

И.В. Иорданов
Д.А. Чепига
Ю.И. Симонова
С.В. Волков
В.А. Коломиец

О ВЛИЯНИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА СОСТОЯНИЕ БОКОВЫХ ПОРОД ПРИ РАЗРАБОТКЕ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ

В результате выполненных исследований установлено, что при эксплуатации горных выработок, когда имеют место внезапные обрушения расщелившейся породной толщи, в боковых породах возникают колебания. Величина амплитуды таких колебаний определяет напряженно-деформированное состояние пород кровли разрабатываемого пласта. Изменение размаха колебаний во времени, одновременно изменяет величины напряжений и деформаций в кровле, представленной в виде балки, свободный конец которой имеет различные варианты опирания. Доказано, что применение закладки выработанного пространства, как способа управления горным давлением в сложных горно-геологических условиях, уменьшает не только величину амплитуды колебаний, в сравнении с традиционными способами управления горным давлением, но и величину действующей на породы кровли силы, возникающей при проявлении динамических нагрузок.

Ключевые слова: угольный пласт; кровля; почва; расслоение боковых пород; обрушение пород; горная выработка; податливая опора; закладочный массив.

Актуальность работы. Разработка угольных пластов в Украине характеризуется относительно низким уровнем технико-экономических показателей. В немалой степени это связано с отсутствием надежных и эффективных способов обеспечения устойчивости горных выработок.

Опыт работы шахт Украинского Донбасса показывает, что с ростом глубины горных работ в массиве осадочных горных пород начинает проявляться такой природный фактор, как расслоение боковых пород, оказывающий существенное влияние на состояние горных выработок и приводящий к возможному травматизму горнорабочих, в результате обрушений расщелившейся породной толщи.

Детальный анализ аварий, произошедших в период с 1990 по 2016г.г. на угольных шахтах Украины, позволяет сделать вывод о том, что основной причиной травматизма от обвалов и обрушений пород, является недостаточная изученность природы обрушений, а так же принятие ошибочных технических решений, способствующих созданию аварийных ситуаций. К последним можно относить несоответствие применяемых способов управления кровлей, средств и способов крепления и охраны горных выработок

конкретным горно-геологическим условиям разработки угольных пластов.

Очевидно изучение природы и особенностей обрушений и разработка мероприятий, направленных на повышение устойчивости боковых пород при проявлении динамических нагрузок, в виде внезапных обрушений расщелившейся породной толщи в горную выработку, будет способствовать сохранению ее эксплуатационного состояния и повышению безопасности горных работ.

Анализ исследований и публикаций.

Традиционно считается, что проявления горного давления в выработках зависят от совокупного влияния многих горно-геологических факторов, к которым первоначально следует относить напряженное состояние осадочных горных пород и их физико-механические свойства. Изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине [1] 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.

*) Работа выполняется под научно-методическим руководством докт.техн.наук, проф. С.Н.Александрова и докт.техн.наук, проф.С.В.Подкопаева ГВУЗ «ДонНТУ» МОН Украины

Считается [1,2], 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 условиях, 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 [1,3].

Сооружаемые средства охраны (костры, накатные костры), предназначенные для эффективного поддержания боковых пород, по мере продвижения очистного забоя, не способны противостоять сдвигению расслоившейся толщи, что в сложных горно-геологических условиях, увеличивает вероятность завала горных выработок.

Согласно [4], динамические нагрузки, проявляющиеся в результате внезапного ударного воздействия на конструкцию, могут частично нейтрализоваться за счет применения податливых опор, а так же при наличии упругого основания в рассматриваемой конструкции или сооружении. Исследованиями ДонУГИ и ДонНТУ [5,6] ранее было установлено, что применение закладки выработанного пространства, как способа управления горным давлением, предотвращает развитие сдвижения горных пород в окрестности выработок и создаёт зоны устойчивых пород впереди и позади очистного забоя. Считается [1], что закладочный массив, на который опираются расслоившиеся породы кровли обеспечивая их плавный прогиб, устраняет негативные явления, проявлявшиеся в углепородной толще в результате обрушений боковых пород.

Однако 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 отдельные их элементы, в последних возникают колебания [4,7,8,9]. Очевидно, понятие устойчивости боковых пород и горных выработок, должно быть тесно связано с учением о колебаниях, имеющих место в результате ведения горных работ, и особенно при внезапных обрушениях боковых пород.

Изучение особенностей обрушений, 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 сложным горно-геологическими условиями.

Постановка задачи. С целью изучения устойчивости горных выработок в сложных горно-геологических условиях, при действии на породы кровли разрабатываемого угольного пласта ударных нагрузок, в виде внезапных обрушений расслоившейся породной толщи, нами были проведены аналитические исследования с использованием основных положений классической механики, теории упругости и теории колебаний [4,7,13,15,24].

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, необходимо учитывать динамический вид нагружения исследуемых конструкций, сооружений или их элементов.

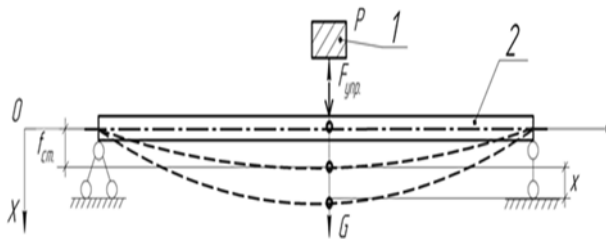
В динамических задачах, в частности в задачах о колебаниях, положение точек изучаемой системы изменяется с течением времени и установленные координаты являются функциями времени [4,16,17,18,19]. Основная задача динамического исследования состоит в

нахождении этих функций, т.е. в определении закона движения рассматриваемой системы.

