

согласия и объединяющих горные предприятия с предприятиями других отраслей промышленности. Предлагаемые методические положения комплексной оценки загрязнения атмосферы горнопромышленного региона позволяют реализовать единый подход к прогнозированию интенсивности загрязнения атмосферы, экономической эффективности производства и контролю за состоянием атмосферного воздуха, используя общие требования экологического императива на рассматриваемой территории.

**Список литературы**

1. Качурин Н.М., Ефимов В.И., Воробьев С.А. Методика прогнозирования экологических последствий подземной

добычи угля в России// Горный журнал. — 2014. — № 9. — С. 138–142.

2. Качурин Н.М., Воробьев С.А., Факторович В.В. Теоретические положения и модели воздействия на окружающую среду подземной добычи полезных ископаемых// Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2013. — Вып. 3. — С. 126–134.

3. Ефимов В.И., Сухарев Г.В. Проблемы и пути их решения при отработке пластов крутых угольных шахт ООО «Объединение Прокопьевскуголь»// Изв. ТулГУ. Науки о Земле. — 2013. — Вып. 2. — С. 66–75.

ecology@tsu.tula.ru

Материал поступил в редакцию  
24 декабря 2014 г.

УДК 622.831.32  
© Б.В. Лаптев, 2015

## Оценка склонности пород целиков к хрупкому разрушению<sup>1</sup>



**Б.В. Лаптев,**  
д-р техн. наук,  
ст. науч. сотрудник

ЗАО НТЦ ПБ

Рассмотрена оценка энергоёмкости разрушения пород, а также энергообмена между обрабатываемыми пластами и вмещающими породами на основании результатов натуральных наблюдений за напряженно-деформированным состоянием пород конструктивных элементов камерной системы разработки и лабораторных исследований механических характеристик пород на образцах.

*The assessment of rock destruction power consumption, as well as energy exchange between the mineable layers and the adjacent rocks on the basis of the results of the field studies for the stressed-deformed state of rocks of structural components of the heading-and-stall method, and the laboratory researches of the rocks mechanical characteristics on samples is considered in the Article.*

**Ключевые слова:** горные удары, энергоёмкость разрушения пород, модели горного удара, условия хрупкого разрушения пород.

**Х**рупкое разрушение пород, иногда в виде динамических явлений, сопровождающее горные разработки и относящееся к наиболее неблагоприятным видам реализации энергии горного давления в производственном процессе, происходит при определенном сочетании геологических и горнотехнических условий в результате концентрированного накопления потенциальной энергии упругого сжатия горных пород. Характеризуется оно внезапным во времени и пространстве высвобождением энергии в виде мгновенного разрушения предельно напряженных областей горных пород и руд с последующим проявлением деформаций, сдвижения и колебания окружающего массива.

Кинематические и динамические условия хрупкого разрушения пород (физическая модель) сводятся к следующему [1]:

1. В результате протекания динамических процессов в массиве горных пород накапливается определенный запас упругой энергии в очаговой зоне.

2. Разрушение пород наступает тогда, когда действующие в очаговой области нагрузки превзойдут предел прочности пород, а запас упругой энергии в ней окажется достаточным, чтобы в очаг их разрушения энергия поступала с избытком (приток энергии в очаг разрушения должен превышать возможность пород ее поглощать на пластическое деформирование). Избыток энергии вызывает нарушение динамического равновесия в очаговой зоне, что ведет к хрупкому разрушению пород.

3. В момент, когда целики породы (руды, угля) не выдерживают приложенных к ним нагрузок и начинают разрушаться, сжатые массивы вмещающих горных пород, расположенных выше и ниже их, получают возможность расширяться и отдавать свою энергию, прежде всего на повышение интенсивности разрушения целиков и сотрясение горно-

<sup>1</sup> На примере соляных пород.

го массива. При крупных динамических явлениях из окружающих пород выделяется энергии во много раз больше, чем из разрушаемых целиков.

Теория хрупкого разрушения пород наряду с анализом энергетического баланса и устойчивости (математическая модель разрушения) включает изучение последовательных стадий развития процесса [1]. К таким стадиям относятся: подготовительная, в результате которой происходят деформирование пород и формирование зоны опорного горного давления; иницирование и распространение бурного разрушения; движение разрушенного материала и прекращение процесса разрушения.

Энергия, выделяющаяся при хрупком разрушении, складывается из части, заключающейся в разрушаемом материале  $W_m$ , и части, поступающей из вмещающих пород  $\mathcal{E}$ . Она расходуется на разрушение  $W_p$  и придание кинетической энергии  $K$  кускам разрушенного материала. Оставшаяся часть энергии поглощается боковыми породами  $W_6$  вблизи места разрушения, часть уходит в форме сейсмических колебаний  $W_c$ .

