

В.И. Бондаренко, Г.А. Симанович, А.В. Вивчаренко, В.Г. Черватюк

## К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ НАГРУЗКИ НА КРЕПЬ ОЧИСТНОГО КОМПЛЕКСА

*Исследованы закономерности нагружения крепи очистных комплексов в тонкослоистом массиве слабых пород.*

### ДО ПИТАННЯ ФОРМУВАННЯ НАВАНТАЖЕННЯ НА КРІПЛЕННЯ ОЧИСНОГО КОМПЛЕКСУ

*Досліджено закономірності навантаження кріплення очисних комплексів у тонкошаруватому масиві слабких порід.*

### ON THE QUESTION OF LOAD FORMATION ON STOPING COMPLEX SUPPORT

*Regularities of support loading of stoping complexes in foliated massif of poor rocks are analyzed.*

#### ОБОСНОВАНИЕ ПОСТАНОВКИ ЗАДАЧИ

В существующих методах прогноза развития нагрузки на механизированную крепь, где основным влияющим фактором является длина  $l_3^i$  породной консоли [1], главное внимание уделяется модулю деформации  $E_i$  породного слоя. Здесь необходимо уточнение величины  $E_i$  в плане общеизвестной физической неоднородности породы в зависимости от знака прилагаемой нагрузки: например, в работе [2] утверждается, что модуль деформации породы на растяжение  $E_i^P$  в 8 – 10 раз меньше модуля деформации породы на сжатие  $E_{сж}^P$ , и этот факт большинство исследователей связывают с наличием трещиноватости и слоистости углевмещающей толщи пород Донбасса. Учет такой «разномодульности» породы (силовой анизотропии) рекомендуют производить введением так называемого приведенного модуля дефор-

мации, который обозначим через  $E_i$ , а его величина, равная

$$E_i = \frac{4E_{сж}^i \cdot E_p^i}{\left(\sqrt{E_{сж}^i} + \sqrt{E_p^i}\right)^2}$$

будет, примерно, в четыре раза меньше (при вышеуказанном соотношении  $\frac{E_p^i}{E_{сж}^i}$  на растяжение и сжатие), чем  $E_{сж}^i$ , определяемый в лабораторных условиях.

Прочностные характеристики пород (сопротивление сжатию  $\sigma_{сж}^i$  и растяжению  $\sigma_p^i$ ), как правило, редко учитываются при описании процессов сдвижения и обрушения слоев кровли над очистным забоем и в выработанном пространстве. Здесь при несущественном сопротивлении растяжению литологических разностей слабых пород, например Западного Донбасса,

целесообразно ограничиться лишь сопротивлением пород сжатию  $\sigma_{сж}^i$ , тем более, что эта характеристика достаточно исследована в рассматриваемом регионе.

### ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ НАГРУЖЕНИЯ КРЕПИ ОЧИСТНЫХ КОМПЛЕКСОВ

Оценка влияния модуля деформации  $i$ -го слоя пород на процесс его изгиба и опускания выполнена с использованием схемы на рис. 1. Повышенный модуль деформации  $E_i$  увеличивает жесткость  $i$ -го слоя и уменьшает величину его прогиба  $y_i(x)$ ; это обуславливает уменьшение высоты  $y_{i+1}(x)$  полости на верхней поверхности слоя и увеличение высоты  $y_{i-1}(x)$  полости на нижней его поверхности при прочих равных условиях. Как следствие, точка 1 перемещается вправо с увеличением нагрузки  $q_{i+1}(x)$  на породную консоль, а точка 2 перемещается влево, способствуя снижению реакции  $q_{i-1}(x)$ . В результате изгибающий момент  $M_i$  возрастает (аналогично изменению  $M_i$ , качественно представленному линиями на рис. 2, б), а его предельное значение  $M_{об}^I$  остается постоянным по причине неизменных других условий. Тогда происходит процесс разрушения и опускания консоли длиной  $(l_2^i)^I$ , возрастание  $M_i$  на ее длине до предельного значения  $M_{об}^I$  с последующим обрушением и поэтапное уменьшение длины консоли сначала до  $(l_2^i)^{III}$ , а затем до  $(l_2^i)^{IV}$ . Таким образом, при увеличении  $E_i$  повышенная жесткость слоя генерирует увеличение его нагруженности (классический механизм деформирования неоднородных систем), что обуславливает уменьшение длины консоли. Этот вывод находится в полном согласии с энергетическими представлениями в геомеханических

