

Г.А. Симанович, В.Г. Черватюк, В.Г. Снигур, А.В. Малыхин

## **МЕХАНИЗМ СДВИЖЕНИЯ НАДУГОЛЬНОЙ ТОЛЩИ И НАГРУЖЕНИЯ КРЕПИ ВДОЛЬ ВЫЕМОЧНОЙ ВЫРАБОТКИ ПОЗАДИ ЛАВЫ**

*Раскрыты основные особенности геомеханики сдвижения надугольной толщи пород, крепежной и охранной систем повторно используемых выемочных выработок в условиях отработки угольных пластов в Западном Донбассе.*

---

### **МЕХАНИЗМ ЗРУШЕННЯ НАДВУГІЛЬНОЇ ТОВЩИ ТА НАВАНТАЖЕННЯ КРІПЛЕННЯ ВЗДОВЖ ВИЙМКОВОЇ ВИРОБКИ ПОЗАДУ ЛАВИ**

*Розкрито основні особливості геомеханіки зрушення надвугільної товщі порід, кріпильної й охоронної систем повторно використовуваних виїмкових виробок в умовах відпрацювання вугільних пластів у Західному Донбасі.*

---

### **DISPLACEMENT MECHANISM OF ABOVE-THE-COAL STRATA AND LOADING ON SUPPORT ALONG EXTRACTION MINE WORKING BEHIND THE LONGWALL**

*Main specialties of displacement geomechanics of above-the-coal strata, supporting and protection systems of reuse extraction mine workings under conditions of Western Donbass coal seams are examined.*

---

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Шахтные измерения перемещений породного контура выемочной выработки однозначно указывают на закономерность их затухания по мере удаления лавы от рассматриваемого сечения. Если максимальный градиент прироста смещений наблюдается в районе сопряжения с лавой и может достигать десятков мм/сут, то позади лавы скорость развития перемещений затухает, и на расстоянии порядка 60 – 100 м стабилизируются проявления горного давления, о чем свидетельствует незначительный прирост перемещений породного контура выработки, составляющий в среднем десятые доли мм/сут. Процесс стабилизации нагружения крепежной и охранной конструкций на этом участке выемочных выра-

боток сам по себе, безусловно, позитивен, но здесь возникает вопрос: в каком состоянии подойдет выемочная выработка к участку стабилизации проявлений горного давления? Поэтому представляется чрезвычайно важным раскрыть механизм сдвижения надугольной толщи в окрестности выемочной выработки позади лавы как на ближнем к ней участке, так и на удалении в зоне стабилизации геомеханических процессов. Непрерывность протекания процесса сдвижения надугольной толщи во времени и пространстве обязывает учитывать предысторию ее деформирования до момента прохода лавы относительно рассматриваемого сечения выемочной выработки.

После прохода лавы активно развивается процесс послыйного обрушения пород в

первую очередь непосредственной, а затем и основной кровли с образованием в выработанном пространстве ряда характерных зон по высоте  $Y$  надугольной толщи. Согласно классическим представлениям, в выработанном пространстве (начиная от почвы пласта) формируются следующие зоны в сечении  $YZ$  по ширине выемочного участка:

– зона беспорядочного обрушения из полностью разрушенных пород непосредственной кровли и нижних слоев основной кровли мощностью 3 – 6 вынимаемых мощностей пологозалегающих пластов Донбасса, которая характеризуется значительной уплотняемостью (модуль деформации уменьшается на несколько порядков), подвижностью и высоким коэффициентом бокового распора (коэффициент поперечной деформации  $\mu = 0,4 - 0,45$ ), приближающим напряженное состояние разрушенных пород к гидростатическому;

– зона шарнирно-блокового сдвижения, сложенная вышележащими слоями основной кровли высотой до 12 – 15 вынимаемых мощностей пологого угольного пласта, которая характеризуется разделением трещинами (перпендикулярными плоскостями) породных слоев на блоки переменной длины, взаимодействующих между собой за счет усилий распора (параллельных плоскостям напластований), благодаря чему развивается сопротивление опусканию вышележащих слоев в выработанное пространство;

– зона плавного прогиба слоев без нарушения сплошности, которая размещается выше предыдущей зоны и характеризуется только упруго-пластическими деформациями без появления очагов разрушения благодаря реакции отпора пород зоны шарнирно-блокового сдвижения.

