

УДК 622.235.53

А.М. Алексеев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАЗМЕРА ЗОНЫ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ВЕДЕНИИ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ В УСЛОВИЯХ РУДНИКА «АЙХАЛ»

Проведены исследования по определению размеров зоны трещинообразования при ведении взрывных работ на руднике «Айхал».

Ключевые слова: зона трещинообразования, взрывные работы, искусственный целик, напряжения.

При ведении взрывных работ на подземных работах необходимым условием является защита продуктивного массива от образования трещин, так что определение границ зон образования трещин вокруг скважинных зарядов, в том числе и ниже уровня скважин, является одной из важнейших задач.

Анализ публикаций последних лет позволяет выделить две методики оценки трещинообразования при взрыве [3,4].

В первой методике используется относительно легко получаемая информация об упругих и прочностных характеристиках породных массивов и обобщенных зависимостей, на основе которого предлагается излагаемый ниже расчетный метод.

Размер зоны трещинообразования в глубину массива вдоль оси удлиненного заряда от донной части скважины рекомендуется определять из следующего соотношения при взрывном разрушении пород крепостью $f \leq 4$, характеризуемых сейсмическим коэффициентом $K_v = 7,85$ м/с в обобщенной зависимости скорости смещений

$$[r_{сж}]_L = \frac{60d_3 \sqrt{\frac{\gamma_{ВВ}}{\gamma_{H_2O}}}}{\sqrt[3]{\left([V_{сж}]_{ст} K_d\right)^2 \sqrt{1 + \frac{l_d}{l_3}}}} \quad (1)$$

где d_3 — диаметр заряда, равный диаметру патрона или диаметру скважины соответственно при зарядании патронированными или россыпными ВВ, м; $\gamma_{ВВ}$ — относительная (по сравнению с водой) плотность ВВ в заряде; l_3, l_d — соответственно длина заряда и демпфера в скважине; K_d — коэффициент динамичности, характеризующий относительное увеличение разрушающей нагрузки при динамическом (взрывном) нагружении породного массива (или образца) по сравнению со случаем квазистатической сжимающей нагрузки; согласно [3] для реальных массивов при скважинах длиной более 3—4 метров может приниматься значение $K_d = 1,25 \dots 2$; $[V_{сж}]_{ст}$ — допустимая скорость смещения, соответствующая статическому пределу прочности на сжатие, м/с.

Значения скоростей смещений могут быть определены по статическому

пределу прочности на сжатие $[\sigma_{сж}]_{ст}$, кг/см² (или пропорциональному ему коэффициенту крепости по шкале М.М. Протодьяконова, $f = 0,01[\sigma_{сж}]_{ст}$) и акустической жесткости (γ^*C_p) охраняемого массива (γ — т/м³, C_p — км/с).

$$[V_{сж}]_{ст} = \frac{0,1[\sigma_{сж}]_{ст}}{\gamma C_p} = \frac{10f}{\gamma C_p}. \quad (2)$$

В случае рассредоточения заряда по длине инертной забойкой, когда $h_{заб} > 6d$ и длина нижней части заряда не меньше $6d$, в расчетную формулу (1) может вводиться не общая длина заряда, а длина его нижней (наддемпферной) части, что уменьшает расчетный размер зоны нарушений в массиве.

На основе этих методов, определен размер зоны трещинообразования вдоль оси скважинного заряда в охраняемом массиве в условиях рудника «Айхал».

Дано: Охраняемый продуктивный массив характеризуется коэффициентом крепости по М.М. Протодьяконову $f = 5$, плотностью $\gamma = 2,4$ т/м³, скоростью звука $C_p = 3,5$ км/с. Коэффициент динамичности для охраняемых пород равен $K_d = 1,25$ (нижний предел). Взрывы выполняются скважинными зарядами диаметром $d_z = d_c = 0,102$ м, плотность ВВ в скважине $\gamma_{ВВ} = 0,9$ т/м³, длина колонки заряда в скважине составляет $l_3 = 12,5$ м.

