Доклады Академии наук СССР
1972. Том 204, № 3

УДК 539.371

ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ

Академик АН КиргССР С. Г. АВЕРШИН, В. Н. МОСИНЕЦ, Г. П. ЧЕРЕПАНОВ

О ПРИРОДЕ ГОРНОГО УДАРА В ВЫРАБОТКАХ

Горным ударом называют взрывообразное внезапное разрушение породы в окрестности выработки, происходящее без выделения газа; это одно из проявлений горного давления и тем опаснее, чем больше глубина горных работ и прочность породы. Горные удары наблюдаются при прохождении подготовительных выработок в их действующих забоях, еще более часты горные удары в целиках различного назначения, в забоях очистных выработок. В подготовительных выработках горные удары, с выбросом горной массы происходят в забоях, стенках выработок и в почве. В старых выработках, в старых целиках эти удары, как правило, весьма большой мощности. Часто горные удары не сопровождаются выбросом массы в выработки, а проявляются лишь в виде сейсмической волны, аналогичной землетрясению. Сила толчка способна в этих случаях травмировать, повредить оборудование и т. д. Достаточно полное представление о состоянии этой проблемы и ее связи с другими аспектами горного дела можно получить из работ ([1], [2]).

1. Механизм возникновения горного удара можно уяснить из следующей простейшей теоретической схемы ([3]). Пусть в горном массиве, который представим для простоты однородным и изотропным телом, проводится горизонтальная выработка высоты h (рис. 1). Считаем, что выработка имеет прямоугольную форму и находится в поле горного давления ($\sigma_1 = \varkappa\gamma H$ — боковое, $\sigma_2 = \gamma H$ — вертикальное); размеры выработки в плане существенно превышают h, при этом все процессы деформирования и разрушения будут рассматриваться в плоскости чертежа (плоская задача).

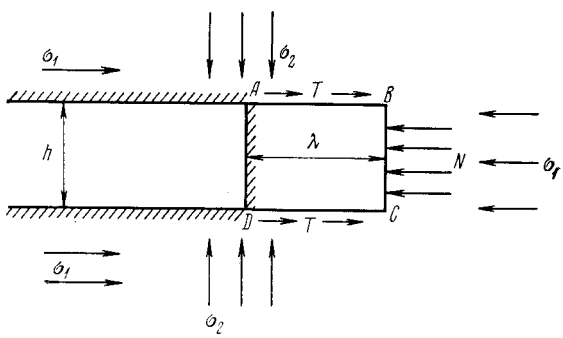

Рис. 1

Мысленно вырежем прямоугольную область $ABCD$ длины λ на продолжении выработки (рис. 1) и приложим к границам этой области AB, BC и CD нормальные и касательные нагрузки, равные соответствующим напряжениям в сплошном теле.

Рассмотрим равновесие этой области в зависимости от параметра λ. Единственное уравнение равновесия имеет вид

$$N(\lambda) = T(\lambda), \qquad (1,1)$$

где N и T — суммарные нормальная и касательная нагрузки, изображенные на рис. 1. Остальные нагрузки, не указанные на рис. 1, очевидно, не дают вклада в уравнение равновесия. Анализ поля упругих напряжений показывает, что функция $N(\lambda)$ качественно имеет вид, изображенный на рис. 2; на расстоянии λ^* примерно равном $(1—2)h$, имеется максимум $N(\lambda)$. Физический смысл $N(\lambda)$ — сила давления, вызывающая горный

удар; она равна

$$N(\lambda) = \beta(\lambda) h \gamma H. \tag{1,2}$$

Здесь β — безразмерный коэффициент концентрации напряжений, зависящий от формы выработки, а также от расположения и типа крепи (он определяется из решения соответствующей задачи теории упругости или опытным путем), γ — средний удельный вес горной породы, H — глубина заложения выработки.

Величина $T(\lambda)$ представляет суммарную силу сопротивления горному удару (разрушению), очевидно, она не может превосходить некоторой предельной величины $T_f(\lambda)$, характеризующей прочность породы. Функция $T_f(\lambda)$ монотонно возрастает с увеличением λ и имеет вид (рис. 2):

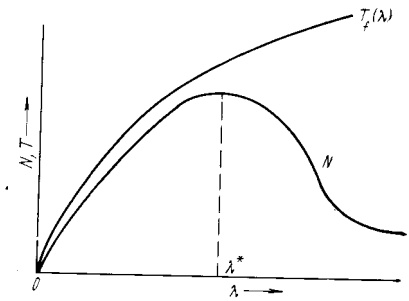

Рис. 2

$$T_f(\lambda) = \alpha(\lambda) \lambda \sigma_c. \tag{1,3}$$

Здесь α — беразмерная функция λ, зависящая также от формы выработки, σ_c — предел прочности на одноосное сжатие.

Из элементарных физических соображений $\alpha(\lambda)$ монотонно убывает от

$$\alpha = 1 \text{ при } \lambda = 0 \tag{1,4}$$

до

$$\alpha \sim {}^1/_2 \text{ при } \lambda \sim h. \tag{1,5}$$

Из указанного характера кривых очевидно, что явление горного удара объясняется первоначальным касанием кривых $N(\lambda)$ и $T_f(\lambda)$ не в начале координат, а при некотором $\lambda_* \neq 0$. Если бы равенство $N(\lambda) = T(\lambda)$ впервые достигалось при $\lambda_* = 0$, то проблемы горного удара не существовало бы, так как при $\lambda_* = 0$ происходило бы явление, аналогичное обрушению кровли. Управление процессом обрушения кровли не представляет трудностей вследствие его равномерности и маломощности.