Эти же зоны наблюдаются около боковых границ выработанного пространства, но их размеры будут отличаться в сравнении с центральной частью ширины выемочного участка. Кроме того, по длине выемочного участка (плоскость  $YX$ ) в

районе его боковых границ будут образовываться свои трещины разрыва с формированием породных блоков (по координате  $X$ ), которые при движении лавы преобразуются в консоли, зависающие над очистным забоем с последующим их обрушением в выработанное пространство. Таким образом, еще раз акцентируется внимание на образовании именно породных плит в зоне шарнирно-блокового сдвижения, которые оперты на нижележащие слои только по двум границам консоли: со стороны выемочной выработки и со стороны угольного пласта; две оставшиеся границы плиты зависают в угловой части выработанного пространства в районе сопряжения и на некотором расстоянии позади него. Далее развивается процесс опускания плит на обрушенные породы, который стабилизируется на некотором расстоянии позади лавы.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В связи с изложенным рассмотрен механизм сдвижения надугольной толщи позади очистного забоя поэтапно, уделив основное внимание развитию распорной системы из породных плит на боковой границе выемочного участка по мере удаления лавы:

– участок непосредственно сопряжения лавы с выемочной выработкой (иногда используется термин «окно» лавы);

– участок потери устойчивости породных консолей и опускания распорной системы из породных плит (на боковой границе выемочного столба) на разрушенные нижележащие породы;

– участок уплотнения обрушенных пород и частичной консолидации разупрочненного массива в выработанном пространстве под воздействием горного давления в зоне его стабилизации.

Рассмотрен участок сопряжения выемочной выработки с лавой, включающий также вылет фронтальных консолей позади концевых секций механизированной крепи и боковых консолей вдоль выработки, где

возведенная охранный конструкция на ее берме и обрушенные породы еще не взаимодействуют в полной мере с опускающимися породами основной кровли. Схема деформирования надугольной толщи на отмеченной длине выработки (объединяющей первые два вышеуказанные участка) в пространственном представлении показана на рис. 1. Здесь, на наш взгляд, отражены основные позиции, обязательные к учету при разработке геомеханической модели.

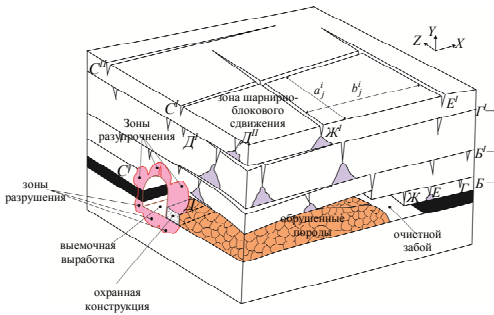


Рис. 1. Пространственное представление схемы сдвига надугольной толщи в районе сопряжения выемочной выработки с лавой

Во-первых, необходимо отразить данное пространственное представление механизма формирования породных плит за счет возникновения и роста трещин разрыва вдоль и поперек выемочного участка в районе его угловой части. Образование отдельных плит в зоне шарнирно-блокового сдвига заканчивается разупрочнением некоторых объемов (как правило, в сечениях, ослабленных трещинами разрыва) за счет концентрации сжимающих напряжений, превосходящих сопротивление сжатию соответствующих слоев.

Во-вторых, по высоте кровли (координата  $Y$ ) породные слои находятся в неодинаковых условиях нагружения. Нижележащие слои шарнирно-блокового сдвига имеют пониженную реакцию отпора (со стороны концевых секций механизированной крепи и разупрочненных пород в окрестности выработки) по отношению к

нагрузке со стороны опускающихся вышележащих слоев; первые подвержены действию более интенсивного изгибающего момента и по этой причине разделяются на породные плиты менее крупных размеров  $a_j^i$  и  $b_j^i$  (см. рис. 1). Следовательно, необходимо учитывать тенденцию возрастания по высоте размеров породных плит (связанную с геомеханикой их нагружения), на которую накладывается влияние структуры надугольной толщи в части разновеликого момента сопротивления изгибу сечений литологических разностей, залегающих в кровле. Таким образом, необходимо рассматривать процесс взаимодействия элементов геометрически неоднородной системы из породных плит, обладающих к тому же разными механическими характеристиками.