системах: увеличивающаяся потенциальная энергия состояния  $i$ -го породного слоя (повышенные напряжения и деформации) должна компенсироваться повышенной кинетической энергией в процессе разрушения, которая прямо пропорциональна объему опускающихся пород, следовательно, обратно пропорциональна длине  $l_2^i$  зависящей консоли.

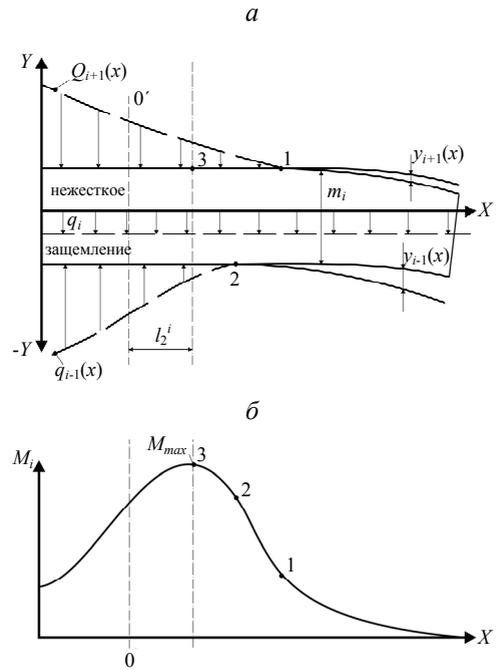


Рис. 1. Схема нагружения (а) отдельного слоя кровли над очистным забоем и соответствующая эпюра (б) изгибающего момента

В противоположном случае пониженного модуля деформации  $E_i$   $i$ -го породного слоя его увеличенный прогиб способствует росту высоты полости  $y_{i+1}(x)$  на верхней поверхности и снижению высоты полости  $y_{i-1}(x)$  на нижней поверхности слоя (см. рис. 1, а). Это вызывает (как уже было отмечено ранее) перемещение точки 1 влево с уменьшением нагрузки  $q_{i+1}(x)$ , а точки 2 – вправо с увеличением реакции

$q_{i-1}(x)$ . В результате изгибающий момент  $M_i$  по длине консоли растет менее интенсивно, что обуславливает следующие варианты развития процесса. Первый – максимальный изгибающий момент  $M_{max}$  в точке  $3^{III}$  (см. рис. 2, б) больше предельной величины  $M_{об}^I$ , и разрушение консоли происходит в точке  $4^{III}$  с образованием ее вылета длиной  $(l_2^i)^{III}$ ; дальнейший рост изгибающего момента  $M_i$  от точки  $1^{IV}$  отличается низкой интенсивностью и его максимум  $M_{max}$  в точке  $3^{IV}$  меньше предельной величины  $M_{об}^I$  – тогда вновь образованная устойчивая консоль характеризуется повышенной длиной  $(l_2^i)^{III}$ . Второй вариант – модуль деформации  $E_i$   $i$ -го породного слоя весьма низок и градиент роста изгибающего момента до такой степени невелик, что консоль будет разрушаться в точке 3 действия максимума изгибающего момента  $M_{max}$  (см. рис. 1, б), располагающегося на расстоянии  $l_2^i$ , определяемом (в том числе) положениями точек 1 и 2. В нашем случае точка 2 будет более удалена от нежесткого защемления, чем точка 1; следовательно, точка 3 максимума  $M_{max}$  также будет удаляться от нежесткого защемления и длина  $l_2^i$  консоли увеличивается. Таким образом, сделан вывод об увеличении длины консоли  $l_2^i$   $i$ -го породного слоя при снижении его модуля деформации  $E_i$  за счет того, что более податливый слой опирается на нижележащие породы и благодаря их реакции устойчивость  $i$ -го слоя повышается.

