

УДК 622.834:622.862.3

doi:10.20998/2413-4295.2019.05.03

ИССЛЕДОВАНИЕ НА МОДЕЛЯХ УСТОЙЧИВОСТИ ПОРОД КРОВЛИ УГОЛЬНОГО ПЛАСТА ПРИ ДЕЙСТВИИ ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

**И. В. ИОРДАНОВ¹, Ю. И. СИМОНОВА^{1*}, А. В. ПЕТРЕНКО¹, А. В. ПОЛОЖИЙ¹,
С. В. ПОДКОПАЕВ¹, В. Ю. ДОВГАЛЬ², А. В. КОРОЛЬ³**

¹Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, УКРАИНА

²Государственное предприятие «Мирноградуголь», г. Мирноград, УКРАИНА

³ПСР «Шахтоуправление «Добропольское» ООО «ДТЭК Добропольеуголь»», г. Доброполье, УКРАИНА

*e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua

АННОТАЦИЯ Целью работы является изучение устойчивости пород кровли угольного пласта при действии динамических нагрузок. Для достижения поставленной цели были выполнены лабораторные исследования на моделях из эквивалентных материалов, когда кровля угольного пласта была представлена в виде балки с податливой опорой – пружиной постоянной жесткости. В результате выполненных исследований установлено, что при действии динамических нагрузок, т.е. при силовом воздействии падающего груза на балку, ее прогиб достигает максимальных значений не одновременно с окончанием действия внешней силы, а одно после другого, через некоторый промежуток времени. При таком взаимодействии балки с податливой опорой постоянной жесткости, количество энергии, затрачиваемой на сжатие пружины, зависит от продолжительности удара и промежутка времени, между окончанием действия внешней силы и перемещением балки, когда эта величина достигает максимальных значений. Геометрический параметр, отражающий перемещения балки при проявлении динамических нагрузок, когда установлен закон ее движения и определены моменты времени, при которых перемещение достигает максимальных значений, определяет напряженно- деформированное состояние моделируемой системы. При наличии в моделируемой деформируемой системе жестких опорных связей, сама система становится более чувствительной к проявлению ударных нагрузок. Наличие податливых связей в системе, смягчает действие динамических нагрузок, за счет уменьшения жесткости моделируемой системы. Изменение жесткости моделируемой системы зависит не только от изменения изгибной жесткости балки, но и от величины податливости опор. При наличии в моделируемой системе податливых опор, динамическая составляющая в общем прогибе балки, отражает мгновенное сжатие опоры, по отношению к статическому действию нагрузки. Для сохранения целостности пород кровли угольного пласта при действии динамических нагрузок, целесообразно применение податливых опор или закладки выработанного пространства, что позволит уменьшить величину ударной силы падающей породы и свести к минимуму вероятность разрушения боковых пород.

Ключевые слова: горное давление; обрушения; очистной забой; динамические нагрузки; податливая опора; закладка выработанного пространства

RESEARCH ON MODELS OF STABILITY OF ROCKS OF THE ROOF OF COAL STRAY DURING DYNAMIC LOADS

**I. JORDANOV¹, Y. SIMONOVA¹, A. PETRENKO¹, A. POLOZHIIY¹,
S. PODKOPAIEV¹, V. DOVGAL², A. KOROL³**

¹Donetsk National Technical University, Pokrovsk, UKRAINE

²State enterprise "Mirnogradugol", Mirnograd, UKRAINE

³PSP "Dobropolskoye Mine Administration" DTEK Dobropolyeugol LLC ", Dobropolye, UKRAINE

ABSTRACT The aim of the work is to study the stability of the roof rocks of the coal seam under the action of dynamic loads. To achieve this goal, laboratory tests were performed on models of equivalent materials, when the roof of the coal seam was presented in the form of a beam with a flexible support-spring of constant rigidity. As a result of the research, conclusions were made. Under the action of dynamic loads, that is, under the force of a falling load on the beam, its deflection reaches maximum values not simultaneously with the termination of the action of an external force after a certain period of time. With this interaction of the beam with a malleable support of constant stiffness, the amount of energy spent on the compression of the spring depends on the duration of the impact and the period of time between the end of the external force and the movement of the beam when this value reaches its maximum values. The geometrical parameter determines the stress-strain state of the simulated system. It reflects the movement of the beam during the manifestation of dynamic loads, when the law of its movement is established and the moments of time at which the movement reaches its maximum values are determined. If there are rigid support links in the simulated deformable system, the system itself becomes more sensitive to the manifestation of shock loads. The presence of malleable bonds in the system mitigates the effect of dynamic loads. This is due to the reduction of its rigidity of the simulated system. The change in the rigidity of the simulated system depends not only on the change in the bending stiffness of the beam, but also on the magnitude of the compliance of the supports. If there are pliable supports in the simulated system, the dynamic component in the total deflection of the beam reflects the instantaneous compression of the support, in relation to the static action of the load. To preserve the integrity of the roof rocks of the

coal seam under the action of dynamic loads, it is advisable to use malleable supports or bookmarks the goaf. This will reduce the magnitude of the impact force of the falling rock and minimize the likelihood of blockage of lateral rock destruction.

Key words: rock pressure; collapse; highwall mining; dynamic loads; ductile support; laying out the space developed.