Требуется определить размер зоны трещинообразования в глубину массива:

- а) при наличии в нижней части скважины демпфера длиной $l_d = 0,5$ м;
- б) при отсутствии демпфера ($l_d = 0$) и размещении заряда на дне скважины.

Решение. По формуле (2) на основе заданных прогнозных и упругих характеристик охраняемого массива находится допустимая скорость коле-

баний при квазистатическом нагружении

$$[V_{сж}]_{ст} = \frac{0,1[\sigma_{сж}]_{ст}}{\gamma C_p} = \frac{10f}{\gamma C_p} = \frac{10 \cdot 5}{2,4 \cdot 3,5} = 5,95 \text{ м/с}.$$

С использованием исходных данных и найденного значения скорости смешений по формуле (1) определяются размеры зон трещинообразования ниже донной части скважины для случаев: а) наличия демпфера длиной 0,5 м; б) отсутствия демпфера и размещении заряда на донной части скважин:

$$[r_{сж}]_L = \frac{60d_3 \sqrt{\frac{\gamma_{ВВ}}{\gamma_{H_2O}}}}{\sqrt[3]{([V_{сж}]_{ст} K_d)^2 \sqrt{1 + \frac{l_d}{l_3}}}} = \frac{60 \cdot 0,102 \sqrt{\frac{0,9}{1}}}{\sqrt[3]{(5,95 \cdot 1,25)^2 \sqrt{1 + \frac{0,5}{12,5}}}} =$$

$$= 1,2 \text{ м(а) при } l_d = 0,5 \text{ м,}$$

$$[r_{сж}]_L = \frac{60d_3 \sqrt{\frac{\gamma_{ВВ}}{\gamma_{H_2O}}}}{\sqrt[3]{([V_{сж}]_{ст} K_2)^2 \sqrt{1 + \frac{l_d}{l_3}}}} = \frac{5,8}{3,81 \sqrt{1 + \frac{0}{12,5}}} = 1,205 \text{ (б) при } l_d = 0.$$

Использование более высоких значений коэффициента динамичности и больших значений коэффициента крепости уменьшит размеры зон трещинообразования ниже донной части заряда по сравнению с найденными выше значениями в

$$\sqrt[3]{\left(\frac{K_d}{1,25}\right)^2 \left(\frac{f}{5}\right)^2} = \frac{\sqrt[3]{(K_d f)^2}}{3,39} \text{ раз.}$$

Во второй части исследование зоны трещинообразования ведется по методике Исмаилова Т.Т. [4]

При применении на Айхальском руднике системы с закладкой выработанного пространства необходимо определить степень влияния систематического действия взрыва на искусственный массив (целик).

Для определения скорости сейсмоколебаний в искусственных целиках следует рассмотреть задачу о взаимодействии волн напряжений с границей раздела двух сред. Как было выявлено выше, акустические жесткости рудного и закладочного массивов различны, поэтому решение задачи о взаимодействии волн, возникающих при взрыве с границей раздела «руда — закладка» следует вести с учетом энергетического соотношения волн сжатия — растяжения.

Количество энергии, отраженной от границы раздела и прошедшей за границу раздела (т.е. в искусственный целик) может быть определено из выражений:

$$W_{отр} = W_0 \frac{\rho_{n1} C_{p1} - \rho_{n2} C_{p2}}{\rho_{n1} C_{p1} + \rho_{n2} C_{p2}}$$

$$W_{пр} = W_0 \frac{4\rho_{n1} C_{p1} \cdot \rho_{n2} C_{p2}}{\rho_{n1} C_{p1} + \rho_{n2} C_{p2}} \quad (3)$$

где W_0 — суммарная энергия волны, падающей на границу раздела; $\rho_{n1} C_{p1}$ — акустическая жесткость рудного тела для Айхальского рудника среднее значение равно $8,4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3 \cdot \text{м/с}$; $\rho_{n2} C_{p2}$ — акустическая жесткость закладочного массива равна $3,0 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3 \cdot \text{м/с}$.

