

К ВОПРОСУ ОБ УСТОЙЧИВОСТИ КРОВЛИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ВНЕЗАПНЫХ ОБРУШЕНИЯХ БОКОВЫХ ПОРОД

С. Подкопаев¹, И. Иорданов¹, Д. Чепига^{1*}

¹Кафедра разработки месторождений полезных ископаемых, Донецкий национальный технический университет, Покровск, Украина

*Ответственный автор: e-mail daria.chepiha@donmtu.edu.ua, тел. +380999815583

STABILITY OF THE COAL SEAM ROOF DURING THE SUDDEN COLLAPSE OF LATERAL ROCKS

S. Podkopaiev¹, I. Iordanov¹, D. Chepiha^{1*}

¹Department of Mineral Deposits, Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine

*Corresponding author: e-mail daria.chepiha@donmtu.edu.ua, tel. +380999815583

ABSTRACT

Purpose. To study the effect of dangerous manifestations of rock pressure (in the form of sudden lateral rock collapse) on the state of the coal seam roof developed in difficult mining and geological conditions by various methods of controlling mining pressure and protecting workings.

Methods. Analytical studies were carried out using the basic principles of the theories of elasticity, classical mechanics, and oscillations. The roof rocks were presented in the form of a beam whose free end has different versions of support.

Findings. As a result of the conducted studies, it was established that in the case of caving in the stratified rock strata, in order to preserve mine workings in the operational state, roof rocks should rest either on filling mass or yielding supports. This will reduce rigidity of the given system and the magnitude of the acting force during the strike of stratified rocks on the beam, due to the increase in the time interval between the application of this force and the maximum deflection of the roof rocks of the developed seam.

Originality. To determine the stress state of the immediate roof rocks of the developed coal seam, it is necessary to take into account rigidity of the system under consideration. The rigidity value is determined not only by the static deflection of the structure (beam), but also by the yielding capacity of the support under consideration.

Practical implications. The proposed approach to predicting stability of mine workings will contribute to the creation of safe working conditions during mining operations in complex mining and geological conditions, including sudden collapses of lateral rocks.

Keywords: rock pressure, dynamic load, rockburst, fluctuations, rock lamination, goaf stowing

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время работа предприятий угольной промышленности Украины осуществляется в постоянно ухудшающихся горно-геологических условиях. Малая мощность разрабатываемых пластов, повышенная геологическая нарушенность и тектоническая трещиноватость вмещающих пород, являются отличительной особенностью угольных месторождений украинского Донбасса.

Опыт работы глубоких шахт показывает, что в результате ведения горных работ, в зонах разгрузки, в углепородном массиве начинает проявляться такой природный фактор, как расслоения боковых пород, приводящий со временем к сдвигению нарушенной

толщи и ее обрушениям. При традиционных способах управления горным давлением полным обрушением кровли или удержанием кровли на кострах, возводимые позади лавы искусственные сооружения не способны противостоять сдвигению нарушенной толщи, а применяемые способы охраны штреков различного рода конструкциями из дерева, не обеспечивают надежной защиты выработок от опасных проявлений горного давления.

Детальный анализ аварий, произошедших на шахтах Украины в период с 2000 – 2016 гг., позволяет сделать вывод о том, что основными причинами завалов выработок, является недостаточная изученность природы обрушений и, в связи с этим, приня-

тие ошибочных технических решений при выборе способа управления горным давлением и охраны подготовительных выработок.

Изучение природы и особенностей обрушений, как разновидности опасных проявлений горного давления, их влияние на состояние боковых пород и, на основе этого, разработка эффективных мероприятий, направленных на повышение устойчивости горных выработок, будет способствовать созданию условий безопасного ведения горных работ в условиях глубоких шахт со сложными горно-геологическими условиями.

Традиционно считается, что проявления горного давления в выработках зависят от совокупного влияния многих горно-геологических факторов, к которым первостепенно следует относить напряженное состояние осадочных горных пород и их физико-механические свойства. Изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине (Nikolin, Podkopaev, Agafonov, & Maleev, 2005) позволило установить, что характер его опасных проявлений определяется не только напряженным состоянием массива осадочных горных пород и их физико-механическими свойствами, но и спецификой формирования последнего, обусловившей неупругое деформирование при объемном сжатии, а также способность деформироваться и разрушаться при разгрузке.

Считается (Nikolin, Podkopaev, Agafonov, & Maleev, 2005; Radchenko, Medvedev, & Kuzmenko, 2010), что наличие зон разгрузки способствует расслоению боковых пород, их проскальзыванию на контактах над- и подработанных слоев, появлению и раскрытию трещин разлома, нормальных к напластованию и зачастую не совпадающих с природными трещинами. В таких случаях, подработанные и расслоившиеся боковые породы, оседающие на хаотически обрушенные слои непосредственной кровли разрабатываемого угольного пласта, представляют собой блочный массив, состоящий из балок различной длины. Причем породы основной кровли, представленные в виде породной консоли, одновременно изгибаются и неконтролируемо обрушаются позади очистного забоя, создавая неблагоприятную геомеханическую обстановку в окрестности горных выработок. На параметры и динамику образования зон, в которых происходят внезапные обрушения боковых пород, в значительной степени влияет способ управления кровлей в лаве и охраны выработок (Viktorov, Iofis, & Goncharov, 2005). В таких условиях применяемые в очистном забое деревянные средства охраны (костры, накатные костры), предназначенные для эффективного поддержания боковых пород, не способны противостоять сдвигению расслоившейся толщи, что при несоблюдении определенных критериев, способствует завалу горных выработок.

Согласно (Tsigler, 2002), динамические нагрузки, проявляющиеся в результате внезапного ударного воздействия на конструкцию, могут частично нейтрализоваться за счет применения податливых опор или при наличии упругого основания в рассматриваемой конструкции или сооружении.

Исследованиями ДонУГИ и ДонНТУ (Zhukov, Vyistorop, Kolchin, & Grigoryuk, 1984; Zborschik & Podkopaev, 1992) ранее было установлено, что закладочный массив предотвращает развитие сдвига горных пород в окрестности выработок и создает зоны устойчивых пород впереди и позади очистного забоя. По всей видимости, закладочный массив, на который опираются породы кровли, обеспечивая их плавный прогиб, устраняет негативные явления, проявлявшиеся в углепородной толще в результате обрушений боковых пород.