Введение

Опыт работы угольных шахт Донбасса показывает, что с ростом глубины горных работ, в анизотропном углепородном массиве вмещающем выработки, начинает проявляться такой негативный фактор, как расслоение боковых пород, оказывающий существенное влияние на устойчивость боковых пород и приводящий к возможному их обрушению, а так же травматизму горнорабочих. По мере отработки угольного пласта, подработанные и расслоившиеся породы кровли, позади очистного забоя, представляют собой блочный массив, состоящий из балок различной длины, которые одновременно изгибаются, разрушаются и неконтролируемо обрушаются, создавая неблагоприятную геомеханическую обстановку в окрестности поддерживаемых горных выработок. Поэтому, в реальных условиях разработки угольных пластов, при отсутствии для расслоившихся пород кровли эффективного подпора со стороны выработанного пространства, опасность возникновения аварийных ситуаций от обвалов и обрушений возрастает.

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. Наряду с этим, изучение особенностей проявления горного давления в выработках на большой глубине 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 [1]. Внезапность обрушений расслоившейся толщи, приводящих к завалам горных выработок, является одной из особенностей разработки угольных пластов в условиях больших глубин. Вместе с тем, это обуславливается не только горно-геологическими, но и горно-техническими факторами. К последним следует относить несоответствие применяемых способов управления кровлей в очистном забое и охраны участков подготовительных выработок, конкретным условиям их эксплуатации.

Известно [2,3], что наиболее благоприятно на состоянии боковых пород в углепородном массиве вмещающем выработки, влияет закладка выработанного пространства, когда породы кровли позади очистного забоя поддерживаются закладочным массивом. При применении этого способа, исключаются обрушения пород непосредственной кровли и внезапные посадки

основной кровли, а значит, сводятся к минимуму проявления динамических нагрузок. Согласно [4,5], динамические нагрузки могут частично нейтрализоваться за счет применения именно податливых опор, а так же при наличии упругого основания для рассматриваемого эксплуатируемого сооружения.

Изучение природы и особенностей обрушений, как разновидности негативных проявлений горного давления в угольных шахтах, их влияние на состояние боковых пород и, на основе этого разработка мероприятий, направленных на повышение устойчивости пород кровли, будет способствовать повышению безопасности труда горнорабочих и сохранению горных выработок в эксплуатационном состоянии.

Цель работы

Целью работы является изучение устойчивости пород кровли угольного пласта при действии динамических нагрузок.

Для достижения поставленной цели были выполнены лабораторные исследования на моделях из эквивалентных материалов, когда кровля угольного пласта была представлена в виде балки с податливой опорой – пружины постоянной жесткости.

Согласно исследованию [6], считается что закладочный массив обладает коэффициентом жесткости – модулем упругости, равным образом, как и пружины, у которых этот коэффициент характеризует величину дополнительной нагрузки, когда при ее действии статическая и динамическая жесткость одинакова. В данной модели, пружина является элементом рассматриваемой деформируемой системы.

Изложение основного материала

В реальных условиях разработки угольных пластов, при различных способах управления кровлей в лаве и охраны штреков, сохранность горных выработок обеспечивается за счет устойчивости пород непосредственной кровли угольного пласта, как основного грузонесущего элемента подземного сооружения.

Согласно гипотезе балок [7-9], можно предположить, что в очистном забое, кровля угольного пласта деформируется и разрушается подобно балкам. Устойчивость породного обнажения в призабойном пространстве лавы, существенно зависит от степени предварительной трещиноватости пород кровли и величины их прогиба, когда отдельные блоки расслоившейся породной толщи работают как шарниры [8,9].

На рис. 1 породы непосредственной кровли угольного пласта, представлены в виде балки длиной L , (м), высотой h , (м), и шириной b (м), имеющей неподвижные шарнирные опоры (т.А и т.В), расстояние между которыми $2a$, (м). Участок балки ВС представляет собой консоль, длина которой a , (м). На край консоли, в т.С, с некоторой высоты H , (м), падает груз массой m , (кг) (рис. 1а).

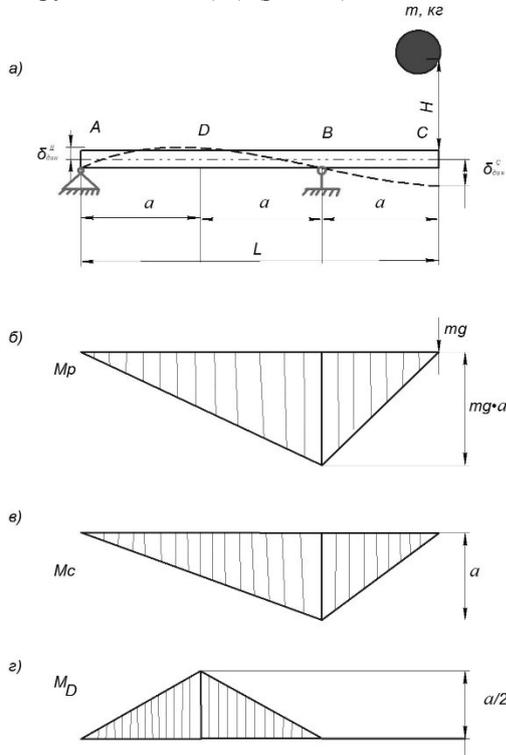


Рис. 1 – Схема к определению динамического прогиба балки в точках D и C с эпюрами изгибающих моментов б, в, г: а) расчетная схема; б) эпюра изгибающих моментов от статически приложенного груза массой m , (кг); в) эпюра изгибающихся моментов от единичной силы, приложенной в точке удара; г) эпюра изгибающихся моментов от единичной силы, приложенной в точке D

Рассмотрим статическую задачу поперечного изгиба балки. На рис.1 б,в, г изображены эпюры изгибающих моментов от статически приложенного груза массой m , (кг)- M_p , (Н·м) (б); единичной силы, приложенной в точке удара- M_c , (Н·м) (в); единичной силы, приложенной в точке D- M_d , (Н·м) (г), построенные в соответствии с [10-12].

