

какого-либо произвольного поперечного сечения. Ясно, что полагая арка более чувствительна к динамическим несовершенствам, чем к совершенствам, нарушающим симметрию. Для систем, описываемых посредством двойной сборки существует объективный критерий: система разрушается при превышении предела критической нагрузки.

Таким образом, исследование поведения барабанов мельниц мокрого самоизмельчения разного типа в зависимости от загрузки, можно сделать следующие выводы: нагрузка на нижнюю поверхность барабана распределяется симметрично с возрастанием от краёв к центру барабана; величина равновесной силы барабанов мельниц со степенью загрузки равной 0% возрастает с увеличением диаметра барабана, но поведение имеет одинаковую тенденцию; появление отрицательных величин на графиках зависимости критической нагрузки от приложенной силы говорит о прощёлкивании пологой арки, т.е. о появлении состояния катастрофы. И если для барабана ММС7000\*2300 такое состояние недостижимо, то у барабана ММС10500\*5400 опасность катастрофы появляется уже при загрузке в 30-40%.

#### Список литературы

1. Мещеряков Л.И. Идентифікація параметрів об'єктів автоматизованого управління в задачах АСУТП ексцесійними моделями // Сб. науч. тр. Національний гірничий університет. – 2006. – № 24. – С. 182–186.
2. Мещеряков Л.И. Базова форма дисперсійної моделі гірничих технологічних комплексів // Сб. науч. тр. НГАУ. – 2004. – № 20. – С. 209–214.
3. Мещеряков Л.И. Методи і моделі ідентифікації та управління гірничими технологічними комплексами: Монографія. – Д.: Національний гірничий університет, 2009. – 263 с.
4. Гилмор Роберт. Прикладная теория катастроф: в 2-х книгах. Кн. 1. Пер.с англ. – М.: Мир, 1984. – 350 с., ил

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Слесарєвим В.В.  
Надійшла до редакції 15.06.11*

УДК 622.831.322:532.528: 53.081.7

© В.В. Зберовский, Ю.А. Костандов

## **ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ВЫБРОСООПАСНЫХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ ПРИ ИХ ГИДРОРЫХЛЕНИИ С УЧЕТОМ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ УГЛЯ СДВИГУ**

Рассмотрена аналитическая модель расчета предельного состояния выбросоопасного угольного пласта в его краевой части при гидроимпульсном воздействии с учетом параметров сопротивляемости угля сдвигу. Определены углы и коэффициенты внешнего и внутреннего трения угля.

Розглянута аналітична модель розрахунку граничного стану викидонебезпечного вугільного пласта в його крайовій частині при гідроімпульсній дії з урахуванням параметрів опору вугілля зсуву. Визначені кути і коефіцієнти зовнішнього і внутрішнього тертя вугілля.

The analytical model of calculation of a limiting condition of an outburst-prone coal seam in its selvage at a hydroimpulse action into account of coal resistance parameters to shift are surveyed. Angles and an external and internal friction factors of coal are defined.

До настоящего времени решение задачи предельного состояния краевой части выбросоопасного угольного пласта не имеет общепризнанного научно-обоснованного решения. Поскольку выполнить моделирование напряженно – деформированного состояния (НДС) краевой части пласта в лабораторных условиях практически невозможно, задача решается аналитическим путем. При этом в физической модели кроме НДС массива горных пород, сформированного природой, приходится учитывать зону разгрузки и зону повышенного горного давления, которые образуются впереди забоя выработки. Также необходимо учитывать, что при нагружении угольного пласта первоначально проявляются пластические деформации угля, которые при потере сопротивляемости угля сдвигу мгновенно переходят в хрупкое разрушение.

Еще более сложной является задача управления состоянием угольного пласта при нагнетании в него жидкости с целью предотвращения внезапных выбросов угля и газа. В условиях больших глубин наиболее простой и технологичный способ гидрорыхления угольных пластов не в полной мере обеспечивает безопасность ведения горных работ. Это подтверждается газодинамическими явлениями и прорывами жидкости в выработанное пространство, происходящими при проведении мероприятий.

