

УДК 622.235+622.236.4

К.Н. Лабинский¹, Е.А. Сдвижкова², К.В. Кравченко², А.Ю. Галечко¹

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ВПЕРЕДИ ЗАБОЯ ВЫРАБОТКИ С ЦЕЛЬЮ ОБОСНОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВЗРЫВНЫХ РАБОТ

¹Донецкий национальный технический университет

²Национальный горный университет

В статье выполнен исследований напряженного состояния породного массива, разрушаемого взрывным способом. Проведено математическое моделирование формирования зон концентрации напряжений впереди забоя выработки. Показаны факторы, влияющие на оптимальную величину заходки. Установлена зависимость расчетного расхода взрывчатого вещества на заходку.

Ключевые слова: напряженное состояние, буровзрывная технология, расчетный расход, глубина заходки

Введение

При проведении выработки по буровзрывной технологии шпур в своем пространственном расположении могут пересекать как зону отжима, так и зону сжатия. Это может оказать влияние на направление действия взрыва и на характер разрушения массива, поскольку с изменением напряжений изменяется эффективность действия взрыва заряда взрывчатых веществ (ВВ).

Для обоснования эффективных параметров паспорта буровзрывных работ очень важно знать размеры зоны отжима в призабойной зоне и области формирования максимальных напряжений. Очевидно, что поле напряжений впереди забоя выработки, проходя через точку максимума, меняет направление градиента. При нарастании напряжений до точки максимума и одновременном разрушении пород под действием этих напряжений разупрочненные породы «выталкиваются» в забой, что характеризуют как «отжим» массива. После достижения максимума направление скорости изменения поля напряжений меняется, что меняет и вектор перемещений пород, препятствуя выбросу их к забою. Следовательно, учет пространственного расположения этих зон позволит обосновать следующие параметры паспорта буровзрывных работ: эффективную глубину заходки и расчетный расход ВВ на заходку.

Изложение результатов

В работе [1] приведены обширные экспериментальные данные, направленные на исследование напряженного состояния призабойной части массива для различных выработок угольных шахт Донбасса. Изучение сопротивления жестко закрепленных проволочных шпуровых датчиков при их относительной деформации под действием напряжений массива позволило оценить изменение напряженного состояния пород по мере удаления вглубь массива от забоя выработки. Для оценки пространственного расположения зон концентрации напряжений использована безразмерная величина – относительная глубина $l_0 = \frac{l}{R_y}$, где R_y – условный радиус выработ-

ки, м, $R_y = \sqrt{\frac{S_{вч}}{\pi}}$; l – расстояние от забоя выработки до точки замера, м.

График изменения напряжений впереди забоя выработки в долях от начальных напряжений γH (γ – объемный вес пород, H – глубина отработки пласта) в зависимости от расстояния вглубь массива для различных горизонтов представлен на рис. 1. Анализ показывает, что максимальные напряжения наблюдаются на расстоянии 0,8–1,0 условного радиуса выработки, а их величина находится в пределах 2,3–2,7 γH .

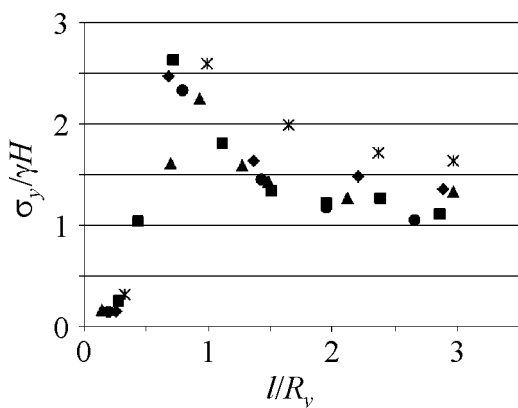


Рис. 1. Относительные напряжения в окрестности забоя выработки в зависимости от расстояния вглубь массива * – 685 м, ♦ – 720 м, ■ – 898 м, ▲ – 915 м, ● – 1012 м

Для установления общих закономерностей разрушения пород под действием формирующихся напряжений впереди забоя выработки необходимо сравнение их с предельными значениями прочности пород, характерными для условий, в которых проводились испытания.