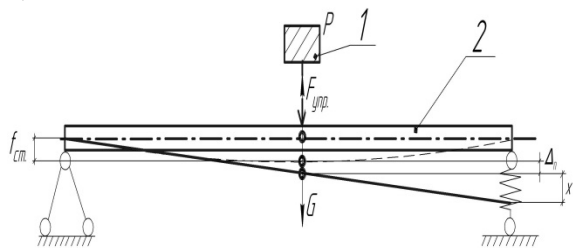
На рис. 1а, б породы кровли разрабатываемого угольного пласта представлены в виде балки длиной l , (м). В одном случае, свободный конец балки имеет неподвижную шарнирную опору (рис. 1а), что в реальных условиях соответствует поддержанию пород кровли жесткими конструкциями. В другом – свободный конец балки опирается на податливую опору, которая имеет жесткость C_p , (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 $F_{упр}$, (Н), когда действующая сила приложена в центре балки (рис. 1а, б).

а)



б)



1 – груз массой m , кг; 2 – балка – породы непосредственной кровли пласта.

Рис. 1. Расчетная схема к определению влияния внезапных обрушений расслоившихся 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.

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

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

где:

G - сила тяжести балки, Н;

$F_{упр}$ - сила упругости балки, Н.

Согласно [4,24]

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

где:

C - жесткость балки, Н/м;

Δ - полный прогиб балки, м.

Из рис. 1а видно, что полный прогиб балки равен

$$\Delta = f_{ст} + x \quad (3)$$

где:

$f_{ст}$ - статический прогиб балки, м.

С учетом вышеизложенного, выражение (1) принимает вид

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

Так как в положении статического равновесия

$$mg = F_{ст} = cf_{ст}, \quad (5)$$

то выражение (1) можно представить в виде

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

или согласно [13], как дифференциальное уравнение свободных колебаний

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

где:

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

Для рассматриваемых условий, из (2)

$$C = mg/f_{ст}, \quad (9)$$

где:

m - масса обрушившихся пород, кг.

а выражение для определения для круговой частоты k , ($\frac{1}{с}$) собственных колебаний, согласно [12,15], будет иметь вид

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

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

$$\Delta = f_{ст}. \quad (10')$$

Значение

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

Для случая, изображенного на рис. 1б, значение круговой частоты так ж

определяется по выражению

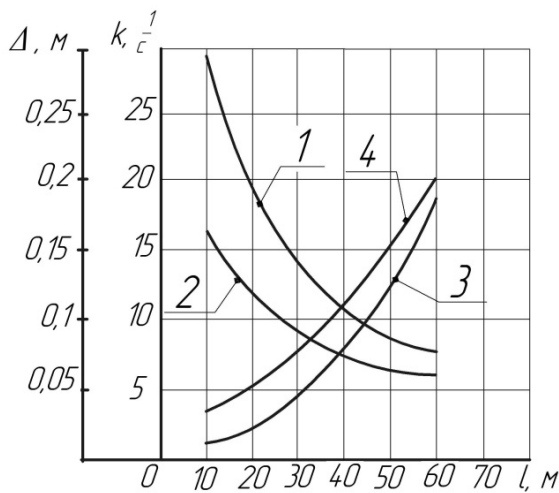
$$k = \sqrt{\frac{g}{f_{ст} + \Delta_{под}}}, \quad (12)$$

где:

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

На рис. 2 представлены зависимости отражающие изменение круговой частоты k , (1/с) собственных колебаний и прогиба балки Δ , (м) от ее длины l , (м), с учетом вида опирания ее свободного конца.

Установлено, 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.



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.

Рис. 2. Изменение круговой частоты собственных колебаний k , (1/с) и прогиба Δ , (м) балки от ее длины l , (м):

В реальных условиях, движение рассматриваемой системы зависит не только

от действия восстанавливающих сил [4,10]. На этот процесс влияет и ряд ограничивающих факторов, в т.ч., сопротивление среды. В этом случае, закон движения рассматриваемой системы можно представить в виде убывающей функции времени с переменной амплитудой, т.е. в виде затухающих колебаний [12,13]. С учетом вышеизложенного

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

где:

β - коэффициент затухания колебаний, 1/с;

$$\beta = r/2 \cdot m, \quad (14)$$

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.

Для анализа ситуаций, учитывающих внезапные обрушения боковых пород, т.е. ударное воздействие на балку при различных способах ее опирания, рассмотрим случай, когда ее свободный конец опирается на неподвижную шарнирную опору (рис. 1а). Обрушившиеся на балку породы будем считать материальной точкой. 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 [20],

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

где:

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

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 $v'_0=0$

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

Рассмотрим теперь движение обрушившихся пород на балке

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

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.

$$f_{уд} = f_{ст} + \sqrt{f_{ст}^2 + 2f_{ст} \cdot h}. \quad (22)$$

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 [20], т.е

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

где:

$T = \frac{1}{2}mv_1^2$, - кинетическая энергия в момент окончания удара, Дж;

$T_0 = 0$ - кинетическая энергия до удара, Дж,

$\sum A = mgh$ - потенциальная энергия обрушившихся пород, Дж,

и тогда,

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

Рассмотрим удар материальной точки о балку, считая его неупругим, когда коэффициент восстановления при ударе $k = 0$ [21]. 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

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

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 , $\left(\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}}\right)$ 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, $\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}}$,

Q_0 - количество движения системы в момент начала удара, $\frac{\text{кг}\cdot\text{м}}{\text{с}}$,

то количество движения системы при ударе не изменится, т.е.

