

УДК 622.28.043.22

Исследование нагружения крепи очистного комплекса в сложных горно-геологических условиях

Раскрыт механизм формирования запредельных нагрузок на механизированную крепь очистных комплексов в процессе посадки основной кровли при отработке пологих угольных пластов в условиях обводненного углевмещающего массива слабых пород.

Ключевые слова: механизированная крепь, пологие угольные пласты, очистные работы, расчет.

Контактная информация: v_domna@yahoo.com

На шахте «Самарская» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь» при отработке пласта с₅ 539-й лавой установлены особенности, связанные с периодичностью посадки основной кровли и двумя аварийными ситуациями посадки на «жесткую базу» комплекса 1МКД-80:

- при посадке основной кровли формировалась нагрузка, приближающаяся к несущей способности секции механизированной крепи, о чем свидетельствовала задвижка штоков гидростоек до минимально допустимого уровня остающихся «зеркал» поверхности высотой 50–70 мм по заднему ряду стоек и 10–30 мм – по переднему. В то же время отдельные визуальные наблюдения указывают на развитие зоны обрушения высотой до 5–7 м, вес пород внутри которой составляет 120–190 кПа, что в 2,6–4,2 раза меньше несущей способности крепи, которая по технической характеристике комплекса составляет 500 кПа;

- стабильно проявлялось преимущественное нагружение переднего ряда стоек секций как при посадке основной кровли, так и при двух аварийных ситуациях посадки кровли на жесткую базу механизированного комплекса. Об этом свидетельствовал прогиб перекрытий секций в районе его шарнирного соединения с консолью, а также повсеместное уменьшение (вплоть до нуля) высоты «зеркал» поверхности штоков в переднем ряду стоек по сравнению с задним рядом. Такое поведение секций механизированной крепи указывало на формирование косонаправленной на забой нагрузки со стороны опускающейся кровли с концентрацией в области переднего ряда стоек;

- в бортовом и сборном штреках деревянные стойки органной крепи наклонены на забой в местах посадки основной кровли, что также подтверждало проявление косонаправленной нагрузки в сторону забоя в районе сопряжения лавы со штреками как в действующей 539-й лаве, так и в ранее отработанной 537-й;

- отмечался относительно легкий процесс восстановления секций механизированной крепи в рабочее состояние (съем с жесткой базы) после аварийных посадок, что может быть косвенным доказательством того, что высота обрушения основной кровли достаточно ограничена и после разборки породы над перекрытиями секций они относительно легко раздвигались (достаточно развиваемого усилия распора) в исходное положение;



В. И. БОНДАРЕНКО,
доктор техн. наук
(Национальный горный университет)



И. А. КОВАЛЕВСКАЯ,
доктор техн. наук
(Национальный горный университет)



М. В. БАРАБАШ,
инж.
(ООО «ДТЭК»)



В. Г. ЧЕРВАТЮК,
канд. техн. наук
(ООО «ДТЭК»)

- наблюдались закономерности изменения водопритока: между посадками основной кровли (в том числе и после посадки крепи на жесткую базу) водоприток был относительно небольшой (на уровне 3–5 м³/ч) в виде капеза воды, достаточно равномерном по всей длине лавы; перед посадкой основной кровли водоприток снижался до 2 м³/ч и менее; после посадки основной кровли водоприток восстанавливался до прежнего уровня, т. е. до 3–5 м³/ч; после посадки на жесткую базу водоприток резко возрастал до 40–50 м³/ч и был сосредоточен в районе сопряжения со сборным штреком;

- посадка на жесткую базу регулярно начиналась с верхних секций, расположенных у бортового штрека, что свидетельствует о влиянии выработанного пространства отработанной 537-й лавы.

С помощью существующих представлений о полнейшем обрушении непосредственной и основной кровли угольного пласта невозможно объяснить в полной мере указанные факты и явления, а именно:

- при весе обрушающихся пород 24 – 38 % несущей способности механизированной крепи происходит ее посадка на жесткую базу; при этом отсутствует зависание протяженных консолей слабых породных слоев основной кровли;

- трудоемкость и продолжительность восстановления рабочего состояния секций после посадки на жесткую базу понижены;

- формируется косонаправленная (на забой) нагрузка на передние ряды гидростоек секций и органической крепи выемочных штреков;

- регулярно снижается водоприток перед посадкой на жесткую базу (с учетом обводненности кровли с резким увеличением водопритока в 10 раз и более после посадки).

