

ГЕОМЕХАНИКА

УДК 593.3

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ВОКРУГ ВЫРАБОТОК

М. В. Курленя, В. Е. Миренков

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

Представлен новый механизм деформирования горных пород вокруг подземных выработок. Разработан метод расчета геомеханического состояния массива горных пород, учитывающий их вес, действие которого совпадает с направлениями растягивающих напряжений на контуре выработки, а в ее почве эти направления различны. Предложен метод расчета деформирования пород, включающий два дополнительных параметра, характеризующих отношение смещений кровли к смещениям почвы выработки и отношение смещений дневной поверхности к смещениям кровли, которые определяются экспериментально.

Горная выработка, феноменологическая модель, напряжения, деформация, обратные задачи

DOI: 10.15372/FTPRPI20180201

В работах [1, 2] принят аналитический подход к обоснованию опорного давления на пласт полезного ископаемого впереди очистной выработки, который предполагался абсолютно жестким с идеальными связями на контакте с породой. Они вызвали широкое обсуждение новых механизмов, влияющих на напряженно-деформированное состояние пород около выработок и возникновение опорного давления. Поэтому для описания геомеханического состояния геологической среды разные исследователи в зависимости от специфики решаемых ими задач предлагали свои модели деформирования [3 – 10]. В этих публикациях содержится теоретический и экспериментальный материал, который, казалось бы, должен в полной мере объяснить механизм формирования опорного давления с последующим разрушением массива горных пород. В разнообразных его моделях вплоть до взаимоисключающих [8, 9] зачастую использовались одни и те же экспериментальные данные. Существенного продвижения в теоретическом плане по сравнению с работами [1, 2] в мировой практике нет, несмотря на новые возможности, открываемые численными методами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-05-00533).

Более сложная ситуация имеет место при расчете напряженно-деформированного состояния в окрестности незаглубленной выработки, когда требуется учитывать поведение дневной поверхности. Классический расчет деформирования и в этом случае сводится к рассмотрению невесомой области, для которой, как показано в [3], необходимо формулировать корректные граничные условия.

КЛАССИЧЕСКАЯ ЗАДАЧА ДЛЯ НЕЗАГЛУБЛЕННОЙ ВЫРАБОТКИ

Обратимся к модели поведения однородного массива пород с горизонтальной незаглубленной выработкой, пройденной по пласту полезного ископаемого с модулем Юнга E и коэффициентом Пуассона μ (рис. 1).

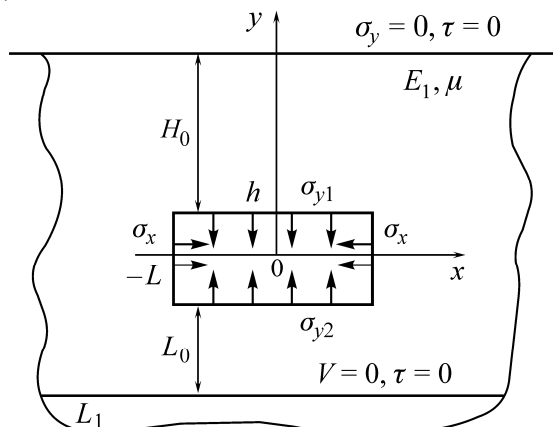


Рис. 1. Расчетная схема дополнительной задачи для незаглубленной выработки

Принимая, аналогично [1–3], линейный закон распределения сжимающих напряжений в нетронутом массиве пород, имеем

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

где σ_x , σ_y — горизонтальные и вертикальные напряжения в точке y ; γ — удельный вес пород; λ — коэффициент бокового отпора; H — некоторое приведенное значение глубины заложения выработки; $2h$ — высота выработки. Если мысленно извлечь из массива часть горной породы в форме выработки и заменить ее действие, согласно (1), усилиями

$$\sigma_{y1} = -\gamma(H - h), \quad \sigma_{y2} = -\gamma(H + h) \quad (2)$$

и

$$\sigma_x = -\lambda\gamma(H - y), \quad -h \leq y \leq h, \quad (3)$$

то породы находятся в равновесии. Чтобы оценить деформирование пород в окрестности выработки, нужно получить решение дополнительной задачи, обеспечивающей нулевые значения напряжений на контуре в сумме с (2), (3). Для этого достаточно воспользоваться математической задачей, в основу которой положены растягивающие напряжения на контуре выработки, условия, равные по модулю (2), (3), и значения нормальных и касательных напряжений $\sigma_y = 0$, $\tau = 0$ на $y = H_0 + h$. Собственный вес пород в дополнительной задаче исключается. Формулировка задачи не закончена. При численном счете предполагается, что на достаточном расстоянии L_0 от выработки на линии L_1 можно сформулировать условия равенства нулю нормальной компоненты смещений V и касательных напряжений τ , т. е.

