



ИСХОДНОЕ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ И РАСЧЕТ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД

В. Е. Миренков

*Институт горного дела им. Н. А. Чинакля СО РАН, E-mail: mirenikov@misd.ru,
Красный проспект 54, г. Новосибирск 630091, Россия*

Показано, что практически модели нетронутого массива нет, есть только первое приближение в одномерной трактовке, т. е. все сводится к экспериментальному определению главных напряжений в точке будущей выработки. Рассмотрен вариант дневной поверхности массива с выемкой, влияющей на исходное поле напряжений. Данные результаты существенны при переходе от открытой добычи к подземной, при рассмотрении только корректных проблем, возникающих при формулировке задач и являющихся теоретической основой любого расчета.

Порода, массив, точка, дневная поверхность, выемка, анализ, главные напряжения

NATURAL STRESS FIELD IN ROCK MASS AND DEFORMATION ANALYSIS

V. E. Mirenikov

*Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
E-mail: mirenikov@misd.ru, Krasny pr. 54, Novosibirsk 630091, Russia*

It is shown that there is no such a model as intact rock mass, there is only a first one-dimensional approximation, i.e. experimental determination of principal stresses at the point of a future underground excavation. The case of ground surface above rock mass with an underground excavation affecting natural stresses is considered. In transition from open-pit to underground mining, the obtained results are essential when considering only correct problems which are the theoretical background for any calculation.

Rock, rock mass, point, ground surface, excavation, analysis, principal stresses

Большой интерес представляют технологии перехода от открытой к подземной отработке полезных ископаемых, когда на дневной поверхности образована выемка. При этом согласно классическому описанию напряженного состояния горных пород необходимо определить дневную поверхность, от которой ведется отсчет вертикальных и горизонтальных напряжений.

Если дневная поверхность содержит выемку в виде оврага естественного или техногенного происхождения, то монотонность изменения главных напряжений меняется. Действительно, проведем две вертикальные линии касательные к контуру выемки, тогда для любой точки массива пород, лежащей между этими параллельными линиями напряжения будут определяться расстоянием до дневной поверхности (выемки) и весом пород. Это означает, что под выемкой напряжения отличаются от напряжений вне этих параллельных и будут меньше. Величина отличия зависит от глубины выемки.

Проведение выработок под выемкой и расчет требуют учета переменного напряжения в этой окрестности.

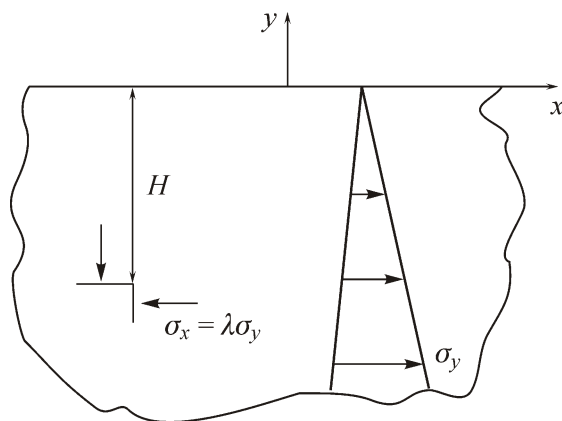


Рис. 1. Схема напряжений в нетронутом массиве пород.

Дневная поверхность с выемкой. Поле напряжений нетронутого массива пород определяется заданием вертикальных и горизонтальных напряжений в произвольной точке в виде

$$\sigma_y = -\gamma(H - y), \quad \sigma_x = -\lambda\gamma(H - y), \quad (1)$$

где H — расстояние от дневной поверхности до рассматриваемой точки; γ — удельный вес пород; λ — боковой распор (рис. 1).