Понятие о динамической форме разрушения пород не имеет абсолютного смысла: одна и та же порода в зависимости от условий нагружения может быть склонной или не склонной к мгновенному хрупкому разрушению. Конструктивные породные элементы около выработок разрушаются спокойно, когда условия отвечают жесткому нагружению, и в динамической форме, если окружающие породы образуют мягкую по отношению к ним систему (окружающие породы упруго расширяются, как сжатая пружина, и создают дополнительный приток энергии).

Сравнение материалов по степени их хрупкости можно выполнить, сопоставляя ряд внешних условий, которые, с одной стороны, включают действующие нагрузки, а с другой — возможную скорость их снижения, т.е. жесткость системы. Например, горный удар происходит, когда внешние нагрузки достигают максимальных значений (предельная нагрузка на целик) и когда жесткость внешней системы меньше жесткости разрушаемого элемента.

Приток энергии и ее поглощение пропорциональны соответственно  $\sigma_0^2 / E_y$  и  $\sigma_0^2 / M_{cn}$  ( $\sigma_0$  — предел прочности пород;  $E_y$ ,  $M_{cn}$  — модули соответственно упругости и спада) [2]. Опасные условия возникают при  $M_{cn} / E_y > 1$ . Рассмотренные положения — необходимые, обязательные условия проявления динамических явлений. Они оценивают породы только по их склонности к потере устойчивости (потенциальную энергоемкость разрушения), а не по интенсивности последствий неустойчивости.

Динамические явления типа горных ударов, внезапных выбросов, сопровождающие разработку месторождений полезных ископаемых, возникают в результате энергообмена между элементами массива горных пород.

Прогноз характера проявлений горного давления в подземных выработках связан с оценкой количества энергии, необходимой для разрушения некоторой части массива, и сопоставлением ее с количеством энергии, выделяющейся из остального массива. Такой подход требует определения напряженно-деформированного состояния массива вблизи выработки, оценки его энергетического потенциала, установления размеров зоны возможных разрушений, количества энергии, затрачиваемой на деформирование пород этой зоны.

Анализ общего теоретического баланса энергий, аккумулируемых в породах и необходимых для их неупругого деформирования, большой диапазон изменения свойств пород не позволяют дать однозначный ответ о возможной организации самоподдерживающегося неуправляемого процесса разрушения пород в конкретной точке с существующими горно-геологическими условиями без надлежащих инструментальных исследований.

Диапазон изменения значений каждого из параметров, характеризующих механические свойства горных пород и определяющих их энергетику, очень широк как по стратиграфии, так и по латерали. Например, на Верхнекамском месторождении калийно-магниевого солей, которое отнесено к выбросоопасным и сложено свитой непосредственно примыкающих друг к другу пластов силвинитового, карналлитового или смешанного состава, а также каменной соли прочность пород на сжатие изменяется от максимального значения (1,1 МПа) у пласта  $D_k$  на Третьем Соликамском руднике до максимального (57,4 МПа) у пласта  $KpII$  на том же руднике. Прочность на растяжение имеет минимальное значение 0,04 МПа у пород пласта  $B_k$  на Втором Соликамском руднике, а максимальное — у пласта  $KpII$ . Аналогичный разброс отмечен и для модулей упругости и спада. Пласты отличаются по содержанию в них (%) основных породослагающих минералов: хлористых калия, натрия и магния. Глубина разработки колеблется от 250 до 450 м, горное давление не превышает 10 МПа.

По данным исследований прочность пород в выбросоопасных зонах на 25 % и более ниже, чем в неопасных; энергоемкость разрушения пород также ниже как в допредельной, так и в запредельной стадиях —  $(5\div 7) \cdot 10^4$  и  $(9\div 11) \cdot 10^4$  против  $(2\div 3) \cdot 10^4$  и  $(24\div 28) \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>. Количество выделяющейся кинетической энергии может достигать  $(2,4\div 17) \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> и примерно равно работе, необходимой на разрушение пород в запредельной стадии.

Энергоемкость разрушения пород, а также энергообмен между обрабатываемыми пластами и вмещающими породами (в данном случае выше- и нижележащими неотрабатываемыми пластами) оценивали по результатам натуральных исследований напряженно-деформированного состояния конструктивных элементов камерной системы разработки комплексом инструментальных методов. По

натурным данным построены полные диаграммы деформирования пород и «графические модели динамических разрушений пород».