$$V = 0, \quad \tau = 0. \quad (4)$$

Так как главный вектор усилий σ_y на L_1 всегда равен $2L(\sigma_{y_2} - \sigma_{y_1})$, то для любого значения L_0 напряжения $(\sigma_{y_2} - \sigma_{y_1})$ убывают как y^{-1} даже на бесконечности. В рамках теории упругости оно должно быть как y^{-2} . Используя результаты работы [3], разделим процесс определения напряженно-деформированного состояния на две части: когда массив пород с выработкой находится под действием только вертикальной составляющей веса пород и только горизонтальной, т. е.

$$\sigma_y = -\gamma(H - y), \quad \sigma_x = 0 \quad (5)$$

или

$$\sigma_y = 0, \quad \sigma_x = -\lambda\gamma(H - y). \quad (6)$$

Выражение (5) для расчетной области требует условия (4), а выражение (6) при условии (4) даст сильное искажение линейного поля. Следовательно, совместное их решение недопустимо. Поэтому воспользуемся полученными результатами в общей задаче (5), (6) и дополнительной, исключая перепад давления горных пород по высоте выработки. Полагая, что $H \gg h$ и принимая $\sigma_{y_1} = \sigma_{y_2}$, приходим к полуплоскости с отверстием. Если $h = 0$, тогда будем иметь математический разрез длиной $2L$ на оси x , а в результате — аналитическое решение.

ОЦЕНКА РОЛИ ВЕСА ПОРОД В ПРОЦЕССЕ ИХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ВОКРУГ ВЫРАБОТОК

Классический метод деформирования горных пород в окрестности выработки исключает влияние их веса. По этой причине существует несовпадение расчетных данных с натурными значениями измеренных смещений. Чтобы преодолеть отмеченный недостаток, обратимся к решению обратной задачи теории геомеханического состояния массива горных пород.

Для изотропного массива и заглубленной горизонтальной выработки с учетом симметрии относительно оси x установлены распределения напряжений и деформаций [11]. В случае незаглубленной выработки симметрия исчезает и проблема существенно усложняется. Рассмотрим дополнительную задачу, в которой пренебрегается вес пород, а искомые смещения кровли и почвы выработки, обозначенные соответственно V_1 и V_2 , различны по модулю. Будем считать, что решение этой задачи (рис. 1) существует. Однако вес пород присутствует, направлен вниз и подвергает породы кровли растяжению V_r , а почвы сжатию V_f на величины V_3 и V_4 . В результате имеем полные смещения

$$V_r = V_1 + V_3, \quad (7)$$

$$V_f = V_2 - V_4, \quad (8)$$

естественно, по модулю. В дополнительной задаче, задав в качестве первого приближения, как это делается в классических подходах, γH и λ , получим V_1 , V_2 и области влияния выработки в кровле и почве.

ВСПОМОГАТЕЛЬНАЯ ЗАДАЧА

Расчетная схема для заглубленной выработки представлена на рис. 2. Решение задачи предполагает установление зоны влияния выработки, т. е. точки $y = H_0 + H_1$, где смещения кровли равны нулю и откуда можно отсчитывать удлинение пород кровли. Если выбрать волокно пород, когда $x = 0$, и направить ось y_1 от точки $y = H_0 + H_1 + h$ противоположно оси y , то удлинение волокна в любой точке y_1 от веса пород определяется по формуле

$$\Delta(y_1) = \int_0^{y_1} \frac{\gamma y_1}{EA} dy_1 = \frac{\gamma y_1^2}{2EA}, \quad (9)$$

где EA — жесткость волокна при растяжении–сжатии; E — модуль Юнга; A — площадь сечения волокна вдоль y_1 . Смещения кровли выработки вычисляются согласно (9) подстановкой $y_1 = H_0 + H_1$. На рис. 2 приведена эпюра смещений точек пород кровли для заглубленной выработки, рассчитанная по формуле (9), — кривая 1.

