

## Раздел 2. Прогнозирование и управление состоянием горного массива

УДК 622.831.27

И.В. Антипов<sup>1</sup>, Н.И. Лобков<sup>1</sup>, Я.А. Ляшок<sup>2</sup>, А.И. Сергиенко<sup>2</sup>

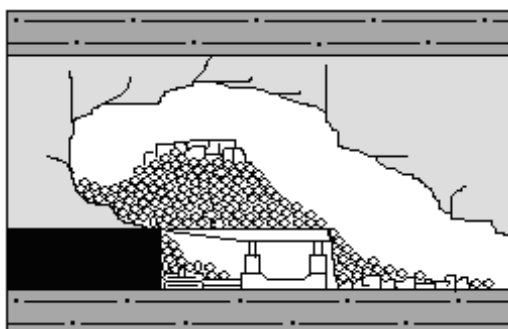
### АНАЛИТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СДВИЖЕНИЯ ГОРНОГО МАССИВА НАД ВЫРАБОТАННЫМ ПРОСТРАНСТВОМ

<sup>1</sup>Институт физики горных процессов НАН Украины

<sup>2</sup>Красноармейский индустриальный институт ДонНТУ

*Представлены результаты новых исследований характера и особенностей сдвижения горного массива над выработанным пространством с учетом расположения лавы относительно нетронутого и нарушенного горного массива.*

В процессе выемки угля лавами над выработанным пространством происходит сдвижение горных пород, в результате которого повышается опорное давление и происходит разрушение и обрушение кровли крупными блоками или мелкими фракциями. В результате высыпания пород в призабойное пространство мелкими фракциями (рис. 1) над секциями крепи образуются пустоты, исключая возможность распора секций между кровлей и почвой и их передвижку.



**Рис. 1.** Обрушения пород кровли мелкими фракциями

Кроме того возникает необходимость устранения просыпавшейся породы из призабойного пространства и с перекрытий секций механизированной крепи. Все это приводит к потере рабочего времени, необходимого для добычи угля, и к повышению себестоимости его добычи.

При обрушении прочных пород крупными блоками возникает повышенная нагрузка на призабойную крепь и возможна посадка механизированной крепи на жесткую базу (рис. 2).

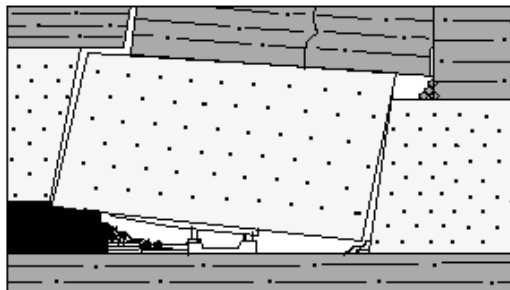


Рис. 2. Обрушения пород кровли крупными блоками

В результате наблюдаются простои лав от нескольких суток до одного-двух месяцев. В связи с тем, что высвобождение секций крепи производится в основном способом БВР, их несущая способность снижается и возникает опасность более частых посадок на жесткую базу.

Кроме того, что эти явления приводят к потерям добычи, они также снижают безопасность работ в очистном забое. Повышение безопасности и стабильности очистных работ требует прогнозирования обрушений кровли в процессе подготовки фронта очистных работ, что позволит заранее предусмотреть мероприятия, направленные на предотвращение завалов лав. Для разработки метода прогноза необходимо выполнить аналитические исследования сдвижения породного массива над выработанным пространством.

В результатах исследований сдвижения породного массива над выработанным пространством, выполненных Борисовым А.А., Турчаниновым И.А., Баклашовым И.В., Кузнецовым Г.Н., Глушко В.Т., Фисенко Г.Л., Канлыбаевой Ж.М, Хохловым И.В. и др., установлено, что над выработанным пространством происходит последовательное сдвижение породных слоев в направлении от выработанного пространства к поверхности. Однако до настоящего времени не определено, сколько породных слоев участвуют в сдвижении над выработанным пространством и формировании опорного давления.

Установлено, что по мере отхода лавы от разрезной печи слои прогибаются под собственным весом и ведут себя, как тонкие плиты, жестко защемленные с 4-х, 3-х и 2-х сторон (рис. 3,а,б,в). Для определения прогибов каждого слоя возникает необходимость расчета тонкой плиты под действием собственного веса и пригрузки с соответствующими краевыми условиями [1].