Для определения статического прогиба балки от действия веса падающего груза, воспользуемся построенными эпюрами (рис. 1 б, в, г), правилом Верещагина [4,10] и определим статический прогиб в т. С

$$\delta_{ст}^C = \frac{M_p \cdot M_c}{E \cdot I} = \frac{mga^3}{EI}, \quad (1)$$

а так же, в середине пролета балки, в т. D

$$\delta_{ст}^D = \frac{M_p \cdot M_d}{E \cdot I} = -\frac{mga^3}{4EI}, \quad (2)$$

где I - момент инерции поперечного сечения, m^4

E - модуль упругости, МПа;

Из выражения (2) видно, что точка D перемещаются вверх (рис. 1а).

Динамический прогиб в этих точках, соответственно равен

$$\delta_{дин}^{C,D} = \delta_{ст}^{C,D} \cdot k_{дин} \quad (3)$$

где $k_{дин}$ – динамический коэффициент.

Значение динамического коэффициента определим по выражению, как в [9]

$$k_{дин} = 1 + \sqrt{1 + \frac{2H}{\delta_{ст}}}, \quad (4)$$

с учетом изменения высоты падения груза H , (м).

Из работ [10,13-15], известно что при $H=0$, моделируемая система подвержена мгновенному приложению нагрузки. В этом случае, значение динамического коэффициента равно $k_{дин} = 2$, а величина деформаций и напряжений в деформируемой системе вдвое больше, чем при статическом нагружении. При $H>0$, в результате падения груза на балку, рассматриваемая система может совершать движение. В этом случае значения динамического коэффициента изменяются.

На рис. 2 представлены зависимости, отражающие изменение величины динамического прогиба, $\delta_{дин}^C$ (м) балки в т. С и динамического коэффициента $k_{дин}$, с учетом изменения высоты H , (м) падения груза. При выполнении расчетов учитывались линейные размеры моделируемой балки : длина $L=0.6$ м; $a=0.2$ м, $h=0.02$ м, $b=0.04$ м. Модуль упругости $E=8800$ МПа, масса падающего груза $m=0.2$ кг.

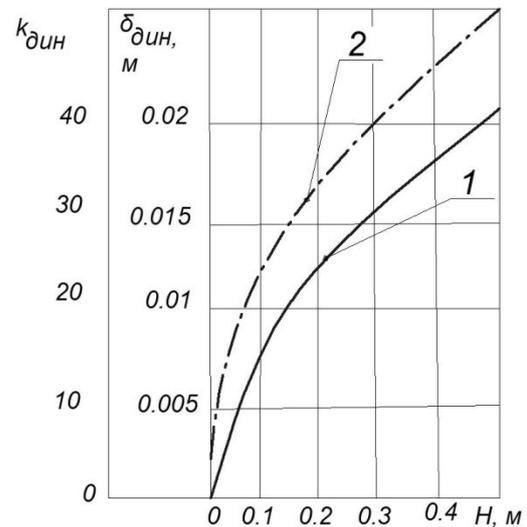


Рис. 2 – Графики изменения величины динамического прогиба $\delta_{дин}^C$, (м) балки в т.С и динамического коэффициента $k_{дин}$, с учетом высоты H , (м) падения груза массой m , (кг): 1- $\delta_{дин}^C$, (м), 2- $k_{дин}$; $m=0.2$ кг

В результате выполненных расчетов было выполнено сравнение теоретически установленных значений статического и динамического прогиба в

т. С, когда балка имела жесткие опорные связи. Установлено, что при жестких опорных связях, в рассматриваемой моделируемой системе, значение статического прогиба балки, значительно меньше ее динамического прогиба. Из приведенных зависимостей видно, что с увеличением высоты падения груза с $H=0.1$ м до $H=0.5$ м, значения динамического прогиба увеличиваются с $\delta_{дин}^C=0.009$ м до $\delta_{дин}^C=0.02$, т.е. в 2.2 раза, при статическом прогибе балки, равном $\delta_{ст}^C=0.0004$ м. Значения динамического коэффициента, при этом, увеличиваются с $k_{дин}=23$ до $k_{дин}=50$, т.е. в 2.1 раза (рис. 2). При $H=0.3$ м общий прогиб балки после удара, равен $\delta_{уд}^C=0.016$ м, а доля статического прогиба, в общем прогибе балки, составляет около 3%.

Из публикаций [16-18], известно что любая динамическая нагрузка, вынуждает деформируемую систему колебаться. Поэтому, задача исследования устойчивости изучаемого объекта, состоит в определении усилий и перемещений, порождаемых инерционными силами и статической компонентой внешнего воздействия, когда система совершает движение. Для смягчения действия динамических нагрузок и ограничения амплитуды колебаний балки в моделируемой системе, рекомендуется применение податливых опор [4,5,10].

Для того чтобы оценить влияние податливой опоры на величину изгибных деформаций пород кровли, при действии динамических нагрузок, были выполнены исследования на моделях из эквивалентных материалов. Эксперименты были проведены на специальном стенде, в лаборатории горного давления ДонНТУ, когда породы кровли угольного пласта были представлены в виде породной балки длиной $L_6=0,6$ м, толщиной $h=0,02$ м и шириной $B=0,04$ м. Масса балки соответствовала $m_6=1.4$ кг, модуль упругости $E=8800$ МПа, плотность $\rho=2100$ кг/м³. Балка была изготовлена из песчано-цементной смеси, согласно рекомендаций [19-21] и нагружалась внешней силой P , (Н). С одной стороны балка имела жесткое закрепление в т. А, на расстоянии $AB=2a$ балка опиралась на податливую опору- пружину постоянной жесткости C_n , (Н/м). Масштаб моделирования 1:100. Фото стенда, на котором проводились эксперименты, представлено на рис.3.