Возникающие вопросы указывают на то, что авторы столкнулись с новым явлением в процессах сдвижения надугольной толщи слабых обводненных пород, которое требует обоснования и разработки новой геомеханической модели процесса, объясняющей весь комплекс выявленных фактов.

Согласно горно-геологическому прогнозу отработки 539-й лавы на участке активизации проявлений горного давления (первая посадка на жесткую базу) в основной и непосредственной кровле залегает аргиллит с периодическим частичным замещением алевролитом общей мощностью до 7,3 м. С учетом высокой вероятности обрушения пласта с₅¹ в выработанном пространстве 539-й лавы максимальная высота посадки основной кровли достигает 7,6 м, которая своим весом создает нагрузку на секции крепи. Структура пород надугольной толщи в пределах указанной высоты в соответствии с горно-геологическим прогнозом следующая:

ложная кровля мощностью 0,28–0,4 м – углистый аргиллит удельным весом 14,8 кН/м³;

непосредственная кровля – аргиллит (с частичным замещением алевролитом на отдельных участках) мощностью до 3 м и удельным весом 25–26,6 кН/м³;

основная кровля – аргиллит (также с частичным замещением алевролитом) мощностью до 4,3 м и удельным весом 25–26,6 кН/м³;

пласт с₅¹ замещается углистым аргиллитом мощностью 0,25 м и удельным весом 14,8 кН/м³.

Тогда максимальное гидростатическое давление столба пород обрушающейся надугольной толщи не превышает

$$\sigma_y^{\max} = (0,35 + 0,25) \cdot 14,8 + (7,6 - 0,35 - 0,25) \cdot 25,8 = 189,5 \text{ кПа},$$

что составляет около 38 % несущей способности крепи. Эти данные соответствуют также результатам анализа состояния механизированной крепи.

Согласно существующим представлениям о сдвиге пород надугольной толщи в выработанное пространство процесс разделяют на две зоны (в пределах интересующей авторов высоты): беспорядочного обрушения $h_{об}$ и шарнирно-блокового сдвижения $h_{ш}$. Высоту зоны обрушения $h_{об}$ определяют из условия подпора опускающихся пород основной кровли разрыхляющимися в объеме породами ложной, непосредственной и частично основной кровли:

$$h_{об} = m - h_c / (k_p - 1) \approx 1,6...2,6, \quad (1)$$

где $m = 0,98...1,05$ м – фактическая вынимаемая мощность пласта;

$h_c = (0,5...0,6)m$ – свободный прогиб (без обрушения) породных слоев основной кровли, м;

$k_p = 1,2...1,25$ – коэффициент разрыхления слабых глинистых сланцев при вынимаемой мощности пласта примерно 1 м.

Тогда высота зоны шарнирно-блокового сдвижения составит $h_{ш} = 7,6 - h_{об} = 5...6$ м, в пределах которой по плоскостям ослаблений возможно расслоение основной кровли на несколько породных слоев. Данные соответствуют наблюдениям и результатам исследований процессов сдвижения надугольной толщи на пологих пластах Донбасса.

С помощью традиционной схемы процесса сдвижения невозможно объяснить причины посадки крепи на жесткую базу, так как вес отслоившихся пород в несколько раз меньше ее несущей способности. По мнению авторов, изучать новое явление многократного увеличения горного давления с изменением его вектора в сторону забоя нужно, учитывая особенности строения и свойств углевещающей толщи:

отсутствует сколько-нибудь существенное зависание консолей породных слоев основной кровли из-за их низких прочностных характеристик, особенно в водонасыщенном состоянии;

в кровле пласта c_5^1 размещается ряд водоносных малоомощных угольных пластов;

непосредственную и основную кровлю составляют глинистые породы, склонные к размоканию и увеличению в объеме («набуханию»), а обширному распространению этого процесса, по данным горно-геологического прогноза, способствует интенсивная трещиноватость – от 5–8 до 10–17 трещин на 1 м.