Но при этом следует отметить, что характерной особенностью динамических нагрузок, которые имеют место, в т.ч. при внезапных обрушениях боковых пород, является то, что в результате ударного воздействия на инженерные конструкции или сооружения в последних возникают колебания (Richard & Whitman, 1967; Timoshenko, 1972; Pippard, 1989; Agarwal, Bohner, Grace, & O'Regan, 2005). Очевидно, понятие устойчивости боковых пород и горных выработок, должно быть тесно связано с учением о колебаниях, имеющих место в результате ведения горных работ, в т.ч. при внезапных обрушениях боковых пород.

Поэтому, для изучения влияния опасных проявлений горного давления, в виде внезапных обрушений расслоившейся толщи, на состояние боковых пород и горных выработок, при разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях, нами были проведены аналитические исследования с привлечением основных положений теории упругости, классической механики и теории колебаний.

2. ИЗЛОЖЕНИЕ МАТЕРИАЛА И РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве параметрического обеспечения геомеханических расчетов устойчивости боковых пород при различных способах управления кровлей в очистном забое и охране горных выработок, наиболее часто используются ситуации, определяемые статическим методом приложения нагрузки. Однако в сложных горно-геологических условиях разработки угольных пластов, когда возможны внезапные обрушения боковых пород кровли, необходимо учитывать динамический вид нагружения исследуемых конструкций, сооружений или их элементов.

В динамических задачах, в частности в задачах о колебаниях, положение точек изучаемой системы изменяется с течением времени и установленные координаты являются функциями времени (Timoshenko, 1972; Timoshenko, Yang, & Unver, 1985; Rabinovich & Trubetskoy, 2000; Sinha, 2010). Основная задача динамического исследования состоит в нахождении этих функций, т.е. в определении закона движения рассматриваемой системы.

На Рисунке 1а, б породы кровли разрабатываемого угольного пласта представлены в виде балки длиной l , (м). В одном случае, свободный конец балки имеет неподвижную шарнирную опору (Рис. 1а), что в реальных условиях соответствует поддержанию пород кровли жесткими конструкциями.

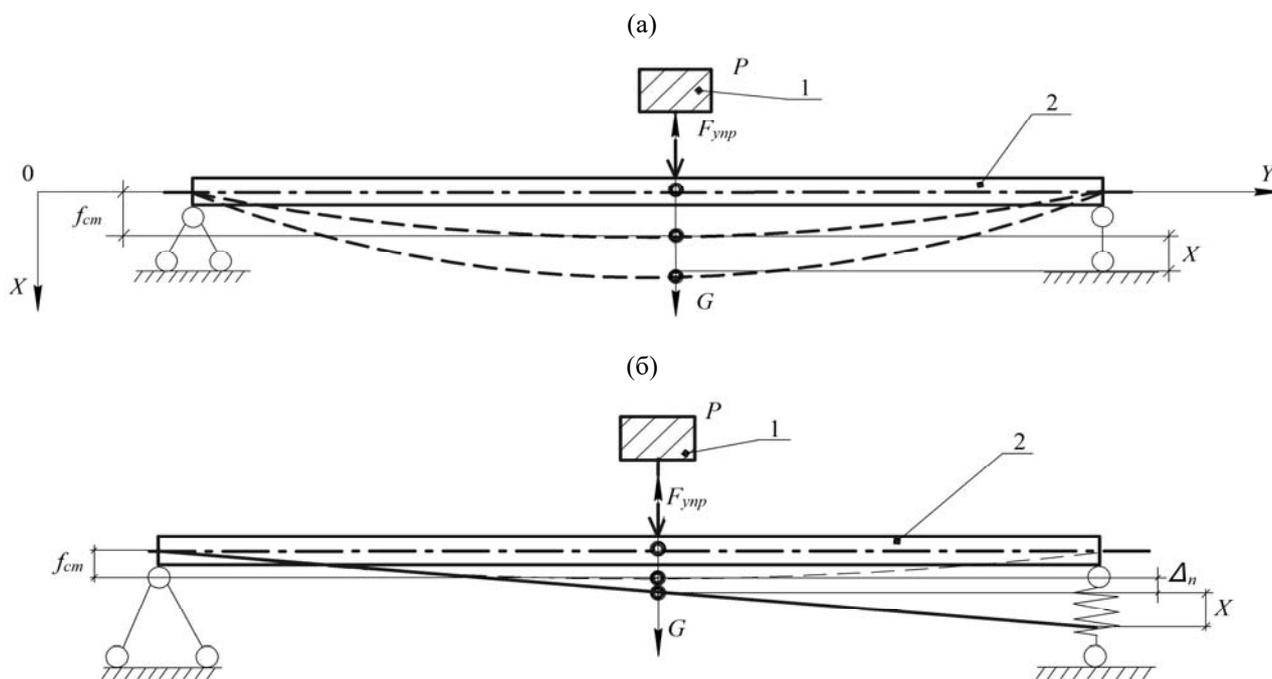


Рисунок 1. Расчетная схема к определению влияния обрушений пород на состояние кровли разрабатываемого пласта, представленной в виде балки: (а) с неподвижной шарнирной опорой; (б) с податливой опорой; $E = 15000$ МПа; $I = 0.083$ м³; $m = 1000$ кг; 1 – груз массой m , кг; 2 – балка – породы непосредственной кровли пласта

В другом – свободный конец балки опирается на податливую опору, которая имеет жесткость C_n , (Н/м), (Рис. 1б), аналогично применению закладки выработанного пространства. С высоты h , (м) на балку падает груз массой m , (кг) и в результате действующей силы, балка деформируется. Действие силы изобразим в произвольный момент времени, когда координата равна x (Рис. 1а, б).

Рассмотрим изменение положения балки под действием силы ее тяжести G , (Н) и силы упругости F_{ynp} , (Н), когда действующая сила приложена в центре балки (Рис. 1а, б).

Дифференциальное уравнение движения балки, в проекции на ось X , имеет вид:

$$m\ddot{x} = \sum F_X = G - F_{ynp}, \quad (1)$$

где:

G – сила тяжести балки, Н;

F_{ynp} – сила упругости балки, Н.

