

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 539.3

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ НА БОЛЬШИХ ГЛУБИНАХ

М. В. Курленя¹, В. Е. Миренков¹, В. А. Шутов²

¹Институт горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, E-mail: mirenkov@misd.nsc.ru,
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия

²Новосибирская архитектурно-художественная академия,
Красный проспект, 38, 630099, г. Новосибирск, Россия

Разработан подход к оценке особенностей деформирования горных пород вокруг выработки (зональная дезинтеграция) в условиях большой глубины ее заложения. Предложен алгоритм расчета геомеханического состояния массива и определены пределы изменения напряжений и деформаций в зоне влияния выработки. Показано, что увеличение модуля Юнга породы в окрестности выработки по сравнению с его значением в глубине массива приводит к уменьшению смещений на ее контуре.

Выработка, физические эффекты, порода, большие глубины, аналитическое решение, модуль Юнга, граничные условия

ВВЕДЕНИЕ

Понятие больших глубин разработки месторождений полезных ископаемых включает расстояние расположения их от дневной поверхности, горно-геологические условия залегания, уровень напряженно-деформированного состояния и физико-механические свойства горных пород, включая процесс дезинтеграции массива вокруг выработок. Согласно классическим представлениям, горные породы на больших глубинах находятся в сжатом состоянии, при котором все поры и трещины закрыты, а породный массив является сплошным. Только на обнажениях, где происходит разгрузка, можно наблюдать трещины и раскрытие пор.

Для обсуждения вопросов больших глубин важно иметь дополнительную информацию о физике поведения горных пород с глубиной и необходимо проводить целенаправленные эксперименты, чтобы установить суть влияния данного фактора. Без этого все расчеты технологий горных работ для больших глубин, использующие аналогию с малыми глубинами, не перспективны. Возникает необходимость привлечения той или иной дополнительной гипотезы, сформулированной на основе экспериментальных наблюдений, для предварительного определения направления исследований.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 13-05-00133).

При приближении к области разгрузки, возникающей вследствие проведения выработки в массиве пород, проявляются различные физические эффекты, не учитываемые в существующих стандартных формулировках задач механики горных пород. Необходимо установить и произвести соответствующее обобщение модели. Некоторые из них обсуждались в [1]. Можно говорить о том, что пока не создано модели явления больших глубин. Здесь не имеется в виду какая-то математическая модель, которая будет достаточно сложна. Здесь нет даже убедительного описания системы причинно-следственных связей. Утверждения об особой роли аналогий при переходе от малых к большим глубинам кажутся поспешными. Речь может идти о более или менее обоснованном представлении глубинных процессов. Перестройка массива пород при движении от дневной поверхности вглубь происходит непрерывно.

Если говорить о выработке, то ее проведение способствует появлению некоторого переходного слоя между массивом пород и самой выработкой. В этом слое происходит локальный сброс энергии деформации и, как следствие, уменьшение концентрации напряжений в отдельных областях массива горных пород. Возникающее сложное напряженное состояние в окрестности выработки инициирует фазовые превращения, другие нестационарные процессы, вызывая в силу своей практической актуальности интерес к поиску решений соответствующих краевых задач [2–5]. При изучении влияния тех или иных свойств пород на деформирование в окрестности выработки (после разгрузки) необходимо строить аналитическое решение модельных задач, чтобы избежать дополнительных ошибок, проистекающих из численного расчета. Получение аналитических решений таких задач полезно и в плане возможности отработки с их помощью различных численных подходов.

Возникающие проблемы описания эффекта зональной дезинтеграции (ЗД) [6] и освоения больших глубин во многом совпадают. Некоторые аспекты ЗД рассмотрены в [7], где утверждается, что именно образование замкнутой области вокруг проведенной выработки позволяет добывать полезные ископаемые на больших глубинах. Чем больше глубина, на которой находится выработка, тем сильнее проявляются защитные свойства ЗД, обеспечивающие ведение очистных работ. Остается множество вопросов по физике процесса ЗД и детальной экспериментальной регистрации ее проявлений на расстоянии $\sqrt{2}R$ (R — радиус выработки) от центра выработки. Так, в [6] например, в окрестности выработки для $R \leq r \leq \sqrt{2}R$ при прохождении шпура через эту область разрушение не фиксировалось, а обнаруживалось только в малой зоне около $r = \sqrt{2}R$.