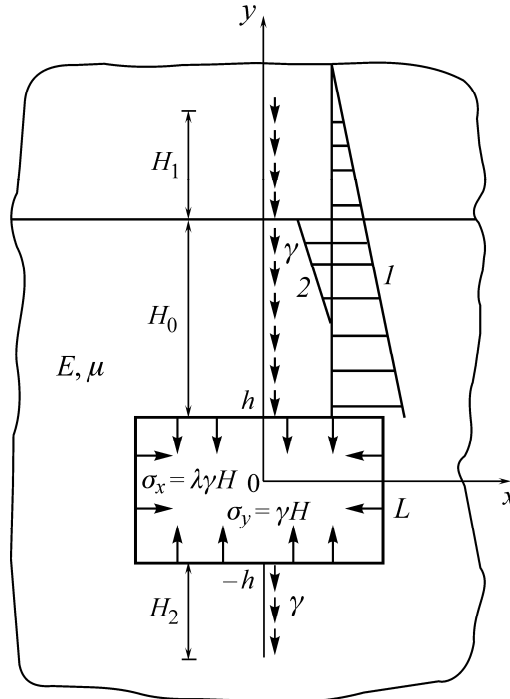


Рис. 2. Расчетная схема заглубленной выработки

Для перехода от заглубленной выработки к незаглубленной отбросим полуплоскость $y \geq H_0 + h$, заменив ее действие реакциями. Последние рассчитываются для заглубленной выработки. Метод последовательных приближений, обеспечивающий такой переход, сводится к следующему: берется полуплоскость, граничные условия которой характеризуются реакциями с обратным знаком. Складывая их для полуплоскости и заглубленной выработки, получим нулевые значения напряжений (дневная поверхность) на $y = H_0 + h$. На контуре выработки в задаче для полуплоскости появятся дополнительные напряжения, которые убираются, используя решения для незаглубленной выработки. В данном случае на нем формируются напряжения с обратным знаком. Таким образом, выполняется первый цикл приближений. Последующие продолжают до достижения заданной точности. На рис. 2 приведена эпюра смещений пород кровли незаглубленной выработки, отвечающая первому циклу приближения от действия веса пород, т. е. сумма эпюр 1 и 2 для $h \leq y \leq h + H_0$ соответствует V_3 . Следовательно, полные смещения контура незаглубленной выработки (7), (8) найдены в первом приближении.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ОТ СОБСТВЕННОГО ВЕСА

Для сравнения возможности деформирования пород кровли и почвы под действием их веса и без его учета выделим волокно вдоль оси y на $x = 0$. В породах почвы направление действия σ_y и веса пород противоположны (рис. 2) и удлинение волокна будет

$$V_f = \int_0^{H_2} \frac{\gamma H - \gamma y}{EA} dy = \frac{\gamma H_2(2H - H_2)}{2EA}. \quad (10)$$

В породах кровли направление действия σ_y и веса γ совпадают и удлинение волокна вычисляется аналогично тому, как построена эпюра смещений на рис. 2, т. е. имеем

$$V_r(y_1) = \int_0^{y_1} \frac{\gamma H + \gamma y_1}{EA} dy_1 + V_{k5}, \quad (11)$$

где V_r — зеркальное отображение эпюры I для $h + H_0 \leq y \leq h + H_0 + H_1$ относительно линии $y = h + H_0$. Максимальное значение смещений кровли выработки вычисляется согласно (11) и в первом приближении равно

$$V_r = \frac{\gamma(H_{y_1} + 0.5y_1^2)}{EA} \Big|_{y_1 = H_0 + H_1} = \frac{\gamma[H(H_0 + H_1) + 0.5(H_0 + H_1)^2]}{EA}. \quad (12)$$

Смещения дневной поверхности из (11) имеют вид

$$V_{ds} = \frac{2\gamma H_1(H + 0.5H_1)}{EA}. \quad (13)$$

Предлагаемая модель деформирования горных пород является феноменологической и предполагает экспериментальный поиск ее параметров на образцах. Введем параметры

$$k = \frac{V_r}{V_f} \quad (14)$$

и

$$k_1 = \frac{V_{ds}}{V_r}, \quad (15)$$

которые также обосновываются экспериментально. А в рамках классической теории упругости — это обратная задача, использующая дополнительную информацию о деформировании рассматриваемой области массива горных пород, что можно трактовать как обобщение классических некорректных задач еще и на геометрические параметры, учитывающие вес. В предлагаемом методе расчета полные смещения и полные напряжения в окрестности выработки напрямую однозначно не связаны, как и в [11]. Эта же ситуация наблюдается и при классическом подходе, исключаяющим вес пород. Однако во всех случаях главная роль принадлежит дополнительной задаче.

Представим выражения k , исходя из (10), (12), и k_1 согласно (12), (13):

$$k = \frac{H(H_0 + H_1) + 0.5(H_0 + H_1)^2}{H_2(H - 0.5H_2)}, \quad (16)$$

$$k_1 = \frac{2H_1(H_0 + 0.5H_1)}{H(H_0 + H_1) + 0.5(H_0 + H_1)^2}. \quad (17)$$

Очевидно, что расчет деформирования горных пород вокруг незаглубленной выработки требует знания величин k и k_1 , основанных на натуральных замерах смещений кровли, почвы выработки и подработанной дневной поверхности. По существу, сравниваются экспериментальные значения k , k_1 и расчетные (16), (17). Из всех геометрических величин, входящих в (16) и (17), задается только H , все остальные получаются в процессе решения. Вопросы, являются ли k и k_1 константами или функциями от x и необходимым числом точек для экспериментальных замеров или даже замеров приращений смещений за одно подвигание забоя, обсуждались в [11].

