

УДК 539.3

**О ВЗАИМОСВЯЗИ ПЛОЩАДИ ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ ВЫРАБОТКИ
И ОБЛАСТИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД**

В. Е. Миренков

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

Классический расчет напряженно-деформированного состояния массива проводится без учета собственного веса пород, т. е. используется статический подход. В работе предлагается учитывать собственный вес пород, реализующийся при образовании полости в горном массиве, т. е. развивается кинематический аспект проблемы. Для идентичных выработок, отличающихся только характерным размером, статический расчет дает одинаковые значения напряжений, которые не достигают предельных, поэтому, согласно теории, разрушения нет в обоих случаях. Представленная феноменологическая теория позволяет учесть собственный вес пород при расчетах деформирования в окрестности выработок, и кинематическая добавка доказывает, что при прочих равных условиях вероятность начала разрушения выработки возрастает с увеличением ее характерного размера.

Выработка, характерный размер, вес пород, напряжения, смещения, феноменологическая теория, разрушение

DOI: 10.15372/FTPRPI20180104

В механике горных пород замечено, что отверстия малого диаметра в породах не разрушаются, а с увеличением площади сечения (выработки) начинают разрушаться. Основанием этого служит утверждение, что большей свободной поверхности выработки соответствует большее количество дефектов структуры пород, которые являются источником начала разрушения. В технике хорошо известен факт, заключающийся в том, что крупные изделия разрушаются при напряжениях, значительно меньших, чем те, которые можно считать допустимыми на основании лабораторных опытов над образцами из того же материала. Не оспаривая такое объяснение, рассмотрим другое, в основе которого лежит учет собственного веса пород для массива с ослаблением.

Исследуем представленные на рис. 1 две квадратные выработки в изотропном массиве пород на одной глубине H от дневной поверхности, но без взаимного влияния. Расчет напряженно-деформированного состояния в окрестности этих выработок без учета собственного веса пород определяет линии возможного обрушения l_1 и l_2 . Ясно, что если значения максимальных касательных напряжений на линиях l_1 и l_2 одинаковы, а вес пород, ограниченных выработками и линиями l_1 и l_2 , разный, то допустимые предельные напряжения на линии l_2 проявятся быстрее.

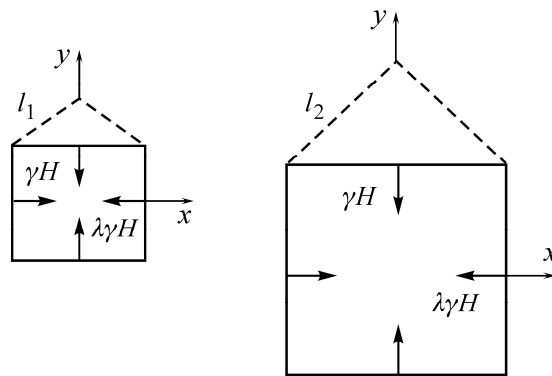


Рис. 1. Две квадратные выработки без взаимного влияния: γ — удельный вес вмещающих пород; λ — боковой распор

РАСЧЕТ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ БЕЗ УЧЕТА СОБСТВЕННОГО ВЕСА

Расчет на прочность предполагает знание напряженно-деформированного состояния в исследуемой области, выбор критерия разрушения и сравнение напряжений в точке с предельными для данного материала пород значениями. В механике горных пород принят линейный закон изменения поля напряжений в нетронутым горным массиве, прямо пропорциональный удельному весу γ и расстоянию от дневной поверхности до исследуемой точки H [1–9]. В исходном состоянии в центре будущей выработки нормальные напряжения равны соответственно [1–3]:

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

где σ_y , σ_x — вертикальная и горизонтальная составляющие напряжений. Складывалось впечатление, что удельный вес пород учитывался при расчете напряженного состояния в окрестности выработки. На самом деле напряженно-деформированное состояние определялось из решения дополнительной задачи для невесомого массива пород с усилиями на контуре $\sigma_y = \gamma H$, $\sigma_x = \lambda\gamma H$ (рис. 1), т. е. собственный вес пород не учитывался.