В-третьих, необходимо учитывать изменение граничных условий нагружения и взаимодействия плит на коротком участке (по длине выемочной выработки) от груди очистного забоя до начала их контакта с обрушенными породами в выработанном пространстве. Так, по ширине сопряжения плиты опираются на нижележащие породы по двум своим границам, а также испытывают реакции отпора концевых секций механизированной крепи. Сразу же позади «окна» лавы условия нагружения породных плит изменяются по причине небольшой длины вылета устойчивых породных консолей в Западном Донбассе: опирание плиты на нижележащие породы происходит только по границе вдоль выработки; по остальным границам взаимодействие происходит только за счет напряжений  $\sigma_{X,Z}$  распора с соседними плитами; плиты нижнего слоя начинают контактировать с охранный конструкцией и обрушенными породами, испытывая некоторую реакцию, способствующую повышению их устойчивости.

На рис. 2 приведена схема деформирования пород кровли и образования зоны шарнирно-блокового сдвига вдоль выемочной выработки в районе ее сопряже-

ния с лавой. Непосредственная кровля уже над рабочим пространством лавы интенсивно разрушается с разделением на блоки небольших размеров, а позади очистного забоя дезинтеграция развивается, и породы непосредственной кровли все более приобретают свойства квазисыпучей среды. Если ее увеличения в объеме (при разрыхлении) недостаточно для компенсации извлеченного объема угля и создания подпора опускающимся породам основной кровли, то происходит отслоение нижних пачек последней до наступления равновесного состояния за счет реакции пород зоны беспорядочного обрушения. Но окончательно равновесие наступает в зоне стабилизации проявлений горного давления, а на рассматриваемом участке состояние надугольной толщи непрерывно меняется.

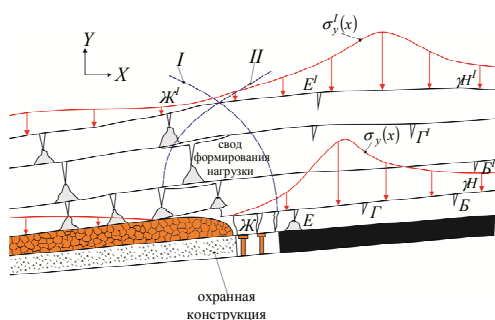


Рис. 2. Схема образования и развития зоны шарнирно-блокового сдвижения выемочной выработки в районе ее сопряжения с лавой

В основной кровле при подходе лавы зарождается и постоянно развивается процесс разделения слоистого массива на отдельные блоки – формируется зона шарнирно-блокового сдвижения. В верхней части каждого породного слоя (при его прогибе в сторону почвы пласта) появляются трещины разрыва от растягивающих напряжений  $\sigma_x$ , момент сопротивления поперечного сечения слоя резко снижается, и при дальнейшем увеличении прогиба происходит разрушение нижней части слоя от концентрации сжимающих компонент

напряжений – по всей мощности слоя образуется магистральное нарушение (трещина), отделяющее породный блок от остального массива. Длина блоков постоянно меняется во времени и пространстве. Так, по высоте основной кровли прогибы вышележащих слоев постепенно снижаются – концентрации растягивающих и сжимающих напряжений уменьшаются по абсолютной величине и их количество, способное образовать магистральное нарушение (по мощности слоя), также сокращается; следовательно, длина (по координате  $X$ ) породных блоков имеет тенденцию к увеличению по высоте основной кровли, что является общепризнанным фактом. Другая тенденция заключается в росте прогибов породных слоев с увеличением расстояния от груди забоя; появляются новые разрушающие концентрации напряжений и происходит подобие «вторичного» разделения породного блока на более мелкие – их длина сокращается (в пределах одного слоя) по мере отхода лавы. Третий фактор уменьшения длины блоков – реологический, обуславливающий снижение прочностных свойств пород во времени, интенсивность которого наиболее высока в первые несколько суток нагружения, то есть, как раз на участке сопряжения и позади него в начальный период взаимодействия с охранной конструкцией. Четвертый фактор – высокая вероятность увеличения водопритока по трещинам, разделяющим породные блоки, что обуславливает снижение прочностных характеристик пород и уменьшение длины породных блоков по вышеуказанным причинам. Кроме того, на перечисленные факторы и закономерности накладывается влияние структуры надугольной толщи и вариация механических свойств слагающих ее литологических разностей. Поэтому разнообразие горно-геологических условий может существенно исказить тенденции увеличения размеров блоков по высоте массива (координата  $Y$ ) и их уменьшения по мере отхода лавы (координата  $X$ ) в геометрически неоднородном строении зоны шарнирно-

