

УДК 622.831.1

А.М. Никольский, А.А. Неверов, С.А. Неверов, М.В. Шинкевич

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МАССИВА ПОРОД ПРИ ПОДХОДЕ ЛАВЫ К ДЕМОНТАЖНОЙ КАМЕРЕ

Ужесточающиеся требования к технологии добычи полезного ископаемого и все более возрастающие трудности в обеспечении безопасности ведения очистных работ дают основания считать проблему управления горным давлением в перспективе одной из основных при решении вопросов повышения эффективности добычи угля. Принятие научно обоснованных решений в подобных условиях возможно лишь на основе достоверной информации о параметрах напряженного состояния массива и физико-механических свойств пород, определяющих интенсивность и характер динамических проявлений горного давления. Получение этой информации требует проведения комплекса исследований с использованием ряда методов, позволяющих изучить геомеханическое состояние массива. При этом основная задача сводится к определению напряжений в массиве и установлению закономерностей их изменения в результате отработки месторождения.

Известно, что разработка угольного пласта сопровождается возникновением вокруг очистного забоя области повышенного опорного давления. При этом величина и характер смещения пород боков и кровли выработок зависит от множества факторов (глубина разработки, мощность пласта, геометрия и размеры выработанного пространства, наличие целиков, физико-механические свойства пород и т.д.). Сложные условия управления горным давлением заставляют разрабатывать технологии и технические средства, обеспечивающие безопасность очистной выемки. Наибольший интерес в настоящее время проявляется к проблеме управления труднообрушаемыми кровлями.

Управление тяжелыми кровлями представляет значительную сложность. Высокая её устойчивость ведет к зависанию пород и последующему неуправляемому массовому обрушению в выработанном пространстве с завалами лав на больших площадях. К труднообрушаемым относятся кровли, шаг обрушения которых, как правило, превосходит двукратную ширину поддерживаемого выработанного пространства. Обычно они представлены песчаниками, известняками либо нерасслаивающимися алевролитами в основной кровле при мощности непосредственной, не превышающей пяти мощностей пласта. Исследованиями [1] установлено, что состояние массива над крепью на высоту зоны обрушения и его взаимодействие с крепью в процессе выемки пласта и передвижки секций являются определяющими факторами при распределении напряжений. При этом наблюдается высокая концентрация опорного давления, которая способствует увеличению отжима угля, раз-

рушению непосредственной кровли и появлению заколов впереди забоя. Высокая напряженность массива в зоне опорного давления, достигающая $2,8\text{--}3,0 \gamma H$, имеет место при залегании труднообрушаемых пород в непосредственной кровле перед первой их осадкой. В дальнейшем, перед последующими осадками, напряжения впереди забоя уменьшаются до $2,0 \gamma H$. При подвигании забоя менее прочные породы самообрушаются, а основная кровля расслаивается и обрушается последовательно.

Интенсивность проявления горного давления в значительной степени определяется шагом обрушения устойчивого слоя. На основании данных [1] и горного опыта установлено, что основную роль на шаг первого и последующего обрушений основной кровли играет ее прочность и мощность.

Практика показывает, что в большинстве лав при управлении кровлей способом полного обрушения, наиболее опасными участками являются места демонтажных камер (краевая область завершающей отработки лавы). Значительная концентрация напряжений является причиной неуправляемых разрушений краевых частей угольного пласта и горных пород. В определенных условиях эти разрушения носят динамический характер и сопровождаются тяжелыми последствиями [2, 3].

При подходе лавы к демонтажной камере возникают трудности связанные с опасным обрушением кровли и отжимами угля от груди очистного забоя, размеры которого резко уменьшаются. Это делает необходимым оценить напряженно-деформированное состояние (НДС) массива в районе демонтажной камеры в зависимости от параметров выемки. Расчет НДС массива выполнен методом конечных элементов (МКЭ) [4-6].