Величина изгибных деформации пород кровли угольного пласта определяет устойчивость балки, а безразмерная величина y , является прочностной характеристикой и зависит от основных параметров рассматриваемой системы, т.е.

$$y = f(h, B, L_6, \rho, F, E) \quad (5)$$

Используя π -теорему [22] и значимость каждого из перечисленных в (5) параметров, когда в качестве независимых размерностей выбраны (н) и (м), параметрическое уравнение в безразмерном виде можно представить как

$$y = f\left(\frac{B}{L_6}; \frac{h}{L_6}; \frac{E}{\rho g L_6}; \frac{F}{E L^2}\right), \quad (6)$$

из чего следует, что в рассматриваемой модели, определяющим является линейный масштаб. Остальные масштабы вычислялись через линейный масштаб, на основе известных физических закономерностей [10].

Число наблюдений n , которые необходимо выполнить для получения достаточно надежных и достоверных результатов моделирования, с показателем точности $\varepsilon=5\%$, было установлено в соответствии с [10], по выражению

$$n = \frac{V_c^2 t_{ct}^2}{\varepsilon^2}, \quad (7)$$

где V_c – коэффициент вариации, принимаем равным $V_c=8\%$; t_{ct} – критерий Стьюдента, $t=1,96$. и соответствовало $n \approx 10$.

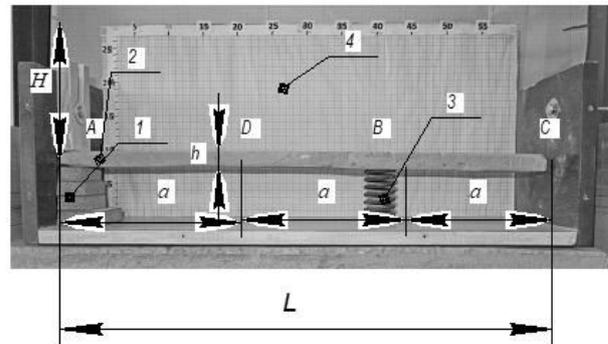


Рис. 3 – Фото стенда для изучения влияния динамических нагрузок на состояние пород кровли угольного пласта с податливой опорой постоянной жесткости, С, (Н/м) : 1- жесткая опора А; 2- балка- непосредственная кровля; 3- податливая опора- пружина, постоянной жесткости, C_n , (Н/м); 4- стенд с координатной сеткой; L-длина балки, (м) D, B, C- точки, в которых происходило соударение падающего груза массой m , (кг) с балкой; H- высота падения груза, м; a- расстояние между точками, (м), $a=0.2$ м

При проведении экспериментов было отработано 30 моделей.

Известно [23,24], что пружины имеют свои собственные константы, которые определяют их жесткость. Существует зависимость, которая подчиняется закону Гука и связывает силу и жесткость, т.е. смещение пружины от своего первоначального положения. Для определения жесткости пружины используемой в моделях, был рассмотрен пружинный маятник [16,24], состоящий из металлической пружины и груза массой m , (кг). При проведении исследований, пружину рассматривали как тело начальной длины l , (м), подвергающееся сжатию. В состоянии равновесия вес груза, находящегося на пружине, уравновешивался силой ее упругости, т.е. выполнялось соотношение

$$mg = C_n \Delta l_n, \quad (8)$$

где C_n - жесткость пружины, Н/м; Δl_n - величина сжатия пружины под действием груза, м.

При определении жесткости пружины C_n , (Н/м), в лабораторных условиях были отобраны три груза, имеющие различные массы m , (кг). Для каждого груза соответствующей массы, было выполнено по 10 измерений определения величины сжатия пружины. Экспериментальные данные по определению жесткости пружины представлены в табл. 1.

При испытании моделей, перемещения и деформации балки, регистрировались цифровой фотокамерой. По фотографическим изображениям, с помощью пиксельных координат точек, с использованием основных принципов фотограмметрии [25], определялось положение исследуемой модели в пространстве до и после действия внешней силы.

Таблица 1 – Определение жесткости пружины C_n , (Н/м) в лабораторных условиях

Масса груза, m, кг	Вес груза, mg, Н	Величина сжатия, Δl , м	Жесткость, C_n Н/м	Среднее значение жесткости, C_n , Н/м
1,22	12,04	0,09	1215	1210
1,12	11,05	0,08	1210	
1,1	10,95	0,08	1206	

В результате действия внешней силы, экспериментально была установлена величина прогиба балки X , (м), которая опиралась на пружину, жесткость которой равна $C_n=1210$ Н/м. Для определения прогиба балки, породный блок массой $m= 0.2$ кг, с высоты $H=0.3$ м, одноразово и поочередно сбрасывали на балку в точки D , B и C , находящиеся на различном расстоянии от опоры A , с учетом того, что $AD=0.2$ м; $AB=0.4$ м; $AC=0.6$ м (рис.3). Коэффициент восстановления при ударе соответствовал $k_b=1$, т.е. рассматривался упругий удар.

Особенностью динамических нагрузок является то, что при действии внешней силы на балку, рассматриваемая система начинает совершать колебания. Их амплитуду A , (м), можно определить по выражению [13, 16]

$$A = \sqrt{x^2 + \frac{V_0^2}{k}}, \quad (9)$$

где k - частота собственных колебаний системы с учетом затухания, 1/с.

Величина A , (м) зависит от перемещения балки x , (м), скорости падения породного блока $V_0 = \sqrt{2gH}$ и $k = \sqrt{\frac{g}{x}}$.