Данный вывод (при низком  $E_i$ ) требует осмысления в части того, что, на первый взгляд, легко деформирующийся породный слой должен сразу же обрушаться с обра-

зованием консоли небольшой длины  $l_2^i$ , а контур свода формирования нагрузки принимать более вертикальное положение. Мы же утверждаем, что при низком  $E_i$  длина консоли  $l_2^i$  увеличивается, но кажущееся противоречие объясняется тем, что мы на данном этапе рассматриваем деформирование отдельного слоя, а не пород кровли как взаимодействующей системы этих отдельных слоев.

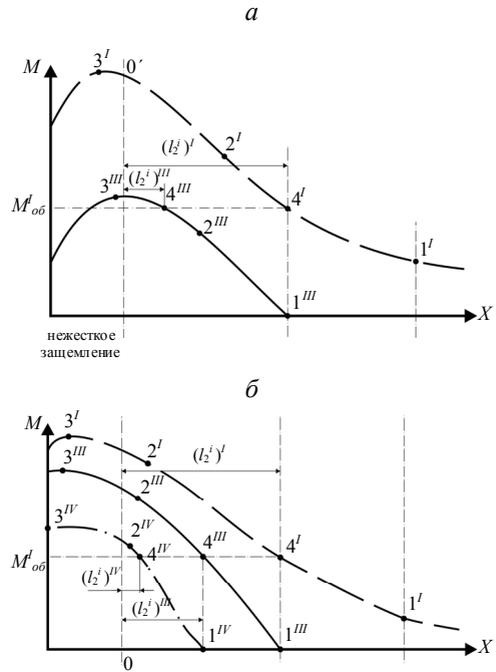


Рис. 2. Качественная эпюра изгибающего момента  $M$ , при вариантах залегания тонкослоистых пород кровли: выше  $i$ -го слоя (а); выше и ниже  $i$ -го слоя (б)

В этом плане, рассматривая надугольную толщу как взаимодействующую систему отдельных слоев, выделены несколько наиболее вероятных случаев влияния модуля деформации  $E_i$  на формирование нагрузки на механизированную крепь через параметр  $l_2^i$ . Сначала разберем «спорный» случай низкого модуля деформации

$E_i$   $i$ -го слоя: он, опускаясь на нижележащие слои, увеличивает на них нагрузку, что может привести к обрушению сформировавшихся ниже породных консолей и уменьшению их длины; это сопровождается снижением реакции  $q_{i-1}(x)$  и плеча ее равнодействующей на  $i$ -й слой, увеличением в нем изгибающего момента  $M_i$  и последующим обрушением с уменьшением устойчивой длины  $l_2^i$  консоли. Аналогичная цепная реакция может возникнуть по причине потери устойчивости консолей вышележащих породных слоев – ведь реакция  $q_{i+1}(x)$  на них  $i$ -го слоя снижается из-за его опускания. Обрушающиеся вышележащие породы увеличивают нагрузку  $q_{i+1}(x)$  на  $i$ -й слой, изгибающий момент  $M_i$  в нем растет и он также обрушается с уменьшением длины  $l_2^i$  консоли; данная цепная реакция может развиваться на нижележащие слои. Поэтому окончательный вывод закономерности влияния модуля деформации слоев можно делать на основе исследования их взаимодействия наиболее современным, учитывающим большое количество факторов, и мощным инструментом – компьютерным моделированием геомеханических процессов.