Таким образом, необходимое условие возникновения горного удара можно записать как

$$N = \beta \gamma h H > T_f = \alpha \lambda \sigma_c \quad \text{при} \quad \lambda_* > 0. \tag{1,6}$$

Усложняющие факторы — неоднородность и неизотропность горной породы; естественная трещиноватость; неупругость деформационных свойств породы; различные формы выработки и крепи — значительно затрудняют количественное описание возникновения горного удара, но не влияют на указанную выше качественную картину. Условие (1,6) сохраняется и в последующих случаях, однако теперь уже β и α существенно зависят от указанных факторов.

Целесообразно отметить, что последний фактор (различные формы выработки и крепи) наиболее эффективно и единообразно учитываются в расчетах в том случае, когда выполняется условие тонкой структуры $L \gg h$, где L — характерный линейный размер выработки в плане. При этом сила, вызывающая горный удар, описывается единственным параметром поля напряжения в окрестности края выработки — ирвиновским коэффициентом интенсивности напряжений K_I, который определяется из решения соответствующей упругой задачи при $h = 0$. В этом случае условие возникновения горного удара ([4]) запишется так:

$$K_I > \delta \sigma_c \sqrt{h}. \tag{1,7}$$

Здесь δ зависит лишь от формы закругления забоя выработки и относительных характеристик прочности породы.

2. Динамика горного удара. В связи с особенностями роста трещин в сжатых телах ([5, 3]) горному удару всегда предшествует устойчивое квазистатическое развитие трещин, что используется для обнаружения угрозы горного удара регистрацией звуковых импульсов. Согласно имеющимся наблюдениям ([6]), для горных ударов в прочных породах наиболее характерной является частота звуковых импульсов: при числе «щелчков» меньше 20 в час. горного удара не бывает; при 30 звуковых импульсах и больше горный удар возможен, а при 80 импульсах в час горный удар неизбежен; примерно за час до наступления горного удара наступает тишина и звуковые импульсы полностью отсутствуют.

Динамика разрушения вслед за потерей устойчивости равновесия описывается в рамках общей теории самоподдерживающегося разрушения ([7]). Приведем вытекающие из нее полезные оценки максимальной скорости движения v отдельных частиц разрушающейся породы

$$v = \beta_{\max} gH / c, \tag{2,1}$$

и их средний линейный размер

$$r_0 \approx 3TE/(\beta^2_{\max}\gamma^2 H^2). \tag{2.2}$$

Здесь c — скорость распространения продольных волн, g — ускорение силы тяжести, β_{max} — наибольшее значение функции $\beta(\lambda)$, T — удельная поверхностная энергия, E — модуль Юнга.

3. Предупреждение и использование горных ударов при помощи энергии взрыва. Приведенный выше анализ механизма возникновения горных ударов наталкивает на мысль использования энергии взрыва в целях управления горным ударом. Возможны следующие принципиальные схемы.

а) Создание продольных полостей в плоскости выработки. Такие полости, как бы удлиняя выработку и выходя в очаг сжимающих напряжений, разгружают породу и смягчают горный удар, в пределе сводя его к разрушению типа обрушения кровли ([3]).

б) Создание поперечных полостей, перпендикулярных к направлению движения выработки, в области максимума силы $N(\lambda)$, вызывающей горный удар. Этот способ более эффективен по сравнению с предыдущим, так как, не изменяя предельной силы $T_f(\lambda)$ сопротивления разрушению, позволяет «срезать» максимум на кривой $N(\lambda)$ (см. рис. 2).

в) Взрывание достаточно мощных зарядов в области максимума $N(\lambda)$ (при $\lambda = \lambda_*$ или несколько глубже при $\lambda > \lambda_*$), так чтобы поднять пик кривой $N(\lambda)$ до предельной кривой T_f и тем самым вызвать горный удар ограниченной мощности, регулируя систему взрывания (взрывы в различных местах с задержкой воспламенения).

Еще более перспективной для проходки глубоких выработок представляется комбинация способов б) и в): почти одновременное создание поперечной полости на расстоянии $\sim 2\lambda_*$ и разрушение породы при помощи взрыва и горного удара на расстоянии λ_*.

Московский горный
институт

Поступило
23 III 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

[1] Добыча полезных ископаемых на больших глубинах, Тр. V Международн. горного конгресса, М., 1968, стр. 208. [2] С. Г. Авершин, Горные удары, М., 1955. [3] Г. П. Черепанов, ПММ, **30**, в. 1 (1966). [4] G. P. Cherepanov, Intern. J. Solids and Structures, **4** (1968). [5] E. Hoek, Z. T. Bieniawski, Intern. J. Fracture Mechanics, **1**, № 3 (1965). [6] *Исследование горного давления геофизическими методами*, «Наука», 1967. [7] Л. А. Галин, Г. П. Черепанов, ДАН, **167**, № 3 (1966).