Основным недостатком этого способа является невозможность управления процессом гидрорыхления при статическом нагнетании жидкости под давлением большим, чем давление гидроразрыва, по причине слоистости, трещиноватости и анизотропных свойств угольного пласта. Происходит либо прорыв жидкости по трещинам напластования, либо гидроотжим пласта или одного из его прослоев. Эти процессы в условиях больших глубин до настоящего времени исследованы недостаточно. С одной стороны, математическая модель равновесного состояния краевой части пласта дополняется новыми уравнениями с гидравлическими параметрами статического, гидродинамического или гидроимпульсного режимов воздействия, что в значительной мере усложняет решение данной задачи. С другой стороны, имеется простое техническое решение – применение буровзрывных работ, что позволяет в сложных условиях решить вопрос безопасности ведения горных работ, но не обеспечивает требуемых темпов проведения выработок.

Применение гидроимпульсного воздействия в качестве противовыбросного мероприятия позволило в значительной мере приблизиться к решению вышеотмеченной проблемы. В модели предельного состояния угольного пласта при гидроимпульсном воздействии учитываются как физико-механические свойства угля, так и НДС углепородного массива. Для краевой части пласта условие равновесия сил на контактирующих поверхностях угольный пласт – вмещающие породы запишется с учетом закона Кулона-Амонтона следующим образом:

$$(P_n - P_1)m_n = 2f\gamma H(l_e - l_0), \quad (1)$$

где  $P_n$  – давление нагнетания жидкости, МПа;  $P_l$  – давление жидкости в кромке пласта, МПа;  $m_n$  – мощность пласта, м;  $f$  – коэффициент внешнего трения между углем и вмещающими породами;  $\gamma$  – удельный вес горных пород т/м<sup>3</sup>;  $H$  – глубина залегания м;  $l_z$  – глубина герметизации шпура, м;  $l_0$  – разрушенная часть кромки пласта, м;

Гидроотжим или его признаки могут проявиться при условии, если давление газа в пласте и давление жидкости, создаваемое в фильтрационной камере, превысят силы горного давления и сопротивляемость угля сдвигу. Последняя определяется силами внешнего и внутреннего трения, которые, в свою очередь, характеризуются коэффициентами внешнего и внутреннего трения угля.

Для оценки адекватности различных методик определения возможности проявления гидроотжима при гидрорыхлении были выполнены расчеты значения давления нагнетания от глубины герметизации скважин при:

- условия  $P_n \geq (0,75 \dots 1,0)\gamma H$ , определяемой нормативной методикой [1], с учетом (1) при  $l_0 = 0$

$$P_n \geq \frac{2f\gamma H}{m_n} l_z; \quad (2)$$

- при гидрорыхлении [2]

$$P_n \geq k\nu\xi \left( e^{\varphi l} - 1 \right) - \frac{\psi \chi \eta \left( e^{il} - e^{\varphi l} \right) Q_n}{\pi m_n \left( l_z - l + 0.5l_p \right) K'_v(i - \varphi)}, \quad (3)$$

где  $\nu = 2 \cos \rho / (1 - \sin \rho)$ ,  $\xi = (1 - \sin \rho) / (1 + \sin \rho)$  – коэффициент бокового распора,  $\varphi = 2 \operatorname{tg} \rho (d - m\xi) / (dm\xi)$ ,  $Q_n$  – расход жидкости, нагнетаемой в пласт, м<sup>3</sup>/с;

- при гидроимпульсном воздействии

$$P_n \geq \int_0^{m_n} \left( \frac{2 \left( k + \mu \gamma H \left( 1 + \frac{fl_z}{m_n} \right) \right)}{\cos \rho} \left( \sin \rho - \sqrt{1 - b^2(y)} \right) + \gamma H \left( 1 + \frac{fl_z}{m_n} \right) \right) dy - P_z$$

$$b(y) = \frac{f \gamma H \left( 1 + \frac{fl_z}{m_n} \right) \left( 1 - \frac{2y}{m_n} \right)}{k + \mu \gamma H \left( 1 + \frac{fl_z}{m_n} \right)}. \quad (4)$$

Эти расчеты были выполнены для конкретных характеристик пласта  $i_3^1$  гор. 915м СП «Шахтоуправление «Суходольское-Восточное» ПАО «Краснодонуголь» и параметров гидрорыхления: сопротивление сдвигу (сцепление)  $k=1$  МПа; коэффициент внутреннего трения  $\mu = \operatorname{tg} \rho$ ; угол внутреннего трения

$\rho=26,57^\circ$ ; удельный вес горных пород  $\gamma=26,5$  кН/м<sup>3</sup>; глубина залегания  $H=915$  м; коэффициент внешнего трения между углем и вмещающими породами  $f=0,5$ ; мощность пласта  $m=1,75$  м; ширина выработки  $b=5,1$  м; глубина скважин для нагнетания жидкости от 6,0 м до 8,0 м; глубина герметизации  $l_2=2,5\dots5,5$  м.

