

УДК 539.3

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПОЛЯ НАПРЯЖЕНИЙ МАССИВА
И СМЕЩЕНИЙ КРОВЛИ ВЫРАБОТКИ
НА ПОДГОТОВКУ РАЗРУШЕНИЯ ПРИ ОЧИСТНЫХ РАБОТАХ**

В. Е. Миренков

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

Рассматривается процесс обрушения кровли в окрестности движущегося забоя, который нельзя описать с позиций статического и кинематического решений. Обусловлена необходимость учета несимметрии деформирования, создаваемой динамической составляющей процесса. Для этого требуются дополнительные экспериментальные и теоретические исследования по образованию и учету несимметрии распределения смещений. Обсуждаются возможности получения дополнительных сведений о процессе деформирования и обрушения кровли с помощью использования упругих решений. Главными факторами, обеспечивающими корректную формулировку задач, являются рассмотрение статического, кинематического и динамического аспектов деформирования массива и предлагаемое описание неупругой зоны пласта в системе “вмещающие породы – отработываемый пласт”.

Очистная выработка, пласт, труднообрушаемые кровли, смещения, статика, кинематика, динамика

DOI: 10.15372/FTPRPI20200206

В настоящей работе развивается подход, связанный с реализацией статического, кинематического и динамического аспектов деформирования массива при ведении очистных работ, что позволяет исключить возможность некорректных формулировок задач геомеханики, число которых, как показано в [1], велико. Некорректность определяется несоответствием используемых математических и физических моделей. Кинематический аспект дает возможность учесть вес пород [2], неучитываемый до сих пор в аналитических решениях, свести статический расчет к формулировке дополнительной задачи и исключить некорректные постановки задач Коши [3 – 13]. Согласно общей теории уравнений математической физики, к особому классу Коши относятся задачи, области расчета которых содержат бесконечно удаленную точку. Это, в частности, задачи для полуплоскости и плоскости с отверстиями, для пространства и полупространства с полостями.

Подвигание секций крепи сопровождается ударом пород кровли по крепи и отработываемому пласту, приводя при таком взаимодействии к накоплению повреждений в массиве. Наиболее разрушаемый элемент в массиве — пласт, призабойная часть которого деформирует-

ся нелинейно. Необходимо знать область нелинейного деформирования и характер обжатия пласта вмещающими породами, поскольку вне этой области он упругий. В этом случае возможно рассчитать упругие смещения кровли, т. е. объединить статический и динамический аспекты проблемы, к которым необходимо добавить кинематические смещения. Предлагаемая модель опирается на соотношения линейной теории упругости, используя отклонения от нее только для того, чтобы сформулировать основные положения, объясняющие и описывающие достоверно реальный процесс деформирования.

СТАТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПОРОД ОКОЛО ВЫРАБОТОК

В настоящее время расчет напряженно-деформированного состояния около ослаблений в массиве пород осуществляется в основном методом конечных элементов. При этом предполагается, что на контуре выработки граничные значения нормальных и касательных напряжений равны нулю, а на бесконечности массив сжимается постоянными напряжениями, равными исходному полю напряжений в центре будущей выработки, и что результат расчета учитывает собственный вес пород. В [1] доказано, что это не так, и без рассмотрения дополнительной задачи для невесомого массива пород получаемые решения некорректны, т. е. не имеют физического смысла (например, происходит возрастание смещений при удалении от выработки). Предложенная в [2] феноменологическая теория учета собственного веса пород обеспечивает статический расчет, используя натурные данные о смещениях контура выработки для идентификации параметров, характеризующих массив. Исходное поле напряжений на глубине H от дневной поверхности имеет вид

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

где σ_y , σ_x — вертикальная и горизонтальная составляющие этого поля; γ — удельный вес пород; λ — коэффициент бокового распора.

Для горизонтальной выработки симметрия деформирования пород кровли сохраняется для статического расчета и при учете веса пород (рис. 1). Таким образом, расчет деформирования в окрестности выработки без учета динамической составляющей однозначно определяется статическим рассмотрением с учетом веса пород и характеризуется симметрией деформирования кровли.