Суммарная энергия на фронте волны, падающей на границу раздела двух сред, может быть выражена через скорость смещений частиц пород

$$W_0 = 1/2 \rho_n \cdot C_p \cdot V_0^2, \text{ Дж}$$

а преломленная и отраженная энергия соответственно через преломленную и отраженную скорости смещений

$$W_{пр} = 1/2 \rho_n \cdot C_p \cdot V_{пр}^2$$

$$W_{отр} = 1/2 \rho_n \cdot C_p \cdot V_{отр}^2 \quad (4)$$

Тогда

$$1/2 \rho_{n1} \cdot C_{p1} \cdot V_{пр}^2 = 1/2 \rho_{n1} \cdot C_{p1} \cdot V_0^2 \cdot \frac{4\rho_{n1} C_{p1} \cdot \rho_{n2} C_{p2}}{(\rho_{n1} C_{p1} + \rho_{n2} C_{p2})^2}$$

Подставляя значения акустических жесткостей, получим

$$V_{пр}^2 = V_0^2 \cdot 0,775$$

Или

$$V_{пр} = V_0 \sqrt{0,775} \quad V_{пр} = 0,88 V_0$$

соответственно

$$V_{отр} = 0,12 V_0.$$

Из этого следует вывод, что только 88 % энергии сейсмической волны переходит в массив закладки. Тогда скорость сейсмоколебаний частиц материала закладки определится по формуле

$$V_{закл} = 0,88 V_{руды} = 105,6 \rho^{2,25} \cdot 10^{-2}, \text{ м/с} \quad (5)$$

где $\rho = \frac{\sqrt[3]{Q}}{r}$ — приведенный вес заряда ВВ.

В зоне, где горные породы подвержены упругим деформациям, максимальное напряжение на фронте волны и скорость массового смещения в соответствии с законами теории упругости связаны между собой соотношением

$$\sigma_{\max} = \frac{V\rho n \cdot C_p}{g}, \text{ Па} \quad (6)$$

Зная акустическую жесткость пород и скорость сейсмоколебаний, можно определить и величины напряжений на фронте волны.

Подставляя в формулу $\rho_{n1}C_{p1} = 8.4 \cdot 10^7 \text{ Н/м}^3 \cdot \text{м/с}$

$$\sigma_{\max} = \frac{V8,4 \cdot 10^7}{g}$$

получим

$$\sigma_{\max} = 8.5V, \text{ МПа} \quad (7)$$

где V — скорость сейсмоколебаний, м/с.

Поскольку величина скорости сейсмоколебаний зависит от расстояния до центра взрыва и одновременно взрываемого количества ВВ и связана с этими параметрами соотношением

$$V = 120 \rho^{2.25} \cdot 10^{-2}, \text{ м/с},$$

имеем

$$\sigma_{\max} = 1020 \rho^{2.25} \cdot 10^{-2}, \text{ МПа}.$$

Для определения напряжений в искусственных целиках их величину следует рассматривать с точки зрения преломления и отражения волн от границы раздела двух сред.

В упругом приближении на границе раздела двух сред, имеющих соответственно акустическую жесткость $\rho_{n1}C_{p1}$ и $\rho_{n2}C_{p2}$, напряжение на фронте отраженной волны в зависимости от напряжения на фронте волны, падающей на границу раздела может быть определено по формуле

$$\sigma_{\text{отр}} = \sigma_{\max} \frac{\rho_{n1}C_{p1} - \rho_{n2}C_{p2}}{\rho_{n1}C_{p1} + \rho_{n2}C_{p2}} \text{ МПа}, \quad (8)$$

а на фронте волны преломленной во вторую среду как

$$\sigma_{\text{пр}} = \sigma_{\max} \frac{2\rho_{n2}C_{p2}}{\rho_{n1}C_{p1} + \rho_{n2}C_{p2}}, \text{ МПа} \quad (9)$$