Результаты расчетов значений давления нагнетания от глубины герметизации скважин представлены на рис. 1.

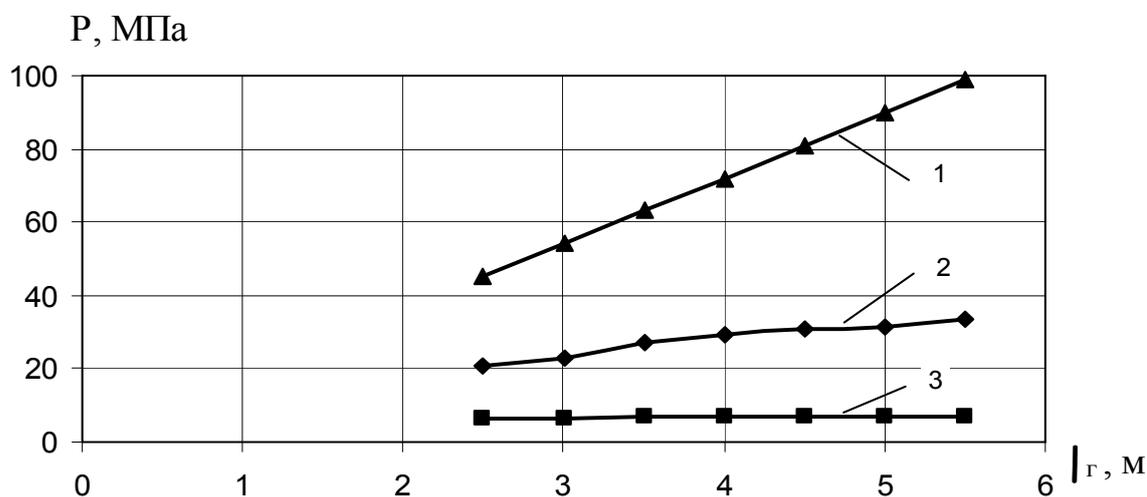


Рис. 1. Зависимости давления гидроотжима от глубины герметизации скважин при высоконапорном нагнетании жидкости, рассчитанные по формулам: 1 – (2), 2 – (4), 3 – (3)

Анализ полученных результатов позволяет отметить, что с увеличением глубины герметизации, что соответствует уменьшению длины фильтрационной камеры, давление гидроотжима возрастает. При этом наблюдается существенное различие в значениях, рассчитанных по (2), учитывающей коэффициент внешнего трения между углем и вмещающими породами, и по формуле (3). Кроме этого, необходимо отметить, что на практике при применении способов гидроотжима или гидрорыхления на глубинах более 800 м признаки гидроотжима краевой части пласта начинают проявляться при давлении нагнетания жидкости от 23,0 МПа до 25,0 МПа, что соответствует расчету давления гидроотжима по условию  $P \geq (0,75\dots1,0)\gamma H$  [1].

Отмеченное несоответствие поясняется тем, что в условии расчета давления гидроотжима  $P \geq (0,75\dots1,0)\gamma H$  по нормативной методике [1] величина фильтрационной камеры составляет 0,1...0,3 м и не учитываются параметры сопротивляемости угля сдвигу. При расчете по формуле (2) учитывается коэффициент внешнего трения  $f$  между углем и вмещающими породами, а величина фильтрационной камеры составляет 2,0 м. При расчете по формуле (3) учитывается также и коэффициент внутреннего трения  $\mu$ . Однако, значения давления гидроотжима (кривая 3 на рис. 1) не соответствует результатам, получаемым в практике. Значения давления гидроотжима, рассчитанные по формуле (4) наиболее адекватны, поскольку они соответствуют значениям, установленным практикой, независимо от глубины герметизации скважины.