Величина σ_y из (1) возникает за счет гравитации, а σ_x не связана напрямую с гравитацией и есть следствие σ_y . Предполагается, что смещения, вызванные (1) в нетронутом массиве пород, прошли, т. е. (1) и деформирование никаким образом не связаны. Классический подход к определению деформирования в ослабленном массиве пород сводится к формулировке нулевых граничных условий на контуре выработки и сжимающих напряжений на бесконечности [1–4], который обсуждался в работе [5]. Определение главных напряжений — самостоятельная задача, которая решается с использованием технических средств [6] и конкретизирует (1).

На контуре будущей выработки запишем главные сжимающие напряжения:

$$\sigma_y = -\gamma H, \quad \sigma_x = -\lambda\gamma H,$$

которые позволяют удалить породы (сделать выработку). От такой замены ничего не изменилось в окрестности выработки и возникает проблема убрать эти напряжения. Теория предлагает для данного контура выработки в другой плоскости (пространстве) решить дополнительную задачу с растягивающими граничными условиями:

$$\sigma_y = \gamma H, \quad \sigma_x = \lambda\gamma H.$$

Такое решение существует, единственно и корректно. Сложив эти два решения, получим на контуре $\sigma_x = \sigma_y = 0$. Натурные замеры главных напряжений, фигурирующих в (1) при $y = 0$, выносятся как сжимающие напряжения на бесконечность и увеличивают класс некорректных решений. Исходное поле напряжений (рис. 2) переменное, так как начало отсчета на дневной поверхности возрастает согласно гравитации при удалении по вертикали от нее. На горизонтальной линии 0–0 (рис. 2) приведена эпюра σ_y , которая существенно меньше под выемкой. Эпюра $\sigma_x = \lambda\sigma_y$ не приведена, чтобы не затемнять рисунок. Если проводить выработку на линии 0–0, то под выемкой граничные условия дополнительной задачи будут меньше, чем вне ее и легко определяемы. Наличие выемки уже обеспечило деформирование пород в момент ее образования. Математическая модель расчета этих деформаций позволяет сформулировать проблему предполагая, что выемки нет, но ее будут делать, поэтому необходимо определить какие произойдут изменения. Напряжения σ_x на выемке уравнивают σ_x из (1), а σ_y —

вес пород, заполняющих выемку. Оставим σ_x на Γ и уберем породу, теперь σ_y равно нулю, так как вес породы убрали. Расчет деформированного состояния сводится к дополнительной задаче с граничными условиями

$$\sigma_x = -\lambda\gamma(H - y), \quad \sigma_y = 0. \quad (2)$$

Проблема расчета деформирования пород рассматривается с позиций теории упругости.

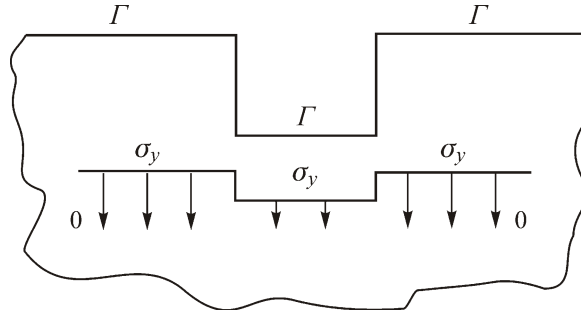


Рис. 2. Дневная поверхность Γ в виде ломаной линии

Исходное напряженное состояние в массиве с выемкой. В безразмерном виде полуплоскость с выемкой в виде треугольника, ограниченная ломаной Γ (дневной поверхностью) представлена на рис. 3.