Подставляя в эти формулы значения акустических жесткостей рудного тела и закладочного материала, имеем

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{отр}} &= 0,47\sigma_{\max} \\ \sigma_{\text{пр}} &= 0,52\sigma_{\max} \end{aligned} \quad (10)$$

Таким образом, напряжение на фронте волны, преломленной в закладочный массив почти в два раза меньше напряжений на фронте волны, проходящей по рудному массиву до границы раздела. Зависимость напряжений на фронте волны от приведенного веса заряда для закладочного материала с учетом преломления волны будет иметь вид

$$\sigma_{з.м.} = 0,52\sigma_{\max}\rho^{2.25} \cdot 10^{-2}, \text{ МПа}. \quad (11)$$

Зависимости величины напряжений от расстояния при определенном весе ВВ для закладочного материала с учетом коэффициента преломления приведены на рисунке 1 и описываются формулами:

При

$$\begin{aligned} Q = 100\text{кг} \quad \sigma_{з.м.} &= 3,28 \cdot 10^2 \cdot r^{-2.25}, \text{ МПа} \\ Q = 200\text{кг} \quad \sigma_{з.м.} &= 5,64 \cdot 10^2 \cdot r^{-2.25}, \text{ МПа}; \\ Q = 300\text{кг} \quad \sigma_{з.м.} &= 7,65 \cdot 10^2 \cdot r^{-2.25}, \text{ МПа}; \\ Q = 600\text{кг} \quad \sigma_{з.м.} &= 12,85 \cdot 10^2 \cdot r^{-2.25}, \text{ МПа}; \\ Q = 900\text{кг} \quad \sigma_{з.м.} &= 17,41 \cdot 10^2 \cdot r^{-2.25}, \text{ МПа}. \end{aligned} \quad (12)$$

Учитывая то обстоятельство, что средняя прочность закладочного материала составляет 6,0-6,5 МПа, становится очевидным, что искусственный целик сохранит свою устойчивость только в том случае, если напряжения на фронте волны не будут превышать предела прочности закладочного материала, т.е. будут менее 6,5 МПа. А это возможно тогда, когда вес ВВ в одном замедлении, согласно рисунку, не будет пре-

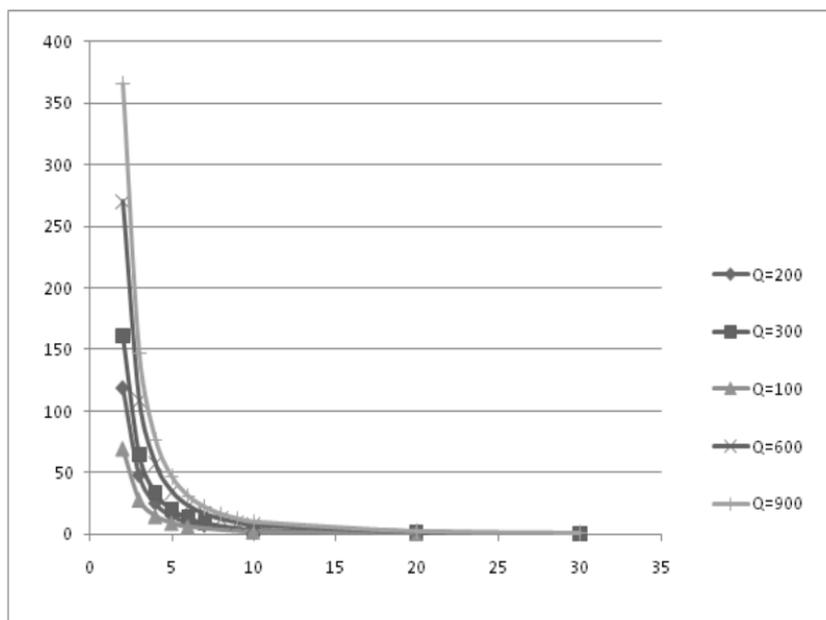


Рис. 1. Зависимости величины напряжений на фронте волны от расстояний для искусственных целиков. Ось X – Расстояние до взрыва, м. Ось Y – Напряжения на фронте взрывной волны, МПа

вышать 300 кг при расстоянии 7,5 м. от искусственного целика до центра взрыва.