Установлено, что геометрические размеры охраняемых целиков в значительной степени влияют на энергетические показатели разрушения пород. Так, при уменьшении ширины целика примерно в 4 раза относительно высоты ( $h/l$  увеличивается с 0,36 до 1,32;  $h$  — высота;  $l$  — ширина целика) количество удельной энергии, затрачиваемой на пластическое и упругое деформирование пород в допредельной стадии, возрастает в 2–4 раза ( $9,3 \cdot 10^4$  и  $37 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> против  $2,1 \cdot 10^4$  и  $20,4 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>). В запредельной стадии, наоборот, количество удельной энергии, затрачиваемой на разрушение более податливых целиков, меньше ( $40 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup> против  $17 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>3</sup>). Данный эффект можно объяснить тем, что в запредельной стадии деформирования преобладает менее «энергозатратный механизм» разрушения — диссипация энергии при преобладании пластических деформаций.

Накопленная потенциальная энергия упругих деформаций сжатия горного массива расходуется в первую очередь на упругое деформирование. В случае избытка потенциальной энергии над энергоемкостью разрушения часть потенциальной энергии приводит массив в движение к новому положению равновесия, т.е. превращается в кинетическую. Указанное условие является обязательным в динамических процессах разрушения.

В соответствии с теоретическими расчетами удельная потенциальная энергия упругого сжатия у соляных пород может достигать  $1,6 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>, а у насыщенных газом —  $25,6 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>.

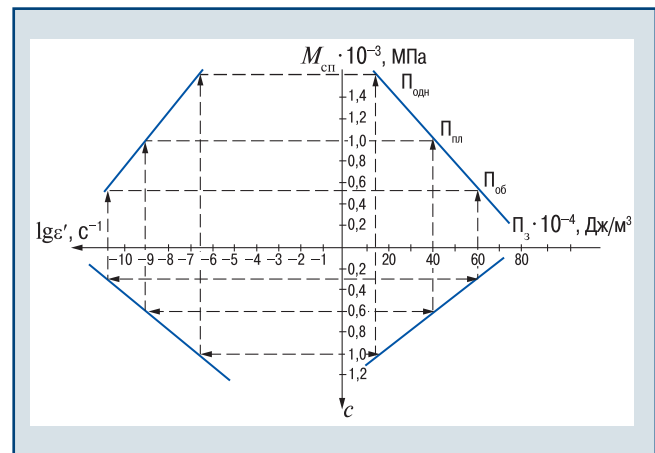
В подавляющем большинстве условий энергии упругого сжатия пород достаточно для организации саморазрушения пород, а в ряде случаев и для выделения излишка энергии в виде кинетической составляющей.

Сопоставление результатов лабораторных и натурных исследований энергоемкости разрушения пород с результатами теоретических расчетов потенциальной энергии упругого сжатия пород показало, что интервалы значений энергии и работы разрушения в основном перекрываются. В ряде случаев максимальная потенциальная энергия упругого сжатия пород, находящихся в трехосном напряженном состоянии, может оказаться больше, чем это необходимо для их неупругого деформирования:  $1 \cdot 10^6 < 1,6 \cdot 10^6 < 3,5 \cdot 10^6$  Дж/м<sup>3</sup>.

Таким образом, при сопоставлении данных теоретических, лабораторных и натурных исследований удельной энергоемкости разрушения солей и данных расчетов потенциальной энергии упругого сжатия пород получено, что обязательное условие для хрупкого разрушения соляных пород, состоящее в превышении энергии на хрупкое разрушение над работой по их неупругому деформированию, в ряде случаев выполняется.

Рассмотренные условия обязательны для самоорганизации хрупкого разрушения пород в динамической форме, но недостаточны. Для оценки достаточности условий необходимо определить вероятные скорости движения частиц разрушенных пород, которые должны быть больше критической скорости, равной 5 м/с [3], иначе произойдет самозатухание процесса разрушения. Проведенные расчеты позволили установить, что для соляных пород критические скорости движения частиц в газовом потоке достигаются при давлении газа в массиве более 3–5 МПа и газоносности  $0,2$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

На рисунке представлены зависимости между относительной скоростью деформирования образцов сильвинитовой породы и каменной соли  $\epsilon'$ , модулем спада  $M_{\text{сп}}$ , степенью нагружения целиков  $c$  и удельной энергией, затрачиваемой на разрушение пород в запредельной области  $P_3$ . Коэффициент парной корреляции составляет 0,9 при уровне значимости 0,001.



▲ Зависимость между относительной скоростью деформирования образцов сильвинитовой породы и каменной соли, модулем спада, степенью нагружения целиков и удельной энергией, затрачиваемой на разрушение пород в запредельной области:

$P_{\text{одн}}, P_{\text{пл}}, P_{\text{об}}$  — напряженное состояние соответственно одноосное, плоское, объемное

Согласно номограмме при относительной скорости деформирования пород  $\epsilon'$  более  $1 \cdot 10^{-4} c^{-1}$ , что соответствует степени нагружения целиков  $c = 1$ , модуль спада составит  $1 \cdot 10^3$  МПа и будет равен среднестатистическому значению модуля упругости каменной соли (нагружающих пород), превышение которого ( $M_{\text{сп}} > E_y$ ) приведет к развитию неуправляемого саморазрушения пород, а энергоемкость запредельного разрушения  $P_3$ , согласно лабораторным исследованиям, близка по своим значениям работе разрушения при одноосном напряженном состоянии  $P_{\text{одн}}$ .

По мнению автора, параметры  $c = 1$ ;  $M_{\text{сп}} > E_y = 1 \cdot 10^3$  МПа;  $\epsilon' = 1 \cdot 10^{-4} c^{-1}$  необходимо считать критериальными. Уменьшение степени

нагрузки целиков до 0,45 приводит к снижению относительной скорости деформирования пород целиков до  $1 \cdot 10^{-8} \text{ с}^{-1}$  и модуля спада — до  $0,45 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ , а энергоёмкость запредельного плоского разрушения — до  $44 \cdot 10^4 \text{ Дж/м}^3$ , что соответствует плоскодеформированному напряженному состоянию.

Следовательно, степень нагружения охранных целиков для исключения вероятности их неуправляемого самопроизвольного разрушения должна быть не более единицы, а с учетом коэффициента запаса прочности — не более 0,7–0,8.

В данном случае к критериальному относится модуль упругости нагружающих пород, равный  $(1,6 \div 2) \cdot 10^3 \text{ МПа}$ , который превышает модуль спада обрабатываемых пород при степени нагружения оставляемых целиков менее единицы, т.е. выполняется одно из главных условий предотвращения процесса саморазрушения пород  $E_y > M_{\text{сп}}$  (жесткость нагружающей системы больше жесткости нагружаемой).

При степени нагружения целиков, равной 0,6, модуль спада пород уменьшается до  $1 \cdot 10^3 \text{ МПа}$ , целики «работают» как минимум в условиях плоско-

деформированного напряженного состояния, и выделения избытка энергии в виде кинетической не ожидается, но чаще находятся в объемном напряженном состоянии.

Аналогично натурным лабораторные исследования показали, что с учетом коэффициента запаса прочности предельная (безопасная) степень нагружения пород сильвинитового или карналлитового состава целиков должна быть при установлении геодинамической безопасности не более 0,6–0,7.

#### Список литературы

1. Петухов И.М., Линьков А.М. Механика горных ударов и выбросов. — М.: Недра, 1983. — С. 150–173.
2. Лантев Б.В. Об удароопасности соляных пород Верхнекамского месторождения // Безопасность труда в промышленности. — 2001. — № 5. — С. 29–31.
3. Глушко В.Т., Виноградов В.В. Разрушение горных пород и прогнозирование проявлений горного давления. — М.: Недра, 1982. — 193 с.

laptevbv@mail.ru

Материал поступил в редакцию 17 октября 2014 г.

УДК 622.235  
© В.А. Фокин, 2015

## К вопросу оценки степени структурного ослабления прибортовой части породного массива карьера



**В.А. Фокин,**  
д-р техн. наук, вед. науч.  
сотрудник

Федеральное государственное  
бюджетное учреждение науки  
ГоИ КНЦ РАН

Разработана методика, основанная на использовании выявленной пространственно-энергетической взаимосвязи массовых взрывов и природных землетрясений и позволяющая оценить степень структурного ослабления прибортовой части породного массива по результатам регулярных сеймонблюдений, что может служить дополнительной информацией при оценке устойчивости как отдельных уступов, так и участка борта карьера.

*The technique was developed based on the use of the revealed spatial and power interrelation of mass explosions and natural earthquakes, and allowing for estimating an extent of structural weakening of the cut off part of the mine rock mass based on the results of regular seismic monitoring that can serve an additional information at an estimation of stability of both separate banks and the section edge of the open-pit mine.*

**Ключевые слова:** карьер, массовый взрыв, сейсмическая энергия, структурное ослабление.

Основной способ разрушения руд и пород любого месторождения — использование энергии взрыва промышленных взрывчатых веществ (ВВ). В результате производства массовых взрывов в карьере окружающий породный массив подвергается сейсмическому воздействию различной интенсивности и продолжительности. Интенсивность воздействия определяется диаметром отбойных скважин, энергетическими

характеристиками используемого ВВ, весом заряда в скважине, числом одновременно взрываваемых скважин (в одной ступени замедления), номиналами применяемых замедлителей, схемой поверхностной сети инициирования (схемой взрывания). Продолжительность такого воздействия определяется протяженностью и шириной блока (т.е. продолжительностью взрывания всех скважин на блоке).