Рассмотрим задачу по определению НДС массива в процессе разработки угольного пласта при подходе забоя к демонтажной камере на основе упругой модели в условиях плоской деформации. На рис. 1 представлена схема расчетной области и основные параметры. Решения выполнены в зависимости от линейного размера целика (L_u), глубины разработки (H), мощности пласта (m) и длины пролета отработки ($L_{\text{прол}}$). Мощность разрабатываемого угольного пласта в расчетах принята 2,5-5 м. Падение – горизонтальное. Горные работы ведутся на глубинах 200-400 м от дневной поверхности. Длина пролета отработки 100-600 м. Условия на границе расчетной области определяются напряженным состоянием нетронутого массива. Управление кровлей осуществляется обрушением

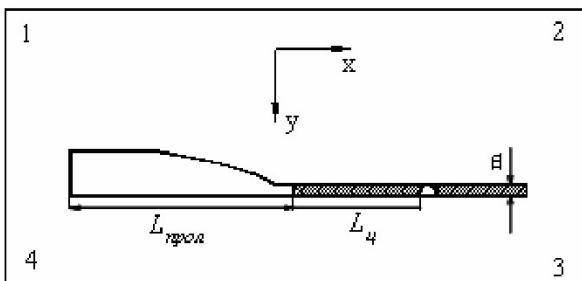


Рис. 1. Схема и основные параметры расчетной области

налагающих пород. В задаче не учитываются обрушенные породы в выработанном пространстве, которые в реальных условиях создают боковой подпор на окружающий массив, тем самым, влияя на характер распределения напряжений. Вес горных пород в моделях учитывался объемной силой. Решения выполнены при следующей постановке задачи – изначально модель свободна от нагрузок, после создания моделируемой области прикладываются краевые условия.

Исходное напряженное состояние нетронутого массива горных пород для месторождений осадочного типа описывается уравнениями:

$$\sigma_y = \gamma g H, \quad \sigma_x = \lambda \sigma_y, \quad \tau_{xy} = 0.$$

где H – расстояние от дневной поверхности до пласта, λ – коэффициент бокового распора, γ – плотность пород, g – ускорение свободного падения.

Учитывая незначительную глубину разработки, верхняя граница модели «1-2» (рис. 1) соответствует дневной поверхности. Поэтому считаем, что она свободна от внешних нагрузок:

$$\sigma_y = 0, \quad \tau_{xy} = 0.$$

На правой боковой границе «2-3» задается условие характерное для нетронутого массива:

$$\sigma_x = \lambda \sigma_y, \quad \tau_{xy} = 0.$$

здесь $\lambda = \frac{\nu}{1-\nu}$, ν – коэффициент Пуассона (по А.Н. Диннику).

На нижней «3-4» и левой боковой «1-4» гра-

ницах модели приняты краевые условия:

$$\text{Граница } «3-4» \quad u_y = 0, \quad u_y = 0, \quad \tau_{xy} = 0.$$

$$\text{Граница } «1-4» \quad u_x = 0, \quad \tau_{xy} = 0.$$

Линии задания граничных условий удалены от моделируемого объекта на расстояния обеспечивающие корректность решений, при которых отсутствует вероятность влияния области разработки на внешние границы модели (в рассматриваемом случае расстояние от очистной выработки до боковых границ превышает размер исследуемой области более чем в три раза).

По условию задачи перемещения на контакте двух материалов (уголь-порода) равны между собой ($u_n = u'_n$). Контуры открытых обнажений (выработок) свободны от внешних нагрузок ($\sigma_x = \sigma_y = 0$).

Массив горных пород моделировался с механическими свойствами, характерными для труднообрушаемых кровель: угольный пласт – $E = 3000$ МПа (E – модуль упругости), $\nu = 0,35$, $\gamma = 1,3$ т/м³; песчаник, аргиллит и алевролит – $E_{cp} = 23000$ МПа, $\nu = 0,27$, $\gamma = 2,7$ т/м³.

Оценка напряженного состояния массива в районе демонтажной камеры представлена на рис. 2-9.

На рис. 2. приведен характер распределения главных (σ_1, σ_2) напряжений в зоне демонтажной камеры при ширине оставляемого целика 30 м, глубине разработки 200 м, длине пролета – 100 м и мощности пласта 2,5 м.

Обобщая результаты расчетов, выделим следующее (рис. 2). Меньшая жесткость (упругие свойства) угольного целика по сравнению с основным массивом и свободные от нагрузки границы очистных выработок приводят к перераспределению напряжений в их окрестностях. Максимальная концентрация напряжений σ_1 наблюдается в районе очистного забоя на расстоянии 1-3 м в глубь массива (угольного целика). При этом нагрузка в сопоставлении с исходным полем напряжений для глубины $H = 200$ м возросла до $3\gamma H$ (16 МПа).