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

или

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

а скорость материальной точки при ударе о балку равна

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

где:

m_1 - масса балки, кг.

Считается [13], 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

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

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

$$\sum A = (m+m_1) \cdot g \cdot f_{уд}^n + \frac{C_n}{2} \cdot \lambda_0^2 - \frac{C_n}{2} \cdot \lambda^2, \quad (33)$$

где:

$\lambda_0 = \frac{m_1 g}{2C_n}$ - деформация упругого основания в начальном положении, м;

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

Деформацию опоры при статическом нагружении определим как в [11], т.е.

$$\lambda_{ст} = \frac{m_1 g}{2c_n}. \quad (34)$$

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.

$$f_{уд}^n = \lambda_{ст} + \sqrt{\lambda_{ст}^2 + 2\lambda_{ст} h \frac{m}{m+m}}. \quad (35)$$

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

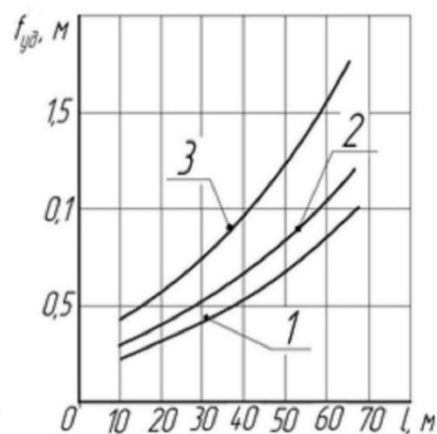
Из рис.3 видно, что в рассматриваемых нами случаях, с увеличением длины балки l , (м), прогиб последней увеличивается. Полученные зависимости, вид которых определили путем подстановки соответствующих значений для рассматриваемых условий в выражения (22) и (35) необходимо использовать при определении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

Из рис. 4 видно, что максимальная величина смещения $x = 0.26$ м отмечена при наличии на свободном конце балки неподвижной шарнирной опоры (рис. 4а), минимальная, $x = 0.11$ м при податливой опоре (рис. 4б). Графики, учитывающие 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 противоположных направлениях до состояния статического равновесия. Максимальный размах колебаний при этом, имеет балка с неподвижной шарнирной опорой. Факт затухания колебательного процесса, определяется множителем $e^{-\beta t}$, а

величина смещения точки от положения статического равновесия – видом опирания балки. Во всех анализируемых случаях, геометрический параметр x , (м), определяет характер напряженно-деформированного состояния балки, при изменении величины которого во времени, одновременно изменяются напряжения и деформации в рассматриваемой системе.

а)



б)

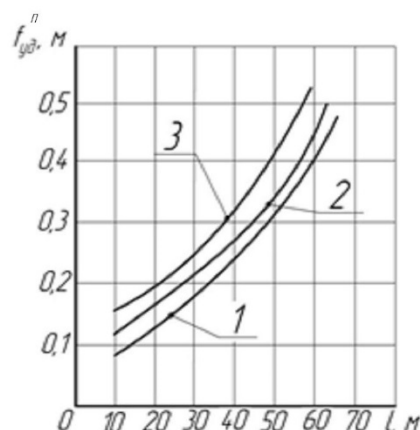


Рис. 3. Изменение прогиба балки $f_{уд}$, (м) длиной l , (м) при обрушении на эту балку боковых пород массой $m=1000$ кг с высоты h , (м) в случае: а) когда свободный конец балки опирается на неподвижную шарнирную опору; б) то же, на податливую опору: 1 - $h=1$ м; 2 - $h=2$ м; 3 - $h=5$ м.

Для подтверждения этого положения выполним статический расчет для балки, имеющей на свободном конце, в одном случае жесткую опору и, в другом, податливую. Считается [4,15,24], что опасным будет сечение в центре пролета балки, поскольку в этом месте изгибающий момент M_{max} , (Нм) наибольший, т.е

$$M_{\max} = \frac{P \cdot l}{4} \quad (36)$$

Напряжения от статического действия обрушившихся на балку пород весом P , (Н) можно определить как в [4]

$$\sigma_{\max}^{\text{ст}} = \frac{M_{\max}}{W}, \quad (37)$$

где:

W - момент сопротивления, см^3 .

На рис.5 представлены зависимости, отражающие изменение величины изгибающего момента M_{\max} , (Н·м) и напряжений σ_{\max} , (МПа), от статического действия веса обрушающихся пород при изменении длины балки l , (м).

Для того чтобы выполнить анализ напряженно-деформированного состояния пород кровли разрабатываемого пласта, необходимо определить величины действующих в рассматриваемой системе напряжений с учетом динамического воздействия. Известно [13,15], что учет динамического воздействия производится введением динамического коэффициента в полученное решение соответствующей статической задачи.

Величину динамического коэффициента $k^{\text{дин}}$ можно определить по выражению

$$k^{\text{дин}} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\Delta}}, \quad (38)$$

где:

Δ - прогиб балки, м.

Величина прогиба Δ , (м) для балки с неподвижной шарнирной опорой определяется как $\Delta = f_{\text{ст}}$, при податливой опоре $\Delta = f_{\text{ст}} + \Delta_{\text{под}}$.