Согласно (Richard & Whitman, 1967):

$$F_{ynp} = C\Delta, \quad (2)$$

где:

C – жесткость балки, Н/м;

Δ – полный прогиб балки, м.

Из Рисунка 1а видно, что полный прогиб балки равен:

$$\Delta = f_{cm} + x, \quad (3)$$

где:

f_{cm} – статический прогиб балки, м.

С учетом вышеизложенного, выражение (1) принимает вид:

$$m\ddot{x} = mg - C(f_{cm} + x) = mg - cf_{cm} - cx. \quad (4)$$

Так как в положении статического равновесия:

$$mg = F_{cm} = cf_{cm}, \quad (5)$$

то выражение (1) можно представить в виде:

$$m\ddot{x} = -cx, \quad (6)$$

или согласно (Panovko, 1976) как дифференциальное уравнение свободных колебаний:

$$\ddot{x} + k^2x = 0, \quad (7)$$

где:

$$k = \sqrt{\frac{C}{m}}. \quad (8)$$

Для рассматриваемых условий из (2) следует:

$$C = \frac{mg}{f_{cm}}, \quad (9)$$

где:

m – масса обрушившихся пород, кг.

Выражение для определения круговой частоты k ,

$\left(\frac{1}{c}\right)$ собственных колебаний с учетом (Richard &

Whitman, 1967), будет иметь вид:

$$k = \sqrt{\frac{g}{\Delta}}. \quad (10)$$

Для случая, изображенного на Рисунке 1а, когда рассматриваемая система имеет на свободном конце неподвижную шарнирную опору с учетом состояния статического равновесия:

$$\Delta = f_{cm}, \quad (10)$$

и тогда:

$$k = \sqrt{\frac{g}{f_{cm}}}. \quad (11)$$

Для случая, изображенного на Рисунке 1б, значение круговой частоты так же определяется по выражению (10), когда:

$$\Delta = f_{cm} + \Delta_{под}, \quad (12)$$

где:

$\Delta_{под}$ – величина усадки податливой опоры, м.

На Рисунке 2 представлены зависимости, отражающие изменение круговой частоты собственных колебаний и прогиба балки от ее длины, с учетом вида опирания ее свободного конца.

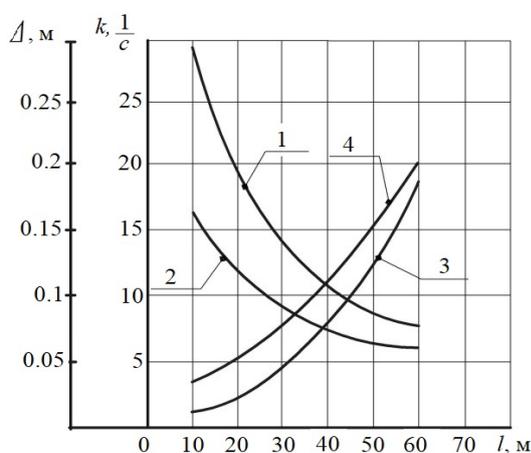


Рисунок 2. Изменение круговой частоты собственных колебаний k , (1/с) и прогиба Δ , (м) балки от ее длины l , (м): 1, 2 – круговая частота собственных колебаний, когда свободный конец балки опирается на неподвижную шарнирную (1) или податливую (2) опору; 3, 4 – прогиб балки с неподвижной шарнирной (3) или податливой (4) опорой

□становлено, что круговая частота собственных колебаний с увеличением длины балки, с $l = 10$ м до $l = 60$ м, т.е. в 6 раз, уменьшается в 2.5 – 3.2 раза. При этом прогиб балки значительно увеличивается (Рис. 2). Очевидно, круговая частота собственных колебаний не зависит от состояния движения рассматриваемой системы, а является ее собственной характеристикой и обуславливается упругими свойствами материала балки, т.е. физико-механическими свойствами пород кровли разрабатываемого угольного пласта и величиной податливости опор, на которые опирается балка.

В реальных условиях, движение рассматриваемой системы зависит не только от действия восстанавливающих сил (Timoshenko, 1972; Panovko, 1976; Rabinovich & Trubetskoy, 2000; Kelly, 2006; Sinha, 2010; Baddour, 2011; Inman & Singh, 2014). На этот процесс влияет и ряд ограничивающих факторов, например, сопротивление среды. В этом случае, согласно (Timoshenko, Yang, & Unver, 1985; Tsigler, 2002) выражение:

$$x = Ae^{-\beta t} \sin(k_1 t + \alpha), \quad (13)$$

где:

β – коэффициент затухания колебаний, 1/с:

$$\beta = \frac{r}{2m}, \quad (14)$$

r – коэффициент сопротивления среды, принимаем равным $r = 0.5$ кг/с;

k_1 – круговая частота собственных колебаний с учетом их затухания, 1/с:

$$k_1 = \sqrt{k^2 - \beta^2}; \quad (15)$$

A – амплитуда собственных колебаний системы, м:

$$A = \sqrt{x_0^2 + \frac{v_0^2}{k_1^2}}; \quad (16)$$

α – начальная фаза колебаний, определяемая из начальных условий;

x_0 – координата точки тела, зависящая от изменения положения системы при ударе обрушившихся пород о балку, т.е. отклонение системы от состояния статического равновесия, м. Представляет собой убывающую функцию времени с переменной амплитудой, т.е. затухающие колебания.

Для анализа ситуаций, учитывающих внезапные обрушения боковых пород, т.е. ударное воздействие на балку, рассмотрим случай, когда ее свободный конец опирается на неподвижную шарнирную опору (Рис. 1а). Для определения величины x_0 , (м), т.е. координаты точки тела, которая зависит от изменения положения рассматриваемой системы при ударе, используем закон сохранения энергии в интегральной форме (Filin, 1981; Ginsberg, 2007), т.е.:

$$\frac{mv_1^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = \sum A(\bar{F}_k) = Pf - \int_0^f F_{ynp} dy, \quad (17)$$

где:

v_0, v_1 – соответственно начальная скорость и скорость падения материальной точки, м/с.

Обрушившиеся на балку боковые породы считаем материальной точкой.