Опираясь на эти данные, построим первое (являющееся основным) приближение процесса добычи полезных ископаемых на больших глубинах.

ПОСТАНОВКА И РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Рассмотрим упругую плоскость, ослабленную круговым отверстием радиусом R , понимая под последним заглубленную выработку. Предположим, что контур выработки свободен от внешних напряжений, а на бесконечности действует сжимающее напряжение P в направлении оси x (рис. 1).

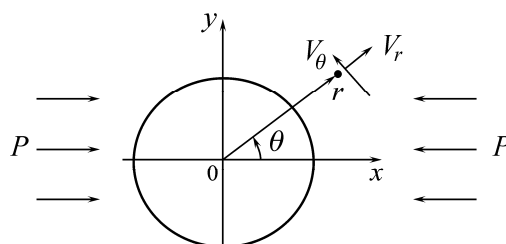


Рис. 1. Схема выработки в полярных координатах

Следуя [8], решение этой задачи в полярных координатах запишем в виде:
для напряжений

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -\frac{P}{2}\left(1 - \frac{R^2}{r^2}\right) - \frac{P}{2}\left(1 - \frac{4R^2}{r^2} + \frac{3R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta, \\ \sigma_\theta &= -\frac{P}{2}\left(1 + \frac{R^2}{r^2}\right) + \frac{P}{2}\left(1 + \frac{4R^2}{r^2} + \frac{4R^4}{r^4}\right)\cos 2\theta, \\ \tau_{r\theta} &= \frac{P}{2}\left(1 + \frac{2R^2}{r^2} - \frac{3R^4}{r^4}\right)\sin 2\theta;\end{aligned}\tag{1}$$

для смещений

$$\begin{aligned}V_r &= \frac{P}{8\mu r}\left\{(\kappa - 1)r^2 + 2R^2 + 2\left[R^2(\kappa + 1) + r^2 - \frac{R^4}{r^2}\right]\cos 2\theta\right\}, \\ V_\theta &= -\frac{P}{4\mu r}\left\{R^2(\kappa - 1) + r^2 + \frac{R^4}{r^2}\right\}\sin 2\theta,\end{aligned}\tag{2}$$

где $\kappa = 3 - 4\nu$, ν — коэффициент Пуассона; $\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}$, E — модуль Юнга.

Исследование поведения касательных напряжений $\tau_{r\theta}$ из (1) дано в [7]. Показано, что при $r = \sqrt{3}R$ касательные напряжения $\tau_{r\theta}(r, \theta)$ достигают экстремальных значений при растяжении или сжатии плоскости, ослабленной круговым отверстием, в направлении оси x . При растяжении или сжатии образцов перед разрушением наблюдают возникновение линий Людерса как результат сдвигов, и только затем идет последующее разрушение. Аналогичная ситуация происходит и в окрестности выработки в массиве пород, сжимаемой на бесконечности.

Рассмотрим смещения V_r и V_θ из (2). На контуре $r = R$

$$\begin{aligned}V_r &= \frac{PR(\kappa + 1)}{8\mu}[1 + 2\cos 2\theta], \\ V_\theta &= -\frac{PR}{4\mu}(\kappa + 1)\sin 2\theta,\end{aligned}\tag{3}$$

аналогично при $r = \sqrt{3}R$

$$\begin{aligned}V_r &= \frac{PR}{8\sqrt{3}\mu}\{3\kappa - 1 + 2[\kappa + 3.66]\cos 2\theta\}, \\ V_\theta &= -\frac{PR}{4\sqrt{3}\mu}\{\kappa + 2.33\}\sin 2\theta.\end{aligned}\tag{4}$$

На рис. 2 приведены графики смещений контура выработки, представляющие собой овалы, сдвинутые друг относительно друга на угол 0.25π .

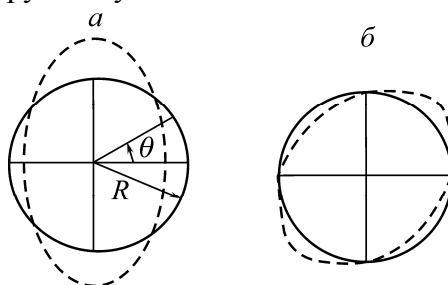


Рис. 2. Смещения контура выработки: а — компонента V_r ; б — компонента V_θ

Максимальные значения

$$V_r = \frac{3PR}{8\mu}(\kappa + 1)$$

достигаются при $\theta = 0$ и 180° , а при $\theta = 90$ и 270°

$$V_r = -\frac{PR}{8\mu}(\kappa + 1).$$

Аналогично для $\theta = 45$ и 225° получаем

$$V_\theta = -\frac{PR}{4\mu}(\kappa + 1),$$

а для $\theta = 135$ и 315° соответственно

$$V_\theta = \frac{PR}{4\mu}(\kappa + 1).$$

При $r = \sqrt{3}R$ качественная картина компонентов смещений сохраняется, но значения становятся больше.

