

сти к образованию здесь сквозной области техногенной нарушенности в надсоляной толще.

Выводы

Геомеханический анализ состояния породного массива на аварийном участке шахтного поля рудника СКРУ-2 показывает, что в интервале надсоляной толщи области техногенной трещиноватости приурочены к краевым частям зоны обрушения 1995 г. т.е. к участкам высоких градиентов мульды сдвижения. При этом можно отметить, что в отличие от СМТ, где фиксируются локальные зоны техногенной нарушенности, в ТКТ образуется сплошная область техногенной трещиноватости от барьерного целика до района провала и далее вдоль южной границы зоны обрушения. В районе барьерного целика разрушению оказывается подвержена вся надсоляная толща за исключением лишь центральной части СМТ.

Вследствие того, что техногенная трещиноватость оказывает влияние на фильтрационные свойства пород, увеличивая скорость фильтрации, возможно повышение интенсивности гидрофильных процессов в интервале надсоляной толщи вдоль границ зоны обрушения по направлению к району провала.

Работа выполнена в рамках госзадания № 0422-2019-0148-С-01.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Барях А.А., Санфиоров И.А., Еремина Н.А., Бабкин А.И., Сабиров Р.Х., Гилев М.В., Мынка Ю.В. Контроль за развитием аварийных ситуаций на калийных рудниках // Горн. вестн. – 1997. – №6. – С. 91-101.
2. Осипов В.И., Барях А.А., Санфиоров И.А., Мамаев Ю.А., Ястребов А.А. Карстовая опасность при затоплении калийного рудника в г. Березники Пермского края Российской Федерации // Геоэкология. – 2014. – № 4. – С. 356-361.
3. Амосин Б.З. Об использовании переменных модулей при решении одного класса задач линейно-наследственной ползучести // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. – 1974. – № 6. – С. 162-166.
4. Барях А.А., Самоделкина Н.А. Об одном подходе к реологическому анализу геомеханических процессов // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2005. – №6. – С. 32-41.
5. Кузнецов Г.Н. Механические свойства горных пород. – М.: Углетехиздат. – 1947. – 180 с.
6. Барях А.А., Асанов В.А., Паньков И.Л. Физико-механические свойства соляных пород Верхнекамского калийного месторождения: учеб. пособие. – Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. – 198 с.
7. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.: ил.
8. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.
9. Фадеев А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике. – М.: Недра, 1987. – 221 с.: ил.

УДК 625.235.5

DOI:10.7242/echo.2020.1.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЛИНИИ НАИМЕНЬШЕГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ШПУРОВОГО ЗАРЯДА ВВ С УЧЁТОМ ЕГО РАДИАЛЬНОГО ЗАЗОРА

В.М. Мальцев, В.В. Аникин
Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Рассмотрено воздействие взрывного импульса шпурового заряда на процесс дробления горных пород с учетом радиального зазора и показана возможность расчёта величины линии наименьшего сопротивления заряда ВВ с заданной степенью дробления взорванной горной массы для любого типа горных пород с учетом их прочности.

Ключевые слова: импульс взрыва, давление, длительность импульса, степень дробления, радиус, шпуровой заряд, радиальный зазор.

Общепринято, что длительность взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) является, как правило, крайне малой величиной, поэтому в классических теориях взрывного разрушения горных пород основным фактором разрушения горного массива принято давление взрывных газов, образующихся при взрыве заряда ВВ, на взрываемую породу.

Вместе с тем само по себе давление взрывных газов не сможет разрушить горный массив без некоторого времени своего воздействия на горную породу, поэтому в данной работе предлагается принять, что основным фактором разрушения горных пород при взрыве заряда ВВ является импульс давления взрыва, который представляет собой произведение давления взрывных газов на длительность его воздействия на взрывае-мый горный массив [1, 2].

Изменение величины импульса давления продуктов детонации шпурового заряда ВВ в зависимости от расстояния при наличии радиального зазора между зарядом и стенками шпура находится по формуле [1-4]:

$$J(r) = \frac{K_z \cdot P_n \cdot t(r) \cdot (L_z/L_m)^{0.5}}{r^n}, \quad (1)$$

где: $J(r)$ – удельный импульс взрыва, Н·с/м²; K_z – коэффициент радиального зазора заряда ВВ; P_n – начальное давление в зарядной полости с учётом отражения взрывной волны от стенок полости, Па; $t(r)$ – длительность действия импульса взрыва на расстоянии r , сек; L_z – длина заряда ВВ, м; L_m – максимальная эффективная длина заряда для данной породы и используемого типа ВВ, при которой линия наименьшего сопротивления (ЛНС) стабилизируется и дальнейшее увеличение длины заряда не приводит к её увеличению, м; r – безразмерное расстояние от центра заряда до искомой точки, выраженное в радиусах шпура; n – степень затухания напряжения в массиве горной породы.