Исходя из вышеизложенного очевидно, что учету параметров, характеризующих сопротивляемость угля сдвигу, а именно, углов или коэффициентов внешнего и внутреннего трения угля, при высоконапорном нагнетании жидкости до настоящего времени должного внимания не уделялось. Высокая эффективность способа гидроимпульсного воздействия при гидрорыхлении угольных пластов и перспектива его широкомасштабного внедрения в производство поставила решение этой задачи на новый уровень. Необходимо также отметить, что, несмотря на значительный объем исследований, связанных как с изучением свойств материалов, так и с нагнетанием жидкости в угольные пласты, достаточно ясных представлений о корректности методов определения углов или коэффициентов внешнего и внутреннего трения углей и адекватности их результатов нет до сих пор.

Значения коэффициентов контактного трения различных пар материалов приводятся в многочисленной литературе, однако, необходимо отметить их значительный разброс. Объяснить это можно различием методик [3, 4] и условий определения этих величин (степень параллельности, плоскостности и шероховатости контактирующих поверхностей, величина нормальной нагрузки, нарушение однородности нормальных напряжений по поверхности контакта вследствие образования опрокидывающего момента при приложении к боковому торцу образца сдвигающей силы, смещенной относительно плоскости контактной поверхности, и т.д.).

Сведения о значении углов внутреннего трения материалов сегодня можно найти лишь в немногочисленной литературе, при этом приведенные в ней данные достаточно противоречивы [3, 5]. Объяснить это также можно различием методик и условий определения этих значений (величина нормальной нагрузки, однородность нормальных напряжений по плоскости сдвига, возможности реализации разрушения типа нормального отрыва при разрушении образца сдвигающей силой и т.д.).

Поэтому для корректного определения углов или коэффициентов внешнего или внутреннего трения угля использовались новые методики, суть которых состояла в определении в условиях стесненной деформации в направлении сжатия зависимости сдвигающего или разрушающего усилия на сдвиг от нормальной сжимающей нагрузки соответственно.

Изготовление образцов в виде прямоугольных параллелепипедов с прямоугольными выступами на одной из их граней, которые используются для установления указанных выше зависимостей, из выбросоопасных угольных пластов ПАО «Краснодонуголь» (марки К и Ж) и проведение на них исследований в значительной степени осложняется их слоистостью и трещиноватостью, неоднородностью и низкими прочностными характеристиками. По этой причине регистрация сдвигающего и нормального усилий при определении углов трения проводилась с помощью аппаратно-программного модуля, аппаратная часть которого включала упругие элементы с тензометрическими мостами, сигналы от которых подавались на усилитель, затем на аналогово-цифровой преобразователь и запоминающее устройство компьютера. Это обеспечило чувствительность измерений по сжимающей и сдвигающей нагрузкам до 2,5 Н.

Зависимости сдвигающего усилия  $F_s$  от нормальной сжимающей нагрузки  $P$  для контактирующих пар уголь-уголь, определенные с помощью разработанных методик, приведены на рис. 2.