Исследуем касательную компоненту смещений $V_\theta(r, \theta)$ на экстремум в зависимости от расстояния до центра выработки. Получим

$$\frac{dV_\theta}{dr} = -\frac{P}{4\mu} \left\{ -\frac{R^2}{r^2}(\kappa - 1) + 1 - 3\frac{R^4}{r^4} \right\} \sin 2\theta = 0, \quad (5)$$

откуда

$$r = R \sqrt{\frac{\kappa - 1 + \sqrt{(\kappa - 1)^2 + 12}}{2}}, \quad (6)$$

т. е. при значении r , определяемом из (6), для смещения V_θ наблюдается экстремум, в данном случае минимум. Интересно, что положение этих минимальных значений зависит от коэффициента Пуассона пород, представляющего отношение поперечных деформаций к продольным. Если коэффициент Пуассона меняется в пределах $0 \leq \nu \leq 0.5$, то координаты минимумов лежат в интервале

$$1.315R \leq r \leq \sqrt{3}R, \quad (7)$$

причем $r = 1.315R$ отвечает коэффициент Пуассона $\nu = 0.5$, а $r = \sqrt{3}R$ соответствует $\nu = 0$. Для $r = \sqrt{2}R$ коэффициент Пуассона $\nu = 0.375$.

Как следует из (1), (2) напряжения не зависят от упругих характеристик пород, а смещения зависят. Отметим, что координаты максимальных значений касательных напряжений совпадают с границей координат области минимальных значений $V_\theta(r, \theta)$. Другими словами, области повышенных значений $\tau_{r\theta}$ и пониженных V_θ перекрываются. На контуре выработки происходят наибольшие восстановления упругих деформаций, а следовательно, и наибольшие значения модуля сдвига, и сравнения его изменения можно вести со случая $r = R$ до значения r , определяемого (6).

Обратимся к решению проблемы зональной дезинтеграции. Будем исходить из того, что модули упругости пород могут зависеть от накопленной пластической деформации. Вопрос уменьшения модуля упругости от накопленной пластической деформации рассматривался в [8–12]. Представляет интерес изучение влияния этого свойства пород на образование зональной дезинтеграции. При изучении влияния тех или иных свойств пород на деформирование выработки после разгрузки необходимо строить аналитическое решение модельной задачи. В данной работе исследуется влияние зависимости модуля Юнга от больших деформаций на распределение напряжений и деформаций в окрестности выработки кругового сечения радиусом R в процессе разгрузки контура на основе аналитического решения.

На рис. 3 изображена диаграмма нагружения образца стали; угловой коэффициент начального прямолинейного участка принимается за модуль Юнга E . Точка M лежит на криволинейном участке диаграммы и характеризует пластические свойства материала. Для точки M материал образца с позиций закона Гука имеет модуль Юнга, представляющий собой угловой коэффициент луча, проведенного из начала координат в точку M диаграммы, т. е. секущий модуль. Например, для чугуна модуль Юнга в обычном смысле не существует, и когда для расчета чугунных изделий применяют закон Гука, то имеют в виду некоторое среднее значение секущего модуля, соответствующее диапазону рабочих напряжений. Аналогичная ситуация отмечается и в окрестности выработки.

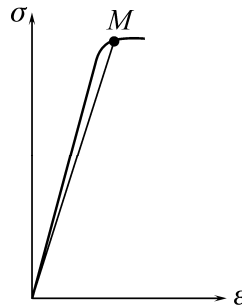


Рис. 3. Диаграмма растяжения стали

Разработана модель, описывающая развитие переходных слоев в окрестности выработки как области новой фазы. Предполагается, что переходные слои, окружающие выработку, представляют собой измененный материал пород, который становится составным, состоящим из оболочки (нетронутые породы) и переходного кольцевого слоя новой фазы, который может быть как непрерывно, так и дискретно неоднородным. Одним из требующих объяснения фактов является возможность заметного изменения деформационных свойств пород (увеличения модуля Юнга, упрочнения) в рамках проблемы зональной дезинтеграции. В нашем случае фазовое превращение инициировано как внешним одноосным растяжением – сжатием, так и последующей разгрузкой в результате проведения выработки.