Соответственно, величину напряжений, действующих в сечении балки, можно определить по выражению

$$\sigma_1^{\max} = k_1^{\text{дин}} \cdot \sigma_{\text{ст}}, \quad (39)$$

и

$$\sigma_2^{\max} = k_2^{\text{дин}} \cdot \sigma_{\text{ст}}, \quad (40)$$

где:

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

С учетом условий деформирования системы, а так же выражений (38), (39) и (40) на рис.6 представлены зависимости, отражающие изменение величины динамического коэффициента $k^{\text{дин}}$ и максимальных напряжений σ_{\max} , (МПа), действующих в сечении балки при ее

различной длине l , (м) и вариантах опирания.

Из рис.6 видно, что с увеличением длины балки, значения динамического коэффициента уменьшаются. Для балки с неподвижной шарнирной опорой, значение исследуемой величины уменьшается в 3 раза, с $k_1^{\text{дин}}=17.3$ до $k_2^{\text{дин}}=5.7$. С учетом податливой опоры, значения этого коэффициента изменяются с $k_1^{\text{дин}}=11.5$ до $k_2^{\text{дин}}=5.4$, т.е. уменьшаются в 2.1 раза (рис. 6, зависимости 1,2). Для балок, длина которых $l > 60\text{м}$, значения динамического коэффициента практически не отличаются.

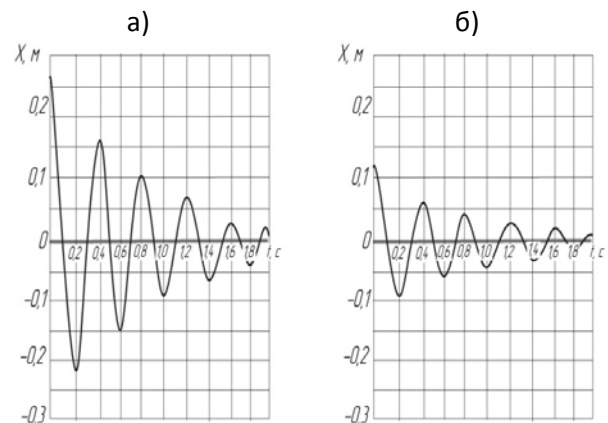


Рис. 4. Изменение координаты точки тела x , (м) во времени t , (с) при обрушении боковых пород массой $m=1000$ кг на балку длиной $l=10$ м с высоты $h=2$ м а) когда балка имеет неподвижную шарнирную опору; б) когда балка имеет податливую опору.

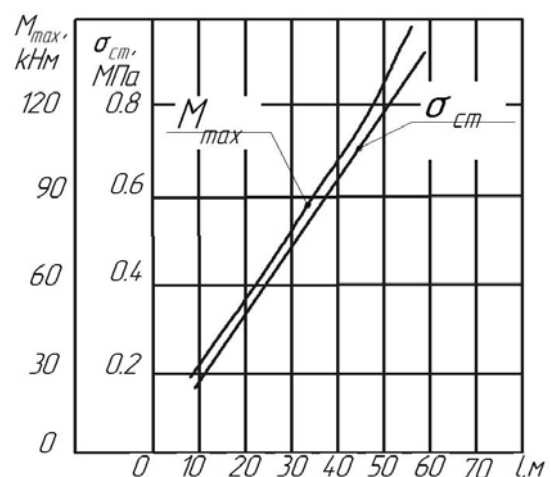


Рис. 5 Изменение величины изгибающего момента $M_{\max}^{\text{изг}}$ (Нм) и напряжений $\sigma_{\text{ст}}$, (МПа) с учетом статического действия груза при изменении длины балки l , (м).

С учетом значений динамического коэффициента $k^{\text{дин}}$ и вариантов опирания балки, максимальные напряжения в ее сечении так же увеличиваются. При наличии на свободном конце балки неподвижной шарнирной опоры, рост составляет 2 раза (рис. 6, зависимость 3), при наличии податливой опоры – 2.9 раза (рис.6, зависимость 4).

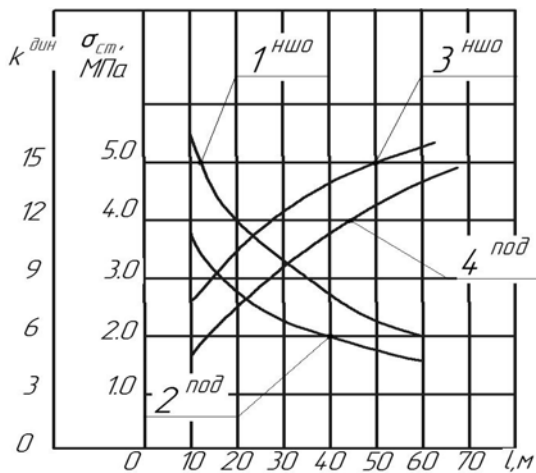


Рис. 6. Изменение величины максимальных напряжений в сечении балки $\sigma_{\text{см}}$, (МПа) и динамического коэффициента $k^{\text{дин}}$ при вариации ее длины l , (м): 1,2 – изменение величины динамического коэффициента для балки с неподвижной шарнирной (1) или податливой (2) опорой; 3,4 – изменение максимальных напряжений в сечении балки с неподвижной шарнирной (3) или податливой (4) опорой.