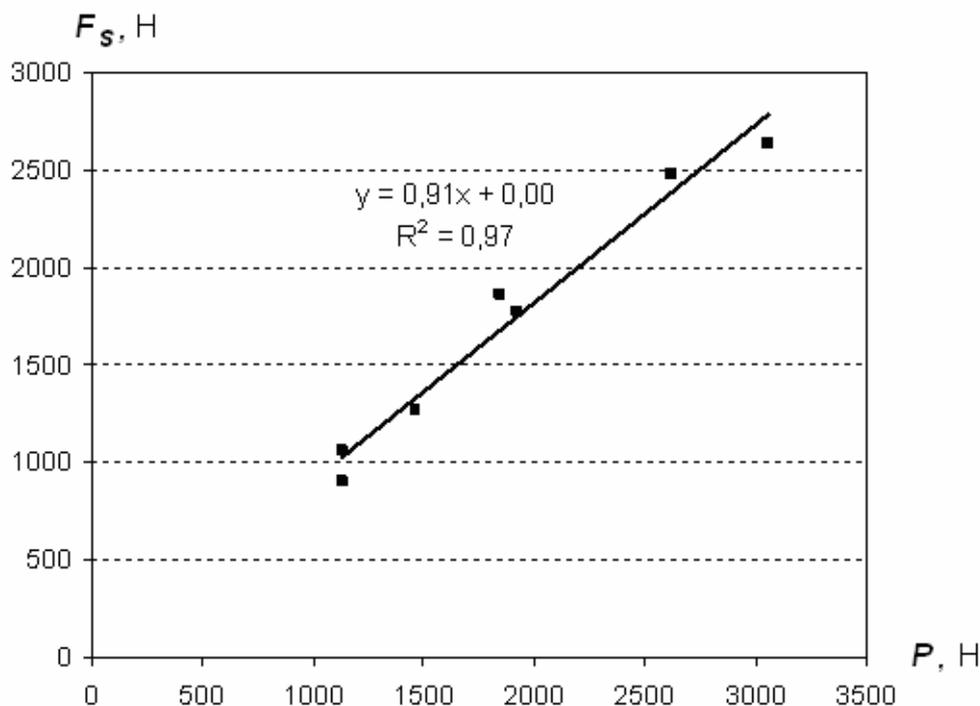


Рис. 2. Зависимость сдвигающего усилия  $F_s$  от нормальной сжимающей нагрузки  $P$  для контактирующей пары уголь-уголь

На этом рисунке представлена также линия тренда для экспериментально определенных точек указанной зависимости и ее уравнение в виде  $y = bx + y_0$ , где, в качестве  $b$  следует понимать удвоенный коэффициент внешнего трения:  $b = 2f$ . Величина достоверности аппроксимации  $R^2$  при этом была не ниже 0,97. Из этого следует, что в исследуемом диапазоне нагрузок зависимость сдвигающего усилия от нормальной сжимающей нагрузки можно считать линейной. Таким образом, значения коэффициента и угла внешнего трения для контактирующей пары уголь-уголь, составляют  $f = 0,45$  и  $\rho = 24^\circ$  соответственно.

Результаты определения с помощью разработанной методики зависимости разрушающего усилия на сдвиг  $F_s$  от нормальной сжимающей нагрузки  $P$  для образцов, изготовленных из проб угля, приведены на рис. 3.

На рисунке также представлена линия тренда и уравнение, соответствующие зависимости вида  $y = dx + y_0$  где, в качестве  $d$  следует понимать сумму коэффициентов внутреннего  $\mu$  и внешнего трения  $f$ :  $d = \mu + f$ .

В данном случае  $f = f_f = 0,07$ , поскольку для снижения влияния величины внешнего трения на определение коэффициента внутреннего трения между образцом и плитой пресса устанавливались стальной уголок и фторопластовая пластина толщиной 0,1 мм, коэффициент внешнего трения которой относительно стали составлял  $f_f = 0,07$ . Величина достоверности  $R^2$  аппроксимации экспериментальных данных линейной зависимостью составляла 0,98. Это означает, что в исследуемом диапазоне нагрузок зависимость разрушающего сдви-

гающего усилия от нормальной сжимающей нагрузки также можно считать линейной. Таким образом, значения коэффициента и угла внутреннего трения для исследуемых проб угля составляют  $\mu = 1,1$  и  $\rho = 48^\circ$  соответственно.

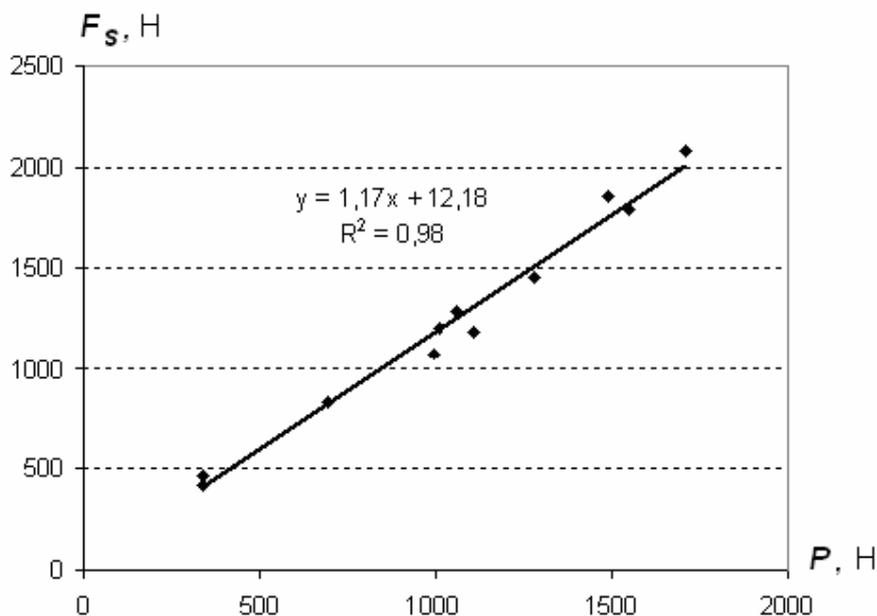


Рис. 3. Зависимость разрушающего усилия на сдвиг  $F_s$  от нормальной сжимающей нагрузки  $P$  для контактирующей пары уголь-уголь

Фотографии некоторых образцов угля после разрушения сдвигом выступов согласно используемой методике приведены на рис. 4.