С целью подтверждения, дополнения и обобщения экспериментальных данных выполнено математическое (численное) моделирование формирования зон концентрации напряжений впереди забоя выработки. Конечно-элементная модель полевого уклона ш. им. А.А. Скочинского построена в программном лицензионном комплексе Phase2, позволяющем оценить напряженное состояние массива на основе упруго-пластической модели среды с применением различных критериев прочности. Расчетная схема обла-

сти, содержащей плоское сечение протяженной выработки, представлена на рис. 2.

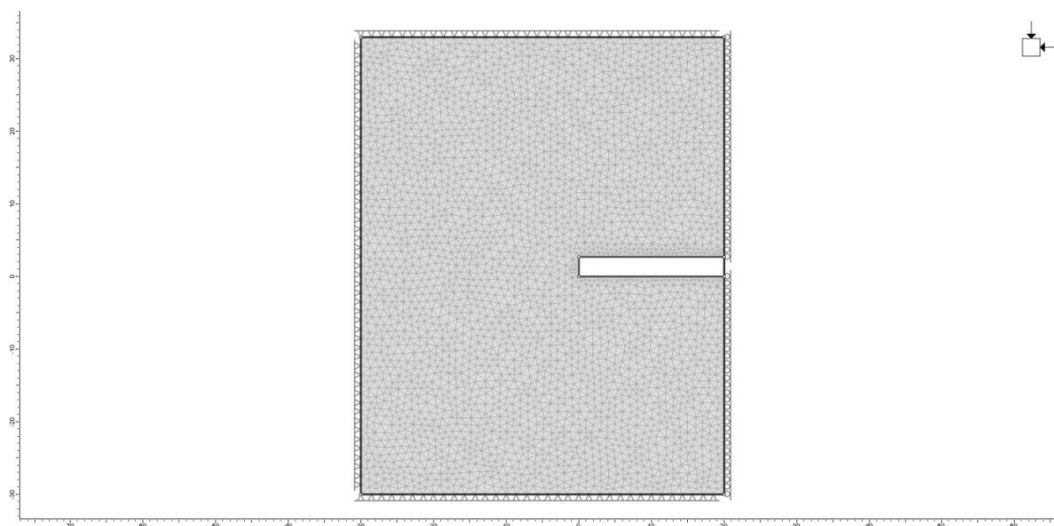


Рис. 2. Расчетная схема модели и конечно-элементная дискретизация области.

Для соблюдения граничных условий рассмотрена область, симметричная относительно левой вертикальной границы. Отличие рассматриваемой задачи от условий плоской деформации корректируется путем введения дополнительных коэффициентов «пригрузки», учитывающих трехмерный эффект в призабойной области [2].

Калибровка модели в отношении деформационной модели среды осуществлялась путем сравнения с экспериментальными данными расчетных величин нормальных вертикальных напряжений $\frac{\sigma_y}{\gamma H}$, локализации зоны от-

жима и зоны повышенных напряжений впереди забоя. Для рассмотренных условий (полевой уклон ЦП ш. им. А.А. Скочинского) наиболее адекватные результаты получены на основе решения упруго-пластической задачи с использованием критерия Кулона Мора.

В результате моделирования установлено, что для полевого уклона сечением $16,2 \text{ м}^2$, расположенного на глубине 1300 м, максимум сжимающих напряжений находится на расстоянии 2,14 м от забоя, что составляет 0,94 от условного радиуса выработки (рис. 3). Величина максимального вертикального напряжения достигает значения $2,8\gamma H$. При этом глубина зоны растягивающих напряжений вдоль оси выработки составила 1,04 м, что примерно составляет 0,5 условного радиуса выработки (рис. 4).

Используя данные геологической службы шахты им. А.А. Скочинского об изменении прочностных свойств пород с увеличением глубины их залегания и результаты численного моделирования для различных глубин расположения выработки, получим величину, характеризующую разрушаемость пород как отношение максимальных напряжений к пределу прочности

пород на одноосное сжатие $\sigma_0 = \sigma_{\max} / R_c$, где R_c – предел прочности пород на одноосное сжатие.