Таким образом, на геостатическое горное давление $\sigma_y(\gamma H)$ накладывается дополнительная составляющая $\sigma_y(\Delta)$ от «набухания» (относительное увеличение объема обозначим Δ , что тождественно объемной деформации пород) водонасыщенных аргиллитов и алевролитов непосредственной и основной кровли, отражающей следующие особенности:

впереди лавы прогнозируется стабильно равномерное вертикальное давление $\sigma_y(\Delta)$, обусловленное условиями «стесненного» деформирования породы с ограничением перемещений ее увеличивающегося объема в каком-либо направлении пространства. При этом возникают также дополнительные горизонтальные напряжения $\sigma_x(\Delta)$, которые способствуют частичному закрытию трещин (смыкание их берегов), что ограничивает водоприток и степень «набухания» пород кровли;

над рабочим пространством лавы происходит изгиб слоев кровли и некоторое раскрытие трещин, что увеличивает водоприток, объем «набухающих» пород и давление расширяющейся во все стороны породы. Этому сопротивляются: по горизонтали – нетронутый массив впереди лавы, а со стороны выработанного пространства обрушенные породы и силы трения τ по плоскостям напластований (возникают от действий вертикального горного давления); по вертикали – вышележащие породы кровли и только в направлении рабочего пространства лавы перемещению пород препятствует только крепь. Сопротивление крепи в среднем на порядок меньше сил горного давления, и процесс сдвижения по законам природы направляется в сторону самого слабого элемента геомеханической системы;

позади очистного забоя дополнительные составляющие вертикального $\sigma_y(\Delta)$ и горизонтального $\sigma_x(\Delta)$ горного давления снижаются, так как появляется возможность многостороннего расширения «набухшей» породы: вверх – в раскрывшиеся полости расслоения породных слоев, вниз – в уплотняющиеся обрушенные породы, по горизонтали – более интенсивная вертикальная трещиноватость с частичным раскрытием трещин.

Как видим, суммарное воздействие геостатического горного давления $\sigma_y(\gamma H)$ и составляющей $\sigma_y(\Delta)$ «набухания» водонасыщенных пород кровли значительно выше и в этой связи обоснуем данную концепцию совместного воздействия геомеханических и гидродинамических процессов с учетом явлений и фактов, установленных в 539-й лаве и примыкающих участках шахтного поля.

Прежде всего оценим порядок значений геостатического давления $\sigma_y(\gamma H)$ и дополнительных напряжений $\sigma_y(\Delta)$, $\sigma_x(\Delta)$ от расширяющейся в объеме породы при ее водонасыщении. На рассматриваемом участке 539-й лавы глубина H горных работ составляет 160–180 м. Принимая средневзвешенный удельный вес вышележащего массива $\gamma = 25 \text{ кН/м}^3$, получим вертикальное давление нетронутого массива $\sigma_y = \gamma H = 4 \dots 4,5 \text{ МПа}$.

При «стесненных» условиях деформирования, т. е. невозможности расширения элементарного объема породы, размещенного в массиве, классическая линейная теория упругости указывает на связь между напряжениями $\sigma_{y,x}(\Delta)$ и относительным увеличением объема Δ при «набухании» водонасыщенных пород:

$$\sigma_{y,x}(\Delta) = \Delta E / [3(1-2\mu)], \quad (2)$$

где Δ – относительное увеличение объема при водонасыщении;

E и μ – модуль деформации и коэффициент Пуассона породы.

На основании формулы (2) построены графики функции $\sigma_{y,x}(\Delta)$ при $E = 10^3 \text{ МПа}$ (рис. 1). Здесь заведомо принят пониженный в несколько раз модуль деформации аргиллитов и алевролитов для учета влияния их водонасыщения. Как видим, дополнительные напряжения $\sigma_{y,x}(\Delta)$ – значения одного порядка с геостатическим давлением, а если учесть, что при размокании аргиллитов и алевролитов увеличиваются их пластические свойства