На рис. 4 приведены зависимости, отражающие изменение величины прогиба X , (м), амплитуды A , (м) и частоты k , (1/с) колебаний балки длиной L , (м).

Из приведенных зависимостей видно, что при падении в т.С груза массой $m=0.2$ кг, балка будет иметь наибольший прогиб, который равен $X=0.022$ (м) (рис. 4). При этом, доля статического прогиба, который равен $\delta_{ст}=0.012$ м, в общем прогибе балки после удара, когда груз падает с высоты $H=0.3$ м, составляет около 50%. При таком взаимодействии балки с податливой опорой- пружинной, при действии динамических нагрузок, когда породный блок падает на свободный конец поддерживаемой конструкции, амплитуда колебаний увеличивается, а частота наоборот, уменьшается (рис.4).

С учетом затухания колебаний, при коэффициенте затухания равном $\beta < k$, их период можно определить как в [16,26,27] по выражению

$$T = \frac{2\pi}{k} \quad (10)$$

Физический процесс собственных колебаний моделируемой системы характеризуется ее добротностью D , величина которой зависит от логарифмического декремента затухания δ и определяется как в [18], т.е.

$$D = \frac{2\pi}{\delta}. \quad (11)$$

Логарифмический декремент δ представляет качественную характеристику затухания колебаний [4,16]. Этот показатель описывает уменьшение амплитуды колебательного процесса в моделируемой системе.

Физической величиной, определяющей характер колебаний в системе, является коэффициент демпфирования, определяемый как в [28,29] по выражению

$$\xi = \frac{r}{2mk}, \quad (12)$$

где r - коэффициент силы сопротивления движения, $r = 0.3 - 0.5$ кг/с; m - масса моделируемой системы, кг.

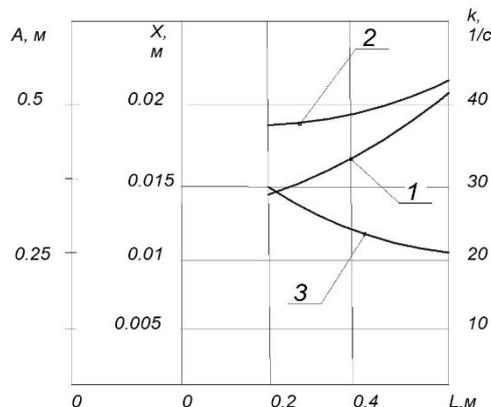


Рис. 4 – Графики изменения величины прогиба X , (м), амплитуды A , (м) и частоты колебаний k , (1/с) балки в моделируемой системе, при падении груза массой $m=0,2$ кг с высоты $H=0.3$ м, с учетом длины L , (м): 1- x , (м); 2- A , (м); 3- k , (1/с)

Модальный коэффициент демпфирования ξ характеризует роль демпфирования в моделируемой системе, которая подвержена колебаниям с первоначальным перемещением. Считается [28], чем меньше значения этого коэффициента, тем дольше будут длиться колебания, а при $\xi \geq 1$, никаких колебаний система не совершает.

На рис.5 приведены графики, отражающие изменение периода колебаний T , (с), добротности D рассматриваемой деформируемой системы и коэффициента демпфирования ξ , при падении на балку длиной L , (м) груза массой $m=0.2$ кг.

Из приведенных зависимостей видно, что при падении груза на свободный конец балки, период колебаний T , (с) балки в рассматриваемой системе и коэффициент демпфирования увеличиваются, а добротность D наоборот, уменьшается. Установленные закономерности свидетельствуют о затухании колебаний в системе. Этот процесс подтверждает рост коэффициента демпфирования, с учетом места падения груза на балку (от т.Д до т.С), который увеличивается с $\xi=0.0065$ до $\xi=0.0083$, т.е. на 25% (рис.5).

В качестве количественного показателя демпфирующей способности колебательной системы с податливой опорой, используется коэффициент диссипации ψ , который определяется как в [4, 27]

$$\psi = 2\delta, \quad (13)$$

Так же, с учетом логарифмического декремента затухания, можно определить полное число колебаний Ne балки в рассматриваемой системе, за период их релаксации [16].

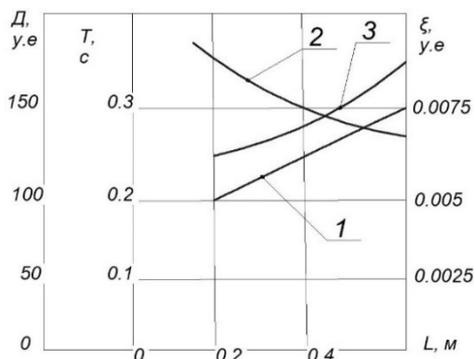


Рис. 5 –Графики изменения периода T , (с) колебаний, добротности D рассматриваемой системы и коэффициента демпфирования ξ при падении груза массой m , (кг) на балку длиной L , (м); 1- T , (с); 2- D ; 3- ξ ; $m=0.2$ кг

На рис. 6 представлены зависимости, определяющие изменение логарифмического декремента затухания колебаний δ , коэффициента диссипации ψ и полного числа колебаний Ne , при падении груза на балку, длиной L , (м), с учетом места соударения.

Установлено, чем больше прогиб балки, тем больше значение δ и коэффициента диссипации, при уменьшении числа Ne колебаний в системе (рис.6).