Из выражения (17) после соответствующих преобразований, получим:

$$f = \frac{2P}{C}. \quad (18)$$

Определим скорость v_1' , (м/с), с которой расслоившиеся породы падают на балку:

$$\frac{m(v_1')^2}{2} - \frac{m(v_0')^2}{2} = \sum A(\bar{F}_k) = Ph; \quad (19)$$

и при $v_0' = 0$:

$$v_1' = \sqrt{2gh}. \quad (20)$$

Рассмотрим теперь движение обрушившихся пород на балке:

$$\frac{m(v''_0)^2}{2} - \frac{m(v''_1)^2}{2} = \sum A(\bar{F}_k) = Pf - \frac{cf^2}{2}. \quad (21)$$

С учетом того, что $v_1'' = 0$ и $v_0'' = v_1' = \sqrt{2gh}$, после подстановки этих условий в (21) и соответствующих преобразований, получим выражение для определения прогиба балки в результате внезапного обрушения на нее пород, т.е.:

$$f_{y\partial} = f_{cm} + \sqrt{f_{cm}^2 + 2f_{cm} \cdot h}. \quad (22)$$

Теперь рассмотрим прогиб балки, когда ее свободный конец опирается на податливую опору (Рис. 1б). Опора (упругое основание) имеет жесткость C_n , (Н/м). В этом случае необходимо учитывать движение материальной точки (обрушившихся пород) под действием силы тяжести до удара, удар материальной точки о балку и движение материальной точки и балки по окончании удара.

Скорость материальной точки до удара определяется из теоремы об изменении кинетической энергии (Filin, 1981):

$$T - T_0 = \sum A, \quad (23)$$

где:

T – кинетическая энергия в момент окончания удара, Дж:

$$T = \frac{1}{2}mv_1^2; \quad (23')$$

$\sum A$ – потенциальная энергия обрушившихся пород, Дж:

$$\sum A = mgh. \quad (23'')$$

Тогда:

$$v_1 = \sqrt{2gh}. \quad (24)$$

Рассмотрим удар материальной точки о балку, считая его неупругим, когда коэффициент восстановления при ударе $k = 0$ (Lapshin, 2006; Ginsberg, 2007; Kochetkov & Fedorov, 2013). Из этого следует, что материальная точка и балка после удара будут иметь одну скорость V , (м/с), а количество движения системы после удара определяется по выражению (Filin, 1981):

$$Q_T = (m + m_1)V, \quad (25)$$

а до удара:

$$Q_0 = mv_1 + m_1v_2 = mv_1, \quad (26)$$

т.к. балка является неподвижной и скорость движения балки $v_2 = 0$, (м/с).

Сумма ударных импульсов \bar{S}_e , ((кг·м)/с) внешних сил равна 0, т.е. когда:

$$Q_T - Q_0 = \sum \bar{S}_e, \quad (27)$$

где:

Q_T – количество движения системы в момент окончания удара, (кг·м)/с;

Q_0 – количество движения системы в момент начала удара, (кг·м)/с.

Количество движения системы при ударе не изменится:

$$Q_T = Q_0, \quad (28)$$

или

$$(m + m_1)V = mv_1, \quad (29)$$

а скорость материальной точки при ударе о балку равна:

$$V = \frac{m}{m + m_1}v_1, \quad (30)$$

где:

m_1 – масса балки, кг.

Считается (Panovko, 1976), когда колебания вызваны мгновенным ударом по балке, величина v_0 в (16) определяется по выражению (30).

Для определения максимального прогиба свободного конца балки, в результате динамического воздействия, применим теорему об изменении кинетической энергии при этом перемещении, т.е.:

$$T - T_0 = \sum A. \quad (31)$$

Следует отметить, что в конце перемещения скорость и кинетическая энергия равны 0, а в начале перемещения:

$$T_0 = \frac{1}{2}(m + m_1)V^2. \quad (32)$$

В связи с этим, работу совершают действующие на систему силы тяжести и упругости податливой опоры:

$$\sum A = (m + m_1)gf_{y\partial} + \frac{C_n}{2}\lambda_0^2 - \frac{C_n}{2}\lambda^2, \quad (33)$$

где:

$\lambda_0 = m_1g / 2C_n$ – деформация упругого основания в начальном положении, м;

$\lambda = \lambda_0 + f_{y\partial}^n$ – деформация податливой опоры в конечном положении, м.

Деформацию опоры при статическом нагружении определим как в (Podkopaiev, Iordanov, & Cheriha 2016):

$$\lambda_{cm} = \frac{m_1g}{2C_n}. \quad (34)$$

Тогда, после соответствующих преобразований, получим выражение для определения прогиба балки после удара о нее обрушившихся пород, при наличии податливой опоры на свободном конце, т.е.:

$$f_{y\partial}^n = \lambda_{cm} + \sqrt{\lambda_{cm}^2 + 2\lambda_{cm}h \frac{m}{m + m_1}}. \quad (35)$$

На Рисунке 3, с учетом выполненных аналитических исследований, установлены зависимости, учитывающие для балок различной длины l , (м) величину прогиба $f_{y\partial}$, (м) в результате обрушения на нее боковых пород. При этом учитывались условия опирания свободного конца балки и высота падения обрушившихся пород.

