

ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В КРОВЛЕ КАМЕР ПРИ НЕГИДРОСТАТИЧЕСКОМ НАЧАЛЬНОМ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ

Показано, що застосування потужних числових методів визначення напружено-деформованого стану гірських порід навколо підземних споруд дозволяє значно знизити трудомісткість досліджень оцінки тривкості та одночасно суттєво підвищити точність та надійність одержаних оцінок.

В работе [1] дана оценка устойчивости потолочин незакрепленных камер для гидростатического начального поля напряжений. В частности, рассмотрен случай, когда несущий слой породы превышает ширину выработки. При этом, как известно, если потолочина сложена из пород с малой прочностью, то можно ожидать разрушения кровли в виде свода обрушения. Такие своды образуются, даже если сцепление частиц породы близко к нулю (сыпучая среда). Вводится коэффициент запаса устойчивости $Z=R/Q$, где R – удерживающая сила на один погонный метр свода выработки, а Q – вес породы в пределах свода на один погонный метр выработки. Контур свода описывается параболой с общим выражением $x^2=2py$, удерживающая сила равна произведению длины дуги параболы $2l$ и прочности породы на растяжение R_p , т.е.

$$R = 2lR_p, \quad (1)$$

а вес породы на единицу свода длины выработки

$$Q = \frac{2}{3} Bh_1 \gamma, \quad (2)$$

где B – ширина камеры, h_1 – высота свода камеры, γ – удельный вес породы (на погонный метр). Очевидно, что, зная длину дуги $2l$, нетрудно определить коэффициент запаса Z . В работе [1] для него получено выражение

$$Z = \frac{3R_p}{4\gamma} \left(\frac{\sqrt{16h_1^2 + B^2}}{Bh_1} + \frac{B}{4h_1^2} \ln \frac{\sqrt{16h_1^2 + B^2} + 4h_1}{B} \right). \quad (3)$$

С учетом некоторой неопределенности параметров формулы отмечается, что кровля выработки будет заведомо устойчивой, если принять $Z \geq 3$.

Рассмотрим теперь случай негидростатического распределения напряжений на бесконечности с коэффициентом бокового расширения $\lambda = \nu/(1+\nu)$, где ν – коэффициент Пуассона горной породы. Таким образом,

$$\sigma_y^{(\infty)} = \lambda \sigma_x^{(\infty)}. \quad (4)$$

Если в книге [1] для определения величины Z были применены методы сопротивления материалов, то для решения данной задачи должны быть использованы методы теории упругости. Однако процедура нахождения точного ана-

литического решения может оказаться затруднительной. В самом деле, в горном массиве может оказаться целая система камер, разделенных целиками; даже в случае их периодического распределения возникает достаточно сложная система уравнений теории упругости с комбинированными граничными условиями на множестве поверхностей. Упрощение постановки путем перехода от пространственной задачи к плоской лишь немного улучшает ситуацию. В то же время существует целый ряд приближенных численных методов, позволяющих произвести решение с приемлемой точностью.

Однако, прежде всего, следует переформулировать выражение для коэффициента запаса устойчивости Z с целью учета негидростатичности напряженного состояния. Для этого, вместо (3), получим выражение для данного коэффициента на основании формул (1) и (2). Пусть $\psi = R_t/R_c$ есть величина отношения предела прочности горной породы на растяжение к пределу прочности на сжатие (как правило, для большинства пород имеем $\psi = 0.1 \dots 0.3$). Тогда нетрудно получить

$$Z = \frac{R_c}{Bh_1\gamma/3\psi l}. \quad (5)$$

Величину, стоящую в знаменателе и имеющую смысл усилия, приходящегося на погонный метр свода камеры, в рамках плоской задачи можно рассматривать как некоторое приведенное напряжение σ_{ed} , действующее в окрестности свода камеры. Остается выбрать подходящее выражение для указанного приведенного напряжения.

В работах [1-2] описан критерий прочности для горных пород, получаемый из общей функциональной зависимости, в которую входят первый и второй инварианты тензора напряжений, т.е. среднее напряжение и интенсивность напряжений (теория прочности П.П.Баладина [3]). В этом случае следует принять

$$Z = \frac{R_c}{\sigma_{eq}}, \quad (6)$$

$$\sigma_{eq} = \frac{-(1-\psi)(\sigma_1 + \sigma_3) + \sqrt{(1-\psi)^2(\sigma_1 + \sigma_3)^2 + 4\psi(\sigma_1 - \sigma_3)^2}}{2\psi}. \quad (7)$$

Здесь σ_1, σ_3 – главные напряжения, определяемые по формулам теории упругости. При известном напряженном состоянии нетрудно получить картину распределения коэффициента запаса устойчивости в горном массиве и, соответственно, оценить прочность свода камеры (т.е. найти линию обрушения свода).