Здесь же сделана попытка раскрыть механизм влияния деформационных свойств пород кровли с тем, чтобы в компьютерной модели наиболее объективно были отражены реально протекающие процессы. В этом плане оценено влияние модулей деформации вышележащих  $E_{i+k}$  и нижележащих  $E_{i-k}$  слоев на состояние  $i$ -го породного слоя. При повышенных деформационных характеристиках вышележащих слоев они за счет более высокой жесткости испытывают пониженный прогиб  $y_{i+k}(x)$  над лавой и примыкающим выработанным пространством. Параметры  $i$ -го слоя остаются неизменными, поэтому высота полости  $y_{i+1}(x)$  увеличивается (за счет огра-

ничения прогиба вышележащих слоев) и точка 1 (см. рис. 1, а) смещается влево – нагрузка  $q_{i+1}(x)$  на  $i$ -й слой снижается. При неизменных параметрах нижележащих слоев точка 2 остается на месте, также как и не меняется величина реакции  $q_{i-1}(x)$  нижележащих слоев. Следовательно, изгибающий момент  $M_i$  снижается по величине, а его максимум в точке 3 удаляется на большее расстояние  $l_2^i$  от нежесткого защемления. В итоге, имеет место тенденция роста длины консоли  $l_2^i$  (она более разгружена) с увеличением модуля деформации  $E_{i+k}$  вышележащих слоев.

В другом варианте распределения деформационных характеристик по мощности пород основной кровли, когда повышенные модули деформации  $E_{i-k}$  имеют нижележащие породные слои, прогнозируется следующий механизм. Здесь снижается прогиб нижележащих слоев и высота  $y_{i-1}(x)$  полости уменьшается, что влечет за собой (при прочих равных условиях) перемещение точки 2 вправо и увеличение реакции  $q_{i-1}(x)$  – изгибающий момент  $M_i$  снижается, а его максимум в точке 3 перемещается вправо. То есть, повышается устойчивость породной консоли, что обуславливает рост ее длины  $l_2^i$ .

В третьем варианте повышенных деформационных характеристик как в вышележащих, так и в нижележащих породных слоях (по отношению к  $E_i$ ) сочетаются оба предыдущие варианты, то есть, снижение нагрузки  $q_{i+1}(x)$  от вышележащих слоев и увеличивающаяся реакция  $q_{i-1}(x)$  со стороны нижележащих слоев, что в совокупности приводит к значительному повышению устойчивости  $i$ -го слоя и росту длины  $l_2^i$  его консоли.

Таким образом, превышение модулей деформации  $E_{i\pm k}$  любых слоев кровли над модулем деформации  $E_i$  отдельного слоя

во всех вариантах приводит к увеличению длины  $l_2^i$  консоли. В противоположном случае ( $E_i > E_{i\pm k}$ ) повышенная жесткость  $i$ -го слоя генерирует развитие на него повышенной нагрузки  $q_{i+k}(x)$  от вышележащих слоев и пониженной реакции  $q_{i-k}(x)$  со стороны нижележащих слоев. Это способствует снижению устойчивости породной консоли (как уже было рассмотрено выше) и уменьшению ее длины  $l_2^i$ .