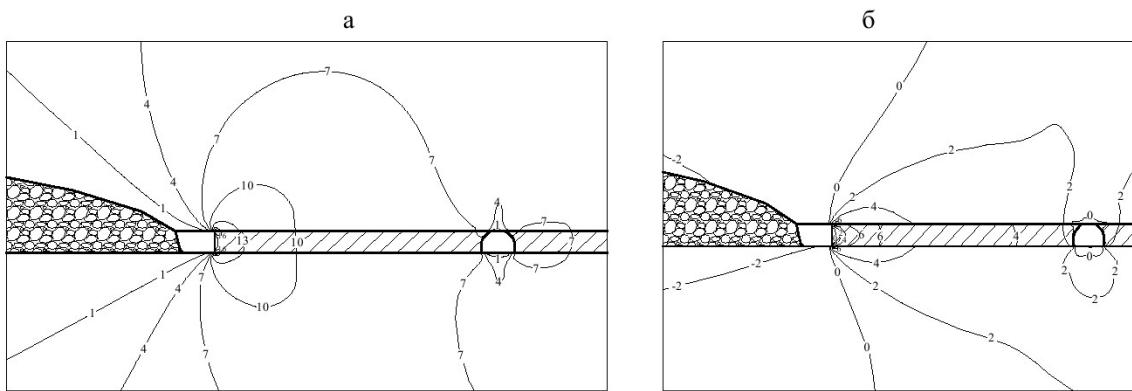


Рис. 2. Распределение напряжений в целике прилегающем к демонтажной камере: а – максимальных главных σ_1 ; б – то же минимальных главных σ_2

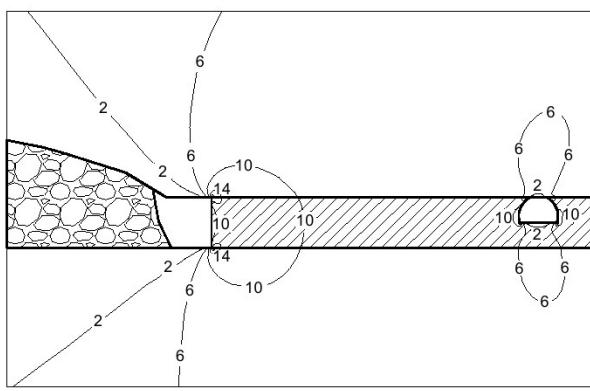


Рис. 3. Распределение напряжений σ_1 в целике прилегающего к демонтажной камере при мощности пласта 5 м

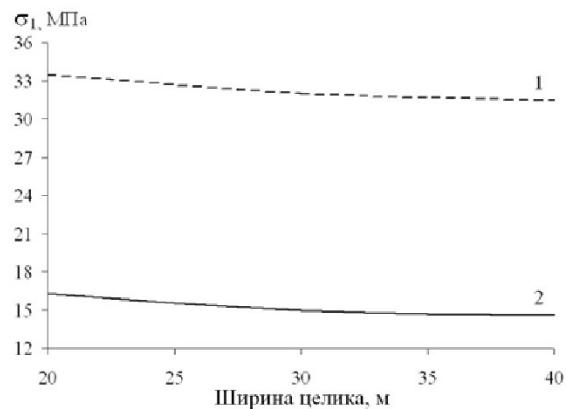


Рис. 4. Величина σ_1 в зависимости от ширины целика вблизи очистного забоя (1-3 м): 1 – при глубине разработки $H = 400$ м; 2 – то же, $H = 200$ м