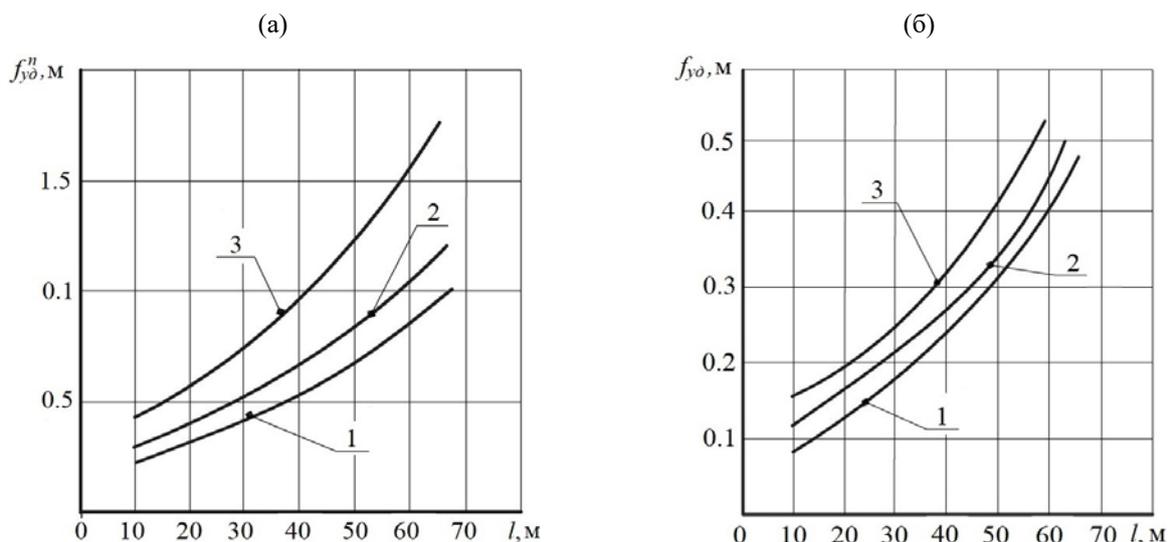


Рисунок 3. Изменение прогиба балки f_{y0} , (м) длиной l , (м) при обрушении боковых пород массой $m = 1000$ кг с высоты h , (м) в случае: (а) когда свободный конец балки опирается на неподвижную шарнирную опору; (б) то же, на податливую опору: 1 – $h = 1$ м; 2 – $h = 2$ м; 3 – $h = 5$ м

Из Рисунок 3 видно, что в рассматриваемых нами случаях, с увеличением длины балки l , (м), прогиб последней увеличивается. Полученные зависимости, вид которых определили путем подстановки соответствующих значений для рассматриваемых условий в выражения (22) и (35), необходимо использовать при определении величины x_0 , (м) в выражении (16).

С учетом (16) в выражении (13) нами получены зависимости, отражающие изменение координаты точки тела x , (м) во времени t , (с) при обрушении пород массой $m = 1000$ кг на балку длиной $l = 10$ м с высоты $h = 2$ м, когда балка имеет на свободном конце неподвижную шарнирную или податливую опору (Рис. 4).

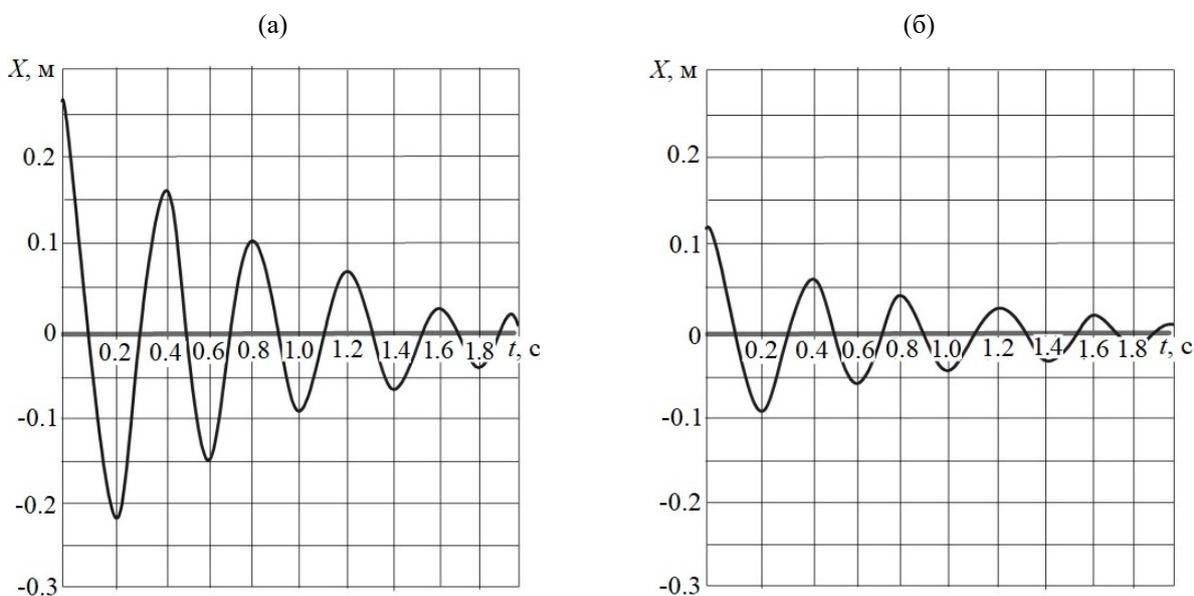


Рисунок 4. Изменение координаты точки тела x , (м) во времени t , (с) при обрушении боковых пород массой $m = 1000$ кг на балку длиной $l = 10$ м с высоты $h = 2$ м: (а) когда балка имеет неподвижную шарнирную опору; (б) когда балка имеет податливую опору

Из Рисунок 4 видно, что максимальная величина смещения $x = 0.26$ м отмечена при наличии на свободном конце балки неподвижной шарнирной опоры (Рис. 4а); минимальная – когда $x = 0.11$ м при податливой опоре (Рис. 4б). Графики, определяющие изменение координаты x , (м) от величины t , (с) при таком движении имеют характерный вид, показывающий, что исследуемая точка проходит через положение равновесия ($x = 0$), двигаясь попеременно в противо-

положных направлениях до состояния статического равновесия. Факт затухания колебательного процесса, определяется множителем $e^{-\beta t}$, а величина смещения точки от положения статического равновесия – видом опирания балки. Однако во всех случаях, геометрический параметр x , (м) рассматриваемой системы, определяет напряженно-деформированное состояние балки, при изменении величины которого во времени, одновременно изменяются напряжения и деформации.

Для того чтобы выполнить анализ напряженно-деформированного состояния пород кровли разрабатываемого пласта, необходимо определить величины действующих в рассматриваемой системе напряжений. Выполним статический расчет балки, имеющей в первом варианте на свободном конце жесткую опору, в другом – податливую. Считается (Tsigler, 2002), что в рассматриваемых случаях опасным будет сечение в центре пролета балки, поскольку в этом месте изгибающий момент M_{max} , (Нм) наибольший. Тогда, напряжения от статического действия возникающей силы P , (Н) можно определить как в (Richard & Whitman, 1967) по выражению:

$$\sigma_{max}^{ст} = \frac{M_{max}}{W}, \quad (36)$$

где:

W – момент сопротивления, см³.