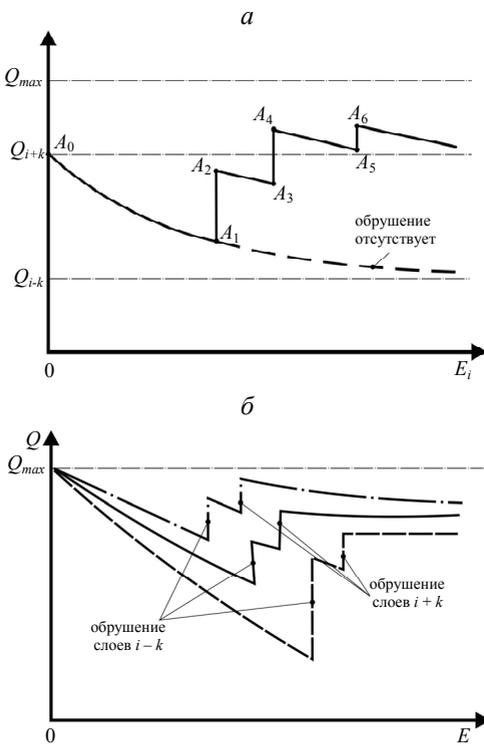


Рис. 3. Схематическое представление развития нагрузки  $Q$  на механизированную крепь в зависимости от модуля деформации  $E_i$   $i$ -го слоя (а) и модулей деформации  $E$  кровли в целом (б) при: —  $E_{i+k} = E_i$ ; ---  $E_{i-k} < E_i$ ; - - -  $E_{i+k} > E_i$

Теперь рассмотрим, как изменение деформационных характеристик слоев влияет на формирование нагрузки на механизированную крепь в соответствии со схе-

мой сдвижения надугольной толщи [1], где основное внимание уделено положению контура свода над очистным забоем. Для этого разработано схематическое представление процесса, показанное на рис. 3.

Сначала рассмотрена связь нагрузки  $Q$  на механизированную крепь с модулем деформации  $E_i$   $i$ -го слоя с учетом ранее приведенных особенностей механизма развития многостадийного нагружения и обрушения слоев кровли (см. рис. 3, а). При неизменных модулях деформации  $E_{i\pm k}$  выше и нижележащих породных слоев проследим качественное изменение нагрузки  $Q$  на механизированную крепь, начиная с экстремального значения  $E_i \rightarrow 0$  (точка  $A_0$ ), которому соответствует некоторая нагрузка  $Q_{i+k}$ . По мере увеличения  $E_i$   $i$ -й слой за счет своей растущей жесткости снижает передачу нагрузки на нижележащие слои, воспринимая на себя все большую часть нагрузки от вышележащих слоев; следовательно, нагрузка  $Q$  на крепь снижается (участок  $A_0 - A_1$ ). Такая тенденция не может длиться бесконечно, как это показано пунктирной линией, асимптотически приближающейся к величине нагрузки  $Q_{i-1}$  от нижележащих слоев; при тонко- и среднеслоистой структуре кровли в точке  $A_1$  происходит обрушение  $i$ -го слоя из-за высокой нагрузки со стороны вышележащих слоев и низкой реакции со стороны нижележащих слоев; обрушение некоторой длины консоли  $i$ -го слоя скачкообразно увеличивает нагрузку на крепь (участок  $A_1 - A_2$ ). Дальнейшее увеличение  $E_i$  опять снижает нагрузку  $Q$  (участок  $A_2 - A_3$ ), но менее интенсивно, так как зависающая, вновь образованная, консоль уже имеет меньшую длину. Тем не менее, при определенном ее значении опять происходит обрушение консоли по вышеуказанным причинам (точка  $A_3$ ) и нагрузка  $Q$  скачкообразно (участок  $A_3 - A_4$ ) уве-

личивается на вес соответствующего объема пород. Здесь нагрузка в точке  $A_4$  может превзойти изначальную величину  $Q_{i+\kappa}$  (точка  $A_0$ ), поскольку все возрастающая жесткость  $i$ -го слоя провоцирует обрушение укороченных консолей  $i$ -го слоя по ранее описанному механизму. В результате при  $E_i \rightarrow \infty$  длина зависающей консоли стремится к нулю и весь объем  $i$ -го слоя, а также повышенная часть вышележащих пород участвуют в формировании нагрузки на механизированную крепь, которая приближается к теоретически максимальному значению  $Q_{max}$ .