а

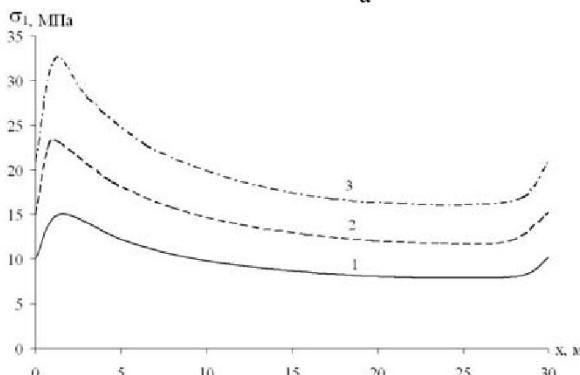
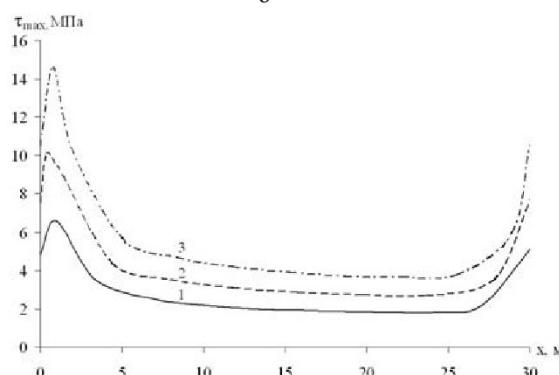


Рис. 5. Распределения напряжений в центральном горизонтальном сечении целика ($L_u = 30$ м, $m = 2,5$ м) прилегающего к демонтажной камере в зависимости от глубины разработки: а – σ_1 ; б – τ_{max} ; 1, 2, 3 – соответственно при $H = 200, 300$ и 400 м

б



Величина напряжений σ_2 в целике изменяется от 0 МПа у забоя до 6 МПа к его центру. В районе зоны обрушения (в кровле и почве) прослеживается рост растягивающих напряжений $\sigma_2 = 0 \div 3,5$ МПа, которые распространяются вглубь массива до 20 м. Последнее свидетельствует об интенсивном трещинообразовании и потере устойчивости пород.

Концентрация напряжений τ_{max} в призабойной зоне угольного целика превышает исходное напряжение γH на 20%. В кровле и почве демонтажной камеры τ_{max} составляет $0,3 \div 0,8 \gamma H$. Необходимо отметить, что наличие труднообрушаемых кровель способствует сохранению повышенной концентрации опорного давления длительное время.

Картина изменения напряжений σ_1 при мощности угольного пласта 5 м ($H = 200$ м, $L_{prod} = 100$ м) представлена на рис. 3.

Вблизи очистного забоя на расстоянии 1-3 м вглубь целика абсолютные значения действующих напряжений σ_1 в его центральной части не значительны, но отличаются (рис. 4). Так, при уменьшении ширины целика, с 40 до 20 м при

прочих равных условиях нагрузка на забой в демонтажной камере увеличивается на 8-10%.

Характерные особенности распределения напряжений в сечении целика в зависимости от глубины разработки представлены на рис. 5, 6. Так, рост глубины горных работ с 200 до 400 м сопровождается приростом нагрузки в призабойной части более чем в 2 раза.

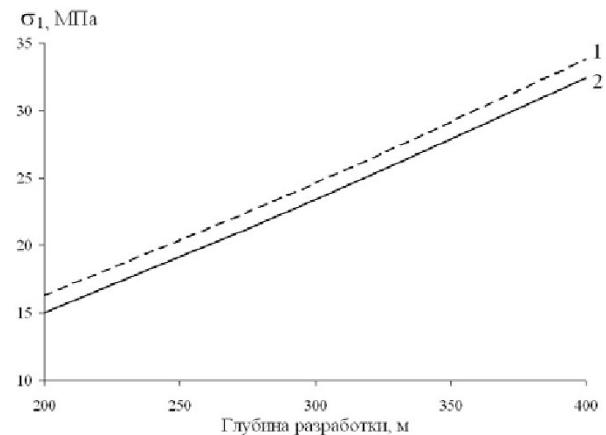


Рис. 6. Величина σ_1 в зависимости от глубины разработки вблизи очистного забоя (1-3 м): 1 – при $L_u = 20$ м; 2 – то же $L_u = 30$ м

