

УДК 539.3

**ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ
НА БОЛЬШОЙ ГЛУБИНЕ**

В. Е. Миренков

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

Обсуждается изменение исходного поля напряжений в массиве горных пород с глубиной. Породы предполагаются упругими. Увеличение уровня напряжений приводит к росту главных касательных напряжений, который, однако, не вызывает разрушение пород. Утверждается, что это возможно только при увеличении значений коэффициентов боковых расporов. Данный процесс приводит к гидростатическому распределению напряжений на большой глубине. Показано, что для изотропного массива коэффициент Пуассона стремится к $1/2$.

Массив горных пород, глубина, напряжения, выработка, разрушение

DOI: 10.15372/FTPRPI20210303

Развитие технологии добычи полезных ископаемых с глубиной требует знания поведения горных пород при больших давлениях, а также исследования их физических свойств, технологических и прочностных характеристик. Сложность строения массива пород и большие давления затрудняют создание математического аппарата для описания происходящих на больших глубинах процессов деформирования пород при их нагрузке и разгрузке, вызванных проходкой выработок. С удалением от контура выработки происходит переход от нулевых напряжений к значениям, бывшим в массиве до ее проходки; необходимо знать параметры такого перехода, т. е. толщину переходного слоя. В этих условиях натурный эксперимент и формулировка обратных задач позволят установить параметры перехода к большим глубинам. Любой расчет деформирования начинается с экспериментального определения главных напряжений на глубине H , что обеспечит идентификацию параметров, характеризующих механические свойства массива.

На больших глубинах условия для возникновения критических ситуаций при ведении очистных работ уже сформировались. Необходимо установить, в каком месте и в какой момент они будут реализованы. После такого прогноза выбираются технологические решения для предотвращения аварийной ситуации. Теоретически для этого необходимо из расчета напряжений и смещений определить места, где массив приобретает податливость путем проскальзывания по линиям скольжения. Деформирование массива по линиям скольжения вызывает вес пород (согласно общей теории учета собственного веса пород [1]), повышение температуры и другие эффекты.

Стандартные методы расчета деформирования пород около ослаблений, когда исходное поле напряжений в точке массива пород задавалось произвольно, неприменимы для больших глубин. Необходимы натурные исследования главных напряжений в массиве пород с определением их численных значений и направлений в пространстве. При переходе работ на большие глубины значения главных напряжений характеризуют коэффициенты бокового распора. С увеличением глубины возможно изменение модуля Юнга, коэффициента Пуассона и удельного веса пород. Без знания данных параметров проводимые расчеты напряженно-деформированного состояния будут далеки от реальности и не обеспечат безопасность горных работ.

Важное значение при математическом моделировании напряженно-деформированного состояния массива на больших глубинах имеет согласованность между способами задания геометрии расчетной области и методами математического решения задачи. Все достоинство тонких методов задания геометрии будет сведено на нет, если не формулировать корректно граничные условия [2–6]. К настоящему времени в научном сообществе сформировалось понимание этой проблемы и намечены пути ее решения [7–10]. Один из них — отказ от численных методов, приводящих к некорректным решениям, и использование только тех методов, которые приводят к строго обоснованным решениям.

ИСХОДНОЕ МЕХАНИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ МАССИВА ГОРНЫХ ПОРОД

В механике горных пород, как правило, принимается, что напряжения в рассматриваемой точке на глубине H от дневной поверхности равны

$$\sigma_z = \gamma(H - z), \quad \sigma_x = \lambda_1 \gamma(H - z), \quad \sigma_y = \lambda_2 \gamma(H - z), \quad (1)$$

где γ — удельный вес пород; H — расстояние до дневной поверхности; λ_1, λ_2 — коэффициенты боковых распоров в направлении осей x и y .

Главные напряжения (1) подчиняются условию $\sigma_z \geq \sigma_x \geq \sigma_y$. Для определенности примем, что $\lambda_1 \geq \lambda_2$. Оси x, y, z показаны на рис. 1.