блокового сдвижения.

Существующие исследования утверждают, что формирование нагрузки на секции механизированной крепи, в том числе и концевые, обусловлено строением зоны шарнирно-блокового сдвижения. Более конкретно, выработаны представления [1] о том, что нагрузка на крепь очистного забоя образуется весом неустойчивых пород внутри свода, формирующегося над выработанным пространством (см. рис. 2, пунктирные линии) и имеющим подобие свода естественного равновесия. В работах [1, 2] даже приводится система доказательств о форме свода, описываемой уравнением параболы, также как и в классической гипотезе свода предельного равновесия проф. М.М. Протодяконова. Свод формируется двумя контурами: контур *I* представлен поверхностями зависающих породных консолей (над выработанным пространством), опирающихся на призабойную часть угольного пласта; контур *II* образуется границей породных блоков, которые при опускании уже практически по всей своей поверхности контактируют с обрушенными породами; ближайшие (в сторону груди забоя) от этих блоков породные плиты находятся в районе изменения знака кривизны изгиба слоев кровли, где как раз образуются магистральные трещины, разделяющие породные слои на блоки; они за счет усилий распора зависят над выработанным пространством и участвуют в нагружении концевых секций механизированной крепи и крепежной системы выемочной выработки.

Анализ современных исследований показывает, что оба контура *I* и *II* (см. рис. 2) изменяют свое положение в пространстве в зависимости от геомеханических и технологических факторов ведения очистных работ. Геомеханические факторы – строение и свойства надугольной толщи, уровень действующих напряжений – безусловно, играют главную роль в развитии проявлений горного давления, но также общеизвестно, что этот процесс имеет временную составляющую. Поэтому гео-

механические факторы изменяют свое влияние в зависимости от продолжительности воздействия тех или иных аномалий горного давления. Среди технологических факторов большинство исследований указывает на наиболее активно влияющие – среднесуточная скорость  $V_c$  подвигания очистного забоя и продолжительность  $t$  его простоя. Например, моделированием на эквивалентных материалах установлена [1] тенденция увеличения длины породных консолей с ростом среднемесячной скорости  $V_m$  подвигания очистного забоя, куда составляющей входит и продолжительность его простоя.

Рассмотрен механизм влияния параметров  $V_c$  и  $t$  на положение каждого из контуров *I* и *II*, что схематически представлено на рис. 3.

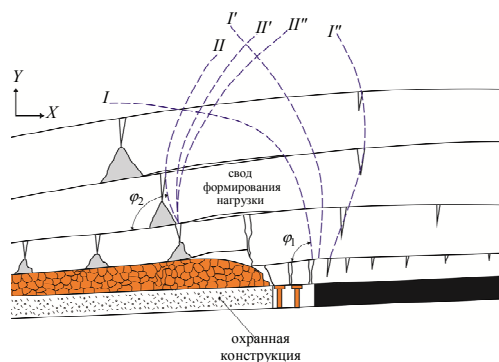


Рис. 3. Связь размеров свода формирования нагрузки на крепь (в районе сопряжения) с технологическими параметрами обработки пласта:  $I, II - V_c = (V_c)_{max}$ ;  $I', II' - V_c = (V_c)_{min}$ ;  $I'', II'' - t = t_{mzx}$