Приближенную зависимость Z от коэффициента бокового расширения λ можно найти, если положить, что в горном массиве при негидростатическом напряженном состоянии на бесконечности $\sigma_3 = \lambda\sigma_1 + O(|\sigma_1 - \sigma_3|)$. Это означает, что максимальное касательное напряжение $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$ является малой величиной, а между максимальной и минимальной компонентами главных напряжений со-

храняется пропорциональная зависимость, аналогичная (4), с точностью до малых порядка τ . Тогда, принимая $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_3 \approx \lambda\sigma$, из (7) находим

$$\sigma_{eq} = \left[-(1-\psi)\sigma + \sqrt{(1-\psi)^2\sigma^2 + 4\sigma^2(1-\lambda)^2/(1+\lambda)^2 + \Delta} \right] (1+\lambda)/2\psi. \quad (8)$$

Здесь Δ – некоторая поправка, учитывающая неоднородность напряженного состояния в массиве. Таким образом, при указанных условиях σ_{eq} приблизительно пропорционально $1+\lambda$. Следовательно, коэффициент запаса устойчивости Z (6) обратно пропорционален этой величине.

Для решения задачи использован метод конечных элементов (МКЭ). Он заключается в том, что тело разбивается на множество элементов (линейных или нелинейных), на границах которых расположены узлы. Система дифференциальных уравнений теории упругости при этом может быть сведена к системе алгебраических уравнений относительно значений перемещений в узлах. Эта система имеет ленточную форму, т.е. является разреженной и, таким образом, занимает значительно меньше места в памяти компьютера. В этом состоит преимущество МКЭ перед другими численными методами решения дифференциальных уравнений в частных производных (например, методом конечных разностей). По известному полю перемещений путем использования соответствующих процедур численного дифференцирования можно найти поле деформаций, и на основании соотношений связи – поле напряжений. МКЭ в достаточной степени апробирован и является основой десятков (если не сотен) широко известных программных продуктов, предназначенных для решения самых различных задач механики континуума.

Задача об устойчивости кровли камер решалась в плоской постановке. Была рассмотрена система из трех камер одинаковых размеров, находящихся на расстоянии $a=B$ друг от друга по горизонтали, где ширина камер B принята равной 16 м. Высота камер составляет $H=2B$. Материал (горная порода) – глинистый известняк (объемный вес $\gamma=0.27 \cdot 10^{-5}$ кГс/мм³, модуль Юнга $E=6500$ кГс/мм², прочность на сжатие $R_c=1.404$ кГс/мм²). Высота наносов принята $h=80$ м, что соответствует вертикальной нагрузке $q \approx 0.3$ кГс/мм². Коэффициент Пуассона ν определяется по заданному λ в соответствии с приведенной выше зависимостью. Были просчитаны случаи для $\lambda=0.2, 0.25, 0.3, 0.35, 0.4$ и 1.0 при $\psi=R_t/R_c=0.1, 0.2$ и 0.3 . В качестве примера на рис. 1 и 2 показано распределение параметра $k=1/Z=\sigma_{eq}/R_c$ (нормализованного эффективного напряжения) в окрестности камер для $\lambda=0.2$ и $\lambda=1.0$ соответственно и при $\psi=0.1$. Цветовая шкала сбоку показывает уровень нормализованных напряжений (т.е. приведенных напряжений, отнесенных к пределу прочности при сжатии).

Как видно из рис. 1, зоны распределения эффективных (приведенных) напряжений различных уровней над камерами действительно имеют форму, близкую к параболической. Выбрав из каких-то соображений значение Z (и, следовательно $k=1/Z$), можно определить кривую, по которой, предположительно,

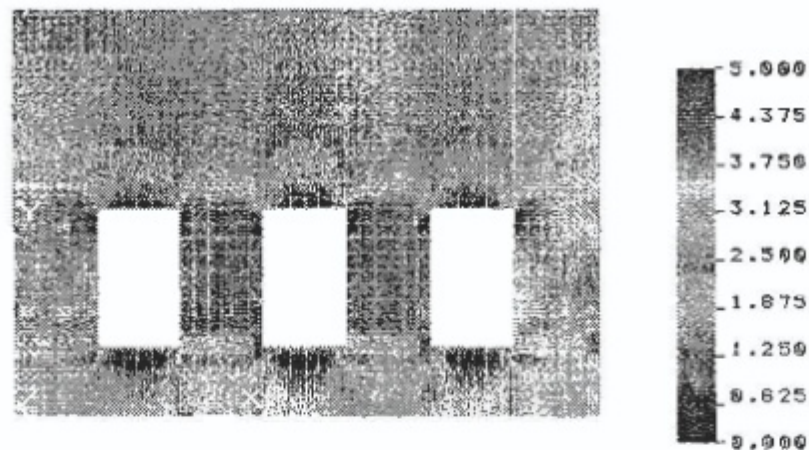


Рис. 1—Поле распределения эффективного напряжения при $\lambda = 0.2$.

будет происходить обрушение свода. Отметим здесь, что аналогичная картина наблюдается и при других относительно низких значениях λ (вплоть до $\lambda=0.4$). При этом ширина зон совпадает с шириной камер.

При $\lambda=1.0$ (гидростатическом давлении) картина распределения напряжений приобретает иной характер. Границы зон изменяются по более сложному закону. Все же над камерами остается небольшая область, где возможно обрушение, но ее ширина значительно меньше ширины камеры (рис.2).