Динамическое воздействие нагрузок на сооружение и конструкции, при расчетах их устойчивости производится введением динамического коэффициента в полученное решение соответствующей статической задачи (Kilchesvkiy, 1969; Timoshenko, Yang, & Unver, 1985).

Динамический коэффициент $k^{дин}$ для случаев, изображенных на Рисунке 1а, б, можно определить по выражению:

$$k^{дин} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta}}, \quad (37)$$

где:

Δ – прогиб балки, м.

Ранее, нами было установлено, что для случая, представленного на Рисунке 1а, $\Delta = f_{cm}$, для случая на Рисунке 1б – $\Delta = f_{cm} + \Delta_{под}$. Соответственно, величину напряжений, действующих в сечении балки, можно определить по выражению:

$$\sigma_1^{max} = k_1^{дин} \sigma_{cm}; \quad (38)$$

$$\sigma_2^{max} = k_2^{дин} \sigma_{cm}, \quad (39)$$

где:

$k_1^{дин}$, $k_2^{дин}$ – соответственно, динамический коэффициент для балки с неподвижной шарнирной или податливой опорой.

С учетом условий деформирования системы, а также выражений (37), (38) и (39) на Рисунке 5 представлены зависимости, отражающие изменение величины динамического коэффициента $k^{дин}$ и максимальных напряжений σ_{max} , (МПа), действующих в сечении балки при ее различной длине l , (м) и вариантах опирания.

Из Рисунка 5 видно, что с увеличением длины балки, значения динамического коэффициента уменьшаются. Для балки с неподвижной шарнирной опорой, значение исследуемой величины уменьшается в 3 раза, с $k_1^{дин} = 17.3$ до $k_2^{дин} = 5.7$. С учетом податливой опоры, значения этого коэффициента изменятся с $k_1^{дин} = 11.5$ до $k_2^{дин} = 5.4$, т.е. уменьшаются в 2.1 раза (Рис. 5, зависимости 1, 2). Для балок, длина которых $l > 60$ м, значения динамического коэффициента практически не отличаются.

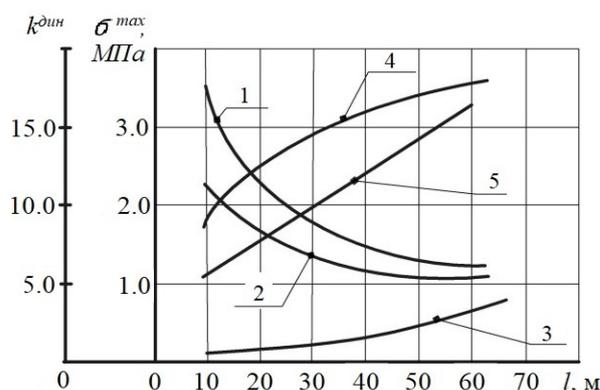


Рисунок 5. Изменение величины максимальных напряжений в сечении балки σ_{max} , (МПа) и динамического коэффициента $k^{дин}$ при вариации ее длины l , (м): 1, 2 – изменение величины динамического коэффициента для балки с неподвижной шарнирной (1) или податливой (2) опорой; 3 – изменение величины напряжений $\sigma_{max}^{ст}$ от статического действия возмущающей силы; 4, 5 – изменение максимальных напряжений в сечении балки с неподвижной шарнирной (4) или податливой (5) опорой

Величина напряжений $\sigma_{max}^{ст}$, (МПа) от статического действия обрушившихся на балку пород с увеличением ее длины с $l = 10$ м до $l = 60$ м, увеличивается в 6 раз (Рис. 5, зависимость 3). Поэтому, с учетом значений динамического коэффициента $k^{дин}$ и вариантов опирания балки, максимальные напряжения в ее сечении также увеличиваются. При наличии на свободном конце балки неподвижной шарнирной опоры, рост составляет 1.9 раза (Рис. 5, зависимость 4), при наличии податливой опоры – 2.8 раза (Рис. 5, зависимость 5).

Однако, для балок, длина которых составляет $l = 10 - 30$ м, величина максимальных напряжений, с учетом динамического коэффициента при наличии податливой опоры на ее свободном конце, меньше на 40% в сравнении с расположением там же неподвижной шарнирной опоры (Рис. 5, зависимость 4, 5). С увеличением длины балки $l > 60$ м, значения максимальных напряжений практически совпадают. Это происходит за счет увеличения статического прогиба балки и уменьшения жесткости рассматриваемой системы.

На Рисунке 6 представлены зависимости изменения жесткости C , (Н/м) системы и промежутка времени t , (с) между моментом приложения действующей силы и достижением максимального прогиба балки при ее различной длине l , (м).

Жесткость рассматриваемой системы, с учетом опирания свободного конца балки, определяли по выражению (9) с учетом условий (10') и (12) (Рис. 6), а промежуток времени t , (с) между моментом приложения действующей силы и достижением максимального прогиба балки по выражению (Kilchevskiy, 1976; Gross, Ehlers, Wriggers, Schröder, & Müller, 2017):

$$t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\Delta}{g}}. \quad (40)$$

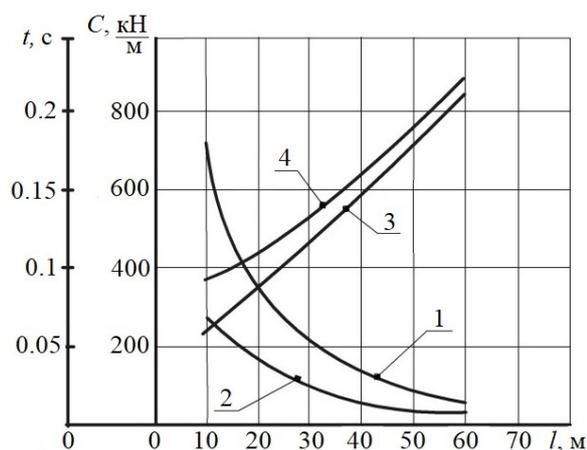


Рисунок 6. Изменение жесткости системы C , (Н/м) и промежутка времени t , (с) между моментом приложения действующей силы и достижением максимального прогиба при различной длине балки l , (м): 1, 2 – жесткость системы, когда свободный конец балки опирается на неподвижную шарнирную (1) или податливую (2) опору; 3, 4 – изменение промежутка времени, то же при неподвижной шарнирной (3) или податливой (4) опоре

Установлено, что чем меньше жесткость рассматриваемой системы, тем больше время, которое затрачивается на ее максимальный прогиб, а, следовательно, меньше величина действующей силы при обрушении расслоившихся пород на балку (Рис. 6). Этим можно объяснить эффективность применения податливых опор (закладочного массива) при внезапных обрушениях боковых пород.