Напряжения на фронте сейсмической волны, преломленной в искусственный целик, при одновременно взрываемом количестве взрывчатого вещества не превышающем 400 кг достигают 6,0 МПа. Следовательно, нормальные растягивающие напряжения на контуре искусственного целика будут изменяться в пределах от 1,7 до 8,4 МПа, а касательные напряжения от 1,5 до 3,6 МПа.

Таким образом, при ведении взрывных работ вблизи искусственных целиков на их контуре будут возникать сжимающие и растягивающие напряжения, превышающие величину напряжения на фронте ударной волны, т.е. напряжения достаточные не только для образования трещин в це-

лике, но и для разрушения его приконтурной части. Поэтому, при ведении взрывных работ по отбойке руды во вторичных камерах следует учитывать сейсмическое воздействие взрыва и принимать меры по снижению сейсмического эффекта.

Наряду с возможными нарушениями в приконтурной части целиков под влиянием сейсмической волны возможно также образование трещин на протяжении всего целика, что является весьма нежелательным явлением, т.к. неизбежно ведет к снижению несущей способности закладочного массива и, как результат, к разрушению искусственного целика.

Анализ результатов некоторых исследований [2, 5, 6] показывает, что при динамическом нагружении пород скорость развития трещин колеблется от 0,34 до 0,51 C_p , в среднем состав-

для $0,4 C_p$. В работах [1,7] установлено также, что предельным значением равномерного и устойчивого распространения трещин с постоянной скоростью является скорость волн Релея, определяемая как

$$C_R = 0,92 \sqrt{\frac{(1-2\mu)}{2(1-\mu)}} C_p \quad (13)$$

Безразмерное время роста трещин может быть выражено

$$\tau = \frac{\sqrt{(1-C^2) \left[1 - \frac{1-2\mu}{2(1-\mu)} C^2 \right]}}{C^{9/2} \sqrt{1 - \frac{C^2(1-2\mu)}{2(1-\mu)}}} \quad (14)$$

где $C = V_{mp} / C_s$, V — скорость развития трещин, м/с; C_s — скорость поперечной волны, м/с; μ — коэффициент Пуассона.

С учетом действующих в среде напряжений и ее прочностных параметров безразмерное время роста трещин может быть определено из выражения

$$\tau = \frac{\sqrt{\vartheta \sqrt{C_s}}}{\sqrt{2\sqrt{2} J_\tau}} t \quad (15)$$

где ϑ — постоянная характеристика среды, $H/m^{-0,5} \cdot c^{-0,5}$; $J_\tau = 2\sigma_p l_0 \Delta t$ — импульс растягивающих напряжений; l_0 — начальная трещиноватость (длина трещин), м; σ_p — тангенциальное напряжение растяжения, МПа.

$$\sigma_p = \frac{\mu}{1-\mu} \sigma_{Rmax}, \text{ МПа}$$

где σ_{Rmax} — радиальное напряжение сжатия, МПа; Δt — время приложения импульса, $t = \frac{\theta^2}{\Phi^2}$; θ — модуль сцепления среды, $H/m^{-3/2}$.

Приравняв равенства, получим выражение

$$\frac{V_{mp}^{4,5} \theta^4}{4\sqrt{2} \sigma_p l_0 \Delta t \Phi^3} = \frac{4C_s^2 (C_s^2 - V_{mp}^2) (C_p^2 - V_{mp}^2) C_p (2C_s^2 - V_{mp}^2)^2}{\sqrt[4]{C_p^2 - V_{mp}^2}}$$

где θ^4 / Φ^3 — интегральный модуль сцепления среды.