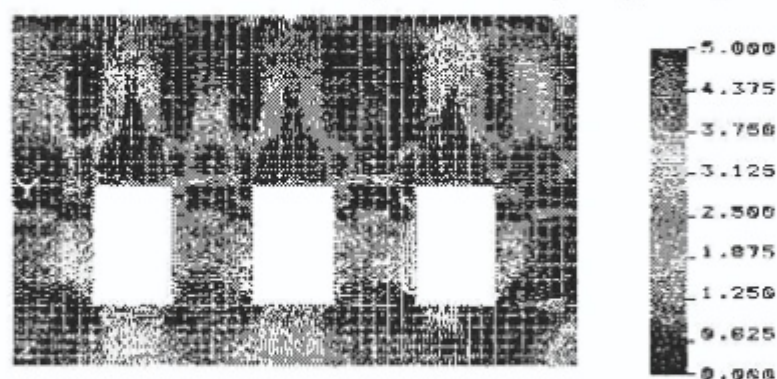


Рис.2.—Поле распределения эффективного напряжения при $\lambda = 1.0$.

Очевидно, что действительная картина распределения приведенных напряжений является весьма сложной и существенным образом зависит от степени негидростатичности напряженного состояния.

Построим теперь зависимость нормализованного приведенного напряжения k от параметра λ . В разных точках тела эта зависимость будет выглядеть по-разному вследствие неоднородности напряженно-деформированного состояния. Например, в узле, расположенном на линии, проходящей через середину средней камеры с ординатой $y=66.08$ м, эти зависимости представлены на рис.3 тремя кривыми. Верхняя кривая соответствует случаю $\psi=0.1$, средняя — $\psi=0.2$, нижняя — $\psi=0.3$. Как видно из рисунка, все три кривые близки к прямым (особенно при достаточно больших значениях коэффициента пропорциональности), и растут с увеличением λ , что подтверждает полученный ранее приближенный результат (8) о характере изменения приведенного напряжения. Разумеется, не для всех точек тела это справедливо. Там, где максимальное касательное на-

пряжение не мало и главные напряжения не сохраняют пропорциональность друг другу, зависимости $k(\lambda)$ имеют значительно более сложный характер. Важно, однако, что при решении с использованием МКЭ всегда можно с достаточной для практических целей точностью рассчитать напряженно-деформированное состояние, а затем, в соответствии с критерием (6), определить интересующие нас опасные зоны (в данном случае – зоны обрушения свода камеры).

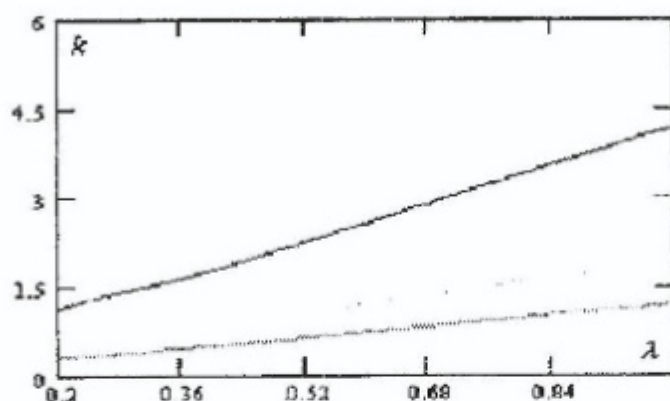


Рис. 3—Изменение нормализованного приведенного напряжения.

Таким образом, в настоящей работе показано, что применение мощных численных методов определение напряженно-деформированного состояния горных пород в окрестности подземных сооружений (в частности, камер) позволяет, с одной стороны, значительно снизить трудоемкость исследований по оценке несущей способности и, с другой стороны, одновременно существенно повысить точность и надежность полученных оценок. Применительно к поставленной выше задаче результаты численного решения дают основание утверждать, что степень негидростатичности исходного напряженного состояния весьма значительно отражается на прочностных свойствах свода камеры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Н. Шашенко, Н.С. Сургай, Л.Я. Парчевский. Методы теории вероятности в геомеханике. – К.: Техніка, 1994. – 216 с.
2. В.П. Пустовойтенко. Геотехнічне забезпечення підземного будівництва в Україні. – К.: Наукова думка, 1999. – 264 с.
3. П.П. Баландин. К вопросу о гипотезе прочности. // Вестник инженеров и техников. – 1937. – № 1. – С. 122-127.

УДК 622.831.322

Е.В. Гладкая, В.Н. Ревва,
Н.А. Рязанцева, Н.А. Рязанцев

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СПОСОБА ПРОГНОЗА ВЫБРОСООПАСНОСТИ ГОРНЫХ ПОРОД ПО ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТНОЙ ЭНЕРГИИ СТРУКТУРНО-ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ

Обґрунтовано спосіб прогнозу викиднебезпечності гірничих порід за ефективною поверхневою енергією з урахуванням структурно-фазових переходів і наведено результати його застосування на шахті ім. А.Г. Стаханова.

Прогноз выбросоопасности горных пород по их эффективной поверхностной энергии, созданный в ОФТГП ДонФТИ НАНУ, является одним из норма-