Коэффициент радиального зазора определяется по формуле:

$$K_z = \frac{(r_s/r_0)^{-2\gamma}}{\Delta^m} \quad (2)$$

где: r_s – радиус зарядной камеры (шпура, скважины), м; r_0 – радиус заряда (патрона) ВВ, м; γ – политропа ВВ; Δ – относительный радиальный зазор между зарядом и стенками шпура, выраженный в радиусах заряда; m – эмпирическая степень коэффициента радиального зазора, зависящая от вида взрывания (трещинообразование, дробление, выброс), для расчёта ЛНС $m = 1,5$;

Относительный радиальный зазор между зарядом и стенками шпура определяется из выражения:

$$\Delta = \frac{r_s - r_0}{r_0} \quad (3)$$

Значение γ вычисляется по формуле:

$$\gamma = 2,1 \cdot (0,001 \cdot \rho_v)^{0,73} \quad (4)$$

Использование в качестве основного фактора разрушения импульса давления взрывных газов предполагает применение аналогичного динамического критерия разрушения. Такой критерий – нормированный импульс дробления рассмотрен в работах [3, 4] и определяется экспериментально в лабораторных условиях путем ударного разрушения стандартных образцов.

Вместе с тем, лабораторный способ определения нормированного импульса дробления является достаточно трудоёмким и длительным процессом, поэтому в данной работе предлагается использовать конструкционную формулу теоретического определения динамической разрушаемости пород I_i , которая включает основные физико-

механические свойства горных пород и усреднённую степень устойчивого дробления образцов при их ударном разрушении:

$$I_i = \frac{\rho \cdot C}{\rho_v \cdot D} \cdot \frac{\sigma \cdot t_0}{i_0^2} \cdot \frac{1 - \mu}{1 + \mu}, \quad (5)$$

где: I_i – теоретический расчётный показатель динамической разрушаемости породы, Па·с; ρ – плотность исследуемой породы, кг/м³; C – скорость распространения продольной волны возмущения в исследуемой породе, м/с; σ – прочность породы на одноосное сжатие, Па; μ – коэффициент Пуассона; i_0 – степень дробления породных образцов, обеспечивающая их устойчивое разрушение.

Величина i_0 определяется видом взрывного воздействия на породу – трещинообразование, дробление, выброс. Диапазон её изменения лежит в пределах 1,26 – 1,6. При подземной шпуровой отбойке $i_0 = 1,45$. При этом испытуемый образец породы раскалывается на 3 части и немного мелочи.

При ведении взрывных работ ЛНС обычно рассчитывается без учета степени дробления взорванной горной массы. Как правило, значение степени дробления находится дополнительным отдельным расчётом только по требованию технологического процесса или иным важным причинам.

Для определения безразмерной ЛНС предлагается использовать не начальный импульс взрыва, а необходимый для получения данной ЛНС оптимальный импульс $J_0(r^*)$:

$$W^* = \frac{\hat{f}}{i_v} \cdot \left(\frac{J_0(r^*)}{I_i \cdot m \cdot \eta} \right)^{0.5}, \quad (6)$$

где: \hat{f} – коэффициент, зависящий от условий взрывания (размеров выработки, глубины разработки) и устанавливаемый по результатам обязательного опытного взрывания перед утверждением паспорта буровзрывных работ, $\hat{f} = 0,8 \div 1,3$; i_v – рекомендуемая степень дробления массива горных пород для обеспечения оптимального разрушения при данной ЛНС, $i_v = 3 \div 6$; m – коэффициент сближения шпуров; η – коэффициент использования шпура.

В данной работе коэффициент $\hat{f} = 1$, так как условия взрывания для всех исследованных пород приняты одинаковыми.