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 3,4). В таких условиях, решение о размещении на свободном конце балки податливой опоры, позволило смягчить действие ударных нагрузок, имеющих место при внезапных обрушениях расслоившейся породной толщи. С увеличением длины балки $l > 60$ м, прогиб последней увеличивается, а следовательно происходит уменьшение жесткости рассматриваемой системы.

На рис.7 представлены зависимости изменения жесткости C , (Н/м) системы и промежутка времени t , (с) между моментом

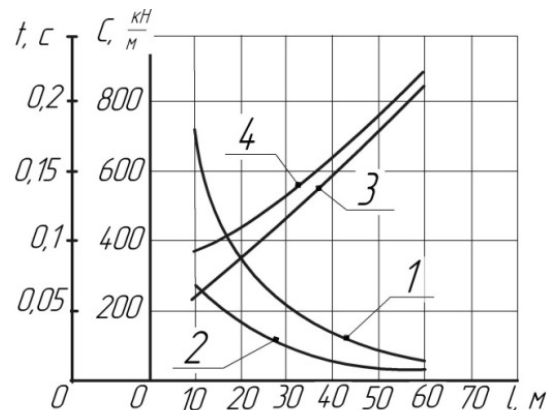
приложения действующей силы и достижением максимального прогиба балки при ее различной длине l , (м).

Жесткость рассматриваемой системы, с учетом опирания свободного конца балки, определяли по выражению (9), а промежуток времени t , (с) между моментом приложения действующей силы и достижением максимального прогиба балки по выражению [22,23]

$$t = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{\Delta}{g}} \quad (41)$$

Установлено, что чем меньше жесткость рассматриваемой системы, тем больше время, которое затрачивается на максимальный прогиб балки, а следовательно, меньше величина действующей силы при обрушении расслоившихся пород на балку.

Исходя из этого следует, что для определения напряженно-деформированного состояния пород непосредственной кровли разрабатываемого угольного пласта при внезапных обрушениях боковых пород, необходимо учитывать жесткость рассматриваемой системы, величина которой определяется статическим прогибом балки-консоли пород кровли и податливостью опоры, на которую опирается свободный конец балки.



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.

Рис. 7. Изменение жесткости системы C , (Н/м) и промежутка времени t , (с) между моментом приложения действующей силы и

достижением максимального прогиба балки при различной ее длине l , (м):

Для рассматриваемых в настоящей работе ситуаций, с целью сохранения выработок в эксплуатационном состоянии, породы кровли должны опираться на закладочный массив, что будет способствовать уменьшению жесткости системы, а значит и величины действующей силы при ударе расслоившихся пород о балку- породы непосредственной кровли.

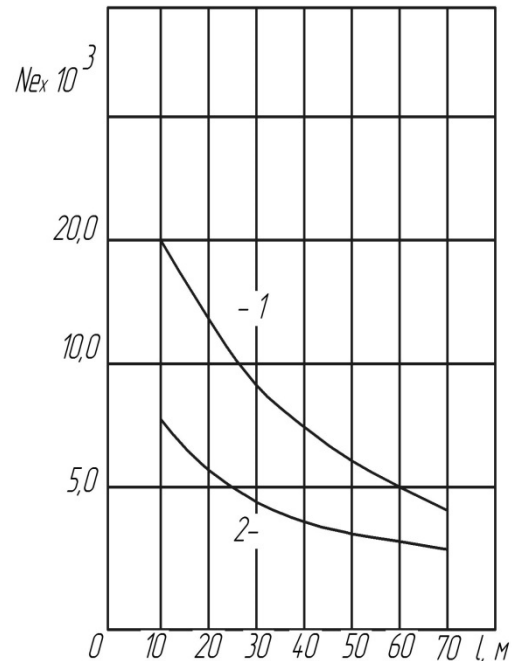
Свободные колебания технических систем в реальных условиях протекают, когда на них действуют силы сопротивления и с течением времени колебания затухают, что определяется периодом их релаксации [10]. Изменение полного числа колебаний Ne за время их релаксации, в рассматриваемой системе при вариации длины балки l , (м) представлено на рис.8.

Из рис.8. видно, что максимальное число колебаний $Ne=19700$, совершаемое системой за время их релаксации, отмечено нами при наличии на свободном конце балки длиной $l=10$ м жесткой опоры (рис.7, зависимость 1). Число колебаний уменьшается при увеличении длины балки или применении податливой опоры (рис.7, зависимость 2).

Действительно, используя для характеристики рассматриваемой нами колебательной системы такой показатель как добротность D , можно утверждать, что при применении податливых опор, затухание колебаний происходит быстрее (рис.9 зависимость 2). Это связано с уменьшением жесткости рассматриваемой системы, когда величина последней может регулироваться усадкой опоры. В случае, когда опоры жесткие (рис.9, зависимость 1), уменьшение добротности системы связано с увеличением длины балки, ее статического прогиба, а, следовательно и уменьшением ее жесткости.

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 определённого типа и вида нагружения боковых пород. Величину критических напряжений в таком случае, определяют исходя из формулы Эйлера [15,24].



1 – с неподвижной шарнирной опорой;
2 – с податливой опорой.