Аналитические методы определения напряжений вокруг горных выработок основаны на использовании положений теории упругости. Так как породный массив от угольного пласта до поверхности имеет слоистую структуру и наблюдается хрупкое разрушение слоев при изгибе, горный массив является квазидискретной средой [2]. Поэтому отдельный породный слой рассматривается как однородная, изотропная упругая среда [3].

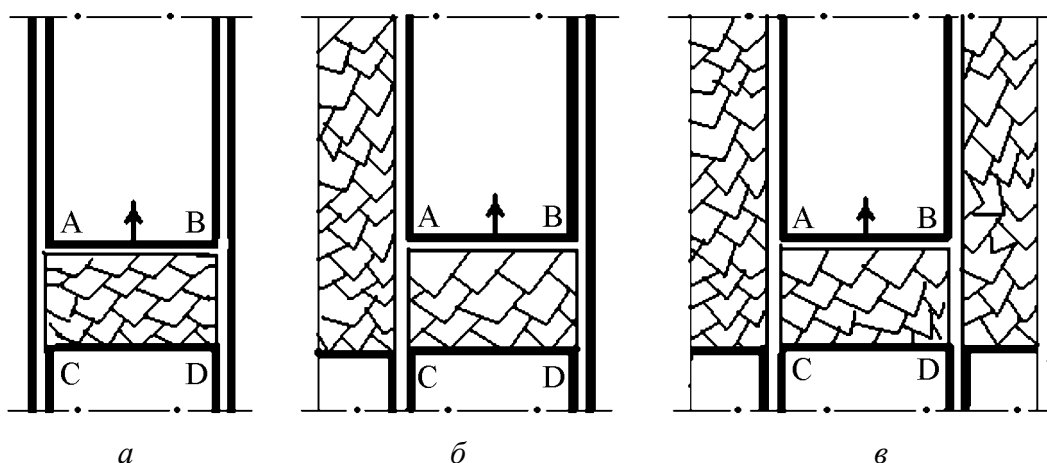


Рис. 3. Схемы расположения лавы относительно нетронутого и нарушенного массива

При исследовании изменения напряжений в элементарном объеме массива, находящегося в состоянии равновесия, используются основные уравнения теории упругости [4, 5]: три уравнения равновесия, шесть уравнений неразрывности деформаций, отражающих то, что в процессе деформирования сплошность среды не нарушается, а также дополнительные уравнения, связывающие деформации с напряжениями и учитывающие физические особенности развития деформаций изотропной среды (обобщенный закон Гука).

Изгиб тонкой плиты под действием поперечной нагрузки описывается неоднородным дифференциальным уравнением четвертого порядка в частных производных Софи Жермен–Лагранжа [6]. Краевые условия определяются в зависимости от способа заделки плиты. Для жесткого защемления характерно отсутствие прогиба и угла изгиба. Для свободного края отсутствует изгибающий момент и поперечная сила. Решение уравнения производится с использованием таких методов, как разложение в ряд Тейлора, метод конечных разностей, метод конечных элементов и др. приближенные методы [7–9]. На протяжении последних 30 лет развивается универсальная программная система конечно-элементного анализа ANSYS, предназначенная для решения линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твердого тела [10–12].

В работе [13] описан расчетный метод, являющийся универсальным для определения разрушающих напряжений и шага первичной посадки основной кровли, представленной слоями разной толщины. Применение предложенного метода позволяет сократить время расчета шага посадки кровли по сравнению с расчетом плиты.

Величина изгиба плиты может быть определена как среднее значение изгибов прогибов двух балок с корректирующим коэффициентом, линейно зависящим от величины отношения сторон плиты (рис. 4).