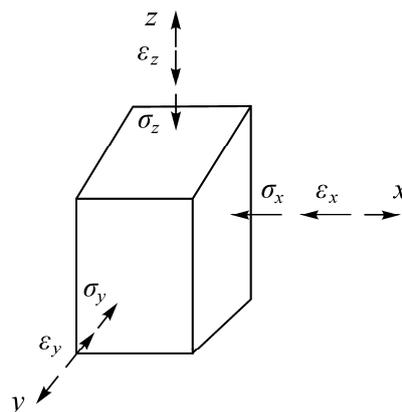


Рис. 1. Главные напряжения и деформации в массиве пород

Причиной возрастания напряжений (1) с удалением от дневной поверхности является собственный вес пород. Увеличение σ_z вызывает рост сжатия нижележащего пласта пород. Выдавливание пласта идет в сторону наиболее слабого сопротивления нагружению, увеличивая его, т. е. с увеличением глубины λ_2 возрастает и стремится к λ_1 . Дальнейший рост H приво-

дит к выдавливанию материала пород в горизонтальном направлении, увеличивая значения $\lambda_1 = \lambda_2$ до единицы (массив становится несжимаемым). Натурный эксперимент по определению напряжений $\sigma_z \geq \sigma_x \geq \sigma_y$ позволяет установить глубину H_0 , при которой $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$.

Из обобщенного закона Гука

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= \frac{1}{E}[\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)], \\ \varepsilon_x &= \frac{1}{E}[\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E}[\sigma_y - \nu(\sigma_z + \sigma_x)].\end{aligned}\quad (2)$$

Разрешая (2) относительно напряжений, имеем:

$$\begin{aligned}\sigma_z &= \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu\varepsilon_z, \\ \sigma_x &= \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu\varepsilon_x, \\ \sigma_y &= \lambda(\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z) + 2\mu\varepsilon_y,\end{aligned}\quad (3)$$

где

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)},$$

E — модуль Юнга; ν — коэффициент Пуассона; $\varepsilon_z, \varepsilon_x, \varepsilon_y$ — главные деформации.

Выделим мысленно из массива пород на глубине H от дневной поверхности кубический элемент и приложим к его граням сжимающие напряжения согласно (1), а к граням отверстия такие же сжимающие напряжения, т. е. массив, как и был, останется в равновесии (см. рис. 1).

Подставив (1) в (2) для исходного напряженного состояния, получим:

$$\begin{aligned}\varepsilon_z &= \frac{\gamma H}{E}[1 - \nu(\lambda_1 + \lambda_2)], \\ \varepsilon_x &= \frac{\gamma H}{E}[\lambda_1 - \nu(\lambda_2 + 1)], \\ \varepsilon_y &= \frac{\gamma H}{E}[\lambda_2 - \nu(\lambda_1 + 1)].\end{aligned}\quad (4)$$

Главные касательные напряжения в выделенном элементе (рис. 1):

$$\tau_{zy} = \frac{\sigma_z - \sigma_y}{2}, \quad \tau_{xz} = \frac{\sigma_x - \sigma_z}{2}, \quad \tau_{xy} = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}.$$

Значение τ_{zy} является наибольшим касательным напряжением, если $\sigma_z \geq \sigma_x \geq \sigma_y$. С ростом γH касательные напряжения τ_{zy} увеличиваются быстрее всех. На некоторой глубине они достигают предельных значений, и должен произойти сдвиг. Однако в массиве пород на больших глубинах сдвигов не наблюдается. Такая ситуация возможна, если произойдет изменение в значениях коэффициентов боковых распоров. Рост глубины приводит к увеличению λ_2 , т. е. уменьшению максимального касательного напряжения. Эти изменения будут продолжаться с ростом H до тех пор, пока коэффициенты боковых распоров не сравняются

и станут равными единице. После этого $\tau_{zy} = \tau_{zx} = \tau_{yx} = 0$. Таким образом, в массиве пород используются все возможности перестроения главных напряжений переходом к гидростатике. Дальнейшее увеличение главных напряжений без видимых разрушений возможно только при условии нулевого прироста деформаций.

Для определения ν , λ_1 , λ_2 , полагая $\varepsilon_z = \varepsilon_x = \varepsilon_y = 0$, из (4) имеем три уравнения:

$$\begin{aligned} 1 - \nu(\lambda_1 + \lambda_2) &= 0, \\ \lambda_1 - \nu(\lambda_2 + 1) &= 0, \\ \lambda_2 - \nu(\lambda_1 + 1) &= 0. \end{aligned} \tag{5}$$

Основные ограничения на решение системы (5) — это неравенства:

$$0 \leq \nu \leq 0.5, \quad \lambda_1 \leq 1, \quad \lambda_2 \leq 1. \tag{6}$$

Любые эксперименты по определению λ_1 , λ_2 и ν , удовлетворяющие (5) и (6), являются решением (5). Перепишем систему (5):

$$\nu = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2}, \quad \nu = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 + 1}, \quad \nu = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + 1}. \tag{7}$$