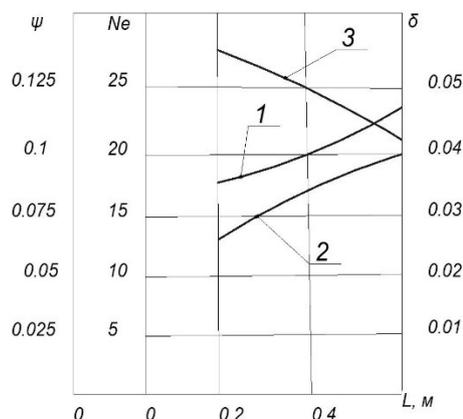


Рис. 6 – Графики изменения логарифмического декремента δ затухания колебаний, коэффициента диссипации ψ и полного числа колебаний Ne балки в рассматриваемой системе, с учетом места падения груза по длине L , (м): 1- δ , 2- ψ , 3- Ne

В теории колебаний, при анализе собственных колебаний изучаемого объекта, часто применяют спектральные методы, сущность которых заключается в замене исследуемых физических величин, таких как внешняя сила и жесткость, их спектрами. Знание динамической жесткости упругого основания, в моделируемом случае, пружины, позволяет определить плотность амплитудного спектра движений, возникающих в системе после удара. Однако, от момента удара, зависит не плотность амплитудного спектра, а фазовый спектр [13, 16, 26].

При исследовании фазовых соотношений между действием внешней силы и откликом осциллятора, ранее было установлено, что отклик последнего всегда отстает от воздействия [16, 17]. Поэтому, в случае воздействия на балку внешней силы, при исследовании затухающих колебаний моделируемой системы, когда тело одновременно совершает одинаковые по направлению движения, сравниваемые спектры должны отличаться друг от друга только сдвигом [16].

Согласно [29-31], между существующими характеристиками, описывающими колебательные свойства рассматриваемой деформируемой системы, существует взаимосвязь, которая позволяет определить величину сдвига фазы $tg\varphi$ по выражению

$$tg\varphi = \frac{x \cdot k}{v_0} \quad (14)$$

Действительно, из-за неоднородности материала балки, с учетом величины внешней силы, при наличии податливой опоры, деформация будет отставать от перемещения во времени на величину сдвига фазы $tg\varphi$, которая зависит от физико-

механических свойств балки, ее массы и жесткости податливой опоры. Исходя из этого, деформации, вызванные соответствующими перемещениями, достигают своего наибольшего значения не одновременно с окончанием действия внешней силы, а через некоторую величину $tg\varphi$, одно после другого.

Промежуток времени t_n , (с) между окончанием действия внешней силы и перемещением балки, когда последние достигают наибольшего значения, определяется по выражению [26]

$$t_n = \frac{tg\varphi T}{2\pi} \quad (15)$$

Считаем, что за время удара $t_{уд}$, (с), внешняя сила $P=mg$, (Н) совершает работу A , (Дж), в результате которой балка перемещается и деформируется. Мощность, N , (Вт), затрачиваемая на перемещение и деформирование балки, с учетом времени, определяется по выражению [4, 12]

$$N = \frac{A_N}{t_{уд} + t_n} \quad (16)$$

где $t_{уд}$ - продолжительность удара, (с).

Продолжительность удара $t_{уд}$, (с) определяется по выражению [31]

$$t_{уд} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{x}{g}} \quad (17)$$

Работа A_N , (Дж), затрачиваемая на сжатие пружины, накапливается в сжимаемом теле в виде потенциальной энергии, а выражение для определения этой величины имеет вид [12]

$$A_N = \frac{cx^2}{2} \quad (18)$$

На рис. 7 представлены графики, отражающие изменение величины сдвига фазы во времени $tg\varphi$, продолжительности удара $t_{уд}$ (с) и мгновенной мощности N , (Вт), затрачиваемой на сжатие пружины при падении на балку длиной L , (м) груза массой $m=0.2$ кг.

Из приведенных зависимостей (рис. 7) видно, что с увеличением времени удара $t_{уд}$, (с), когда перемещения балки X , (м) так же увеличивается, увеличивается сдвиг фазы во времени $tg\varphi$ и значение мгновенной мощности N , (Вт), затрачиваемой на перемещение и деформирование балки. В результате выполнения такой работы, за определенный промежуток времени, равный $\Delta t=t_{уд} + t_n$, (с), происходит сжатие пружины. Очевидно, чем продолжительнее удар $t_{уд}$, (с) и больше значение сдвига фазы во времени $tg\varphi$, с учетом места соударения породного блока с балкой относительно податливой опоры, тем больше величина мгновенной мощности, которая необходима для сжатия пружины (рис. 7).

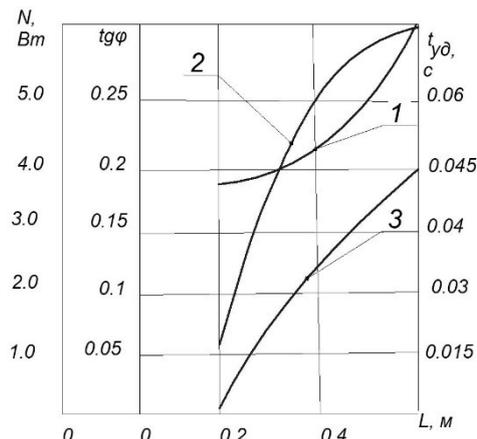


Рис. 7 – Графики изменения величины сдвига фазы во времени $tg\varphi$, продолжительности удара $t_{уд}$ (с) и мгновенной мощности N , (Вт), затрачиваемой на перемещение и деформирование балки, при падении груза массой $m=0.2$ кг: 1- $tg\varphi$; 2- $t_{уд}$ (с); 3- N , (Вт)

Определим теперь величину ударной силы $P_{уд}$, (Н) при падении груза массой m , (кг) на балку с различной высотой H , (м), но с учетом того, что балка имеет различные опорные связи. Так, согласно второго закона Ньютона [24]

$$m\bar{d}V = \bar{P}dt \quad (19)$$

С использованием теоремы о среднем [12], считаем что величина ударной силы определяется как

$$P_{уд} = \frac{mV}{t_{уд}} \quad (20)$$

На рис. 8, представлены графики, отражающие изменение величины ударной силы $P_{уд}$, (Н) при падении груза массой m , (кг) на балку длиной L , (м) с жесткой или податливой опорой.