Для решения задачи о деформировании пород в окрестности выработки необходимо иметь решение дополнительной задачи, которое в сумме с (1) обеспечит нулевые значения напряжений на контуре. Для этого достаточно решить математическую задачу для невесомой плоскости с растягивающими значениями напряжений на контуре отверстия, имитирующего выработку, равными по модулю (1). На этом связь исходной и дополнительной задач заканчивается. Расчет напряжений и смещений позволит использовать любую из существующих теорий прочности по определению возможности разрушения в окрестности выработки. Как показано в [4], для многих теорий прочности критические линии, по которым может развиваться разрушение, практически совпадают. Осредненные линии предельного состояния приведены на рис. 1. Как показано в [5], классический расчет не учитывает собственный вес пород и даже если случайно удастся угадать γH и λ (т. е. правильно определить предельную линию), отвечающие замерам смещений кровли и почвы выработки, то вес пород необходимо учитывать.

ТЕОРИЯ УЧЕТА ВЕСА ПОРОД

Для сравнения будем рассматривать выработки на рис. 1 как заглубленные. Область их влияния обозначена пунктирной линией на рис. 2, а заштрихованная область, ограниченная кровлей и осредненной линией l , на которой согласно любой теории прочности может насту-

ВЛИЯНИЕ ИСХОДНОГО НАПРЯЖЕНИЯ σ_x НА СМЕЩЕНИЯ

Смещения кровли и почвы выработки могут определяться неравенством $v_k \gg v_n$. Это объясняется, при прочих равных условиях, трудностью сжатия более нагруженных пород относительно менее сжатых, но тогда смещения должны быть больше в кровле [5]. Учтем данный факт, как и в [5], сформулировав нулевые нормальные смещения на расстоянии h_1 от почвы выработки на линии, параллельной оси x , или подбирая модуль Юнга для пород почвы, обеспечивающий экспериментальное значение $\kappa(x)$. Какое из этих двух условий выбрать зависит от численной реализации.

Соотношения (1), (2) и результаты [5] представляют первое приближение по расчету смещений пород кровли и почвы под действием сжимающих усилий $\sigma_y = -\gamma H$ и собственного веса пород кровли и почвы, соответственно γ_1, γ_2 . Поле напряжений нетронутого массива пород примем в виде

$$\sigma_y = \gamma(H - y), \quad \sigma_x = \lambda\gamma(H - y). \quad (8)$$

Смещению пород кровли и почвы выработки, полученному в [5], препятствуют напряжения σ_x в виде (8), создавая трение, направленное против смещения пород:

$$\tau = f\sigma_x, \quad (9)$$

где f — коэффициент трения, т. е. уменьшит значения и (1) и (2). В силу линейности исходного поля напряжений это уменьшение смещений будет больше в почве, чем в кровле выработки.

Тогда с учетом (1) и (2) полное увеличение длины волокна для пород кровли и почвы запишется следующим образом:

$$v_k = \int_0^{H_1} \frac{-\gamma H - \gamma_1 y + \lambda\gamma_1 f(H - H_1)}{EA} dy = \frac{H_1}{EA} [-H(\gamma - \lambda\gamma_1 f) - \gamma_1 H_1(0.5 - \lambda f)], \quad (10)$$

$$v_n = \int_0^{H_2} \frac{-\gamma H + \gamma_2 y + \lambda\gamma_2 fH}{EA} dy = \frac{H_2}{EA} [-H(\gamma - \lambda\gamma_2 f) + 0.5\gamma_2 H_2]. \quad (11)$$

В результате отношение смещений пород кровли и почвы выработки, согласно (10), (11), равно

$$\kappa = \frac{H_1 [H(\gamma - \lambda\gamma_1 f) + \gamma_1 H_1(0.5 - \lambda f)]}{H_2 [H(\gamma - \lambda\gamma_2 f) - 0.5\gamma_2 H_2]}. \quad (12)$$

В соотношениях (10)–(12) в отличие от (1), (2) принято, что γ — некоторое усреднение для $\sigma_y = \gamma H$, а γ_1, γ_2 — вес пород в зонах влияния выработки, где H_1 — зона влияния в кровле, H_2 — зона влияния в почве. Даже для изотропного массива пород $H_1 > H_2$, что можно объяснить трудностью сжатия более нагруженных пород почвы относительно менее сжатых в кровле, да еще растягиваемых от собственного веса. Выражения (10)–(12) будем рассматривать как второе приближение, так что дальнейшие приближения связаны с новыми знаниями о поведении пород под нагрузкой. Экспериментальные значения параметра κ позволят определить соотношение между H_1 и H_2 и количественно оценить распространение усилий в напряженных породах.

Рассмотренная в работе теория является феноменологической, т. е. предполагает, что параметр κ определяется экспериментально, а в рамках классической теории упругости это обратная задача, использующая дополнительную информацию о деформировании рассматриваемой

области, что можно трактовать как обобщение классических обратных задач и на учет веса пород. Реальное различие смещений пород кровли и почвы не позволяет считать классическое численное решение правильным, так как нарушается принцип соответствия результатов расчета и натурных данных. Нахождение по этим натурным смещениям соответствующих напряжений — дополнительная некорректная задача.