Для надежной работы рассматриваемой системы, т.е. эксплуатационного состояния горной выработки, необходимо, чтобы все ее элементы были устойчивы. Это достигается определенными условиями деформирования балки, когда величины возникающих в ее сечении напряжений не превышают предельных значений. При этом породы непосредственной кровли разрабатываемого угольного пласта должны деформироваться в установленных пределах, когда выполняются соответствующие условия прочности для определенного типа и вида нагружения боковых пород. Величину критических напряжений в таком случае, определяют исходя из формулы Эйлера (Timoshenko, 1972).

Однако ее применение имеет ряд ограничений, которые должны учитывать момент потери устойчивости балки, когда действующие в любом ее сечении напряжения не превышают предела пропорциональности. В тех случаях, когда такие условия не выполняются, разрушение балок будет происходить от действующих изгибных напряжений.

Для таких условий пределы применимости формулы Эйлера, можно установить исходя из понятия предельной гибкости балки, величина которой зависит от физико-механических свойств пород непосредственной кровли, т.е.:

$$\lambda_{np} = \pi \sqrt{\frac{E}{[\sigma_{изг}]}} \quad (41)$$

где:

$[\sigma_{изг}]$ – предел прочности пород непосредственной кровли на изгиб, Н/м²;

E – модуль упругости пород непосредственной кровли, Н/м².

С учетом этого, формула Эйлера дает истинное значение нагрузки, при которой происходит потеря устойчивости балки, т.е. когда выполняется соотношение:

$$\sigma_{max}^g > \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (42)$$

Очевидно, что для рассматриваемых условий при прогнозировании устойчивости пород непосредственной кровли и горных выработок, в результате обрушения боковых пород, критическая нагрузка всегда подобна разрушающей при расчете балки на изгиб.

Таким образом, в результате выполненных исследований установлено, что для сохранения горных выработок в эксплуатационном состоянии, когда имеют место опасные проявления горного давления, в виде внезапных обрушений расслоившейся породной толщи, необходимо ориентироваться на уменьшение жесткости рассматриваемой системы. С учетом таких требований, надежность рассматриваемой системы обеспечивается в том случае, когда породы кровли разрабатываемого пласта опираются на закладочный массив. Такое решение позволяет смягчить действие ударных нагрузок, которые имеют место при внезапных обрушениях боковых пород. При традиционных способах управления кровлей в очистном забое, уменьшение жесткости системы происходит за счет увеличения длины балки – консоли пород непосредственной кровли разрабатываемого угольного пласта. В этом случае, из-за отсутствия со стороны выработанного пространства эффективного подпора пород кровли, не обеспечивается ее устойчивое состояние, что увеличивает вероятность завала горной выработки при опасных проявлениях горного давления.

3. ВЫВОДЫ

При разработке угольных пластов в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах в результате расслоения боковых пород, опасность возникновения аварийных ситуаций исходит от внезапных обрушений боковых пород. Размещение позади очистного забоя опоры, в виде закладки выработанного пространства, позволит создать условия, в которых боковые породы сохраняют свою устойчивость и горные выработки будут находиться в эксплуатационном состоянии, что отвечает требованиям безопасного ведения горных работ. Для эффективного поддержания подработанного массива осадочных горных пород, необходимо установить оптимальные параметры закладочного массива.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы выражают благодарность сотрудникам факультета машиностроения, экологии и химических технологий Донецкого национального технического университета МОН Украины (г. Покровск) за консультации при подготовке работы.

REFERENCES

- Agarwal, R.P., Bohner, M., Grace, S.R., & O'Regan, D. (2005). *Discrete Oscillation Theory*. New York: Hindawi Publishing Corporation.
<https://doi.org/10.1155/9789775945198>
- Baddour, N. (2011). Recent Advances in Vibrations Analysis. Rigeika, Croatia: In Tech.
<https://doi.org/10.5772/861>
- Filin, A. (1981). *Prikladnaya mehanika tverdogo deformiruemogo tela*. Moskva: Nauka.
- Ginsberg, J. (2007). *Engineering Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/cbo9780511805899>
- Gross, D., Ehlers, W., Wriggers, P., Schröder, J. & Müller, R. (2017). *Dynamics – Formulas and Problems: Engineering Mechanics 3*. Berlin, Heidelberg: Springer – Verlag.
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-53437-3>
- Inman, D., & Singh, R. (2014). *Engineering Vibration*. London: Pearson Education.
- Kilchesvkiy, N.A. (1969) *Teoriya soudareniya tverdyyih tel*. Kyiv: Naukova dumka.
- Kilchevskiy, N.A. (1976) *Dinamicheskoe kontaktnoe szhatie tverdyyih tel. Udar*. Kyiv: Naukova dumka.
- Kelly, S. (2006). *Advanced Vibration Analysis*. London: CRC Press, Taylor & Francis Group.
<https://doi.org/10.1201/b15904>
- Kochetkov, A.V., & Fedorov, P.V. (2013) Nekotorye voprosy teorii udara. *Naukovedenie*, 1-15.
- Lapshin, V.V. (2006) Udar o poverhnost tela s dopolnitelnoy oporoy. *Vestnik Moskovskogo Gosudarstvennogo Tehnicheskogo Universiteta imeni N.E. Bauman. Estestvennyye nauki*, 45-53.
- Nikolin, V.I., Podkopaev, S.V., Agafonov, A.V., & Maleev, N.V. (2005). *Snizhenie travmatizma ot proyavleniy gornogo davleniya*. Donetsk: Nord-Press.
- Panovko, Y. (1976). *Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara*. Leningrad: Mashinostroenie.
- Pippard, A. (1989). *The Physics of Vibration*. Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/cbo9780511622908>
- Podkopaev, S.V., Iordanov, I.V., & Chepiga, D.A. (2016). O dinamicheskikh nagruzkah pri vnezapnykh obrusheniyyah bokovykh porod. *Suchasni Resursoenerhozberihayuchi Tekhnolohiyi Hirnychoho Vyrobnystva*, 2(18), 99-112.
- Rabinovich, M.I., & Trubetskov, D.I. (2000). *Vvedenie v teoriyu kolebaniy i voln*. Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika".
- Radchenko, V.V., Medvedev, E.N., & Kuzmenko, N.S. (2010). *Predostyraschenie travmatizma ot obvalov i obrusheniy na ugolnykh shahtakh*. Kyiv: Naukova dumka.
- Richard, F.E., & Whitman, R.V. (1967). Comparison of Footing Vibration with Theory. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, 96(3), 143-168.
- Sinha, A. (2010). *Vibration of Mechanical Systems*. Cambridge: Cambridge University Press.
<https://doi.org/10.1017/cbo9780511778087>
- Timoshenko, S. (1972). *Kurs teorii uprugosti*. Kyiv: Naukova dumka.
- Timoshenko, S.P., Yang, D.H., & Unver, U. (1985). *Kolebaniya v inzhenernom dele*. Moskva: Mashinostroenie.
- Tsigler, F. (2002). *Mehanika tverdyyih tel i zhidkostey*. Izhevsk: NITs "Regulyarnaya i haoticheskaya dinamika".
- Viktorov, S.D., Iofis, M.A., & Goncharov, S.A. (2005). *Sdvizhenie i razrushenie gornyykh porod*. Moskva: Nauka.
- Zborschik, M.P., & Podkopaev, S.V. (1992). Mehanizm povyisheniya ustoychivosti krovli v lavah pri primenenii zakladki vyirabotannogo prostranstva. *Ugol Ukrainy*, (5), 20-23.
- Zhukov, V.E., Vyistorop, V.V., Kolchin, A.M., & Grigoryuk, E.V. (1984). *Maloohodnaya tehnologiya dobychi uglja*. Kyiv: Tehnika.