Контур *I* границ зависающих породных консолей определяется комплексом взаимосвязанных процессов деформирования произвольного слоя основной кровли в районе сопряжения выемочной выработки с лавой, которые зависят от мощности слоя, его прочностных, деформационных и реологических характеристик; реакции  $P_n$  подпора нижележащих слоев и нагрузки

$P_g$  от опускающихся вышележащих слоев. С увеличением скорости подвигания очистного забоя сокращается продолжительность действия процесса расслоения надугольной толщи – снижение реакции  $P_n$  подпора нижележащих слоев замедляется, а нагрузка  $P_g$  со стороны вышележащих слоев еще не успевает существенно развиться, так как последние пока сохраняют устойчивое состояние. Следовательно, увеличивается устойчивая длина вылета породных консолей над концевым участком очистного забоя; контур  $I$  наклоняется в сторону выработанного пространства (уменьшается угол  $\varphi_1$ ), что соответствует снижению объема неустойчивых пород внутри свода предельного равновесия. Эту тенденцию усиливает реологический фактор: пониженная продолжительность действия повышенных нагрузок (при увеличении  $V_c$ ) ограничивает реологические закономерности снижения прочностных и деформационных характеристик пород во времени. Значит, устойчивость породных консолей сохраняется в большей степени, чем при пониженной скорости подвигания очистного забоя (линия  $I'$ ). В целом влияние  $V_c$  таково, что с ее снижением длина консолей над забоем уменьшается, угол  $\varphi_1$  увеличивается и контур  $I$  изменяет свое положение в сторону угольного пласта, а объем неустойчивых пород увеличивается. Данная закономерность подтверждена многочисленными шахтными, лабораторными и аналитическими исследованиями, также как и другая – с увеличением времени  $t$  простоя лавы длина породных консолей над забоем снижается под воздействием тех же процессов расслоения основной кровли и реологических факторов. Более того, при длительных простоях и интенсивном водопитоке (в связи с образованием системы техногенных трещин) процесс расслоения активно развивается не только над выработанным пространством, но и в глубь массива над угольным пластом. В

результате образуется линия скольжения разупрочненных пород с наклоном в сторону нетронутого массива (линия  $I''$ ) под углом  $\varphi_1 = 100 - 110^\circ$  [3]. При этом значительно увеличивается объем неустойчивых пород над концевым участком лавы.

Что касается пород кровли непосредственно над выемочной выработкой, то исследования [4] выявили следующие закономерности влияния скорости подвигания очистного забоя и времени его простоя. При повышении  $V_m$  влияние лавы развивается глубже в нетронутый массив, но величина сближения пород кровли и почвы в районе сопряжения меньше, чем при малых скоростях  $V_m$  подвигания. С другой стороны, при росте  $t$  также увеличиваются перемещения породного контура выработки в районе сопряжения. Следовательно, изменение положения контура  $I$  в сторону массива не только провоцирует повышенную нагрузку на концевые секции механизированной крепи, но и на крепежную и охранную системы выемочной выработки.

Те же процессы взаимодействуют на положение контура  $II$ , характеризующего изменение знака кривизны изгиба породных слоев и замыкающего свод неустойчивых пород со стороны выработанного пространства (см. рис. 3). При пониженной скорости подвигания лавы, тем более при ее остановке, процесс расслоения и опускания основной кровли интенсифицируется: нагрузка  $P_g$  со стороны вышележащих слоев увеличивается, реакция отпора  $P_n$  со стороны нижележащих слоев уменьшается, также как и сопротивление изгибу породных блоков (снижение прочностных характеристик породы во времени). В результате наблюдается подобие «вторичного» дробления породных блоков (плит) – их размеры уменьшаются и часть объема первоначального блока ложится на обрушенные породы и исключается из общего объема неустойчивых пород в своде, формирующих нагрузку на концевые секции. Контур  $II$  границы свода перемещается в

сторону нетронутого массива (угол  $\varphi_2$  возрастает) и последовательно занимает положения  $III'$  и  $III''$ . Таким образом, снижение  $V_c$  и увеличение  $t$  способствуют уменьшению объема пород в своде предельного равновесия. Но закономерности положения границ  $I$  и  $II$  с параметрами  $V_c$  и  $t$  таковы, что увеличение объема неустойчивых пород при перемещении контура  $I$  превосходит сокращение объема неустойчивых пород со стороны изменяющейся границы  $II$  и общие тенденции влияния технологических параметров следующие: нагрузка на концевые секции механизированной крепи, крепежные и охранные конструкции выемочной выработки возрастает с уменьшением скорости подвигания очистного забоя и увеличением времени его простоя.