Установлено, что с увеличением высоты падения груза на балку, величина ударной силы $P_{уд}$, (Н) при наличии в рассматриваемой деформируемой системе податливой опоры постоянной жесткости, уменьшается в 2,8 раза, в сравнении с вариантом, в котором моделируемая балка имеет жесткие опорные связи (рис. 8).

В результате выполненных лабораторных исследований устойчивости пород кровли угольного пласта, представленной в виде балки с податливой опорой постоянной жесткости, установлено, что при динамических нагрузках, динамическая составляющая в общем прогибе балки, отражает мгновенное сжатие податливой опоры, по отношению к статическому действию. Из этого следует, что динамические перемещения в рассматриваемой деформируемой системе, сводятся к минимуму, когда статические смещения принимают максимальные значения. При определении перемещений деформируемой системы, которая содержит податливые опорные связи, при действии динамических нагрузок, кроме деформаций изгиба балки, необходимо учитывать податливость опор и место соударения падающего груза с балкой, относительно податливой опоры.

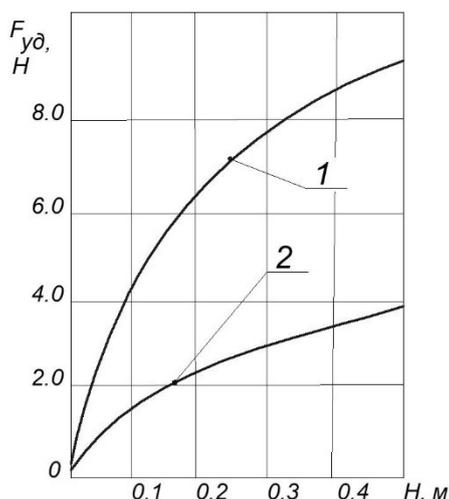


Рис. 8 – Графіки зміни величини ударної сили $F_{уд}(H)$ при падінні груза масою m , (кг) на балку довжиною L , (м) існуючої різних опорних зв'язей, з урахування висоти падіння H , (м): 1- з жорсткими опорними зв'язями; 2- з підатливою опорою; $m=0.2$ кг; $L=0.6$ м

Таким чином, при діянні динамічних навантажень на балку з різними варіантами опорних зв'язей, геометричний параметр X , (м), що характеризує переміщення балки, визначає напружено-деформоване стан системи.

Висновки

Експериментальна задача про вплив динамічних навантажень на стійкість кровлі в вуглеводородному масиві, що містить виробку, в якій бокові породи вугільного пласта вважаються балкою, з різними видами опорних зв'язей, може бути розв'язана методами теорії еластичності, з урахуванням того, що встановлено закон руху розглянутої деформованої системи і, визначено моменти часу, при яких переміщення балки-сміщення бокових порід, досягають максимальних значень. При наявності жорстких опорних зв'язей в розглянутої деформованої системі, остання є більш чутливою до прояву ударних навантажень. При наявності в системі підатливих опорних зв'язей, кількість енергії, витраченої для деформування балки, залежить від місця соударення падаючої породи з балкою, відносно підатливої опори.

Список літератури

1. **Николин, В. И.** Снижение травматизма от проявлений горного давления / **Николин В. И., Подкопаев С. В., Агафонов А. В., Малеев Н. В.** – Донецк: Норд-Пресс, 2005. – 332 с.

2. **Жуков, В. Е.** Малоотходная технология добычи угля **В. Е. Жуков, В. В. Выстороп, А. М. Колчин и [др.]**. – К.: Техника, 1984. – 144 с.
3. **Зборщик, М. П.** Механизм повышения устойчивости кровли в лавах при применении закладки выработанного пространства / **М. П. Зборщик, С. В. Подкопаев** // *Уголь Украины*. – 1992. – № 5. – С. 20-23.
4. **Шакирзянов, Р. А.** Динамика и устойчивость сооружений / **Р. А. Шакирзянов, Ф. Р. Шакирзянов**. – Казань: Изд-во Казанс. гос. архит-стр. ун-та, 2005. – 120 с.
5. **Liashok, Ya.** Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development / **Ya. Liashok, I. Jordanov, D. Chepiga, S. Podkopaiev** // *Mining of Mineral Deposits*. – 2018. – Vol. 12, Issue 4. – P. 9-19. – doi: 10.1547/mining12.04.009.
6. **Якоби, О.** Практика управления горным давлением / **О. Якоби**. – М.: Недра, 1987. – 566 с.
7. **Викторов, С. Д.** Сдвигание и разрушение горных пород / **С. Д. Викторов, М. А. Иофис, С. А. Гончаров**. – М.: Наука, 2005. – 277 с.
8. **Шашенко, А. Н.** Геомеханика / **А. Н. Шашенко, В. П. Пустовойтенко, Е. А. Сдвижкова**. – К.: Новый друк, 2016. – 528 с.
9. **Борисов, А. А.** Механика горных пород и массивов / **А. А. Борисов**. – М.: Недра, 1980. – 360 с.
10. **Беляев, Н. М.** Сопrotивление материалов / **Н. М. Беляев**. – М.: Наука, 1965. – 856 с.
11. **Циглер, Ф.** Механика твердых тел и жидкостей / **Ф. Циглер**. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая механика», 2002. – 912 с.
12. **Акимов, В. А.** и др. Теоретическая механика. Динамика. В 2 ч. Ч 2: Динамика материальной точки / Под общ. ред. проф. **А.В. Чигарева**. – Минск: Новое знание, 2010. – 863 с.
13. **Baruh, H.** Applied Dynamics / **H. Baruh**. – Taylor Francis Group. LLS, 2015. – 872 p.
14. **Ginsberg, I.** Engineering Dynamics / **I. Ginsberg**. – Cambridge University Press, 2008. – 726 p.
15. **Kleppner, D.** An introduction to Mechanics / **D. Kleppner, R. Kolenkow**. – Cambridge University Press, 2014. – 542 p.
16. **Стрелков, С. П.** Введение в теорию колебаний / **С. П. Стрелков**. – СПб.: Изд-во «Лань», 2005. – 440 с.
17. **Ebrahimi, F.** Advances in Vibration. Annalistic Research. In Tech. / ed. **F. Ebrahimi**. – 2011. – 456 p.
18. **Гусев, А. Ф.** Прикладная теория колебаний / **А. Ф. Гусев, М. В. Навоселова**. – Тверской госуд. ун-т, 2017. – 160 с.
19. Національний стандарт України. Методи випробування цементу. Частина 1. Визначення міцності (EN 196-1:2005, IDT) ДСТУ EN196-1:2007. Київ, Мінбуд України, 2007. – 30 с.
20. **Борщ-Компониц, В. И.** Практическая механика горных пород / **В. И. Борщ-Компониц**. – М.: Из-во «Горная Книга», 2013. – 322 с.
21. **Дворкин, Л. И.** Испытания бетонов и растворов. Проектирование их составов / **Л. И. Дворкин, В. И. Гоц, О. Л. Дворкин**. – М.: Инфра-Инженерия, 2015. – 418 с.
22. **Бриджмен, П. В.** Анализ размерностей / **П. В. Бриджмен**. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 148 с.