Рис. 8. Изменение числа колебаний Ne совершаемое системой за время их релаксации при вариации длины балки l , (м):

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 [15], величина которой зависит от физико-механических свойств пород непосредственной кровли, т.е.

$$\lambda_{пр} = \pi \sqrt{\frac{E}{[\sigma_{изг}]}} \quad (42)$$

где:

$[\sigma_{изг}]$ – предел прочности пород непосредственной кровли на изгиб, H/m^2 ;

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

$$\sigma_{\max}^g > \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (43)$$

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

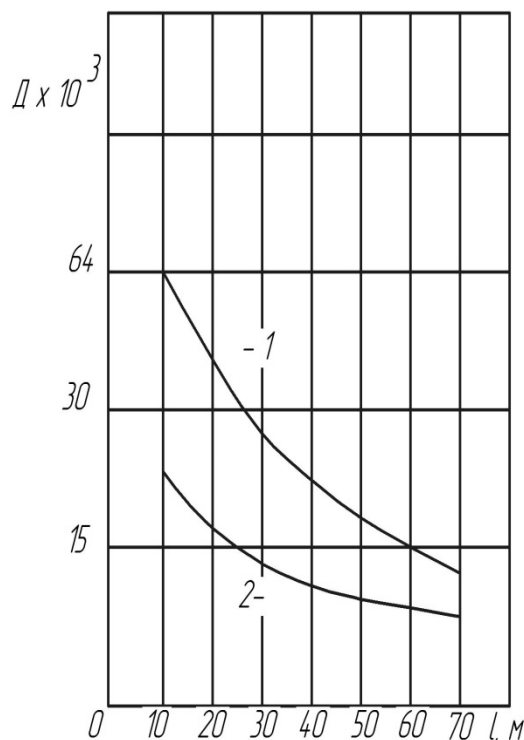


Рис. 9. Изменение величины добротности D рассматриваемой системы от длины балки l , (м), когда свободный конец опирается на неподвижную шарнирную (1) или податливую (2) опору.

Таким образом, в результате выполненного комплекса исследований установлено, что для сохранения горных выработок в эксплуатационном состоянии, необходимо ориентироваться на уменьшение жесткости рассматриваемой системы. В такой системе породы кровли разрабатываемого пласта следует считать балкой, свободный конец которой имеет различные варианты опирания. При определении величины прогиба такой балки,

необходимо учитывать податливость применяемых средств охраны или сооружений, на которые опирается балка-непосредственная кровля разрабатываемого пласта.

Вывод. При разработке угольных пластов на больших глубинах, когда имеет место расслоение боковых пород, опасность возникновения аварийных ситуаций исходит от обвалов и обрушений пород кровли разрабатываемого угольного пласта. При определенных параметрах породной консоли и отсутствии ее эффективного подпора со стороны выработанного пространства, в результате динамического (ударного) воздействия, вероятность завала горных выработок всегда возрастает.

Применение закладки выработанного пространства позволит существенно изменить геомеханическую обстановку в окрестности поддерживаемых в углепородном массиве горных выработок, за счет улучшения состояния пород кровли разрабатываемого пласта, в т.ч. при внезапных обрушениях боковых пород. При применении закладки выработанного пространства, величина действующей на породы кровли силы, в результате действия динамических нагрузок, значительно меньше, чем при традиционных способах управления горным давлением.

Список литературы

1. Николин В.И. Снижение травматизма от проявления горного давления/ В.И. Николин, С.В.Подкопаев, А.В.Агафонов, Н.В.Малеев.- Донецк: Норд-Пресс, 2005.-232с.
2. Радченко В.В. Предотвращение травматизма от обвалов и обрушений на угольных шахтах/В.В.Радченко, Э.Н.Медведев, Н.С.Кузьменко.- К.; 2010.-372с.
3. Викторов С.Д. Сдвигение и разрушение горных пород/ С.Д.Викторов, М.Д.Июфис, С.А.Гончаров.- М: Наука, 2005.-277с.
4. Тимошенко С.П. Колебания в инженерном деле. - М.; Наука, 1967. - 444с.
5. Жуков В.Е. Выстороп В.В., Колчин А.М., Григорюк Е.В. Малоотходная технология добычи угля.- К.; Техника, 1984.-141с.
6. Зборщик.М.П., Подкопаев С.В. Механизм повышения устойчивости кровли в лавах при применении закладки выработанного пространства // Уголь Украины, 1992,-№5, - с.20-23,
7. Pippard A.B. The Physics of Vibration-Cambridge University Press, 2007-656p.- ISBN: 0521033330
8. Richard F.E., Whitman R.V., Comparison of footing vibration with theory.- I. SoilMech. And Found. Div. Asce.1967.-№93,6 – p.143-168.

9. Discrete Oscillation Theory/ R.P. Agarwal, M. Bohrer, S.R. Grace, P. O'Regan.- Hindwai Publishing Corporation, 2005.-961p. ISBN: 97775945194

10. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн.- НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика»: - 2000.- 560с. – ISBN5 – 93972-012-9.

11. Подкопаев С.В., Иорданов И.В., Чепига Д.А. О динамических нагрузках при внезапных обрушениях боковых пород// Сучасні ресурсоенергозберегаючі технології гірничого виробництва.- Кременчук: КрНУ, 2016.- Вип.2 (18) – с.99-112.

12. Iuman D.J. Engineering Vibration.- Pearson Education. Inc., - 2014- 707p.- ISBN: 978-1-4822-3400-8.

13. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара. - Л.: Машиностроение, 1976.- 320с.

14. Бирбраер А.Н., Роледер А.Ю. Экстремальные воздействия на создания. – СПб.: Изд-во Политехнн. ун-та, 2009. – 594с.

15. Циглер Ф. Механика твердых тел и жидкостей. - Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика» - 2002.- 912с.