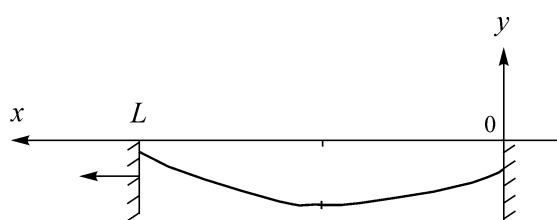


Рис. 1. Симметрия смещений кровли выработки с учетом веса пород

Согласно феноменологической теории [2], учет веса пород сводится к расчету смещений и не связан с напряжениями. С другой стороны, если смещения, представленные кривой I (рис. 2), поставить в соответствие некоторому значению $(\gamma H)_0 > \gamma H$, то, выполнив статический расчет для исходного поля напряжений аналогичного (1) в виде

$$\sigma_y = (\gamma H)_0, \quad \sigma_x = \lambda\gamma H, \quad (2)$$

получим приведенное значение $(\gamma H)_0$, вызывающее при исходном поле напряжений (2) смещения, показанные на рис. 2 кривой I .

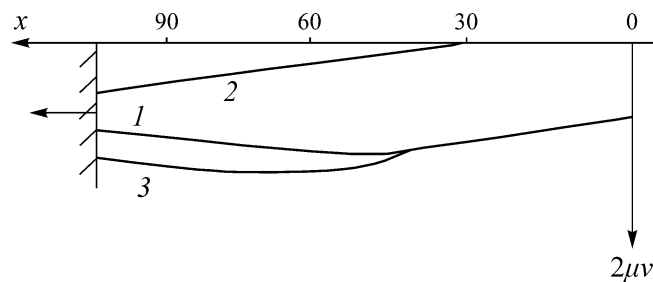


Рис. 2. Схема формирования смещений кровли выработки: 1 — сумма статических и кинематических; 2 — динамические; 3 — полные смещения

И наконец, можно вычислить напряжения σ_x , соответствующие исходному состоянию (2), которые будут больше напряжений σ_x , получаемых из (1). По определению, σ_x в (1) и (2) совпадают, остается проверить, достаточно ли значения σ_x , получаемого из (2), чтобы разрушить породы кровли в точке максимальных смещений, используя деформационный критерий разрушения. Можно выполнить статический и кинематический расчеты при ведении очистных работ в предположении отсутствия динамической составляющей. При таких расчетах и при большем пролете выработанного пространства обрушение кровли будет в центре выработки, что не соответствует натурным данным. Существенно то, что физические, механические и геометрические параметры в таких расчетах задаются априори. Натурные замеры смещений кровли и почвы выработки позволяют уточнить эти параметры и вычислить смещения от собственного веса пород, т. е. свести проблему к рассмотрению обратных задач с достижением необходимой точности решения. Отметим, что требование достижения приемлемой точности может отнести данный подход к классу труднорешаемых проблем.

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ СОСТАВЛЯЮЩЕЙ НА НЕСИММЕТРИЮ ДЕФОРМИРОВАНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПОДГОТОВКИ РАЗРУШЕНИЯ

Динамический аспект ведения очистных работ связан с единичным подвиганием крепи и заметно проявляется при увеличении длины выработанного пространства до 20–30 м [14], т. е. на начальном этапе отработки пласта динамикой процесса можно пренебречь. При этом деформирование системы “вмещающие породы – пласт” остается упругим и возможно осуществить идентификацию параметров, характеризующих горный массив, с выработкой, приведя их в соответствие с натурными замерами смещений согласно феноменологической теории учета собственного веса пород. Если для горизонтальной выработки имеем натурные замеры смещений в кровле — v_1 и почве — v_2 , то коэффициент κ [2] определяется как

$$\kappa = \frac{v_1}{v_2}. \quad (3)$$

Обозначив v_3 — смещения из классического решения, сформулированного на контуре выработки в виде (1), v_4 — смещения от собственного веса пород, запишем

$$v_1 = v_3 + v_4, \quad (4)$$

$$v_2 = v_3 - v_4. \quad (5)$$

Подставляя (4), (5) в (3), получим

$$v_3 = \frac{\kappa + 1}{\kappa - 1} v_4. \quad (6)$$

Учитывая (6) из (4), (5), имеем

$$v_1 = \frac{2\kappa}{\kappa+1} v_3, \quad v_2 = \frac{2}{\kappa+1} v_3. \quad (7)$$

Учет веса пород переводит поставленную задачу в разряд обратных и позволяет идентифицировать параметры, характеризующие горный массив с выработкой. Существенно, что соотношения (6), (7) позволяют получить пропорциональную зависимость введенных в рассмотрение смещений.