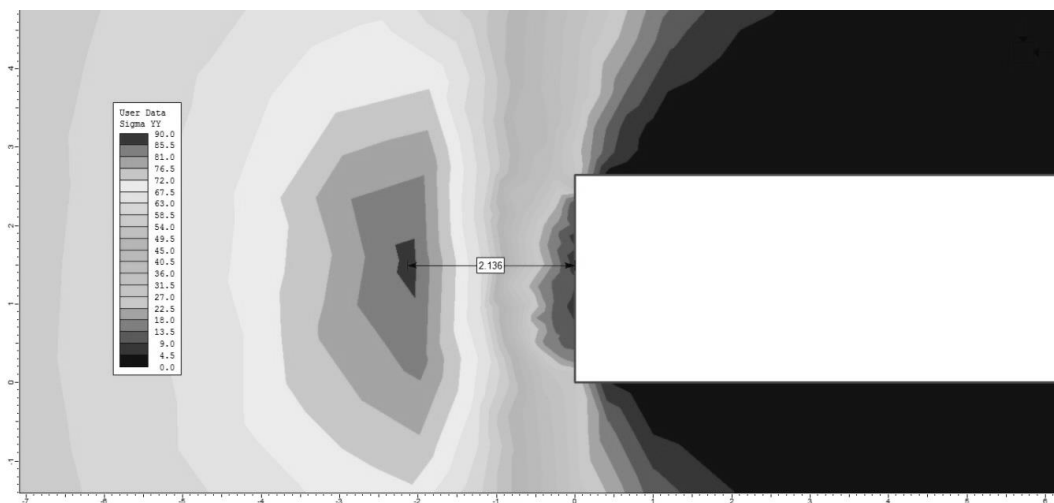


Рис. 3. Распределение нормальных вертикальных напряжений σ_y и положение максимума этих напряжений впереди забоя выработки

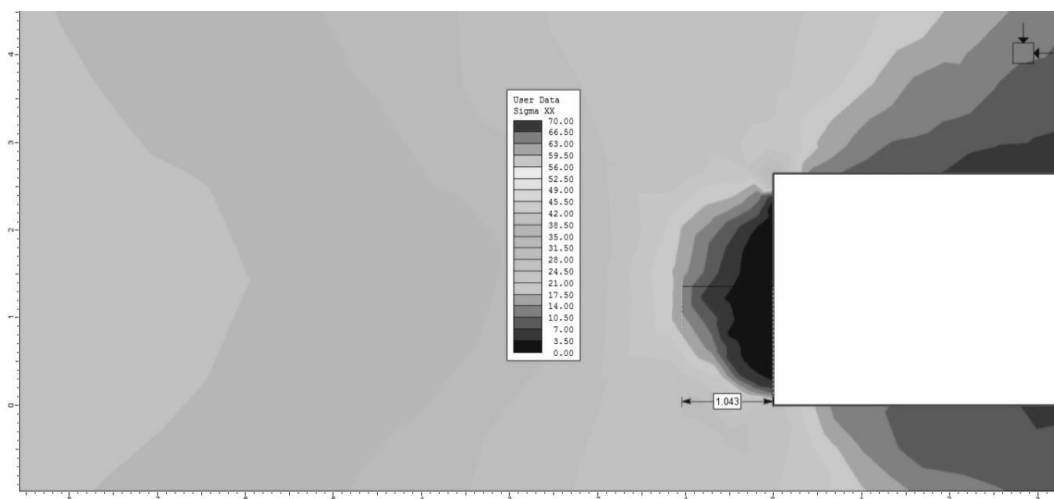


Рис. 4. Распределение нормальных горизонтальных напряжений σ_x и протяженность зоны отжима угля.