Тогда из второго и третьего следует равенство

$$\lambda_1^2 + \lambda_1 = \lambda_2^2 + \lambda_2,$$

решение которого существует, если $\lambda_1 = \lambda_2$. Этот результат был получен логическим анализом раньше. Учитывая последний результат, первое и второе уравнения (7) дают

$$\nu = \frac{1}{2\lambda_1}, \quad \nu = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + 1}. \tag{8}$$

Приравнивая данные соотношения, запишем уравнение

$$2\lambda_1^2 - \lambda_1 - 1 = 0,$$

при решении которого получим два корня $\lambda_1 = 1$ и $\lambda_1 = -0.5$. Физический смысл имеет значение $\lambda_1 = \lambda_2 = 1$. Подставив $\lambda_1 = 1$ в (8), определим коэффициент Пуассона $\nu = 0.5$. Проверить принятое предположение (5) можно только экспериментом, натурными замерами значений главных напряжений на больших глубинах. Все эксперименты, где прослеживается тенденция к установлению зависимости между коэффициентом Пуассона и боковыми распорами, получаемыми в пределе, являются подтверждением правильности предположения. Верно и обратное, если из экспериментов определяются значения коэффициентов боковых распоров приблизительно равными и близкими к 0.8–0.9, то можно считать, что $H = H_0$, и имеет место переход к большим глубинам.

Таким образом, предположение об упругом массиве пород для глубоких горизонтов справедливо, если коэффициент Пуассона не превышает 0.5, при этом коэффициенты боковых распоров близки и равны единице. При различных коэффициентах бокового распора необходимо применять другие модели массива или уточнять экспериментальные значения главных напряжений.

Упругие характеристики горных пород зависят от напряжений в нетронутом массиве, причем для достаточно больших глубин изменение удельного веса, модуля Юнга и коэффициента Пуассона может быть значительным. Проведение выработки существенно влияет на состояние пород, которое не дает объективной информации при визуальном обследовании состояния свободной поверхности выработки. Как результат сложного напряженного состояния в массиве на контуре выработки возникают различные виды разрушения (высыпание, расслоение, стреляние и др.). Одновременность проявления разных разрушений пород, образующих массив, говорит о величинах исходных напряжений, превосходящих предельные значения. Известны случаи, когда в массиве пород на больших глубинах возникают варианты больших главных напряжений σ в горизонтальном направлении [2]. С точки зрения теории упругости (4), (5) это не имеет существенного значения, а напряженное состояние просто стремится к гидростатике.

ДЕФОРМИРОВАНИЕ ПОРОД ОКОЛО ВЫРАБОТКИ В ГИДРОСТАТИЧЕСКОМ ПОЛЕ НАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрим горизонтальную выработку радиусом R , когда поле главных напряжений в центре будущей выработки имеет вид

$$\sigma_z = \sigma_x = \sigma_y = -\gamma H. \quad (9)$$

Дополнительная задача формулируется для выработки при действии на ее контуре растягивающих напряжений γH (рис. 2). Для получения полных напряжений в массиве с выработкой необходимо сложить исходное поле сжимающих напряжений (9) и дополнительное решение, обеспечивая нулевые значения напряжений на контуре.

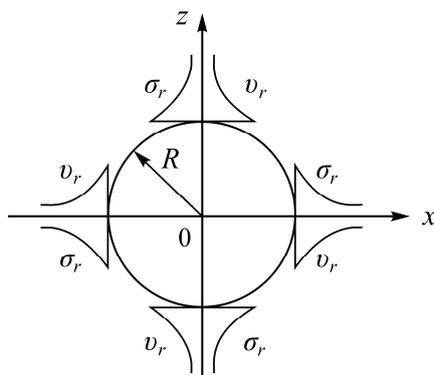


Рис. 2. Растягивающие радиальные напряжения и смещения в окрестности выработки (дополнительная задача)

Дополнительная задача для заглубленной выработки, учитывая результаты (5)–(8), сводится к случаю задания равномерного растягивающего напряжения γH , приложенного на контуре. В полярной системе координат решение задачи в напряжениях при отсутствии сдвигов в массиве пород запишется как

$$\sigma_r = \frac{\gamma H R^2}{r^2}, \quad \sigma_\theta = -\frac{\gamma H R^2}{r^2}, \quad \sigma_{z\theta} = 0,$$

переменный радиус $r \geq R$. Для компонент смещений

$$v_r = -\frac{\gamma H R^2}{2\mu r}, \quad v_\theta = 0,$$

где $\mu = E[2(1+\nu)]^{-1}$.

Согласно (9), $\lambda = 1$, $\nu = 0.5$, тогда $\mu = E/3$, если $\nu = 0.25$, то $\mu = E/2.5$, т. е. смещение радиальной компоненты для $\nu = 0.5$ будет больше, чем при меньших значениях коэффициента Пуассона. Независимо от механических параметров E и ν , напряжения в окрестности выработки для любых пород одинаковы в пределе.