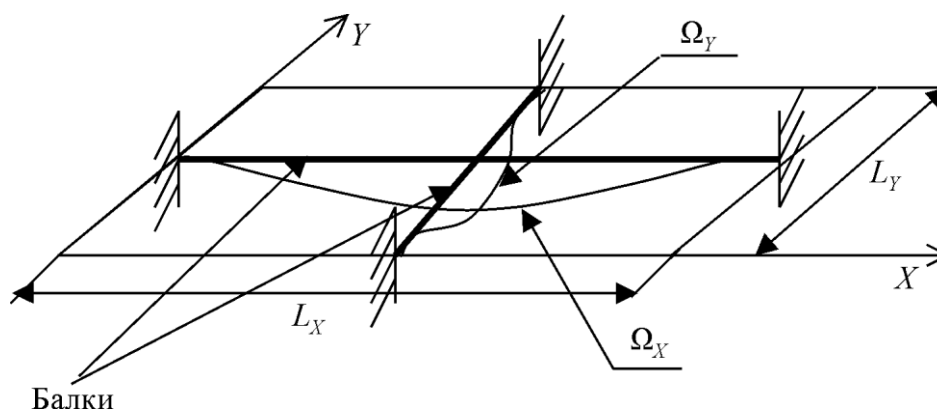


Рис. 4. Расчетная схема определения величины изгиба плиты, жестко защемленной с 4-х сторон

$$\omega_{x,y} = \left( 0.749298 - 0.252674 \cdot \frac{L_y}{L_x} \right) \cdot \sqrt{\omega_x \cdot \omega_y}, \quad L_x \leq L_y \quad (1)$$

Прогиб жестко защемленной с 3-х сторон плиты и с одним свободным краем (рис. 5) определяется прогибом жестко защемленной с двух сторон плиты и консольной балки.

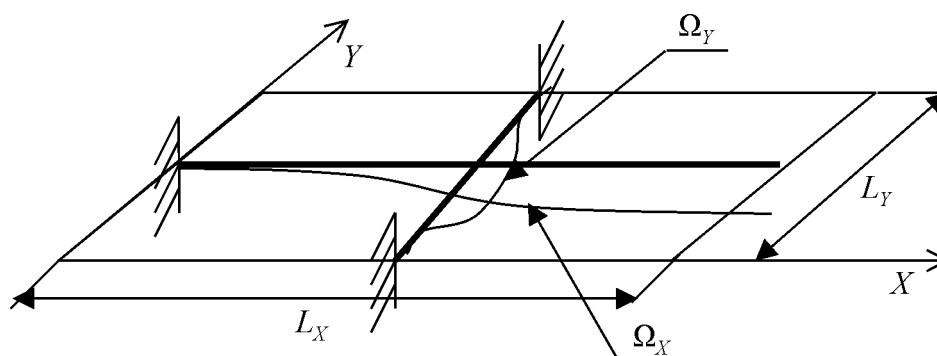


Рис. 5. Расчетная схема определения изгиба плиты, жестко защемленной с 3-х сторон, и с одной свободной стороной

$$\omega_{x,y} = \left( 0.3399 \cdot \frac{L_y}{L_x} - 0.098348 \right) \cdot \sqrt{\omega_x \cdot \omega_y}, \quad L_x \leq L_y \quad (2)$$

Изгиб плиты, защемленной с двух сторон, и с двумя свободными сторонами (рис. 6) определяется, как и изгиб балки, защемленной с двух сторон.

$$\omega_{x,y} = \omega_y \quad (3)$$

Прогиб балок  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  описывается дифференциальным уравнением 4-го порядка

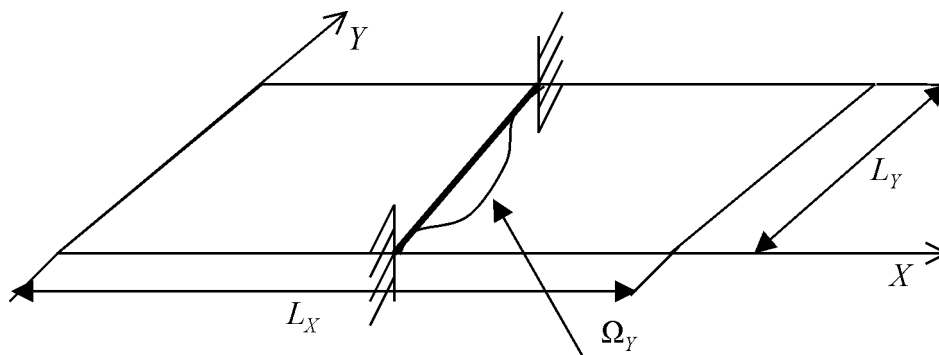


Рис. 6. Расчетная схема определения изгиба плиты, жестко защемленной с 2-х сторон, и с двумя свободными сторонами

$$\frac{d^4 \omega(x)}{dx^4} = \frac{q}{EJ}, \quad (4)$$

где  $q$  – распределенная нагрузка ( $\text{Н/м}^2$ ),  $E$  – модуль упругости ( $\text{Па}$ ),  $J$  – момент инерции  $J = bh^3/12$  ( $\text{м}^4$ ),  $b$  – ширина балки  $b = 1$  ( $\text{м}$ ).