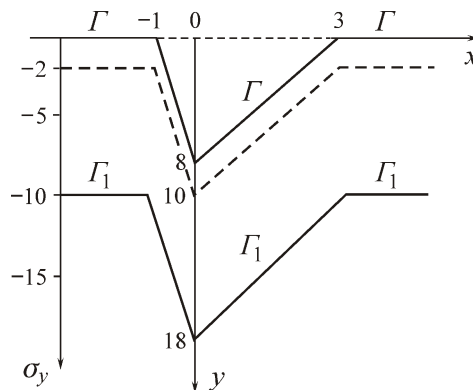


Рис. 3. Исходное поле напряжений в массиве с выемкой

Напряжения на дневной поверхности по определению равны нулю, т. е. $\sigma_x = 0$, $\sigma_y = 0$ и Γ — изолиния нулевых напряжений. Определим, как пойдет изолиния $\sigma_y = -10$ в массиве пород с выемкой. На удалении от выемки находим значение $\sigma_y = -10$ и из этой точки параллельно Γ проводим линию до пересечения с вертикальной касательной к выемке из точки $x = -1$. Из точки их пересечения параллельно меньшей боковой грани выемки проводим прямую до пересечения с осью y . Из точки $y = 18$ параллельно второй боковой грани выемки проводим прямую до пересечения с вертикальной касательной из точки $x = 3$. Из последней точки параллельно оси x проводим горизонтальную линию. Обозначим полученную ломаную линию Γ_1 . Очевидно, что изолиния Γ_1 представляет изолинию Γ , опущенную на 10 единиц по оси y . В любой точке изолинии Γ_1 вертикальные напряжения $\sigma_y = -10$, а горизонтальные $\sigma_x = -10\lambda$. Аналогично для любого значения $y \geq 8$ можно провести свою изолинию, что и определит напряжения σ_y и σ_x , используемые для формулировки граничных условий, если здесь делать ослабление массива. Для определения напряжений в точке массива пород $x = 0$, $y = 10$ проходим путь по пунктирной линии и получаем

$$\sigma_y = -2, \quad \sigma_x = -2\lambda. \quad (3)$$

Восстановленное исходное поле напряжений под выемкой в массиве пород использовало формальное определение главных напряжений в точке на глубине H в виде $\sigma_y = -\gamma H$, $\sigma_x = -\lambda\gamma H$. Модель (1) не конкретизирует боковой распор, т. е. не определяет физический смысл λ . Наличие выемки еще больше усложняет ситуацию. Натурные замеры главных напряжений под выемкой определяют величину λ , а замеры в этом же слое в удалении от выемки свое λ .

Переход от открытой разработки к подземной требует расчета напряженно-деформированного состояния согласно (2). Доработка месторождения подземным способом и необходимость проведения выработки ниже выемки граничные условия формулируются согласно (3). Дополнительное решение для массива пород с выемкой и выработкой получается после задания граничных условий на выемке (2), а на выработке — с учетом (3).

Таким образом, в любом случае напряженно-деформированное состояние определяется полем напряжений нетронутого массива пород последовательно:

1) поле напряжений на момент прекращения открытой добычи (поле нетронутого массива принимается в виде (1), дополнительное решение для контура будущей выемки);

2) поле нетронутого массива на момент прекращения открытой добычи для дневной поверхности в виде Γ (рис. 3);

3) поле напряжений на момент образования выработки под дневной поверхностью с граничными условиями в виде (2) на Γ и в виде (3) на контуре отверстия с центром, например, в точке $x = 0, y = 10$ (рис. 3).

Взаимовлияющие выработки. В произвольной точке на глубине H_0 величины главных напряжений находятся в результате натурального эксперимента