Из полученного выражения можно выделить время, в течение которого будет продолжаться развитие трещины

$$\frac{V_{mp}^2 \theta^4 \sqrt{C_p^2 - V_{mp}^2}}{\sigma_p l_0 \left[4C_s^2 \sqrt{C_s^2 - V_{mp}^2} - C_p (2C_s^2 - V_{mp}^2)^2 \right] \sqrt{2}} \quad (16)$$

Подставляя в эту формулу данные для закладочного материала:

$$V_{mp} = 800 \text{ м/с};$$

$$\sigma_p = 3,6-7,5 \text{ МПа};$$

$$\theta^4 / \Phi^3 = 1,98 \cdot 10^4 \frac{H \cdot c}{m^5 / 2}$$

$$l_0 = 0,04 \text{ м};$$

$$C_p = 3500 \text{ м/с}; C_s = 1500 \text{ м/с}, \text{ получим } \Delta t = 0,0025 \text{ с}.$$

Тогда зона трещинообразований в искусственных целиках от сейсмического действия взрыва составит

$$L = \Delta t \cdot V_{mp} = 0,0025 \cdot 800 = 2 \text{ м}$$

Таким образом, при отбойке руды с весом ВВ в одном замедлении, равном 400 кг, зона возможных трещинообразований в искусственных целиках составит 2 м.

Выводы

1. Выведенные зависимости изменения величины скорости сейсмоколебаний от одновременно взрываемо-

го заряда и расстояния до центра взрыва позволили установить зоны упруго-пластических и упругих деформаций для рассматриваемого рудника. Установлено, что в результате массовой отбойки руды в искусственных целиках, прилегающих к очистным камерам, могут возникать остаточные деформации горных пород, способные привести к откольным явлениям, к разубоживанию руды закладочным материалом, а иногда и к потере устойчивости целиков.

2. При массовой подземной отбойке руд параметры зоны упруго-пластических деформаций в целиках, прилегающих к очистным камерам, определяемые скоростью колебаний элементов массива и расстоянием от центра взрыва, изменяются по степенному закону.

3. С учетом законов отражения и преломления определена интенсив-

ность сейсмоколебаний и величины динамических напряжений внутри искусственных целиков. Доказано, что на контуре искусственных целиков возникают сжимающие и растягивающие напряжения, превышающие величину напряжения на фронте ударной волны, т.е. напряжения, достаточные для разрушения их приконтурной части.

4. Наряду с возможными разрушениями приконтурной части целиков под влиянием преломленной в целик сейсмической волны возможно образование трещин на протяжении всего целика. Приведенный расчет величины трещинообразования показывает, что глубина трещин для искусственных целиков на Айхальском руднике при существующих параметрах отбойки руды будет составлять 2 м, а по методике Пергамента В.Х. – 1.2 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бреховский Л.М. Волны в слоистых средах. М. Изд-во АН СССР. — 1957 – С. 502
2. Бромберг К.Б. Ударные волны в упругой среде. М. Госгортехиздат. — 1959. — С. 116
3. Исмаилов Т.Т. Обоснование и разработка технологии взрывных работ, обеспечивающей устойчивость горных выработок при комбинированной отработке рудных месторождений, диссертация.
4. Курузов Б.Н. Обзор направлений развития и совершенствования взрывного дела в России и зарубежных странах. Информационный бюллетень Национальной организации инженеров – взрывников. –2001. — №1. –С. 8-10
5. Ляхов Г.М. Основы динамики взрыва в грунтах и горных породах. М. Недра. - 1974. – С.192
6. Мосинев В.Н. Деформация горных пород взрывом. Фрунзе, Илим. — 1971. –С 188
7. Пергамент В.Х., Зурков И.Е., Овчаров Ю.Е. Методика определения размеров зон трещинообразования при ведении взрывных работ на карьерах по добыче блочного камня. Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) 2004. — №12. – С.75-77. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Алексеев Андрей Михайлович – старший преподаватель, Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Амосова, rector-svf@ysu.ru