Граничные условия для жестко защемленной балки:

$$\omega(0) = 0, \quad \frac{d\omega(0)}{dx} = 0, \quad \omega(L) = 0, \quad \frac{d\omega(L)}{dx} = 0. \quad (5)$$

Граничные условия для консольной балки:

$$\omega(0) = 0, \quad \frac{d\omega(0)}{dx} = 0, \quad \frac{d^2\omega(L)}{dx^2} = 0, \quad \frac{d^3\omega(L)}{dx^3} = 0. \quad (6)$$

Граничные условия для жестко защемленной балки характерны отсутствием прогибов и угла изгиба балки на обоих концах. Граничные условия для консольной балки характерны отсутствием прогиба и угла изгиба на одном конце баки, а также отсутствием изгибающего момента и поперечной нагрузки на другом.

В результате решения уравнений (5) и (6) получаются известные уравнения изгиба балок.

Для жестко защемленной балки:

$$\omega(x) = \frac{1}{EJ} \left( \frac{qL}{2} \frac{x^3}{6} - \frac{qL^2}{12} \frac{x^2}{2} - \frac{qx^4}{24} \right). \quad (7)$$

Для консольной балки:

$$\omega(x) = \frac{-1}{EJ} \left( \frac{qLx^3}{12} \right). \quad (8)$$

Применение предложенного метода расчета изгиба плит позволило установить характер распределения напряжений в изгибающемся породном слое

для определения шага первичной посадки труднообрушаемой кровли с погрешностью не более 10% [14].

С использованием формул изгиба балок (7), (8) и изгиба плиты (1)–(3) проведено сравнение результатов расчета изгиба породного слоя над выработанным пространством (табл. 1) для условий ш/у "Покровское".

Сравнительные расчеты выполнены для следующих горно-технических и горно-геологических условий: длина очистного забоя 200 м, отход лавы от разрезной печи от 100 м до 200 м, мощность слоя песчаника 10 м, модуль упругости песчаника  $E = 5 \cdot 10^{10}$  Па, коэффициент Пуассона  $\mu = 0.3$ , плотность  $\rho = 2500$  кг/м<sup>3</sup>. Результаты расчетов приведены в табл. 1. В период первичной посадки кровли при заделке плиты с четырех сторон разница в вычислениях изгиба плиты и балок не превышает 0,18% при соотношении сторон плиты 1 : 2. При отходе лавы на 200 м от разрезной печи разница в вычислениях не превышает 12%, при отходе лавы от разрезной печи на 100 м разница менее 3%.

Таблица 1

Результаты расчетов величин изгиба плиты и балок

Заделка по натуре	$L_y/L_x$	Плита	Балка			Процент ошибки
		прогиб по Ansys	прогиб балки по X	прогиб балки по Y	среднее геометрическое	
с четырех сторон	1,00	0,006777	0,013949	0,013949	0,006927	2,29
	1,25	0,009766	0,013949	0,034054	0,009447	3,32
	1,50	0,011773	0,013949	0,07061 5	0,011621	1,30
	1,75	0,01280 0	0,013949	0,130823	0,013119	2,42
	2,00	0,01359 0	0,013949	0,223178	0,013611	0,18
с трех сторон	1,00	0,017989	0,446355	0,013949	0,019061	5,62
	1,25	0,040694	0,446355	0,034054	0,040260	1,08
	1,50	0,075937	0,446355	0,070615	0,073061	3,94
	1,75	0,122730	0,446355	0,130823	0,119979	2,29
	2,00	0,178000	0,446355	0,223178	0,183529	3,0
с двух сторон	1,00	0,017561		0,015454		12
	1,25	0,040918		0,037655		8,8
	1,50	0,082299		0,075717		6,2
	1,75	0,149250		0,137241		4,3
	2,00	0,250651		0,230697		3

Максимальная величина изгиба породного слоя перед обрушением при отходе лавы от разрезной печи на 100 м наблюдалась в центре плиты, жестко заземленной с четырех сторон (рис. 7,а), и достигла 0,0136 м.

