенциального напряжения на стенке зарядной камеры от относительного расстояния
1 – ТЭН; 2 – аммонит 6ЖВ; 3 – аммонит ПЖВ-20; 4 – граммонит 79/21; 5 – игданит

Таким образом, уменьшение начальной концентрации энергии в заряде, сопровождающееся уменьшением начального напряженного состояния на стенке взрывной полости, приводит к снижению диссипативных потерь энергии и, следовательно, затрат энергии на трещинообразование, что, в свою очередь, способствует уменьшению максимальных радиальных напряжений вблизи полости взрыва. В связи с этим увеличивается энергия, расходуемая на механическую работу. Данный метод определения напряжений позволяет рассчитывать напряжения на расстояниях до пяти относительных радиусов.

Из результатов расчета следует, что применение закономерностей энергетиче-

ского подобия к изменению максимальных напряжений с расстоянием при взрыве должно учитывать энергию диссипации, существенно изменяющуюся в зоне дробления при применении ВВ с различными детонационными характеристиками.

ЛИТЕРАТУРА

1. Менжулин М.Г. Фазовые переходы на поверхностях трещин при разрушении горных пород // ДАН РФ. 1993. Т. 328. № 3.
2. Механический эффект подземного взрыва / В.Н.Родионов, В.В.Адушкин и др. М.: Недра, 1971.
3. Райс М. Сжатие твердых тел сильными ударными волнами / М.Райс, Р.Мак-Куин, Дж.Уолш // Динамические исследования твердых тел при высоких давлениях. М.: Мир, 1965.