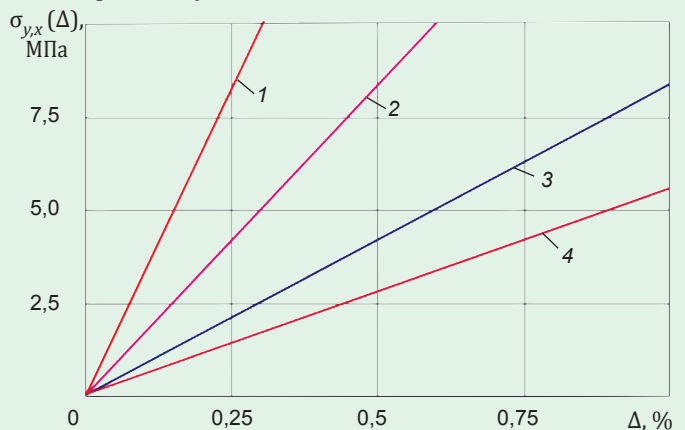


Рис. 1. Связь напряжений $\sigma_{y,x}(\Delta)$ стесненного деформирования при водонасыщении аргиллита (алевролита) с его относительным увеличением объема Δ при разных значениях коэффициента Пуассона μ : 1 – $\mu = 0,45$; 2 – $\mu = 0,4$; 3 – $\mu = 0,3$; 4 – $\mu = 0,2$.

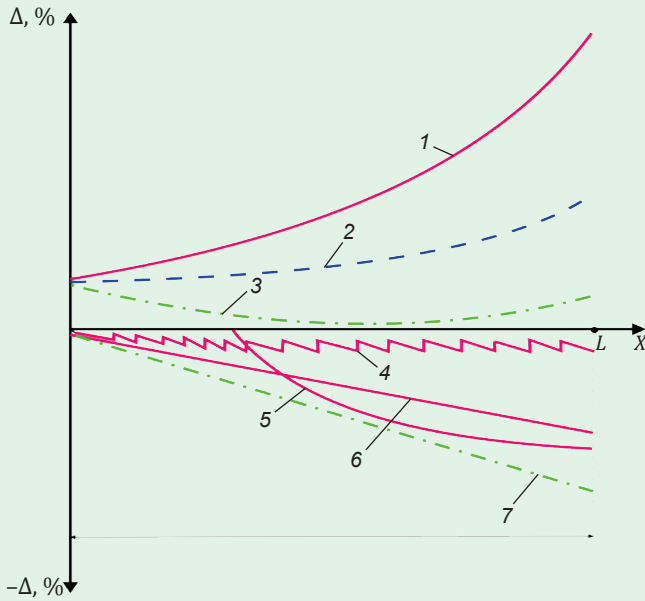


Рис. 2. Качественные закономерности изменения по мере отхода X лавы составляющих увеличения и компенсации объемов пород кровли при их водонасыщении и шаге посадки основной кровли L : 1 – увеличение объема при водонасыщении; 2 – результирующая без компенсационных полостей; 3 – результирующая с компенсационными полостями; 4 – податливость крепи; 5 – уплотнение обрушенных пород; 6 – закрытие кливажных трещин; 7 – компенсационные полости.

(коэффициент μ возрастает) и объемное расширение может составить несколько процентов, то формируется новый, достаточно высокий, уровень горного давления, многократно превышающий геостатическое γH .

Данный результат – первое подтверждение того, что формирование нагрузок на крепь, многократно превышающей вес пород внутри зоны обрушения при посадке основной кровли, вполне реально. Безусловно, «стесненные» условия «набухания» водонасыщенного аргиллита

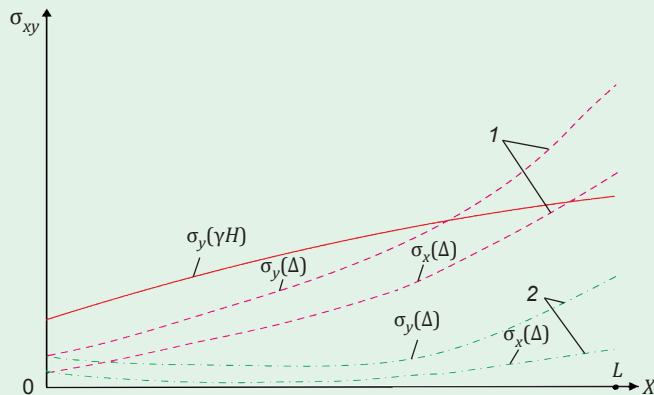


Рис. 3. Качественные закономерности изменения составляющих горного давления σ_{xy} по мере отхода лавы: без компенсационных (1) и с компенсационными (2) полостями.