На рис. 2 приведена схема полных смещений кровли выработки: кривая 3 есть сумма смещений 1 (учет статических и кинематических) и 2 (добавка, учитывающая динамику процесса). Эта схема исключает симметрию деформирования пород и определяет наиболее напряженную часть массива впереди движущегося забоя. Слабейшим местом в системе “вмещающие породы – пласт” является, как правило, пласт, и можно наблюдать разрушение (выдавливание) пласта, проскальзывание пород по контакту “пласт – порода”, приводящие к увеличению полных смещений, газовыделению и т. п., т. е. существенно нелинейное деформирование пласта. При этом труднообрушаемая кровля описывается упругой моделью и, если удастся смоделировать разрушаемый пласт как упругое тело, например с переменным модулем Юнга $E(x)$ или набором упругих элементов, характеризующих отпор пласта, то придем к модели упругого массива с упругим пластом. Замена разрушаемого пласта эквивалентной упругой конструкцией позволяет вычислять либо аналитически, либо численно полные смещения кровли на конкретное положение забоя. В результате получаем полные смещения кровли отработываемого пласта, определяя координату максимальных смещений v_{\max} и растягивающие напряжения σ_x в этой точке. В первом приближении протяженность разрушенного пласта впереди движущегося забоя лавы и степень разрушения можно оценить по выходу штыба при бурении шпуров или используя любой другой способ определения нарушенности пласта.

ДИНАМИКА РАЗВИТИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ ВЫРАБОТКИ

Согласно общепринятой концепции, сжимающие напряжения в массиве пород определяются исходным линейным полем (1) при $y = 0$ в центре будущей выработки. Дополнительная задача получения корректного решения предполагает задание растягивающих нормальных напряжений на контуре выработки, исчезающих на бесконечности, дающих в сумме с исходным полем сжимающих напряжений (1) при $y = 0$ на контуре выработки нулевые нормальные и касательные напряжения. И только в этом случае утверждение о нулевых значениях нормальных и касательных напряжений на свободной поверхности имеет физический смысл. Как доказано аналитически и экспериментально в механике горных пород, дополнительная задача формулирует растягивающие напряжения на контуре выработки и определяет сжимающие напряжения на отработываемый пласт. Главный вектор растягивающих напряжений уравнивает главный вектор сжимающих. Следовательно, чем больше протяженность выработки, тем больше суммарное сжатие пласта. Для малой длины выработки растягивающие напряжения дополнительной задачи имеют небольшой главный вектор, уравниваемый сжимающими напряжениями, действующими на пласт, и нелинейными эффектами за счет дополнительного сжатия можно пренебречь [14]. С ростом длины выработки до 20–30 м сжимающие напряжения на пласт существенно возрастают и в области опорного давления состояние пород становится неустойчивым. Этой длины выработки достаточно, чтобы в конкретном случае [14] обеспечить за счет единичных подвиганий секций крепи проявление динамики в смещениях кровли.

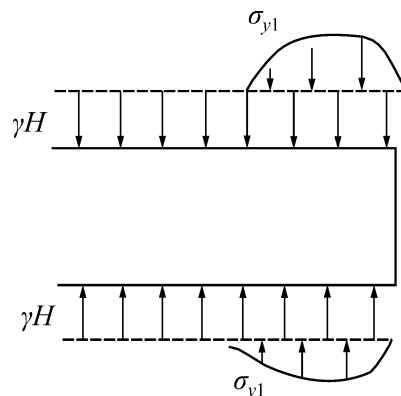


Рис. 3. Полные сжимающие напряжения, действующие на обрабатываемый пласт

На рис. 3 представлена окрестность движущегося забоя и полные напряжения сжатия, действующие на обрабатываемый пласт (на контуре выработки нормальные сжимающие напряжения равны нулю). Эпюра сжимающих пласт нормальных напряжений имеет вид $\sigma_y = \gamma H + \sigma_{y1}$, где γH — исходное напряжение σ_y из (1) при $y = 0$; σ_{y1} — опорное давление, определяемое из решения дополнительной задачи.