Таким образом, при нагружении собственным весом согласно (9) с ростом глубины, деформирование пород под давлением осуществляется путем реализации сдвигов, в первую очередь если массив только создается. На свободной поверхности выработки напряжения нулевые и вновь происходят сдвиги, распространяясь от $r = R$ вглубь массива с затуханием. Глубина распространения сдвигов образует зону влияния выработки при обратном переходе пород от больших напряжений к нулевым. В действительности соотношение (1) выполняется приближенно. Оценка зоны влияния экспериментально очень важна при определении зависимости ее параметров от радиуса выработки.

ОЧИСТНЫЕ РАБОТЫ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

Процесс разрушения пород в окрестности выработок связан с пространственным и временным изменением их напряженно-деформированного состояния. Временные изменения предлагается связывать с объемом выработанного пространства и глубиной ведения горных работ, что позволяет рассматривать квазистатический подход. Контрольные точки статического расчета определяют отдельные этапы развития процесса разрушения пород. Актуальной становится проблема изучения наиболее общих закономерностей развития процесса разрушения на основе расчета статического, кинематического и динамического аспектов деформирования пород при очистных работах на больших глубинах. Область, где развиваются процессы разрушения, будет характеризоваться проявлением нелинейных деформаций на отдельных участках в окрестности выработки; их целесообразно заменить на эквивалентные упругие. Для реализации такого подхода следует использовать информацию о временных изменениях структурных характеристик для перенапряженной области, которая может быть получена в результате количественной интерпретации экспериментальных данных смещений.

Геомеханическая ситуация в окрестности выработки на больших глубинах определяется близким к гидростатическому полем распределения напряжений, которое устанавливается экспериментально. Вес пород γ и модуль Юнга E подлежат уточнению в процессе ведения очистных работ с использованием натуральных измерений смещений. При расчете напряженно-деформированного состояния массива необходимо использовать предложенный в [11] алгоритм замеров смещений кровли и пласта для идентификации параметров, характеризующих процесс отработки и последовательность перехода от статического процесса к кинематическому и динамическому.

ВЫВОДЫ

Установлено, что для упругого массива пород значения коэффициентов боковых распоров и коэффициента Пуассона однозначно определяются по замерам главных напряжений на заданной глубине. Для больших глубин напряженное состояние массива стремится к гидростатическому, а коэффициент Пуассона к одной второй.

Предложены рекомендации по изучению процесса деформирования горных пород на больших глубинах на основе рассмотрения статического, кинематического и динамического аспектов определения смещений кровли выработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Миренков В. Е., Евстигнеев Д. С.** Феноменологическая модель деформирования горных пород в окрестности трещины // Горн. журн. — 2017. — № 7. — С. 120–125.
2. **Неверов А. А., Неверов С. А., Тапсиев А. П., Щукин С. А., Васичев С. Ю.** Обоснование геотехнологий выемки рудных месторождений на основе развития модельных представлений об изменении параметров природного поля напряжений // ФТПРПИ. — 2019. — № 4. — С. 74–89.
3. **Reiter K. and Heidbach O.** 3-D geomechanical — numerical model of the contemporary crustal stress state in the Alberta Basin (Canada), *Solid Earth*, 2014, No. 5. — P. 1123–1149.
4. **Ustinov K. B.** On semi-infinite interface crack in bi-material elastic layer, *Eur. J. Mech.*, 2019, Vol. 75. — P. 56–69.
5. **Пожарский Д. А.** Периодические системы трещин в трансверсально-изотропном теле // Изв. РАН. МТТ. — 2019. — № 3. — С. 54–63.
6. **Khludnev A. M.** On modeling thin inclusions in elastic bodies with a damage parameter, *Math. Mech. of Solids*, 2019, Vol. 24, Issue 9. — P. 2742–2753.
7. **Васильев В. В.** Сингулярные решения в задачах механики и математической физики // Изв. РАН. МТТ. — 2018. — № 4. — С. 48–65.
8. **Васильев В. В., Лурье С. А.** Обобщенная теория упругости // Изв. РАН. МТТ. — 2015. — № 4. — С. 16–27.
9. **Васильев В. В., Лурье С. А.** Новое решение осесимметричной контактной задачи теории упругости // Изв. РАН. МТТ. — 2017. — № 5. — С. 12–21.

Поступила в редакцию 08/II 2021

После доработки 22/V 2021

Принята к публикации 24/V 2021