16. Баланин А.А., Фрайман Г.М. Основы теории колебаний и волн. Динамика сосредоточенных и распределительных систем. - , Нижний Новгород : ФИЦ ИПФ РАН, 2016-232с.

17. Kelly S.G. Advanced Vibration Analysis-CRCPres, Teylor@Francis .- Gproup, 2007.- 650p- ISBN: 978-1-4200.-1532-4.

18. Baddour N. Recent Advances in Vibrations Analysis.- In Tech., Rigecka, Croatia, 2011.-236p.

19. Sinda A. Vibration of Mechanical Systems.- Cambridg University Press, 2010/-324p.- ISBN0521518733.

20. Филин А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т.3.- М.: Наука,1981-480с.

21. Лапшин В.В. Удар о поверхность тела с дополнительной опорой// Вестник Московского гос.техн.ун-та им.Н.Э.Баумана. Сер.: Естественные науки. М.; 2006.-с.45-53.

22. Кильчевский Н.А. Теория соударения твердых тел. К.; Наукова думка, 1969.- 246с.

23. Кильчевский Н.А. Динамическое контактное сжатие твердых тел. Удар.- К.: Наукова думка, 1976.- 311с.

24. Тимошенко С.П. Курс теории упругости.- К.: Наукова думка, 1972. – 508с.

References

1. Nikolin V. (2005), “Snizhenie travmatizma ot proyavleniya gornogo davleniya” [“Reduction of traumatism from the manifestation of rock pressure”] / V. Nikolin, S.Podkopaev, A.Agafonov, N.Maleyev .- Donetsk: Nord-Press, 232p (in Russian).

2. Radchenko V. (2010), “Predotvrashchenie travmatizma ot obvalov i obrusheniy na ugol'nykh shakhtakh” [“Prevention of injuries from collapses and collapses in coal mines”] / V. Radchenko, E. Medvedev, N. Kuzmenko.- К.; 372p (in Russian).

3. Viktorov S. (2005), “Sdvizhenie i razrushenie gornykh porod” [“Movement and destruction of rocks”] / S. Viktorov, M. Iofis, S. Goncharov . M: Science, 277p.

4. Timoshenko S. (1967), "Kolebaniya v inzhenernom dele [“Fluctuations in the engineering case”] .- М.; Science, 444p.

5. Zhukov V. Vygotkop V., Kolchin A., Grigoryuk E.(1984), “Malootkhodnaya tekhnologiya dobychi uglya”

[“Low-waste technology of coal mining”] К.; Technique, 141p.

6. Zborschik.M., Podkopaev S. (1992), “Mekhanizm povysheniya ustoychivosti krovliv v lavakh pri primenenii zakladki vyrabotannogo prostranstva” [“The mechanism of increasing the stability of the roof in lavas with the use of a bookmark of the worked-out space”] // Coal of Ukraine, 1992, No5, pp.20-23

7. Pipparad A.B. (2007), “The Physics of Vibration-Cambridge University Press”, 656p. ISBN: 0521033330

8. Richard F.E., Whitman R.V. (1967), “Comparison of footing vibration with theory”- I. SoilMech. And Found. Div. Asce.1967. No 93,6 – pp.143-168.

9. Discrete Oscillation Theory (2005), R.P. Agarwal, M. Bohrer, S.R. Grace, P. O'Regan.- Hindwai Publishing Corporation, 961p. ISBN: 97775945194

10. Rabinovich M., Trubetskov D. (2000), “Vvedenie v teoriyu kolebaniy i voln” [“Introduction to the theory of oscillations and waves”]. - SRC "Regular and chaotic dynamics: 560p. ISBN5 - 93972-012-9.

11. Podkopaev S., Iordanov I., Chepiga D. (2016), “O dinamicheskikh nagruzkakh pri vnezapnykh obrusheniyakh bokovykh porod” [“About dynamic loads in sudden collapses of lateral rocks”] // Sucasni resursoenergozberegajuchi tekhnologii girnichogo vibrobittva .- Kremenchuk: KrNU, Vol.2 (18), pp. 99-112.

12. Iuman D.J.(2014), Engineering Vibration.- Pearson Education. Inc., 707p., ISBN: 978-1-4822-3400-8.

13. Panovko Y. (1967), “Osnovy prikladnoy teorii kolebaniy i udara” [“Fundamentals of the Applied Theory of Oscillations and Shock”]-L: Mechanical Engineering, 320p.

14. Birbraer A., Roleder A. (2009), “Ekstremal'nye vozdeystviya na sozdaniya” [“Extreme effects on the creation”] - SPb .: Publishing house of Polytechnic. University, 594p.

15. Ziegler F. (2002), “Mekhanika tverdykh tel i zhidkostey” [“Mechanics of Solids and Liquids”], Izhevsk: SRC "Regular and Chaotic Dynamics", 912p.

16. Balanin A, Freiman G. (2016), “Osnovy teorii kolebaniy i voln. Dinamika sosredotochennykh i raspredelitel'nykh system” [“Fundamentals of the theory of oscillations and waves. Dynamics of concentrated and distributive systems”] -, Nizhny Novgorod: FIC IPF RAS, 232p.

17. Kelly S.G. (2007), “Advanced Vibration Analysis”, CRCPres, Teylor@Francis, Gproup, 650p., ISBN: 978-1-4200.-1532-4.

18. Baddour N.(2011), “Recent Advances in Vibrations Analysis”, In Tech., Rigecka, Croatia, 236p.

19. Sinda A. (2010), “Vibration of Mechanical Systems”, Cambridg University Press, 324p., ISBN0521518733.

20. Filin A. (1981), “Prikladnaya mekhanika tverdogo deformiruyemogo tela” [“Applied mechanics of a solid deforming body”]. T.3. М.; Science, 480p.