При заземлении плиты породного слоя с трех сторон максимальная величина прогиба перед обрушением составила 0,183 м у свободной стороны. По направлению к середине плиты породного слоя величина прогиба уменьшается и является минимальной от середины к противоположному краю плиты (рис. 7,б).

При защемлении породного слоя с двух сторон (рис. 7 в) величина его прогиба перед обрушением увеличилась и составила 0,230 м по всей длинной стороне плиты.

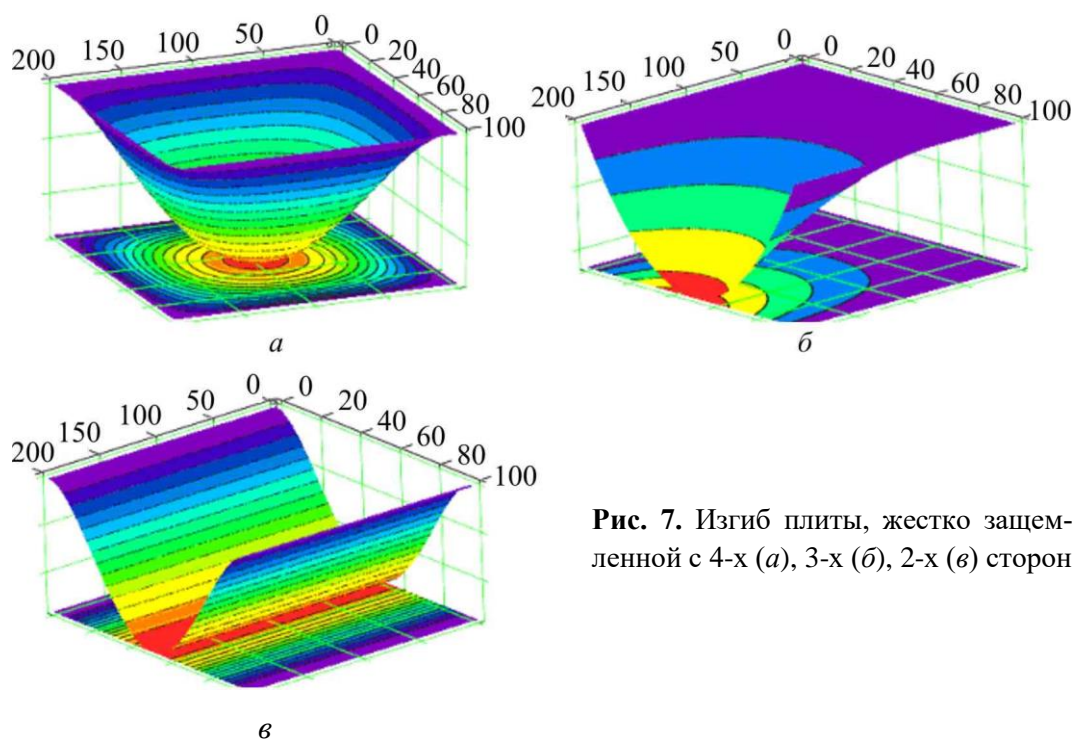


Рис. 7. Изгиб плиты, жестко защемленной с 4-х (а), 3-х (б), 2-х (в) сторон

Проведенные исследования являются продолжением ранее выполненных работ, результаты которых опубликованы в сборниках научных трудов [13, 14]. Новые исследования позволили уточнить и расширить представления о характере и особенностях сдвижения горного массива над выработанным пространством с учетом расположения лавы относительно нетронутого и нарушенного горного массива.

В результате исследований установлено, что:

1) величина изгиба породного слоя над выработанным пространством увеличивается с уменьшением числа защемленных сторон;

2) при работе одиночной лавы в массиве угля (слой кровли защемлен с четырех сторон, рис. 3,а) максимальная величина изгиба кровли наблюдается в середине слоя; при трехстороннем защемлении слоя (рис. 3,б) максимальная величина его изгиба больше у свободного края плиты, а уменьшение величины изгиба наблюдается до середины слоя; при защемлении слоя с двух сторон (рис. 3,в) наблюдается максимальный изгиб породного слоя в его центре вдоль длинной стороны плиты;

3) определение максимального изгиба породных слоев над выработанным пространством позволяет оценивать особенности их взаимодействия в области полных сдвижений кровли над выработанным пространством очистного забоя.