Указанный импульс J_0 создаётся на некотором расстоянии r^* , которое зависит от прочности данной породы и величины ЛНС, формируемой используемым зарядом ВВ:

$$r^* = k \cdot \sigma^{0.5} \cdot W^* \quad (7)$$

где W^* – безразмерная ЛНС; σ – прочность породы, МПа; k – эмпирический коэффициент местоположения разрушающего импульса взрыва (для шпура диаметром 42 мм равен $k = 4,2 \cdot 10^{-5}$).

$$W^* = \frac{W(J)}{r_s} \quad (8)$$

где r_s – радиус зарядной камеры (шпура, скважины).

Значения рекомендуемой степени дробления массива горных пород для обеспечения оптимального разрушения при данной ЛНС дана в табл.

Таблица

Рекомендуемая степень дробления

i_v	5	4	3,5	3
σ , МПа	< 50	50-150	150-200	> 250

Указанная в формуле (6) искомая величина W^* входит в правую часть равенства (7) как аргумент искомого расстояния для оптимального импульса и аналитически не решается. Поэтому здесь применяется метод последовательных приближений. Он позволяет достичь разницы между последовательно задаваемой изменяющейся W_x^* и получаемой расчётом W^* менее любой допускаемой погрешности для данного параметра.

На рис. представлена зависимость расчётной ЛНС от прочности породы.

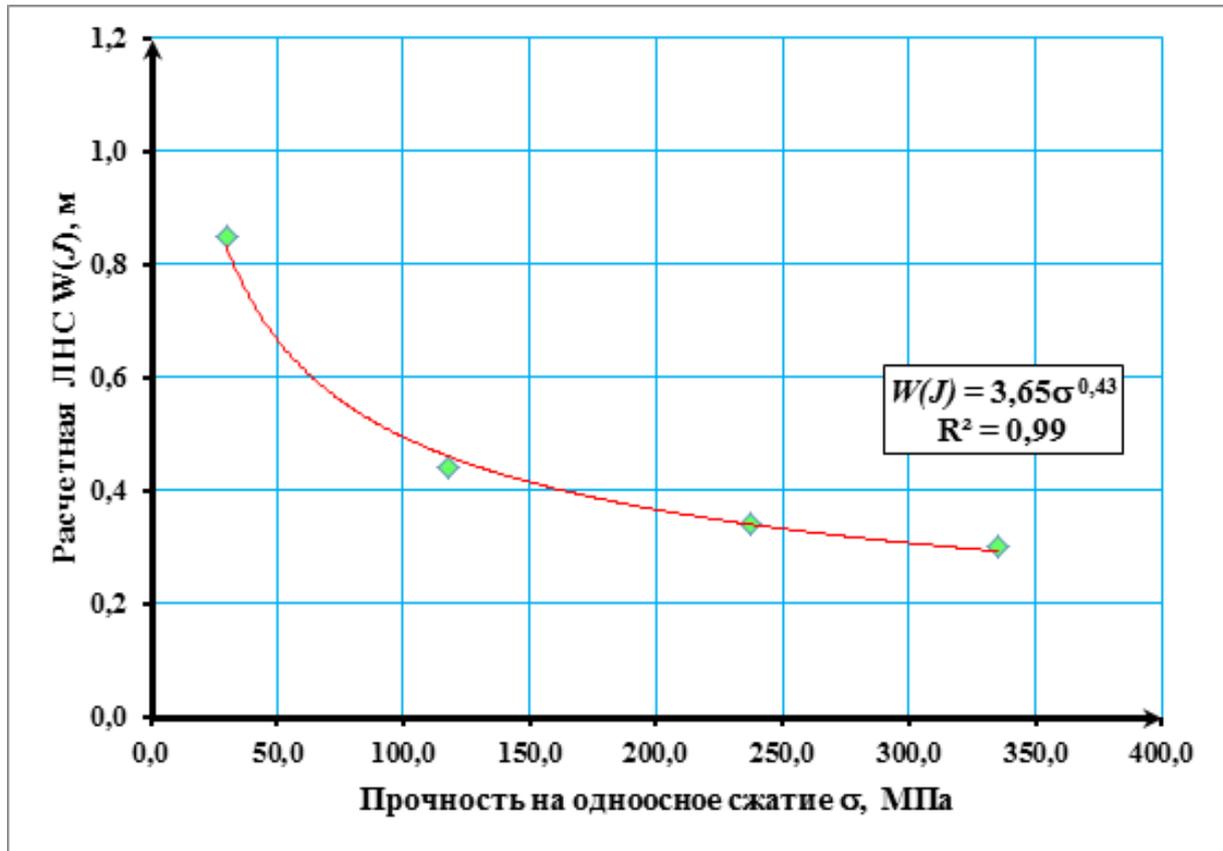


Рис. Зависимость величины расчётной ЛНС от прочности породы

Указанная зависимость была получена при использовании горных пород различных типов (сильвинит, гнейс, роговик и порфирит кварцевый), у которых статическая прочность на одноосное сжатие ($\sigma_{сж}$) изменяется от 30 МПа до 335 МПа.