Встает вопрос о величине и структуре переходного кольцевого слоя пород в окрестности выработки. Основную информацию дает анализ касательных напряжений, приведенный в [7], и касательных смещений, полученный здесь. Можно предположить, что если смещения (2) зависят от модуля Юнга, то величину кольцевого слоя R^1 следует определять по формуле (6). В то же время изменение модуля Юнга происходит от значения E_0 в глубине массива к значению E_1 на контуре выработки (рис. 4).

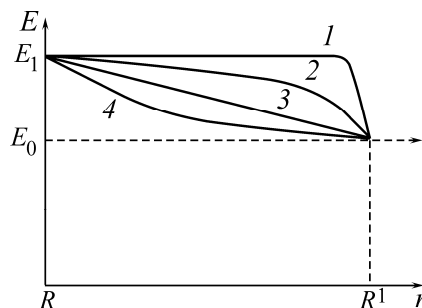


Рис. 4. Схема изменения модуля Юнга: 1–4 — возможные варианты перехода от E_0 к E_1

Таким образом, в результате проведения выработки (разгрузки пород) модуль Юнга изменился скачком (кривая 1 на рис. 4). Радиус породного кольца изменяется в пределах $1.315R \leq R^1 \leq \sqrt{3}R$ в зависимости от коэффициента Пуассона пород.

Обращаясь к сдвигу, имеем:

$$\tau_{r\theta} = \mu\gamma, \quad (8)$$

где μ — модуль сдвига; γ — сдвиговая деформация, которая вычисляется по формуле [8]:

$$\gamma = \frac{dV_r}{rd\theta} + \frac{dV_\theta}{dr} - \frac{V_\theta}{r}. \quad (9)$$

Из (9) с учетом (2) легко получить, что сдвиговая деформация достигает экстремума при $r = \sqrt{3}R$ и пропорциональна $\tau_{r\theta}$ при постоянном значении модуля Юнга.

Бурение шпура из выработки показывает, что в окрестности выработки материал не разрушен. В этой области касательные напряжения малы, а модуль сдвига повышен и нет оснований для высыпания разрушенного материала в шпур. При $r = \sqrt{3}R$ касательные напряжения максимальны, а модуль сдвига уменьшился и появилась возможность реализации сдвига, сопровождаемого разрушением пород и их высыпанием в шпур. С увеличением длины шпура уменьшается величина $\tau_{r\theta}$ при неизменном модуле сдвига и разрушение прекращается, т. е. наступает стабилизация. С этой точки зрения предположение о $E_1 > E_0$ (рис. 4) вполне реализуемо. Проскальзывание и разрушение возможно только при создании свободной поверхности в этом месте, например бурением шпура. Конечно, вокруг шпура образуется своя зональная дезинтеграция, но сдвиги от проведения выработки на $r = \sqrt{3}R$ уже готовы реализоваться в любую ослабленную зону. Именно так и было обнаружено явление зональной дезинтеграции [6].

Возможность уменьшения модуля Юнга за счет больших напряжений в нетронутым массиве пород и рост его за счет разгрузки на контуре выработки накладываются на аналитическое решение, не имеющее отношения к свойствам пород. Однако оно позволяет оценить размеры и степень роста E , привести в соответствие действительное и желаемое. Можно предположить, что численные значения модуля Юнга E_1 для пород близки к приведенным в справочной литературе, так как получены на образцах в лабораторных условиях. Определение механических характеристик пород по скорости прохождения поперечных и продольных волн и на образцах в лабораторных условиях может дать значения E_0 и E_1 . Необходимо учитывать, что для реального массива с выработкой разгрузка элемента пород кровли больше, чем почвы. Поэтому кольцевая область $R \leq r \leq R^1$ может либо деформироваться в овал, либо сохраняться около выработки, но модуль Юнга в ней возрастает от почвы к кровле. Отметим важность коэффициента Пуассона пород в процессе зональной дезинтеграции с точки зрения аналитического решения задачи. Необходимы целенаправленные натурные исследования по детализации и строгости описания процесса зональной дезинтеграции.