Если соотнести рис. 2 с меньшей из выработок на рис. 1, то можно считать, что рис. 2 соответствует и большей из выработок рис. 1. Во втором случае надо заменить y_0 на y_1 ($y_1 > y_0$) и помнить, что сторона выработки будет больше. Проанализируем имеющиеся различия для выработок на рис. 1. Как следует из (12), параметр κ для меньшей выработки при $\gamma = \gamma_1$ и $H \gg y_0$ близок к единице, т. е. влияние собственного веса на деформирование незначительно. В то же время для большей выработки (рис. 1) из (12), где значение H_1 достаточно большое и может приближаться к H , следует $\kappa \approx 3$. Это значит, что влияние собственного веса пород на деформирование в окрестности выработки существенно.

ВЛИЯНИЕ СОБСТВЕННОГО ВЕСА ПОРОД НА ПРЕДЕЛЬНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Собственный вес пород учитывается при расчете напряженно-деформированного состояния около выработки и при реализации любого критерия прочности. Если на вычисленной потенциально предельной линии реальные напряжения не достигли необходимой для разрушения величины, то, увеличивая исходные напряжения, можно добиться предельных значений. При этом выпадает “замковый блок” — область, ограниченная предельной линией (рис. 2). В наших расчетах вес пород учитывается не напрямую, а через уточнение исходного поля напряжений, поэтому добавка к напряжениям закономерна и корректна в феноменологической теории с учетом собственного веса в процессе разрушения. Если отверстие мало, то зона влияния у такого ослабления мала при больших γH , и собственный вес пород, влияющих на напряжения, небольшой, а значит влиянием γ_1 можно пренебречь по сравнению с H .

Когда задается вопрос, что же инициирует разрушение, то это и напряжения, и вес. В предлагаемой теории вес учитывается только в смещениях и влияние его при разрушении характеризуется объемом возможного сдвижения. По существу, напряжения в рассматриваемой модели определяются для невесомого материала пород и проявить себя могут только так. Согласно выбранной теории прочности, вычислим предельную линию, и если нет разрушения, то достичь его можно по двум направлениям: при классическом подходе (без учета веса пород) повышением исходного поля напряжений, или, увеличивая геометрический размер полости (не меняя исходное напряженное состояние), получить ситуацию, когда большой объемный вес просто оторвет “замковый блок”. В определенном смысле эти возможности эквивалентны.

На рис. 3 представлены площади пород, которые приходят в движение в процессе разрушения. Разрушение возможно по линиям l_1 и l_2 для выработок квадратного сечения со сторонами $2a_1$ и $2a_2$ соответственно. Граничные значения напряжений одинаковы в этих случаях и им отвечают линии l_1 и l_2 с одинаковыми предельными значениями напряжений, если не учитывать вес пород. Согласно классическому решению, ситуации одинаковы с точки зрения перспективы разрушения, но необходимо выяснить, почему первая выработка более устойчива по сравнению со второй. Оценим, какие усилия добавляются к вычисленным классическим предельным на l_1 и l_2 (рис. 3), если учесть вес пород. Пусть для простоты линии l_1 и l_2 образуют угол 45° с осью y , тогда площади $S_1 = a_1^2$, $S_2 = a_2^2$. Вес пород, выделенный на рис. 3, будет $P_1 = S_1 \gamma_1$ и $P_2 = S_2 \gamma_1$. Вес P_1 и P_2 вызывает на линиях l_1 и l_2 касательные напряжения, кото-

рые осредним по длине и обозначим через τ_1 и τ_2 , т. е. вес уравновешивается равномерно распределенными касательными напряжениями. В конечном счете касательные напряжения связаны для этих выработок соотношением

$$\tau_2 = \frac{a_2}{a_1} \tau_1.$$

Таким образом, для выработок с малой площадью поперечного сечения (в частности, для шпуров) полученные результаты в виде изолиний будут меньше, а для выработок с большей площадью — больше в соответствующее число раз, как отношение a_2/a_1 . Существенно, что уменьшение или увеличение геометрических параметров приводит к соответствующему уменьшению или увеличению веса пород, ограниченного такой изолинией и выработкой. Этот вес создает в окрестности критической изолинии пониженные или повышенные значения дополнительных напряжений, что объясняет масштабный фактор, встречающийся в практике горного дела.