ВЫВОДЫ

Использование импульса давления газов, образующихся при взрыве шпурового заряда, позволяет рассчитать величину линии наименьшего сопротивления заряда ВВ с заранее заданным числовым значением степени дробления взорванной горной массы. Установлена зависимость величины радиуса начального оптимального импульса взрыва, определяющего величину линии наименьшего сопротивления шпурового заряда, от прочности породы и величины определяемой ЛНС для любого типа горных пород.

Исследование выполнено при финансовой поддержке в рамках программы ФНИ (проект № 0422-2019-0148-С-01, регистрационный номер темы НИОКТР: АААА-А18-118040690032-2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ханукаев А.Н. Энергия волн напряжений при разрушении пород взрывом. – М.: Госгортехиздат, 1962. – 200 с.: ил.
2. Баум Ф.А., Григорян С.С., Санасарян Н.С. Определение импульса взрыва вдоль образующей скважины и оптимальных параметров скважинного заряда // Взрывное дело. – 1964. – № 54/11. – С. 53-102.
3. Руководство по ведению взрывных работ на калийных рудниках Верхнекамского месторождения. – Пермь, 1984. – 195 с.
4. Лыхин П.А., Мальцев В.М. Нормированный импульс дробления как показатель дробимости горных пород // Физические проблемы разрушения массивов горных пород: сб. докл. Междунар. конф. – М.: РАН, 1999. – С.174-176.
5. Мальцев В.М. Расчет радиуса зоны трещинообразования одиночного удлиненного заряда ВВ // Стратегия и процессы освоения георесурсов: материалы ежегод. науч. сес. ГИ УрО РАН по результатам НИР в 2009 г. – Пермь, 2010. – С. 220-222.

УДК 622.02

DOI:10.7242/echo.2020.1.10

**О РЕЗУЛЬТАТАХ РАЗРАБОТКИ КРИТЕРИЯ ПРОЧНОСТИ
ДЛЯ УСЛОВИЙ ИСТИННОГО ТРЕХОСНОГО НАПРЯЖЕННОГО
СОСТОЯНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

И.Л. Паньков

Горный институт УрО РАН, г. Пермь

Аннотация: Разработан новый критерий прочности горных пород для условий истинного трехосного напряженного состояния, параметры которого находятся по результатам комплексного определения пределов прочности на одноосное растяжение, одноосное сжатие и двухосное равнокомпонентное сжатие. Приведены результаты комплексного определения прочностных показателей, а также параметров разработанного критерия для различных типов горных пород. Построены зависимости изменения предела прочности сильвинита от величины промежуточного и минимального главных напряжений.

Ключевые слова: горная порода, главные напряжения, критерий прочности, истинное трехосное напряженное состояние.

В настоящее время одним из наиболее мощных инструментов при решении задач геомеханического обеспечения безопасных условий разработки полезных ископаемых, добываемых в сложных горно-геологических условиях, является компьютерное моделирование напряженного состояния подрабатываемых горных массивов. Развитие возможностей вычислительной техники позволяет реализовывать решения задач в трехмерной постановке с определением всех трех компонент поля главных напряжений (т.н. истинного трехосного напряженного состояния). Данный подход подразумевает, что при оценке состояния массива должны использоваться критерии прочности, включающие в свое математическое выражение не только максимальные (σ_1) и минимальные (σ_3), но и промежуточные (σ_2) главные напряжения. Несмотря на большое количество предложенных различными исследователями критериальных зависимостей [1], список наиболее часто применяемых критериев для решения такого типа задач геомеханики весьма ограничен. К таким критериям, в первую очередь, относится эмпирический критерий Моги [2] и его степенная модификация, предложенная Колменарисом и Зобаком [3]. Также удовлетворительные результаты для различных типов горных пород дает обобщенный вариант линейного критерия Друкера-Прагера, предложенный Парижо [4], и, по своей сути, являющийся следствием обобщения энергетической теории прочности Мизеса [5].