ABSTRACT (IN RUSSIAN)

Цель. Изучение влияния опасных проявлений горного давления, в виде внезапных обрушений боковых пород, на состояние кровли разрабатываемого угольного пласта при различных способах управления горным давлением и охраны выработок в сложных горно-геологических условиях.

Методика. Для достижения поставленной цели были выполнены аналитические исследования с привлечением основных положений теории упругости, классической механики и теории колебаний, когда в рассматриваемой системе породы кровли представлены в виде балки, свободный конец которой имеет различные варианты опирания.

Результаты. В результате выполненных исследований было установлено, что при обрушениях расслоившейся породной толщи для сохранения горных выработок в эксплуатационном состоянии, породы кровли должны опираться на закладочный массив или податливые опоры. Это позволит уменьшить жесткость рассматриваемой системы, а значит и величину действующей силы при ударе расслоившихся пород о балку, за счет увеличения промежутка времени между моментом приложения этой силы и достижением максимального прогиба пород кровли разрабатываемого пласта.

Научная новизна. Для определения напряженно-деформированного состояния пород непосредственной кровли разрабатываемого угольного пласта, необходимо учитывать жесткость рассматриваемой системы, величина которой определяется не только статическим прогибом конструкции (балки), но и учитывает податливость опоры, на которую опирается рассматриваемая конструкция.

Практическая значимость. Предложенный подход в прогнозировании устойчивости пород кровли и горных выработок будет способствовать созданию безопасных условий труда при ведении горных работ в сложных горно-геологических условиях, в т.ч. при внезапных обрушениях боковых пород.

Ключевые слова: горное давление, динамические нагрузки, внезапные обрушения, колебания, расслоение боковых пород, закладка выработанного пространства

ABSTRACT (IN UKRAINIAN)

Мета. Вивчення впливу небезпечних проявів гірничого тиску у вигляді раптових обвалень бічних порід, на стан покрівлі розроблювального вугільного пласта при різних способах управління гірничим тиском і охорони виробок в складних гірничо-геологічних умовах.

Методика. Для досягнення поставленої мети були виконані аналітичні дослідження з залученням основних положень теорії пружності, класичної механіки і теорії коливань, коли в даній системі породи покрівлі представлені у вигляді балки, вільний кінець якої має різні варіанти обпирання.

Результати. В результаті виконаних досліджень було встановлено, що при обваленнях розшарованої породою товщі для збереження гірничих виробок в експлуатаційному стані, породи покрівлі повинні спиратися на закладний масив або податливі опори. Це дозволить зменшити жорсткість даної системи, а значить і величину ударної сили при обваленні розшарованих порід на балку, за рахунок збільшення проміжку часу між моментом докладання цієї сили і досягненням максимального прогину порід покрівлі пласта.

Наукова новизна. Для визначення напружено-деформованого стану порід безпосередньої покрівлі вугільного пласта, що розробляється, необхідно враховувати жорсткість даної системи, величина якої визначається не тільки статичним прогином конструкції (балки), а й враховує податливість опори, на яку спирається розглянута конструкція.

Практична значимість. Запропонований підхід в прогнозуванні стійкості порід покрівлі гірничих виробок сприятиме створенню безпечних умов праці при веденні гірничих робіт в складних гірничо-геологічних умовах, в т.ч. при раптових обваленнях бічних порід.

Ключові слова: *гірський тиск, динамічні навантаження, раптові обвалення, коливання, розшарування бокових порід, закладка виробленого простору*

ARTICLE INFO

Received: 12 September 2017

Accepted: 25 September 2017

Available online: 30 September 2017

ABOUT AUTHORS

Serhii Podkopaiev, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Mineral Deposits, Donetsk National Technical University, 2 Shybankova Ave., 85300, Pokrovsk, Ukraine. E-mail: serhii.podkopaiev@donntu.edu.ua

Ihor Iordanov, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mineral Deposits, Donetsk National Technical University, 2 Shybankova Ave., 85300, Pokrovsk, Ukraine. E-mail: gendir@eme.kiev.ua

Daria Chepiha, PhD Student of the Department of Mineral Deposits, Donetsk National Technical University, 2 Shybankova Ave., 85300, Pokrovsk, Ukraine. E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua