

ленных условиях показали, что эффективность пылеподавления происходит через 2,5 мин и составляет 62 %.

Таким образом, методы и средства, направленные на ресурсосбережение и охрану окружающей среды при производстве массовых взрывов на карьерах, органически связаны. Использование простейших ВВ снижает затраты на взрывные работы, уменьшает объемы некондиционной продукции и выбросов ядовитых газов в атмосферу.

Взрывание высоких уступов в зажатой среде сокращает расход бурения, средств взрывания и забоечного материала при одновременном снижении пылегазовыделений в атмосферу карьера. Это свидетельствует о идентичности решения сложных проблем ресурсосбережения и охраны окружающей среды на карьерах.

1. *Ресурсосберегающие технологии взрывного разрушения горных пород* / Э. И. Ефремов, В. М. Комир, И. А. Краснопольский и др. — Киев : Техніка, 1990. — 149 с.
2. *Ефремов Э. И.* Ресурсосберегающие, экологически надежные технологии взрывного разрушения горных пород на карьерах // Материалы Междунар. конф. по металлургии и горному делу. — Эдинбург, 2—6 июля 1990. — Эдинбург, 1990. — С. 439—448.
3. *Академическая наука — горное производство* // Горн. журн. — 1991. — № 5. — С. 29—34.
4. *Ефремов Э. И., Джос В. Ф.* Повышение эффективности буровзрывных работ на обводненных горизонтах карьера ИнГОКа // Там же. — 1976. — № 2. — С. 59—60.
5. *Галкин В. В.* Заряжание обводненных скважин неводоустойчивыми ВВ // Там же. — 1980. — № 3. — С. 40—41.
6. *Мосинец В. Н.* Новые ресурсосберегающие технологии разработки руд цветных металлов. — М. : ИПКОН АН СССР, 1988. — 19 с.
7. *Демидюк Г. П., Викторов С. Д., Фугзан М. М.* Влияние взрывного нагружения на эффективность последующих этапов обогащения // Взрыв. дело. — 1986. — № 89/46. — С. 116—121.
8. *Ефремов Э. И.* Проблемы охраны окружающей среды при массовых взрывах на карьерах // Вісник АН України. — 1989. — № 11. — С. 64—70.
9. *Борьба с пылью в рудных карьерах* / В. А. Михайлов, П. В. Бересневич, В. Г. Борисов, А. И. Лобода. — М. : Недра, 1981. — 262 с.
10. *Ефремов Э. И.* Проблемы охраны окружающей среды при крупномасштабном взрывании на карьерах СССР // Материалы Междунар. конф. по взрывной технике. — Линц, 25—27 ноября, 1987. — Линц, 1987. — С. 1—9.

Ин-т. геотехн. механики АН Украины,  
Днепропетровск

Получено 10.01.92

УДК 622.275(088.8)

**А. Ф. Булат**

## **ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ**

На основе обобщения результатов теоретических и экспериментальных исследований особенностей поведения предельно-напряженных пород при наложении дополнительных слабых воздействий предложено принципиально новое направление научных исследований — изменение состояния горного массива малоэнергоёмкими механическими и физическими воздействиями, реализующими дозированное высвобождение потенциальной энергии горного массива при разработке пластов на больших глубинах.

Усложнение горно-геологических условий добычи полезных ископаемых ставит ряд важнейших проблем, основу решения которых призвана обеспечить геомеханика. Наиболее актуальны проблемы эффективного разрушения прочных пород, предотвращения разрушения массива вокруг подземных сооружений и поддержания последних, предотвращения динамических проявлений горного давления и др. Общим для указанных проблем является процесс разрушения, а различие состоит в предотвращении или направленном переводе в устойчивый контролируемый режим в одних случаях и иници-

© А. Ф. Булат, 1993

ировании управлен и в других. Поэтому исследование процесса разрушения предельно напряженных горных пород, условий его формирования и протекания, методов инициирования и управления составляют основу создания принципиально новых методов управления геомеханическими процессами и технологий ведения горных работ в сложных горно-геологических условиях.

Согласно существующим представлениям для изменения состояния напряженных горных пород необходимы воздействия с возмущением, превышающим по величине действующие в массиве, например торпедирование и камуфлетное взрывание в выбросоопасном массиве, напорные усилия при комбайновом разрушении, усилия в крепи при поддержании обнажений пород. Однако с утверждением представления о горном массиве как активной системе с запасом энергии появились новые данные, уточняющие эти представления. Так, экспериментально установлено, что положительных результатов в поддержании выработок можно добиться ограниченным по величине распором крепи. Энергетический баланс процессов, происходящих при динамических явлениях, свидетельствует о том, что нарушение равновесия от слабого возмущения, например при бурении угля, может приводить к неконтролируемому лавинообразному разрушению.

Изложенное позволяет сделать вывод о принципиальной возможности изменения состояния массива слабыми, малоэнергетическими воздействиями при активном использовании энергии, накопленной в нем. Авторами работ [1, 2] высказана гипотеза, что чувствительность предельно напряженных пород к механическим воздействиям зависит от условий развития процесса разрушения. Это позволило объяснить контролируемые процессы в напряженных газонасыщенных породах и углях при различных воздействиях, приводящих к значительным возмущениям напряжений. Однако эта гипотеза не находила развития из-за противоречивых представлений о механизме слабых воздействий.

Известно, что при ведении горных работ вблизи обнажаемых поверхностей массив в результате перераспределения напряжений переходит в предельное состояние с разрыхлением пород. В зависимости от условий, разрыхление может или развиваться, охватывая значительные области, о чем свидетельствуют многочисленные примеры обрушений и вывалов в выработках, или задерживаться с накоплением больших запасов потенциальной энергии, что наблюдается в случае выбросоопасности.

Исследования особенностей поведения горных пород после достижения предельных состояний при трехосном неравнокомпонентном сжатии [3, 4] позволили понять природу высокой чувствительности пород к малоэнергетическим воздействиям. Установлено, что при значениях минимальной компоненты напряжений  $\sigma_3 = 0,3 \text{ МПа}$  дополнительные механические воздействия ведут к кратковременному охрупчиванию пород и снижают их остаточную несущую способность в нарушенном состоянии. С увеличением минимальной компоненты напряжений чувствительность к воздействиям уменьшается, а при достижении порогового значения, соответствующего разрушению без разрыхления, реакция на слабые воздействия (порядка 0,01—0,1 текущего значения несущей способности пород) исчезает.

Теоретически механизм влияния малоэнергетических воздействий объясняется так. Породы в приконтурной области находятся в предельно напряженном состоянии с различной степенью нарушенности их сплошности. Малоэнергетические воздействия искусственного (механические, взрывные, физико-химические, биохимические, гидравлические) или естественного (выемка угля, разгрузка, передвижение, распор крепи) происхождения при определенных условиях для разрыхления пород вызывают кратковременное снижение их остаточной несущей способности. Это в свою очередь приводит к нарушению равновесного состояния и выделению энергии упругих деформаций массива, за счет которой происходит дальнейшее увеличение зоны разрушения.

Такая зависимость чувствительности предельно напряженных пород к механическим малоэнергетическим воздействиям от условий развития разруше-

ния доказана шахтными экспериментальными исследованиями, выполненными в различных горно-геологических условиях при проведении и креплении выработок, при вскрытии выбросоопасных угольных пластов и добычных работах. Причем во всех случаях затраты энергии на разрушение массива при малоэнергоёмких воздействиях были значительно ниже, чем при традиционных методах разрушения. В частности, в очистных выработках затраты энергии снижаются в 60—100 раз. Активизация разрушения и затрачиваемая на нее энергия зависят от возможности протекания процесса с разрыхлением, а сопоставление энергии, затраченной на активизацию процесса разрушения и увеличение зоны разрушения, доказывает, что процесс идет за счет энергии, накопленной в массиве.

Установленная закономерность разрушения предельно напряженных пород позволяет перейти от существующих пассивных к созданию принципиально новых активных методов управления геомеханическими процессами малоэнергоёмкими механическими воздействиями при ведении горных работ.

Вместе с тем в последнее время при решении проблемы разрушения материалов получают распространение физические методы воздействия: облучение материалов электрическими, магнитными, электромагнитными, ультразвуковыми импульсами, электронными пучками для увеличения прочности и ресурса работы, перевода на заданный уровень и режим деформирования, изменения свойств и структуры материала, разрушения. Огромный интерес представляет развитие этого направления исследований — применение малоэнергоёмких физических воздействий малой мощности для управления свойствами и напряженно-деформированным состоянием массива при ведении горных работ в сложных горно-геологических условиях, требующее, однако, более глубокого изучения процесса разрушения.

Представление горного массива как системы с определенным энергетическим уровнем, повышающимся с увеличением сил горного давления, и сложными энергетическими преобразованиями в процессе изменения ее состояния, включающими физические и механические превращения импульсно-волнового характера, требует более подробного рассмотрения указанных аспектов с учетом физико-механических свойств горных пород.

В горном массиве, в соответствии с иерархической геофизической моделью, можно выделить элементы, ограниченные геологическими разломами (характерный линейный размер  $a > 10^3$  м), включающими магистральные трещины (размер  $a > 10^{-1}$  м), видимые трещины ( $a > 2 \cdot 10^{-4}$  м), макропоры и трещины ( $a = 10^{-6} \div 2 \cdot 10^{-4}$  м), субмакропоры ( $a = 10^{-7} \div 10^{-6}$  м) и наконец, сами переходные поры ( $a = 10^{-9} \div 10^{-7}$  м) и микроэлементы ( $a < 3 \cdot 10^{-9}$  м). Под действием гравитационных сил такая структура находится в постоянном движении. Движение сопровождается преобразованиями элементной иерархии в виде слияния микродефектов, развития трещин, подвижек блоков и др. Эти преобразования происходят с выделением или поглощением энергии. Именно по величине энергии разрушения элементных связей и по их размерам можно судить о необходимой величине воздействия на материал и ожидаемых при этом преобразованиях.

Структурные изменения при деформировании начинаются с нарушения связей на микроуровне. Таковыми являются перемычки между микродефектами. Их линейный размер оценивается зависимостью

$$a = \frac{\mu}{1-\nu} \gamma_0 \tau_0^{-2}, \quad (1)$$

где  $\mu$ ,  $\nu$  — соответственно модуль сдвига и коэффициент Пуассона;  $\gamma_0$  — поверхностная энергия;  $\tau_0$  — постоянная Шмида для материала.

Как видно из (1), размер связей на микроуровне (исходный элемент) является характеристикой материала. Для угля ( $\mu = 0,5 \cdot 10^2$  МПа;  $\gamma_0 = 2 \div 10$  Дж/м<sup>2</sup>;  $\nu = 0,35$ ;  $\tau_0 = 10^2$  МПа)  $a = (3 \div 12) \cdot 10^{-9}$  м, что в природе характеризует микропоры и перемычки между ними. Разрушение такой связи сопровождается импульсом — квантом. Он регистрируется как акустическая эмиссия. Его энергия по аналогии с энергией шарового дефекта ха-

рактируется величиной

$$U = \frac{2(1-\nu)}{\mu} \sigma^2 a^3 = \frac{1-\nu}{\mu} K_1 \pi a^2, \quad (2)$$

где  $K_1$  — коэффициент интенсивности напряжений.

Известно, что хрупкое развитие дефекта в пластичных материалах, например углях, происходит при  $K_{1c} = 12 \left( \frac{\mu \gamma_0}{1-\nu} \right)^{1/2}$ , а остановка — при  $K_{1d} = 1,25 \left( \frac{\mu \gamma_0}{1-\nu} \right)^{1/2}$ . Квант энергии, необходимой для разрушения связи и излучаемой в виде импульса с учетом (2), равен  $U_p = 160 \gamma_0 \pi a^2$ . Величина этой энергии, как видно, зависит от свойств материала и размера развивающегося дефекта. Квант  $U_p$  для угля на микроуровне составляет  $10^{-13}—10^{-12}$  Дж. Развитие микропор сопровождается излучением энергии до  $10^{-7}$  Дж, макропор и трещин — до  $10^{-3}$  Дж. Именно такую энергию (от  $10^{-9}$  до  $10^{-5}$  Дж) имеют импульсы акустической эмиссии, длительность которых составляет  $10^{-8}—10^{-4}$  с и регистрируются они на частотах  $10—10^5$  кГц. Так как связи являются характеристикой материала, то при воздействии они реагируют только на характерные для каждой связи кванты энергии. Эти кванты являются оптимальными для материалов. При их несоответствии связям они должны быть многократно усилены для достижения разрушения. Следовательно, для каждого материала процесс воздействия должен быть регламентирован по длительности  $\tau = \frac{\pi l^2}{ac}$  (где  $l$  — размер разрушаемых связей;  $c$  — скорость распространения звука в материале;  $a$  — размер элементарной связи;  $l = na$ ;  $n$  — количество связей) по величине и периодичности воздействия. При этом каждому уровню разрушения соответствует определенный уровень энергетических превращений, но формируется он микроуровневыми преобразованиями: любой дефект можно привести в неустойчивое состояние путем накопления разрушенных связей до критического значения  $n = fl^2 a^{-2}$ , где  $f$  — коэффициент упаковки дефектов по площади элемента.

В горном массиве как активной системе величина энергии каждого содержащегося в нем структурного элемента характеризуется напряжениями  $\sigma_c = \sigma_0 + p$ , где  $\sigma_0$  — напряжения горного давления;  $p$  — составляющая напряжений, определяющихся технологическими воздействиями. Очевидно, что для разрушения структурного элемента необходимы технологические воздействия, обеспечивающие напряжения, характерные для конкретного материала:

$$p = 9 \sqrt{\frac{\pi \gamma_0 \mu}{n^3 a (1-\nu)}} - \sigma_0. \quad (3)$$

Выражение (3) показывает, что в напряженном горном массиве как активной среде энергетические преобразования при формировании предельного состояния могут происходить с выделением энергии в виде импульсного излучения при  $\sigma_0 < 9 \sqrt{\frac{\pi \gamma_0 \mu}{n^3 a (1-\nu)}}$  или с ее поглощением до достижения предельного состояния при  $\sigma_0 > 9 \sqrt{\frac{\pi \gamma_0 \mu}{n^3 a (1-\nu)}}$ . Но тогда справедлива гипотеза о том, что обработка материала квантами энергии с характеристиками, соответствующими нарушению связей на определенном уровне, приведет к его разрушению [5]. Кванты-импульсы с конкретными характеристиками взаимодействуют со структурными элементами материала, характеристики которых соответствуют характеристикам излучаемых импульсов. Такие представления позволяют оценить эти характеристики как для структурных элементов, так и для импульсов обработки. И хотя проведенный анализ не учитывает многие детали, идеализируя процесс, например, предполагая линейность динамических преобразований (воздействий) и простые виды деформирования, тем не менее это позволяет открыть новое направление развития динамической механики разрушения, которая объясняет природу преобразований в материалах, а также многие явления, происходящие в средах,

в частности измельчение горного массива до «бешеной муки» при выбросах угля, породы, газа и др. Например, при  $n = 1$ , т. е. для квантов-импульсов, получаем  $p = (1440 - \sigma_0)$  МПа, что свидетельствует о значительных концентрациях усилий, превышающих «теоретический» предел прочности материала, при малых уровнях энергий. Такая концентрация происходит за счет весьма малой длительности существования квантов-импульсов. Следовательно, в материале создаются условия существования «мощных» импульсов, которые, как правило, взаимодействуют с его структурой. А такой импульс приведет, взаимодействуя со структурой, к движению маленьких дефектов (разрушение единичных связей), так как их распределение по объему плотней. Импульс быстро утратит энергию, но разрушит среду, в которой он проходит. Длинный импульс равной энергии может вовсе не принести ущерба, так как его взаимодействие происходит в узком диапазоне частот. Учитывая, что в структурной среде распространение трещин сопровождается излучением высокочастотных волн, уносящих дополнительно часть полной энергии, стекающейся к краю трещин, при импульсном изменении напряженного состояния может возникнуть ситуация, когда сама среда будет излучать импульсы-кванты, способные нарушать связи в материале, с подпиткой излучений энергией. Эта ситуация кратковременная, но может возникнуть в области влияния возмущения и измельчить материал до мельчайших фракций на уровне элементарных связей.

Использование физических представлений о структуре горных пород и взаимодействии ее элементов, основанных на положениях механики разрушения, позволяет выяснить новые аспекты явления разрушения горных пород, а физическая «квантовая» теория разрушения с привлечением основ механики твердого тела — новые направления решения проблем геомеханики.

Таким образом, сделана попытка глубже раскрыть и дополнить выполненные разработки, направленные на совершенствование технологий ведения горных работ в подземных условиях, и сформировать принципиально новое направление научных исследований — использование малоэнергетических механических и физических воздействий для направленного изменения состояния горного массива.

Дальнейшее развитие исследований в этом направлении позволяет с принципиально иных позиций подойти к разработке новых методов прогноза и контроля состояния массива в процессе ведения горных работ и методов локального разрушения пород с использованием сил горного давления посредством активизации процессов разрушения при обработке ее малоэнергетическими импульсами-квантами с характерными для среды параметрами. Кроме того, предложенные аспекты позволяют заняться решением проблем, к которым в настоящее время применяются эмпирические зависимости, в частности проблемами акустического прогноза выбросоопасности и проблемами новых методов разрушения пород.

1. Потураев В. Н., Булат А. Ф., Виноградов В. В. Геомеханические аспекты управления состоянием горного массива вблизи выработок // Уголь Украины. — 1988. — № 5. — С. 5—7.

2. Зорин А. Н., Виноградов В. В., Булат А. Ф. Природа влияния слабых возмущений на состояние горного массива // Там же. — 1985. — № 1. — С. 15—16.

3. Виноградов В. В. Геомеханика управления состоянием массива вблизи горных выработок. — Киев: Наук. думка, 1989. — 192 с.

4. Булат А. Ф., Курносоев А. Т. Управление геомеханическими процессами при отработке угольных пластов. — Киев: Наук. думка, 1987. — 200 с.

5. Потураев В. Н., Булат А. Ф., Колесников А. Г. О механизме физических воздействий для локального направленного изменения состояния массива // Физ.-техн. пробл. разработки полезных ископаемых. — 1989. — № 5. — С. 86—91.

Ин-т геотехн. механики АН Украины,  
Днепропетровск

Получено 30.01.92