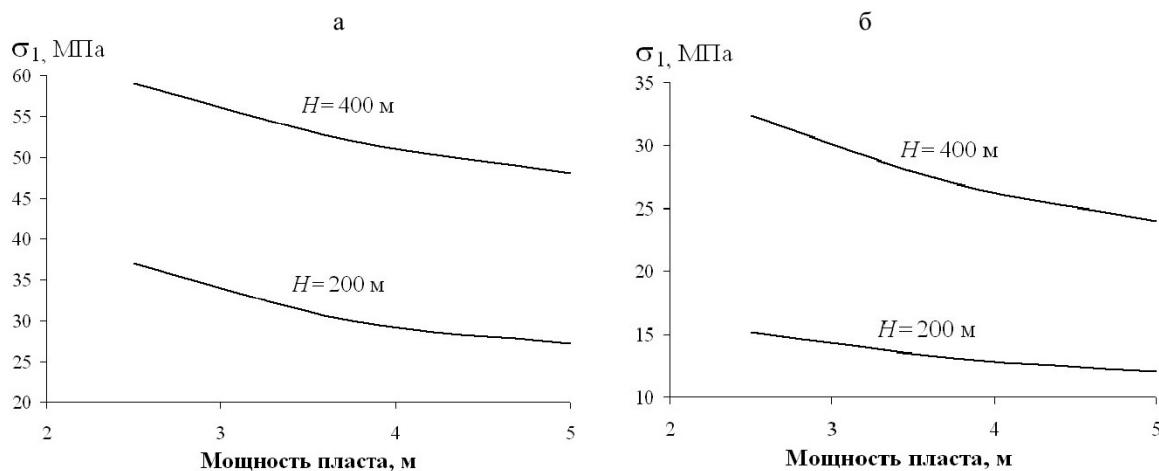


Рис. 7. Распределения напряжений вблизи очистного забоя в зависимости от мощности угольного пласта: а – при длине пролета отработки ($L_{\text{прол}}$) 100 м; б – то же, 300 м

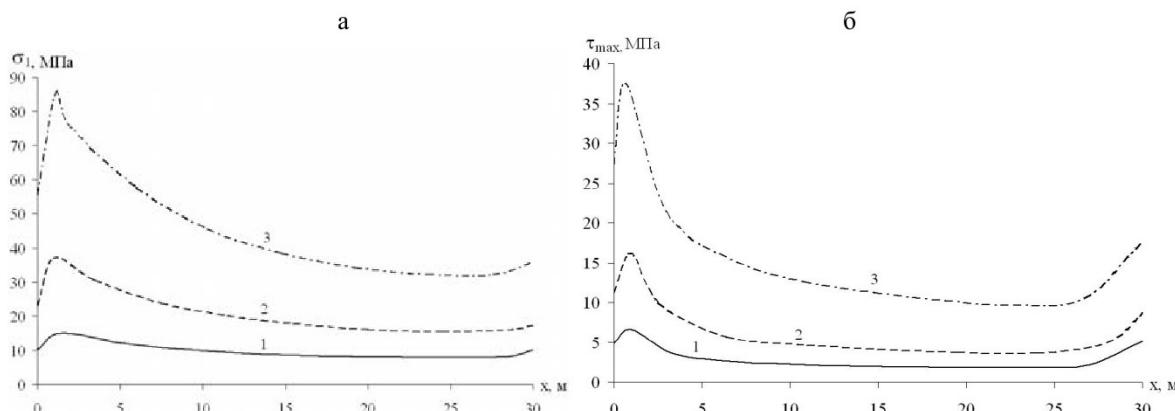


Рис. 8. Эпюры распределения напряжений в центральном сечении целика ($L_u = 30 \text{ м}$) угольного пласта прилегающего к демонтажной камере в зависимости от пролета отработки ($L_{\text{прол}}$) при $H = 200 \text{ м}$, $m = 2,5 \text{ м}$: а – σ_1 ; б – τ_{\max} ; 1, 2, 3 – соответственно при $L_{\text{прол}} = 100, 300$ и 600 м

Оценка влияния выемочной мощности угольного пласта на формирование опорного давления, его концентрацию и величину в призабойной области в зависимости от глубины и длины пролета отработки показана на рис. 7.

Полученные данные свидетельствуют о том что, с уменьшением вынимаемой мощности угольного пласта с 5 до 2,5 м при разной глубине и длине пролета отработки, концентрация опорного давления возрастает в среднем на 20-35%. Следовательно, увеличение мощности пласта можно использовать для предотвращения опасных проявлений горного давления.