Зависимость данного показателя от глубины заложения выработки имеет вид монотонно возрастающей функции (рис. 5), приращения которой становятся малыми на больших глубинах (при $H > 1200$ м). График изменения с высокой степенью корреляции ($r = 0,99$) может быть описан так называемой сигмоидальной функцией (моделью Ричардса) [3]:

$$\sigma_0 = \frac{1,4}{\left(1 + e^{9-0,01H}\right)^{0,576}}.$$

Полученная зависимость позволяет определить величину максимальных напряжений впереди забоя выработки в зависимости от предела прочности пород на сжатие и глубины залегания выработки:

$$\sigma_{\max} = \frac{1,4R_c}{(1 + e^{9-0,01H})^{0,576}} \quad (1)$$

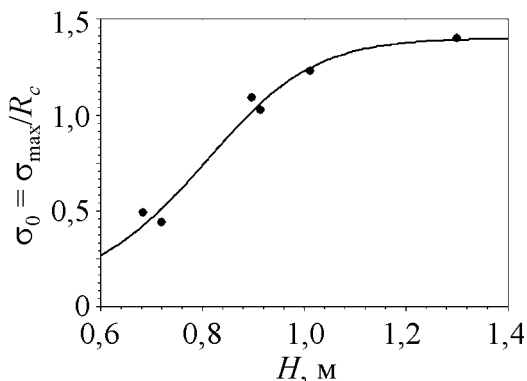


Рис. 5. График зависимости показателя разрушаемости от глубины залегания выработки

Как видно из рис. 5, превышение максимальными напряжениями впереди забоя выработки величины прочности пород на сжатие имеет место для глубин, больших 900 м. Это означает, что на больших глубинах «снятие» напряжений в горизонтальной плоскости приведет к разрушению породного массива. При этом после глубины 1200 м отношение максимума напряжений к пределу прочности на сжатие меняется незначительно и стремится к величине 1,4.

Рассмотрим энергию, необходимую для разрушения породного массива взрывом. Одним из основных свойств, влияющих на затраты энергии по разрушению массива, является его прочность. При испытаниях образцов определяют, чаще всего, пределы прочности на одноосное растяжение и на одноосное сжатие как наиболее полно позволяющие оценивать затраты энергии на разрушение. Таким образом, для разрушения образца породы необходимо к нему приложить нагрузку, превышающую предел его прочности.

Допустим, разрушаемый массив характеризуется критической энергоплотностью породы $[\sigma]$, Дж/м³. Таким образом, для разрушения массива заданного объема при проведении горной выработки необходимо приложить энергию P

$$P \geq [\sigma] l_{\text{зах}} S, \text{ Дж}, \quad (2)$$

где $l_{\text{зах}}$ – глубина заходки, м; S – площадь сечения выработки в проходке, м².

Любое ВВ характеризуется удельной энергией E , Дж/кг, затрачиваемой на разрушение породного массива. Следовательно, разрушение массива заданного объема будет происходить при следующем условии:

$$E * m \geq [\sigma] l_{\text{зах}} S, \text{ Дж}, \quad (3)$$

где m – масса ВВ на заходку, кг.

Роль напряженного состояния породного массива в процессе его разрушения такова: в деформируемом теле (массиве) реализуются напряжения, как способствующие его разрушению (в зоне отжима), так и препятствующие этому процессу (в зоне повышенных напряжений). Окончательно уравнение (3) можно записать в следующем виде:

$$m \geq \frac{([\sigma] - \Delta P_{\text{отж}} + \Delta P_{\text{напр}}) l_{\text{зах}} S}{E}, \text{ кг}, \quad (4)$$

что позволяет оценить массу ВВ, необходимую для разрушения породного массива.

Анализируя данные, представленные на рис. 3–5, можно сделать допущение, что объем пород в зоне отжима составляет примерно 0,25–0,35 от всего разрушаемого объема. Это позволяет определить средневзвешенную энергоплотность в разрушаемом объеме, которая примерно равна $\approx 0,7\sigma_{\text{max}}$. Подставляя выражение (1) в (4), с учетом средневзвешенной энергоплотности окончательно получаем минимальную массу расчетного расхода ВВ, необходимую для разрушения объема пород в пределах контура выработки на глубину заложения максимальных напряжений:

$$Q_{\text{расч}} \geq \frac{0,7\sigma_{\text{max}} l_{\text{зах}} S}{E} \approx \frac{R_c l_{\text{зах}} S}{E(1 + e^{9-0,01H})^{0,576}} \quad (5)$$