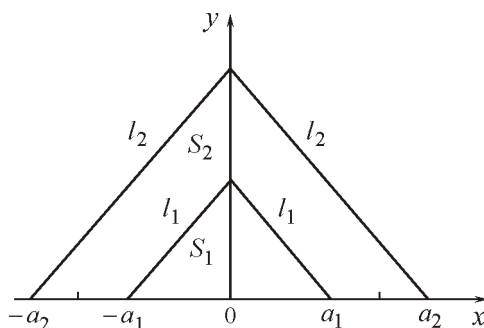


Рис. 3. Области возможного обрушения пород S_1 и S_2 в кровле выработок разного размера

Получение новых знаний о механизмах разрушения горных пород и структурных изменениях в них, развитие математической теории интерпретации натуральных экспериментов лежат в основе разработки технологий. Учет особенностей механических и физико-химических процессов в массиве горных пород обеспечит эффективность ведения очистных работ. Новые проблемы, возникающие в геомеханике в данном направлении, рассмотрены в работах [5, 10, 11]. Здесь предложена теория расчета напряженно-деформированного состояния в окрестности заглубленных выработок, учитывающая собственный вес пород.

Алгоритм расчета сводится к следующему. Используя классический подход [1–9] (без учета собственного веса пород), априори назначаются величины γH и λ из (1), все параметры характеризующие массив с выработкой и рассчитывается напряженно-деформированное состояние в окрестности ослабления, т. е. в области влияния выработки (рис. 2). Если же имеются натурные замеры смещений пород кровли и почвы выработки (коэффициент κ), то по (7) находится нормальная компонента ν , которая определяет приведенные к натурным замерам смещений ν_k и ν_n величины γH и λ , как первое приближение. Аналогично учитывается влияние модуля Юнга на расчет деформирования и последовательно всех параметров, характеризующих горный массив с выработкой. На этом заканчивается первый цикл приближений. Число циклов зависит от заданной точности вычисления смещений. Это и будет уточненное значение исходных напряжений (1), для которых окончательно вычисляются напряжения, смещения, область влияния выработки и выбирается теория прочности, т. е. область возможного разрушения. Добавка напряжений от собственного веса пород малая для выработки с малым характерным размером и большая для большего поперечного сечения объясняет все варианты возмож-

ного разрушения, т. е. масштабный эффект. Кинематический аспект проблем механики горных пород играет важную роль в понимании процессов в массиве пород, так как рассматривает в отличие от динамического более простые и во многих случаях имеющие аналитические решения задачи. Вес пород не относится к фундаментальным взаимодействиям. Как и другие необратимые явления он связан с термодинамическими и статическими рассмотрениями и не дает однозначной связи смещений и напряжений.

ВЫВОДЫ

Разработана феноменологическая теория учета собственного веса пород в окрестности заглубленных выработок в горном массиве.

Доказано, что закономерность разрушения, называемая масштабным эффектом, есть результат дополнительного учета действия собственного веса вмещающих выработку пород.

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. Cluasen J. Bearing capacity of circular footing on a Hork-Brown material, Int. J. rock Mech. Min. Sci., 2013, Vol. 57. — P. 34–41.
4. Курленя М. В., Миренков В. Е. Методы математического моделирования подземных сооружений. — Новосибирск: Наука, 1994. — 188 с.
5. 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.
6. Грицко Г. И., Посохов Г. Е., Цыцаркин В. Н., Курленя В. М. Горное давление на мощных крутых пластах. — Новосибирск: Наука, 1967. — 215 с.
7. Бобылев С. В., Морозов Н. Ф., Овидько И. А. Микромеханика перехода от межзеренной к внутризеренной деформации в наноматериалах // ДАН. — 2015. — Т. 465. — № 6. — С. 674–677.
8. Holmberg K. and Matthews A. Coatings tribology properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering, Amsterdam: Elsevier, 2009. — 506 p.
9. Zhou K., Keer L. M., Wang Q. S., Ai X. L., Sawamiphahali K., Glaws P., Paire M., and Che F. X. Interaction of multiple inhomogeneous inclusions beneath a surface, Comput. Meth. Appl. Eng., 2012, Vol. 217. — P. 25–33.
10. 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. — С. 3–18.
11. Бычков В. П., Владимиров Д. Я., Опарин В. Н., Потапов В. П., Шокин Ю. И. Горная информатика и проблема “больших данных” в построении комплексных мониторинговых систем безопасности недропользования // ФТПРПИ. — 2016. — № 6. — С. 163–179.

Поступила в редакцию 8/XI 2017