## ВЫВОДЫ

1. Для более адекватного моделирования реальных процессов сдвижения надугольной толщи в районе сопряжения лавы и выемочной выработки необходима пространственная постановка задачи взаимодействия элементов геометрически неоднородной распорной системы из породных плит с разными механическими характеристиками. При этом следует учесть, что геометрическая неоднородность и условия на границе системы непрерывно изменяют свои параметры в пространстве и времени по мере отхода очистного забоя.

2. На базе существующих шахтных исследований, результатов вычислительного эксперимента и моделирования на эквивалентных материалах разработано положение о том, что нагрузка на крепь очистного забоя, в том числе и концевых секций, формируется весом неустойчивых пород внутри свода, ограниченного со стороны забоя поверхностями зависающих пород-

ных консолей, а со стороны выработанного пространства – поверхностями изменения знака кривизны изгиба породных слоев при их опускании на нижележащие породы. Оба контура свода (со стороны забоя и выработанного пространства), помимо тесной связи с геомеханическими факторами, подвержены существенному влиянию технологических параметров – скорости подвигания очистного забоя и продолжительности его остановки. Эти закономерности еще раз подчеркивают необходимость реологической постановки задачи для достоверного отражения исследуемых геомеханических процессов и разработки эффективных рекомендаций по поддержанию повторно используемых выработок.

3. По мере вступления в работу охранной конструкции по ее площади формируется высокое опорное давление, которое еще более усиливает асимметрию распределения нагрузки на крепежную систему, что резко снижает ее несущую способность. Более того, сама рамная крепь не предназначена для сопротивления высоким боковым нагрузкам, поэтому она нуждается в усилении в заданном направлении, что наиболее эффективно осуществлять, на наш взгляд, за счет создания рамно-анкерной крепи с пространственно-податливыми связями боковых анкеров и стоек рам.

4. Участок стабилизации проявлений горного давления характеризуется частичным нивелированием геостатических аномалий благодаря совместному действию факторов реологии и уплотнения ранее разупрочненных пород над выработанным пространством, что облегчает работу крепежной и охранной систем. Поэтому представляется чрезвычайно важным обеспечение устойчивости выемочных выработок в районе их сопряжения с лавой, что является гарантией создания ресурсосберегающих перспектив их повторного использования.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лобков Н.И. Моделирование характера поведения породного массива над выработанным пространством лав / Н.И. Лобков, А.И. Сергиенко, Л.Г. Сергиенко // Научные труды НГУ. – Вып. № 26. – Том 1. – С. 56 – 65.

2. Лобков Н.И. Определение параметров обрушения трудноуправляемой кровли в лавах пологих пластов Донбасса / Н.И. Лобков, А.И. Сергиенко, Е.Н. Халименди-ков // Физико-технические проблемы горного производства. – Вып. № 12. – С. 113 – 123.

3. Геомеханика взаимодействия элементов системы «породный массив – выемочная выработка – охранная конструкция» / [Бондаренко В.И., Ковалевская И.А., Симанович Г.А., Коваль А.И.]. – Д.: Системные технологии, 2007. – 209 с.

4. Ильяшов М.А. Оценка влияния скорости подвигания очистного забоя на вмещающие боковые породы

/ М.А. Ильяшов, Н.И. Лобков, Е.Н. Халименди-ков [и др.] // Уголь Украины. – 2008. – № 8. – С. 11 – 13.

## ОБ АВТОРАХ

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

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

Снигур Василий Григорьевич – директор ПСП «Шахтоуправление «Терновское» ПАО «ДТЭК Павлоградуголь».

Малыхин Александр Владимирович – горный инженер, соискатель кафедры подземной разработки месторождений Национального горного университета.