21. Lapshin V. (2006), “Udar o poverkhnost' tela s dopolnitel'noy oporoy” [“A blow to the surface of the body with an additional support”] // Bulletin of the Moscow State Technical University named after NE Bauman. Ser .: Natural sciences. M. pp.45-53.

22. Kilchevsky N. (1969), “Teoriya soudareniya tverdykh tel” [“The theory of collision of solids”]. TO.; Naukova Dumka, 246p.

23. Kilchevsky N. (1976), "Dinamicheskoe kontaktnoe szhatie tverdykh tel" ["Dynamic contact compression of solids"] Strike. K. Naukova Dumka, 311p.

24. Timoshenko S. (1972), "Kurs teorii uprugosti" ["Course in the theory of elasticity"], K. Naukova Dumka, 508p.

Надійшла до редакції 03.11.2017

Рецензент д-р. техн. наук, проф. О.В Агафонов.

Иорданов Игорь Вячеславович – кандидат технических наук, соискатель кафедры «Охрана труда», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г.Покровск, Украина.

Email: gendir2017@gmail.com.

Чепига Дарья Анатольевна – аспирант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г.Покровск, Украина.

E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

Симонова Юлия Игоревна – аспирант кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г.Покровск, Украина

E-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua

Волков Сергей Владимирович – старший преподаватель кафедры «Экономическая кибернетика», Государственное высшее учебное заведение «Донецкий национальный технический университет», г.Покровск, Украина.

E-mail: serhii.volkov@donntu.edu.ua.

Коломиец Владимир Алексеевич – директор, шахтоуправление «Южнодонецкое №1», г.Угледар, Украина.

E-mail: ugnodon1@gmail.ru.

ПРО ВПЛИВ ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ НА СТАН БІЧНИХ ПОРІД ПРИ РОЗРОБЦІ ВУГІЛЬНИХ ПЛАСТІВ

Анотація. В результаті виконаних досліджень встановлено, що при експлуатації гірських виробок, коли мають місце раптові обвалення розшарується породної товщі, в бічних породах виникають коливання. Величина амплітуди таких коливань визначає напружено-деформовані стан порід покрівлі пласта. Зміна розмаху коливань у часі, одночасно змінює величини напруг і деформацій у покрівлі, представленої у вигляді балки, вільний кінець якої має різні варіанти обпирання. Доведено, що застосування закладки виробленого простору, як способу управління гірським тиском в складних гірничо-геологічних умовах, зменшує не тільки величину амплітуди коливань, в порівнянні з традиційними способами, управління гірським тиском, а й величину діючої на породи покрівлі сили, при прояві динамічних навантажень.

Ключові слова: вугільний пласт; покрівля; ґрунт; розшарування бічних порід; обвалення порід; гірничавиробка; податлива опора; закладний масив.

Иорданов Игор Вячеславович - кандидат технічних наук, здобувач кафедри «Охорона праці», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м.Покровськ, Україна.

E-mail: gendir2017@gmail.com.

Чепіга Дар'я Анатоліївна - аспірант кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м.Покровськ, Україна.

E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

Симонова Юлія Ігорівна - аспірант кафедри «Розробка родовищ корисних копалин», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м.Покровськ, Україна.

E-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

Волков Сергій Володимирович - старший викладач кафедри «Економічна кибернетика», Державний вищий навчальний заклад «Донецький національний технічний університет», м.Покровськ, Україна.

E-mail: serhii.volkov@donntu.edu.ua.

Коломієць Володимир Олексійович - директор, шахтоуправління «Південнодонецьке №1», м.Вугледар, Україна.

E-mail: ugnodon1@gmail.ru.

**ON THE INFLUENCE OF DYNAMIC LOADS ON THE CONDITION OF SIDE ROCKS AT
THE DEVELOPMENT OF COAL-BASED PLASTS**

Abstract. As a result of the studies carried out, it has been established that in the operation of mining excavations, when sudden collapses of the exfoliated rock mass occur, lateral rocks oscillate. The magnitude of the amplitude of such oscillations determines the stress-strain state of the roof rocks of the developed formation. The change in the amplitude of the oscillations in time, simultaneously changes the values of stresses and deformations in the roof, presented in the form of a beam, the free end of which has different versions of support. It is proved that the use of a bookmark of the worked-out space as a method for controlling the mountain pressure in complex mining and geological conditions reduces not only the magnitude of the vibration amplitude, in comparison with traditional methods, the control of the rock pressure, but also the magnitude of the force acting on the roof rocks with the manifestation of dynamic loads.

Key words: coal layer; roof; soil; stratification of lateral breeds; bringing down of breeds; mountain making; pliable support; book-mark array.

Iordanov Igor – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Applicant, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: gendir2017@gmail.com.

Chepiga Daria – graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine.

E-mail: daria.chepiha@donntu.edu.ua.

Simonova Yuliia - graduate student, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine.

E-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua

Volkov Sergei - senior lecturer, Public higher education institution Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine.

E-mail: serhii.volkov@donntu.edu.ua.

Kolomiets Vladimir - director, Mine Management "Yuzhnodonbasskoye No. 1", Ugledar, Ukraine.

E-mail: ugnodon1@gmail.com.