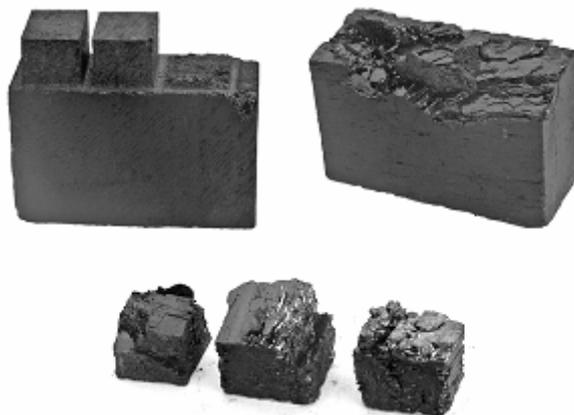


Рис. 4. Образцы угля из шахтопластов ПАО «Краснодонуголь» после разрушения их выступов сдвигом

Отличительной особенностью и преимуществом использованных методик, является то, что при определении углов внешнего и внутреннего трения создаются условия, аналогичные условиям состояния угольного пласта, находящегося в условиях сжатия между породами кровли и почвы. Поэтому применение результатов исследований характеристик сопротивляемости угля сдвигу

в расчетах параметров гидроимпульсного воздействия при гидрорыхлении выбороопасных угольных пластов в значительной мере повышает надежность способа и уровень безопасности ведения горных работ.

При этом установление адекватных значений углов внутреннего и внешнего трения угля позволяет более достоверно рассчитывать давление гидроотжима, которое является граничным условием при определении предельного состояния краевой части выбороопасного угольного пласта, для различных глубин герметизации скважин. А применение гидроимпульсного воздействия обеспечивает равномерность обработки угольного пласта по всей его мощности.

#### Список литературы

1. Правила ведения горных работ на пластах склонных к газодинамическим явлениям. - К.: Минуглепром Украины, 2005. - 224 с.
2. Теоретические основы гидроотжима и гидрорыхления на угольных шахтах / А.А. Борисенко. - М.: «Наука», 1986. - 114 с.
3. Барон Л.И. Характеристики трения горных пород. - М.: Наука, 1967. - 207с.
4. Капранов И.В. Теоретическая механика: Ч.1. Статика: Учеб. пособ. - М.: РГОТУПС, 2001. - 81 с.
5. Порпевский А.К., Катков Г.А. Основы физики горных пород, геомеханики и управления состоянием массива. М.: Московский гос. открытый ун-т, 2004. - 120с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Бойком В.О.  
Надійшла до редакції 20.06.11*

УДК 622.833.5

© Є.В. Тимошенко

## **ДО ПИТАННЯ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРОГНОЗУ СТАНУ ПОРІД ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ВИЙМАННІ ТОНКИХ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ**

В статті представлені результати моделювання та прогноз стану порід при високій швидкості посування очисного вибою при вийманні тонких вугільних пластів в умовах ПАТ «Шахтоуправління «Покровське».

В статті представлені результати моделювання та прогнозу стану порід при високій швидкості подвигання очисного забоя при виемке тонких угольних пластів в умовах ПАО «Шахтоуправление «Покровское».

The results of modeling and forecasting the state of rock at high speed longwall advance excavation at thin coal seams in the PJSC "Shahtoupravlenie" Pokrovskoe" are described.

**Вступ.** Швидкість посування очисного вибою є одним з визначальних параметрів, які впливають на обсяги видобування вугілля за певний проміжок часу. Фактично, досить складно сьогодні досягти максимальних швидкостей, при яких релаксації гірського масиву перевищували б стійкість порід основної покрівлі та інших верхніх шарів жорсткості, що призводило б до миттєвих розвантажень накопичених напружень і динамічних переміщень зависаючих порід покрівлі. Відомі випадки, коли такі явища виникали на пластах з тяжкообвалювальними покрівлями. Вони супроводжувалися переміщеннями великих пород-