Если смещения дневной поверхности отсутствуют $k_1 = 0$, то приходим к заглубленной выработке и параметры γH и λ определяются быстрее и более точно. Такая ситуация имеет место почти всегда, когда протяженность выработки мала. После этого замеры смещений V_r , V_f и V_{ds} можно использовать для нахождения других, входящих в решение параметров, характеризующих вмещающие породы и обрабатываемый пласт.

Введем важное предположение относительно параметров k и k_1 , значения которых из формулировки граничной задачи не следуют. Параметры k и k_1 устанавливаются с помощью экспериментов, традиционных для феноменологического подхода. Реальное различие смещений пород кровли и почвы не позволяет считать классическое численное решение правильным, так как нарушается принцип соответствия результатов расчета и натуральных данных. Выявление по этим натурным смещениям напряжений — дополнительная некорректная задача. Основное дополнительное условие — это смещения в массиве пород с незаглубленной выработкой, так как они возникают в кровле, почве и на дневной поверхности в процессе горных работ.

Итак, алгоритм расчета деформирования в случае незаглубленной выработки (рис. 1) сводится к следующему. Из классического подхода к решению задачи, исключаящей собственный вес пород, устанавливаем в (7), (8) только V_1 , V_2 , V_4 , а из вспомогательной задачи — V_3 . Смещения дневной поверхности находим из (13). Если натурные замеры смещений V_{ri} , V_{fi} и V_{ds} не совпадают с расчетными, то следует варьировать величинами γH и λ . Последовательными приближениями, изменяя их значения и производя каждый раз все необходимые вычисления, добиваемся наилучшего совпадения расчетных и натуральных результатов. Первый цикл приближений заканчивается фиксированием величин $(\gamma H)_1$ и λ_1 . Они являются исходными данными для последующих расчетов и достижения требуемой точности определения напряженно-деформированного состояния нетронутого массива горных пород. Следует иметь в виду, что на точность решения также оказывают влияние и механические характеристики пород.

ВЫВОДЫ

Предложена феноменологическая модель деформирования горных пород в окрестности выработок неглубокого залегания.

Метод расчета геомеханического состояния массива пород вокруг подземных выработок, основанный на статике и кинематике, обеспечивает более точное решение и направлен на совершенствование способов вскрытия, подготовки и технологий разработки месторождений полезных ископаемых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Михлин С. Г.** О напряжениях в породе над угольным пластом // Изв. АН СССР. ОТН. — 1942. — № 7–8. — С. 13–28.
2. **Баренблатт Г. И., Христианович С. А.** Об обрушении кровли при горных выработках // Изв. АН СССР. ОТН. — 1955. — № 11. — С. 73–86.
3. **Миренков В. Е., Красновский А. А.** К вопросу учета линейного изменения поля напряжений нетронутого массива с глубиной в задачах геомеханики // ФТПРПИ. — 2014. — № 3. — С. 26–32.
4. **Clausen J.** Bearing capacity of circular footing on a Hork-Brown material, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 2013, Vol. 57. — P. 34–41.
5. **Li X., Li D., Lin Z., Zhao G., and Wang W.** Determination of the minimum thickness of crown pillar for safe exploitation of a subsea gold mine based on numerical modeling. Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 2013. — P. 42–56.
6. **Shen H., Abbas S. M.** Rock slope reliability analysis based on distinct element method and random set theory, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 2013, Vol. 61. — P. 15–22.
7. **Савченко С. Н.** Деформирование геологической среды при отработке двух продуктивных пластов Штокмановского месторождения // ФТПРПИ. — 2010. — № 6. — С. 48–56.
8. **Серяков В. М.** Об одном способе учета реологических свойств горных пород при расчете напряженно-деформированного состояния массива в зоне подработки // ФТПРПИ. — 2010. — № 6. — С. 18–24.
9. **Неверов С. А., Неверов А. А.** Геомеханическая оценка устойчивости выработок выпуска руды при системах с обрушением // ФТПРПИ. — 2013. — № 2. — С. 113–122.
10. **Vazhbakht B. and Zsaki A. M.** A finite element mesh optimization method incorporating delogic features for stress analysis of underground excavations, Int. J. of Rock Mech. Min. Sci., 2013, Vol. 59. — P. 111–119.
11. **Миренков В. Е.** Об одном методе расчета напряженно-деформированного состояния массива горных пород вокруг выработок с учетом весовых характеристик // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 20–26.

Поступила в редакцию 13/II 2018