Таким образом, учитывая практику ведения взрывных работ на глубоких горизонтах угольных шахт Донбасса, можно сделать вывод о том, что шпуровы пересекают как зону отжима, так и зону повышенных напряжений, что необходимо учитывать при расчете параметров шпуровых зарядов. Если это не обусловлено технологической необходимостью, оптимальная глубина шпуров должна быть такой, чтобы они не пересекали зону максимальных напряжений: $l_{\text{зах}} \approx (0,90-0,96)\sqrt{\frac{S}{\pi}}$, поскольку размещенный за зоной повышенных напряжений заряд будет расходовать энергию не только на разрушение горного массива, но и на преодоление напряжений, «зажимающих» породу вглубь массива.

Выводы

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Удаление зоны максимальных напряжений вглубь массива не зависит от глубины заложения выработки и находится на расстоянии 0,90–0,96 условного радиуса выработки, что позволяет обосновывать глубину заходки при буровзрывной технологии проведения выработки $l_{\text{зах}} \approx (0,90-0,96)\sqrt{\frac{S}{\pi}}$.

2. Величина, характеризующая разрушаемость пород как отношение максимальных напряжений к пределу прочности пород на одноосное сжатие $\sigma_0 = \sigma_{\max}/R_c$, описывается сигмоидальной функцией (моделью Ричардса). При этом превышение максимальными напряжениями впереди забоя выработки величины прочности пород на сжатие имеет место для глубин, больших 900 м. Это означает, что на больших глубинах «снятие» напряжений в горизонтальной плоскости приведет к разрушению породного массива. При этом после глубины 1200 м отношение максимума напряжений к пределу прочности на сжатие меняется незначительно и стремится к величине 1.4.

3. Расчетный расход ВВ на заходку определяется сложной функцией, учитывающей глубину заложения выработки, ее площадь сечения в проходке и предел прочности на одноосное сжатие.

1. Минделли Э.О. Взрывные работы на глубоких горизонтах шахт / Э.О. Минделли, Л.А. Вайнштейн, П.А. Демчук – Донецк: Донбасс, 1971.– 96 с.
2. Сдвижкова О.О. Стійкість підземних виробок у структурно-неоднорідному породному масиві з випадково розподіленими властивостями: Дис... д-ра техн. наук / О.О. Сдвижкова; Нац. гірн. ун-т. - Дніпропетровськ, 2002. - 336 с. - рус.
3. Сигмоида // Википедия. [2007—2013]. [Електронний ресурс]. – Режим доступа: <http://ru.wikipedia.org/?oldid=53400665>.

К.М. Лабінський, О.О. Сдвижкова, К.В. Кравченко, О.Ю. Галечко

ОЦІНКА НАПРУЖЕНОГО СТАНУ МАСИВУ ПОПЕРЕДУ ВИБОЮ ВИРОБКИ З МЕТОЮ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВИБУХОВИХ РОБІТ

У статті виконано аналіз досліджень напруженого стану породного масиву, що руйнується вибуховим способом. Проведено математичне моделювання зон концентрації напружень попереду вибою виробки. Показано фактори, що впливають на оптимальну величину західки. Встановлено залежність розрахункових витрат вибухової речовини на західку.

Ключові слова: напружений стан, буропідривна технологія, розрахункові витрати, глибина західки

K.N. Labinskiy, E.A. Sdvizhkova, K.V. Kravchenko, A.Y. Galechko

EVALUATION OF A STRESS STATE OF MINE ROCK AHEAD THE FACE OF EXCAVATION FOR GROUNDING THE PARAMETERS OF EXPLOSIVE WORKS

The analysis of researches of a stress state of mine rock, which was destroyed during explosive works, is shown in this article. The mathematical modelling of formation of zones of

stress ahead the face of excavation is conducted. The influence of factors on optimal length of stope are shown. The dependence of calculated consumption of explosives is developed.

Keywords: stress state, explosion works, calculated consumption, length of stope