Таким образом, “деградация” модуля Юнга в зависимости от больших напряжений для нетронутого массива пород и увеличение его на свободной поверхности приводят к уменьшению смещений. Кольцевая область $R \leq r \leq R^1$ препятствует развитию смещений, определяемых (2), в зоне $r \geq R^1$, т. е. создается отпор, повышающий напряжения для $r \geq R^1$, которые исчезают на бесконечности. Так создаются условия для реализации последующих зон ЗД. В то же время повышение модуля Юнга пород в окрестности выработки приводит к увеличению предела прочности пород, что сказывается на устойчивости контура ослабления, обеспечивая освоение больших глубин. В основном этот результат качественный, и для реальных расчетов нужны дополнительные натурные исследования.

Создание эффективных схем ведения очистных работ требует, с одной стороны, получения знаний о механизмах образования и разрушения горных пород и структурных изменениях в них, с другой — развития математической теории интерпретации натурных экспериментов

(методов решения обратных задач) и разработки технологических приемов реализации этих схем, вытекающих из обозначенных знаний. Данная совокупность составляет основу сформулированной новой технологической механики горных пород — научно-технической области, интенсивно развивающейся в последние годы в силу чрезвычайного разнообразия массивов горных пород и открывающихся все новых возможностей. Одной из особенностей технологической механики горных пород является мультидисциплинарность, поэтому ее будущее заключается в насыщении физическим и математическим содержанием, обеспечивающим высокую эффективность и экологическую чистоту.

ВЫВОДЫ

Предложен механизм учета влияния больших глубин на перераспределение напряженно-деформированного состояния массива горных пород около выработки за счет локального изменения модуля Юнга. Установлены минимальные значения касательных смещений и нелинейная зависимость координат от коэффициента Пуассона, а также корреляция их с положением максимальных касательных напряжений. Такой алгоритм в качестве первого приближения может быть использован для выявления общих закономерностей изменения свойств пород, отражающих большие глубины, включая зональную дезинтеграцию пород вокруг выработок.

С позиций приведенного аналитического решения рассмотрен метод управления горным давлением применительно к большим глубинам горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mirenkov V. E. Finite stress in fracture mechanics, *Engineering Fracture Mechanics*, 2004, Vol. 48, No. 1.
2. Опарин В. Н., Киряева Т. А., Гаврилов В. Ю. и др. О некоторых особенностях взаимодействия между геомеханическими и физико-химическими процессами в угольных пластах Кузбасса // ФТПРПИ. — 2014. — № 2.
3. Назарова Л. А., Назаров Л. А., Эпов М. И., Ельцов И. Н. Эволюция геомеханических и электрогидродинамических полей в массиве горных пород при бурении глубоких скважин // ФТПРПИ. — 2013. — № 5.
4. Чанышев А. И., Абдулин И. М. Определение напряженно-деформированного состояния массива пород вокруг выработки произвольного сечения по данным измерений смещений на ее поверхности // ФТПРПИ. — 2014. — № 1.
5. Шкуратник В. Л., Новиков Е. А. О взаимосвязи термостимулированной акустической эмиссии скальных горных пород с их пределом прочности при сжатии // ФТПРПИ. — 2012. — № 4.
6. Открытие № 400 СССР. Явление зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземных выработок / Е. И. Шемякин, М. В. Курленя, В. Н. Опарин, В. Н. Рева, М. А. Розенбаум // Оpubл. в БИ. — 1992. — № 1.
7. Миренков В. Е. К вопросу о зональной дезинтеграции горных пород вокруг подземной выработки // ФТПРПИ. — 2014. — № 1.
8. Мухелишвили Н. И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. — М.: Наука, 1966.
9. Li K. P., Carden W. P. Simulation of sprungback, *Intern, J. Mech. Sci.*, 2002, Vol. 44.
10. Geng L., Wagoner R H. Role of plastic anisotropy and its evolution on sprungback, *Lutern, J. Mech. Sci.*, 2002, Vol. 44.
11. Gau J.-T., Kinzel G. L. An experimental investigation of the influence of the Bauschinger effect on sprungback predictions, *J. Mater. Process. Techol.*, 2001, Vol. 108.
12. Красновский А. А., Миренков В. Е. К расчету напряженно-деформированного состояния пород около нефтеносного пласта // ФТПРПИ. — 2008. — № 2.

Поступила в редакцию 15/VIII 2014