При увеличении выработанного пространства появляется реальная возможность выдавливания части пласта между забоем и местом максимального давления на пласт, где материал пласта не выдерживает сжимающих напряжений и разрушается (рис. 3). В конечном счете реализуется наблюдаемое на практике явление отжима пласта в выработку, сопровождаемое падением напряжений в пласте (разгрузка), увеличением смещений и восстановлением нового равновесного состояния. С этого момента наиболее напряженной частью становится окрестность движущегося забоя, где возможны динамические проявления горного давления, связанные с исходным полем напряжений на этой глубине и формированием выработанного пространства.

В общем случае породы кровли больше всего сжаты над обрабатываемым пластом и, учитывая большую прочность вмещающих пород на сжатие, возможность возникновения нелинейных деформаций связана с пластом. Над выработкой, согласно формулировке дополнительной задачи, породы кровли испытывают деформации растяжения. Поскольку горные породы слабее сопротивляются растяжению, чем сжатию, разрушение труднообрушаемых кровель происходит в выработанном пространстве, чему способствует динамика, возникающая от разрушаемого сжатием пласта. Это приводит к смещению области максимальных смещений кровли в сторону забоя. Наличие несовершенств строения пород кровли вызывает сложное напряженное состояние с образованием дополнительных зон растяжения и с неконтролируемым разрушением кровли и требует дополнительного рассмотрения процесса деформирования.

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОБРУШЕНИЯ КРОВЛИ

Вопросы, связанные с расчетом напряженно-деформированного состояния массива при ведении очистных работ, требуют учета нелинейного поведения пород впереди движущегося забоя. При начальном подвигании забоя, когда динамической составляющей можно пренебречь, смещения кровли и почвы обрабатываемого пласта, вычисленные статическим методом, позволяют по произвольно заданным характеристикам массива пород определить область влияния выработки, т. е. учесть смещения кровли от веса пород. На данном этапе решения, используя экспериментальные данные по полным смещениям, рассматриваются обратные задачи по идентификации параметров массива пород последовательными приближениями.

Отвечающие натурным смещениям параметры породного массива позволяют рассчитывать статическую и кинематическую составляющие процесса деформирования на любое положение забоя. Кривая 2 (рис. 2) характеризует дополнительное динамическое сжатие пласта, которое при известной области разрушенного угля на любое фиксированное положение забоя определяет сжатие пласта впереди забоя. Оценка напряженного состояния пласта предполагает численный расчет полных смещений и координат их максимальных значений, оценивающих разрушение кровли. Другими словами, необходимо определить уменьшение модуля Юнга в пласте в окрестности забоя с точностью до постоянного множителя, полученного в процессе решения. Множитель выбирается из условия того, что полные смещения, приведенные на рис. 2, определяются как сумма статического и кинематического расчетов для переменного модуля Юнга:

$$E = \begin{cases} E, & x \geq x_0; \\ E[1 - \alpha f(x)], & L \leq x \leq x_0, \end{cases} \quad (8)$$

где $x = L$ — фиксированное положение забоя, на которое производится расчет смещений; $x = x_0$ — координата, характеризующая область влияния дополнительного динамического обжатия отрабатываемого пласта; $f(x)$ — функция, определяющая характер разрушения пласта впереди забоя (по выходу штыва); α — коэффициент пропорциональности.

Алгоритм расчета деформирования массива пород с выработкой на фиксированное положение забоя $x = L$ сводится к определению характера обжатия пласта $f(x)$. Для установленного коэффициента α с помощью статического расчета находится модуль Юнга из (8). При переменном в окрестности забоя модуле Юнга строится статическое решение, определяющее область влияния выработки, и учитывается собственный вес пород для новой несимметричной области влияния, т. е. учет собственного веса усиливает несимметрию за счет кинематических смещений. Совпадение расчетных смещений с учетом (8) и натурных замеров на забое при $x = L$ достигается определением соответствующего коэффициента α .