Уровень действующих напряжений в сечении целика в зависимости от длины пролета отработки представлен на рис. 8. Анализ результатов расчетов показал, что увеличение $L_{\text{прол}}$ с 100 до 600 м ведет к росту напряжений в призабойной зоне более чем в 4 раза. Наличие зон растяжения вокруг выработанного пространства свидетельствует об интенсивном разрушении пород. Следует отметить, что наиболее благоприятная ситуация наблюдается в начальной стадии разработки пласта (участок монтажной камеры). Дальнейшее разви-

тие фронта добычных работ сопровождается ростом нагрузки на забой лавы. При этом максимальная концентрация напряжений наблюдается в районе демонтажной камеры и зависит от длины выемочного участка. В этих условиях необходимо осуществлять комплекс мероприятий, направленных на снижение опасного влияния геомеханических процессов на выработки.

В мировой практике существуют достаточное количество методов и способов управления горным давлением (передовое торпедирование, гидромикроторпедирование и т. д.), несмотря на опытную длительную проверку, они не дают в большинстве случаев положительных результатов, так как обладают, помимо частных, общими недостатками – неравномерностью и неуправляемостью разупрочнения. Одним из прогрессирующих и перспективных способов разупрочнения труднообрушающейся кровли является метод направленного гидроразрыва (НГР) разработанный в Институте горного дела СО РАН [7]. С помощью метода достигается равномерное и направленное изменение механических свойств массива, исключение площадного зависания кровли и резких ди-

намических последствий на механизированные комплексы, а также обеспечивается сохранность горных выработок в зоне ведения очистных работ.

В связи с этим широкомасштабное внедрение и освоение метода НГР позволит эффективно решать задачи борьбы с динамическими проявлениями горного давления, которые представляют большую опасность для жизни шахтеров и нано-

сят ощутимый материальный ущерб угольной промышленности.

Выполненный анализ НДС массива в районе демонтажной камеры позволил сделать следующие выводы. Основное влияние на интенсивность развития горного давления оказывают глубина горных работ, размер пролета отработки и мощность пласта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Катков, Г.А., Журило, А.А. О механизме формирования горного давления и взаимодействия механизированных крепей с труднообрушаемой кровлей // Вопросы горного давления. – 1979. – вып. 37.
2. Христианович, С.В., Кузнецов, С.В. О напряженном состоянии горного массива при проведении очистных работ // Горное давление, сб. LIX. Ленинград, ВНИМИ, 1965. с. 95-111.
3. Жданкин, А.А., Жданкин, Н.А. Пространственное напряженно-деформированное состояние массива в районе сопряжений выемочных штреков с лавой // ФТПРПИ. - 1985. - № 4.
4. Зенкевич, О. Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975.
5. Курленя, М.В. Техногенные геомеханические поля напряжений / М.В. Курленя, В.М. Серяков, А.А. Еременко. – Новосибирск: Наука, 2005. – 264 с.
6. Павлова, Л.Д. Геометрическая дискретизация на конечные элементы, конгруэнтные по форме и размерам, структурным блокам разрушающегося углеродистого массива / Л. Д. Павлова // Горный информационно - аналитический бюллетень. – 2004. – № 4. – С. 94–97.
7. Клишин, В.И. Адаптация механизированных крепей к условиям динамического нагружения. – Новосибирск: Наука, 2002. – 200 с.

□ Авторы статьи:

Никольский
Александр Михайлович
- г главный инженер проек-
тов (Сибирский горный
институт проектирования
шахт, разрезов и обогати-
тельных фабрик (ОАО
«Сибгипрошахт», г. Ново-
сибирск))
E-mail: nikosya@mail.ru

Неверов
Александр Алексеевич
-канд. техн. наук,
ведущий инженер
(Сибирский горный инсти-
тут проектирования шахт,
разрезов и обогатительных
фабрик (ОАО «Сибгипро-
шахт» , г. Новосибирск))
E-mail:
neverovaa_79@mail.ru

Неверов
Сергей Алексеевич
-канд. техн. наук,
ведущий инженер
(Сибирский горный инсти-
тут проектирования шахт,
разрезов и обогатительных
фабрик (ОАО «Сибгипро-
шахт» , г. Новосибирск))
E-mail:
neverova_79@mail.ru

Шинкевич
Максим Валерьевич
- младший научный со-
трудник Института угля и
углемеханики СО РАН
E-mail :
gas_coal@kemsc.ru