1. Антипов И.В. Формирование разрушающих напряжений в изгибающихся породных слоях [Текст] / И.В. Антипов, Н.И. Лобков / Межвед. сб. научн. тр. «Геотехническая механика». – Днепропетровск: ИГТМ НАН Украины. – Вып. 93. – 2011. – С. 38–45.
2. Антипов И.В. Квазидискретная модель нижнего слоя пород кровли [Текст] / И.В. Антипов / Физические процессы горного производства. – М., 1991. – С. 46–47.
3. Глушко В.Т. Геофизический контроль в угольных шахтах [Текст] / В.Т. Глушко, В.С. Ямщиков, А.А. Яланский. – К.: Наук. думка, 1978. – 224 с.
4. Кацауров И.Н. Горное Давление [Текст] / И.Н. Кацауров // Механика горных пород. – М.: «МОТКЗГИ». – Вып. II. – 1972. – 263 с.
5. Баклашов И.В. Механика горных пород [Текст] / И.В. Баклашов, Б.А. Картозия. – М.: Недра, 1975. – 271 с.
6. Тимошенко С.П. Курс теории упругости [Текст] / С.П. Тимошенко. – К.: Наук. думка, 1972. – 506 с.
7. Antypov I., Filimonov P., Shcherbinin D. Finite Element Method in geomechanics [Текст] // Вести Донецкого горного института: Всеукраинский научно-технический журнал горного профиля / Гл. ред. Александров С.Н. – Донецк: ДонНТУ, 2001. – С. 86–88.
8. Антипов И.В., Филимонов П.Е. Имитирование условий взаимодействия крепи с горным массивом методом конечных элементов [Текст] / И.В. Антипов, П.Е. Филимонов // Сб. научн. тр. "Геотехническая механика". – ИГТМ НАН Украины. – № 49. – 2004. – С. 99–106.
9. Антипов И.В., Филимонов П.Е., Гатауллин Н.Н. Численное моделирование геомеханических процессов в породном массиве [Текст] / И.В. Антипов, П.Е. Филимонов, Н.Н. Гатауллин / Геодинамика и напряженное состояние недр Земли. Труды международной конференции. – Новосибирск: ИГД СО РАН, 2004. – С. 51–54.
10. Чигарев А.В. ANSYS для инженеров: Справочное пособие [Текст] / А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение-1, 2004. – 512 с.
11. Каплун А.Б. ANSYS в руках инженера: Практическое руководство [Текст] / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. — М.: Едиториал УРСС, 2003. – 272 с.
12. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя [Текст] / К.А. Басов. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
13. Лобков Н.И. Определение разрушающих напряжений от прогиба слоев над выработанным пространством [Текст] / Н.И. Лобков, А.И. Сергиенко, Л.В. Сергиенко и др. // Физико-технические проблемы горного производства / Под общей редакцией А.Д. Алексева. – Донецк: ИФГП НАНУ. – Вып. 10. – 2007. – С. 119–127.
14. Лобков Н.И. Определение параметров обрушения трудноуправляемой кровли в лавах пологих пластов Донбасса [Текст] / Н.И. Лобков, А.И. Сергиенко, Е.Н. Халимендигов // Физико-технические проблемы горного производства / Под общей редакцией А.Д. Алексева. – Донецк: ИФГП НАНУ. – Вып. 12. – 2009. – С. 113–123.



*I.V. Antypov, M.I. Lobkov, Y.A. Lyashok, O.I. Serqienko*

**АНАЛІТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗРУШЕННЯ ГІРНИЧОГО МАСИВУ  
НАД ВИРОБЛЕНИМ ПРОСТОРОМ**

*Представлено результати нових досліджень характеру й особливостей зрушення гірничого масиву над виробленим простором з урахуванням розташування лави відносно недоторканого й порушеного гірничого масиву.*

*I.V. Antypov, N.I. Lobkov, Y.A. Lyashok, A.I. Serqienko*

**ANALYTICAL RESEARCHES OF MINING MASSIFF SHIFTING  
ABOVE OPEN AREA**

*The newest researches results of character and features shifting mining massiff over the open area taking into account an arrangement of a longwall concerning the untouched and broken area are presented.*