идеализированы, но если оставить только малую долю этого давления в десятки мегапаскалей, то она все равно сравнима с несущей способностью крепи, составляющей 0,5 МПа.

Для раскрытия других особенностей процесса сдвижения надугольной толщи рассмотрим явление «набухания» пород при подвигании очистного забоя (по координате X восстания пласта), которое схематически показано на рис. 2. Кривая 1 характеризует развитие процесса «набухания» породного слоя кровли по мере подвигания очистного забоя.

Под термином «развитие» понимается, что относительный объем Δ увеличивается, во-первых, во времени, во-вторых, – с увеличением водонасыщенности слоя, которая растет в промежутке времени между посадками основной кровли. Так, впереди лавы в зоне опорного давления повышенные вертикальные σ_y и горизонтальные σ_x напряжения в значительной степени закрывают берега трещин, уменьшая водоприток, следовательно, и «набухание» глинистых пород. Над очистным забоем и позади него трещины раскрываются вследствие прогиба и оседания породных слоев – водоприток и «набухание» породы увеличиваются и все это происходит во время воздействия воды в процессе подвигания забоя на шаг L посадки основной кровли. В результате по координате X интенсификация «набухания» возрастает нелинейно.

Кроме того, есть факторы, частично компенсирующие увеличение объема водонасыщенных пород кровли:

закрытие кливажных и техногенных (в процессе изгиба) трещин в породном слое, когда объем свободных полостей растет примерно пропорционально длине его пролета, т. е. линейно с расстоянием X отхода лавы (кривая 6, см. рис. 2);

уплотнение позади лавы обрушенных пород под воздействием горного давления. Но по мере их усадки растет сопротивление. Как показывают исследования свойств обрушенных пород Западного Донбасса, их уплотнение практически прекращается (кривая 5, см. рис. 2) при нагрузке $\sigma_y = 10...12$ МПа, т. е. в несколько раз превышающей геостатическое давление всех вышележащих пород, а при $\sigma_y = \gamma H$ усадка пород зоны беспорядочного обрушения прекращается гораздо раньше;

податливость секций крепи (кривая 4, см. рис. 2), но она влияет на компенсацию «набухания» кровли несущественно, так как при ритмичной работе комплекса постоянно «входит в массив», а некоторое проседание непосредственной кровли легко компенсируется регулированием вынимаемой мощности пласта.

Результат развития «набухания» породных слоев кровли и действия компенсирующих факторов – результирующая кривая 2 (см. рис. 2), особенность которой в том, что по мере отхода забоя лавы от предыдущей по-

садки основной кровли рост излишнего объема водонасыщенных пород происходит медленно, а при приближении забоя к следующей посадке основной кровли действие компенсирующих факторов ослабевает и интенсивно растет объем водонасыщенной породы. Это способствует активному росту составляющих $\sigma_y(\Delta)$ и $\sigma_x(\Delta)$ горного давления, обусловленных обводнением кровли (рис. 3). В то же время геостатическая составляющая $\sigma_y(\gamma H)$, напротив, выполаживается с увеличением отхода лавы, так как основная часть пролета слоев ложится на обрушенные породы. Поэтому, если в начале отхода лавы от предыдущей посадки основной кровли нагрузку на крепь формирует преимущественно геостатическое давление $\sigma_y(\gamma H)$, то при подходе лавы к следующей посадке главной является составляющая $\sigma_y(\Delta)$ «набухания» водонасыщенных пород (см. рис. 3). В сумме составляющие $\sigma_y(\gamma H)$ и $\sigma_y(\Delta)$ могут превысить несущую способность крепи, что объясняет причину ее посадки на жесткую базу.

Аналогично можно объяснить другие факторы и явления, наблюдаемые в 539-й лаве (рис. 4). Периодичность изменения водопритока при посадке основной кровли, когда она сопровождается посадкой крепи на жесткую базу, объясняется так. Стабилизация водопритока на уровне 3–5 м³/ч после отхода лавы от предыдущей посадки обусловлена некоторым раскрытием трещин при изгибе и оседании слоев кровли позади лавы. В этот период «набухания» водонасыщенных пород в значительной степени компенсируется указанными ранее факторами и горизонтальные напряжения $\sigma_x(\Delta)$ недостаточны для закрытия трещин. Перед посадкой основной кровли резко возрастает напряженность пород над лавой, в том числе и горизонтальных напряжений $\sigma_x(\Delta)$, которые частично закрывают трещины в основной кровле над лавой и поэтому водоприток снижается до 2 м³/ч и менее. При обрушении основной кровли, сопровождающемся посадкой на жесткую базу, скопившаяся вода проникает в забой и выработанное пространство по обширным трещинам и разломам с резким увеличением водопритока до 40–50 м³/ч.