ВЫВОДЫ

Нелинейные деформационные процессы при ведении очистных работ проявляются в окрестности движущегося забоя и зависят от глубины заложения выработки и длины отработанного пространства. Предложен алгоритм расчета полных смещений кровли очистной выработки и оценки координат обрушения. Использована дополнительная информация о деформировании отрабатываемого пласта на фиксированное положение забоя. Расчет динамического состояния пласта сведен к определению его статического состояния с помощью введения переменного модуля Юнга в призабойной части. Описана последовательность расчета полных смещений (статических, кинематических и динамических), получены координаты их максимальных значений и растягивающих напряжений для последующей проверки пород кровли на разрушение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Миренков В. Е. О некорректных задачах в геомеханике // ФТПРПИ. — 2018. — № 3. — С. 3–10.
2. Курленя М. В., Миренков В. Е. Феноменологическая модель деформирования горных пород вокруг выработок // ФТПРПИ. — 2018. — № 2. — С. 3–9.
3. Carranza-Torres C., Rysdahe B., and Vasim M. On the elastic analysis of a circular lined tunnee considering the delayed installation of the support, J. Rock Mech. and Min. Sci., 2013, Vol. 61. — P. 57–85.
4. Rezali M., Hossaini M. F., and Majdi A. Determination of hongwall mining-induced stress using the strain energy method, J. Rock Mech. and Rock Eng., 2015, Vol. 48. — P. 2421–2433.

5. **Badrul Alam A. K. M., Masaki Niioka Fujii, Daisuke Fukuda, and Jun-ichi Kodama.** Effect of confining pressure on the permeability of three rock types under compression, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2014, Vol. 65. — P. 49–61.
6. **Wei Wang, Yuan-ping Cheng, Hai-feng Wang, Hong-yong Liu, Liang Wang, Weili, and Jing-yu Jiang.** Fracture failure analysis of hard-thick sandstone and its controlling effect on gas emission in underground ultra-thick coal extraction, *J. Eng. Failure Analysis*, 2015, Vol. 54. — P. 150–162.
7. **Клишин В. И., Фрянов В. Н., Павлова Л. Д., Опрук Г. Ю.** Моделирование дезинтеграции подкровельной толщи при обработке мощного пласта с выпуском угля на забойный конвейер // *ФТПРПИ*. — 2019. — № 2. — С. 79–88.
8. **Basarir H., Oge I. F., and Aydin O.** Prediction of the stresses around main and tail gates during top coal caving by 3D numerical analysis, *J. Rock Mech. and Min. Sci.*, 2015, Vol. 76. — P. 88–97.
9. **Михлин С. Г.** О напряжениях в породе над угольным пластом // *Изв. АН СССР. ОТН*. — 1942. — № 7, 8. — С. 13–28.
10. **Баренблатт Г. И., Христианович С. А.** Об обрушении кровли при горных выработках // *Изв. АН СССР. ОТН*. — 1955. — № 11. — С. 73–86.
11. **Шапошник Ю. Н., Неверов А. А., Неверов С. А., Никольский А. Н.** Оценка влияния накопившихся пустот на безопасность доработки Артемьевского месторождения // *ФТПРПИ*. — 2017. — № 3. — С. 108–118.
12. **Гольдштейн Р. В., Осипенко Н. М.** Моделирование механизма движений в промежуточном слое между контактирующими телами при сдвиге со сжатием // *МТТ*. — 2016. — № 3. — С. 55–70.
13. **Мирсалимов В. М.** Максимальная прочность выработки в горном массиве, ослабленном трещиной // *ФТПРПИ*. — 2019. — № 1. — С. 12–21.
14. **Грицко Г. И., Власенко Б. В., Посохов Г. Е.** Прогнозирование и расчет проявлений горного давления. — Новосибирск: Наука, 1980. — 160 с.

Поступила в редакцию 25/II 2020

После доработки 28/II 2020

Принята к публикации 10/IV 2020