Теперь перейдем к рассмотрению закономерности влияния модулей деформации  $E$  всех породных слоев основной кровли на формирование нагрузки  $Q$  на механизированную крепь (см. рис. 3, б). При однородной кровле (модуль деформации всех слоев одинаков  $E_{i\pm\kappa} = E$ , сплошная линия) повышение деформационных свойств одновременно всех слоев снижает интенсивность их опускания и, соответственно, нагрузку на крепь до момента обрушения нижней части слоев – нагрузка скачкообразно возрастает. При этом со стороны нижележащих слоев отпор исчезает на участке обрушившихся консолей и устойчивость вышележащих слоев снижается; при дальнейшем росте  $E$  происходит обрушение и вышележащих слоев – снова нагрузка резко возрастает и цикл закономерности  $Q(E)$  повторяется. Во втором варианте пониженного модуля деформации нижележащих слоев ( $E_{i-\kappa} < E$ , пунктирная линия) зависимость  $Q(E)$  более интенсивно снижается на первом участке, так как менее жесткие нижележащие слои формируют основную долю нагрузки, передаваемой более жесткими вышележащими слоями. Достигнув некоторой предельной длины (большей, чем при однородных породах за счет своей податливости), консоли нижележащих слоев обрушаются в первую очередь и вес части длины пород-

ной консоли передается на крепь – нагрузка  $Q$  скачкообразно возрастает; при этом снижается реакция на вышележащие слои, они переходят в неустойчивое состояние и также часть из них обрушается, провоцируя еще один скачок нагрузки на механизированную крепь. Далее процесс может повторяться, но общая тенденция такова, что нагрузка на механизированную крепь при  $E_{i-\kappa} < E$  все же ниже, чем при однородной кровле, так как часть более жестких вышележащих породных слоев не обрушается, с одной стороны, а, с другой – благодаря своей жесткости – эти слои передают пониженную нагрузку на крепь. В третьем варианте ( $E_{i+\kappa} > E$ , штрихпунктирная линия на рис. 3, б) первый участок зависимости  $Q(E)$  аналогичен предыдущим, но линия располагается выше остальных вариантов, так как более деформируемые вышележащие слои гораздо интенсивнее опускаются на нижележащие, нагружают последние и процесс обрушения породных консолей происходит раньше.

## ВЫВОДЫ

1. До и после стадий обрушения породных консолей нагрузка  $Q$  уменьшается с увеличением их модулей деформации  $E$  по причине ограничения прогибов более жестких породных слоев.
2. В период обрушения нагрузка скачкообразно увеличивается за счет веса объемов пород, опускающихся на крепь.
3. Процесс обрушения носит характер цепной реакции и начинается, как правило, с нижележащих слоев до такой высоты, когда наступает устойчивое состояние ближайшего вышележащего слоя на длине его пролета от груди забоя до контакта с обрушенными породами в выработанном пространстве.
4. В этом процессе залегание в основной кровле более мощной литологической разности с повышенным модулем деформации (например, песчаника) резко увели-

чивает жесткость слоя и может привести как к замыканию свода обрушения с формированием пониженной нагрузки на крепь, так и к резкому скачку нагрузки при

обрушении слоя в пределах рабочего пространства лавы и примыкающему к нему участку выработанного пространства.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковалевская И.А. Особенности сдвижений пород надугольной толи при отработке угольных пластов в Западном Донбассе / И.А. Ковалевская, Г.А. Симанович, М.С. Демидов // Школа подземной разработки: материалы междунар. научн.-практич. конф. – Д.: Лізунов-Прес, 2012. – С. 243 – 252.

2. Савостьянов, А.В. Управление состоянием массива горных пород / А.В. Савостьянов, В.Г. Клочков. – К., 1992. – 276 с.

## ОБ АВТОРАХ

Бондаренко Владимир Ильич – д.т.н., профессор, заведующий кафедрой подземной разработки месторождений Национального горного университета.

Симанович Геннадий Анатольевич – д.т.н., профессор кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.

Вивчаренко Александр Васильевич – к.т.н., директор Департамента по вопросам функционирования и реформирования угольной промышленности Министерства энергетики и угольной промышленности Украины.

Черватюк Виктор Григорьевич – к.т.н., руководитель департамента по производству дирекции по добыче угля ООО «ДТЭК».