$$\sigma_y = -\gamma H_0, \quad \sigma_x = -\lambda\gamma H_0. \quad (4)$$

Для корректной формулировки задачи будущего ослабления необходимы только значения (4), позволяющие сформулировать дополнительную задачу. Все другие использования (1) некорректны и может создаться впечатление, что модель не несет никакой нагрузки. На самом деле модель (1) вводит понятие дневной поверхности, правило отсчета величины (4), последовательность формулировки дополнительной задачи. Если выработка существует, то дополнительная задача решает вопрос о расчете напряжений и смещений, через которые можно установить вид деформирования, прочность, устойчивость и т. п. данной конструкции. Вторая выработка требует определения поля напряжений массива с первой и последующей формулировкой дополнительной задачи. Теперь имеем возможность перейти к дополнительной задаче, но для этого нужно убрать породу из выработки. Порода создает давление за счет веса, и если убрать ее, то вертикальная составляющая прироста давления σ_y при движении от кровли к почве равна нулю (гравитация). Растягивающие граничные условия дополнительной задачи на выработке определяют в итоге деформирование в ее окрестности. Деформирование прошло, на этой поверхности напряжения $\sigma_y = \sigma_x = 0$ и можно рассматривать для массива с выработкой новое исходное поле. Если возникла необходимость проведения второй выработки в окрестности первой, чтобы рассмотреть процесс взаимовлияния этих объектов, необходимо решать дополнительную задачу. Считается, что на контуре первой выработки полные напряжения σ_y и σ_x равны нулю и учет их взаимовлияния примем в виде: на контуре первой выработки полные напряжения $\sigma_y = 0, \sigma_x = 0$, на второй полные напряжения σ_y, σ_x определяются из главных напряжений в центре выработки. Концепция исходного поля напряжений (1) не имеет памяти и снова массив нагружается от нуля.

ВЫВОДЫ

Впервые доказано, что на выемке в массиве пород, выходящей на свободную поверхность, для расчета напряженно-деформированного состояния в ее окрестности необходимо формулировать дополнительную задачу, полагая вертикальные напряжения на контуре равными нулю. Доказано, что расчет деформирования в окрестности любого ослабления осуществляется только через дополнительную задачу, обеспечивающую существование, единственность и корректность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. **Suknev S. V.** Brittle and quasi-brittle fracture of geomaterials with circular hole in nonuniform compression, *Journal of Mining Science*, 2020, vol. 56, no. 2, pp. 174–183. [**Сукнев С. В.** Хрупкое и квазихрупкое разрушение геоматериалов с круговым отверстием при неравнокомпонентном сжатии // ФТПРПИ.— 2020. — № 2. — С. 19–30.]
2. **Lotidis M. A., Nomikos P. P., Sofianos A. I.** Laboratory study of the fracturing process in marble and plaster hollow plates subjected to uniaxial compression by combined acoustic emission and digital image correlation techniques, *Rock Mech. and Rock Eng.*, 2020, vol. 53, no. 4, pp. 1953–1971.
3. **Mirsalimov V. M.** Maximum strength of opening in crack-weakened rock mass, *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, no. 1, pp. 9–17. [**Мирсалимов В. М.** Максимальная прочность выработки в горном массиве, ослабленном трещиной // ФТПРПИ. — 2019. — № 1. — С. 12–21.]
4. **Zhuravlev A. B., Ustinov K. B.** Characteristic values of elastic anisotropy in transversely isotropic rocks. Role of shearing modulus, *Journal of Russian Academy of Sciences, Mechanics of Solids*, 2019, no. 4, pp. 129–140. [**Журавлев А. Б., Устинов К. Б.** О величинах, характеризующих степень упругой анизотропии трансверсально изотропных горных пород; Роль сдвигового модуля // Известия РАН. МТТ. — 2019. — № 4. — С. 129–140.]
5. **Mirenkov V. E.** Ill-posed problems of geomechanics, *Journal of Mining Science*, 2018, vol. 54, no. 3, pp. 361–367. [**Миренков В. Е.** О некорректных задачах геомеханики // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 3–10.]
6. **Kurlenya M. V., Baryshnikov V. D., Baryshnikov D. V., Gakhova L. N., and Kachalsky V. G., Khmelinin A. P.** Development and improvement of borehole methods for estimating and monitoring stress–strain behavior of engineering facilities in mines, *Journal of Mining Science*, 2019, vol. 55, no. 4, pp. 682–694. [**Курленя М. В., Барышников В. Д., Барышников Д. В. и др.** Разработка и совершенствование скважинных методов оценки и контроля напряженно-деформированного состояния инженерных горных сооружений // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 182–195.]