Косонаправленный на забой вектор горного давления в период посадки основной кровли, особенно при посадке комплекса на жесткую базу, обусловлен совместным действием концентраций вертикальных $\sigma_y(\Delta)$ и горизонтальных $\sigma_x(\Delta)$ напряжений в кровле пласта (см. рис. 4) над лавой. Каждый породный слой основной кровли находится под действием высоких сжимающих горизонтальных напряжений $\sigma_x(\Delta)$ и может потерять устойчивость. Из равновесного состояния кровлю выводит концентрация вертикальной нагрузки $\sigma_y(\Delta)$. Прогиб направлен по результирующей горного давления, примерно совпадающей с расположением переднего ряда стоек крепи.

Причина относительно облегченного процесса восстановления рабочего состояния секций крепи сле-

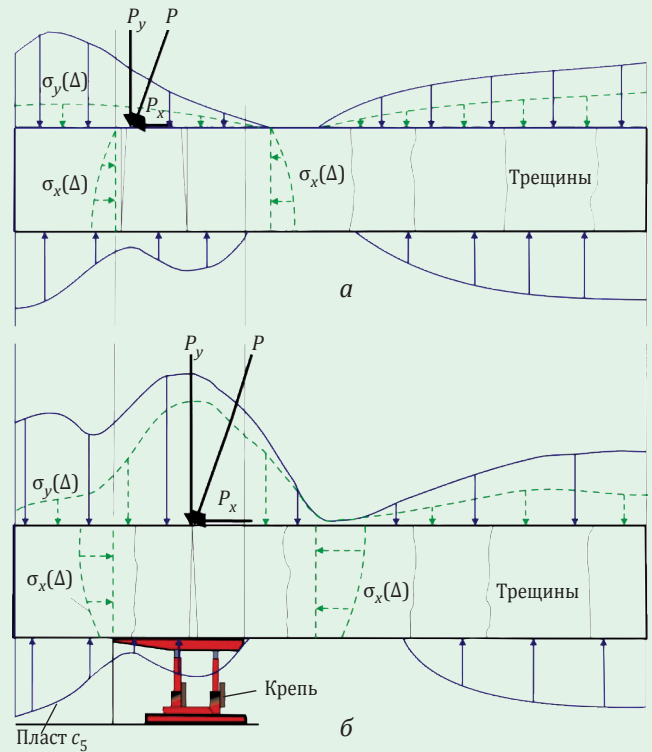


Рис. 4. Схема нагружения слоя основной кровли: а и б – после предыдущей посадки и перед посадкой основной кровли; P_y , P_x и P – силы, действующие по вертикали, горизонтали и результирующая.

дующая. Посадка на жесткую базу сопровождается определенной разгрузкой кровли от напряжений $\sigma_y(\Delta)$ и $\sigma_x(\Delta)$. При некотором разбурировании обрушенных пород над секцией появляются дополнительные полости, компенсирующие «набухание» пород, и напряжения исчезают. Остается только геостатическая составляющая горного давления $\sigma_y(\gamma H)$, которая (как указывалось ранее) гораздо меньше не только несущей способности крепи, но и усилий распора секции, может без существенных затруднений принять исходное рабочее положение поддержания кровли с необходимыми зазорами для прохода комбайна и передвижки секций.

Выводы. Исследование нового явления в формировании высокой, косонаправленной и превышающей несущую способность механизированной крепи нагрузки, обусловленной «набуханием» в замкнутом объеме обводненных слабых пород основной кровли при ее посадке, в геомеханике сдвижений надугольной толщи – отправная точка для выполнения комплекса шахтных наблюдений, лабораторных исследований на моделях из эквивалентных материалов и компьютерного моделирования процесса в целях выработки рекомендаций по безаварийной отработке пологих угольных пластов в сложных горно-геологическими условиями.