23. Яблонский, С. А. Курс теории колебаний / С. А. Яблонский, С. С. Норейко. – М.: Изд-во BHV, 2007. – 336 с.
24. Трофимова, Т. И. Курс физики / Т. И. Трофимова. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 560 с.
25. Обиралов, А. И. Фотограмметрия / А. И. Обиралов, А. Н. Лимонов, Н. А. Гаврилова. – М.: Недра, 1969. – 392 с.
26. Bottega, W. J. Engineering Vibrations / W. J. Bottega. – CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006. – 727 p.
27. Baddour, N. Recent Advances in Vibration Analysis / N. Baddour // In Tech., Rijeka, Croatia, 2011. – 236 p. – doi: 10.5772/861.
28. Ковалева, Н. В. Определение оптимальных параметров демпфирования в системах сейсмоизоляции / Н. В. Ковалева, Ю. Л. Рутман, Г. В. Давыдова // *Инженерно-строительный Журнал. Magazine of Civil Engineering*. – 2013. – № 5. – С. 107-115. – doi 10.5862/MCE.40.12.
29. Водопьянов, В. И. Исследование демпфирующих свойств материалов / В. И. Водопьянов, А. А. Белов. – Волгоград, ВолгГТУ, 2001. – 12 с.
30. Meirovitch, L. Fundamentals of Vibrations / L. Meirovitch. – Mc Graw- Hill, 2001. – 806 p.
31. Кильчевский, Н. А. Теория соударений твердых тел / Н. А. Кильчевский. – Киев: Наук. думка, 1969. – 246 с.
10. Belyaev, N. Soprotivleniye materialov [Strength of materials]. M., Nauka, 1965, 856.
11. Ziegler, F. Mekhanika tverdykh tel i zhidkostey [Mechanics of solids and liquids]. Izhevsk: SIC "Regular and chaotic mechanics", 2002, 912.
12. Akimov, V. Teoreticheskaya mekhanika. Dinamika. [Theoretical mechanics. Dynamics]. Dinamika material'noy tochki. Under. ed. of prof. A. V. Chigarev. Minsk: New knowledge, 2010, 863.
13. Baruh, H. Applied Dynamics. Taylor Francis Group, LLS, 2015, 872.
14. Ginsberg, I. Engineering Dynamics. Cambridge University Press, 2008, 726.
15. Kleppner, D., Kolenkow, R. An introduction to Mechanics. Cambridge University Press, 2014, 542.
16. Strelkov, S. Vvedeniye v teoriyu kolebaniy [Introduction to the theory of oscillations]. SPb.: Publishing house "Lan", 2005, 440.
17. Ebrahimi, F. Advances in Vibration Analysis Reserch. In Tech. 2011, 456.
18. Gusev, A., Navoselova, M. Prikladnaya teoriya kolebaniy [Applied vibration theory] Tver State. Univ, 2017, 160.
19. Natsional'nyy standart Ukrayiny. Metody vyprovuvannya tsementu. Chastyna 1. Vyznachennya mitsnosti (EN 196-1: 2005, IDT) DSTU EN196-1: 2007. Kiev, Minsk Ukrini, 2007, 30.
20. Borscht-Komponiyets, V. Prakticheskaya mekhanika gornykh porod [Practical mechanics of mountain rocks]. M., From-in "Mountain Book", 2013, 322.
21. Dvorkin, L. Gotz, V., Dvorkin, O. Ispytaniya betonov i rastvorov. Proyektirovaniye ikh sostavov. M.: Infra-Engineering, 2015, 418.
22. Bridgman, P. Analiz razmernostey. Izhevsk, Scientific and Research Center "Regular and Chaotic Dynamics", 2001. 148.
23. Yablonsky, S., Noreiko, S. Kurs teorii kolebaniy [Oscillation course]. M, Izd-vo BHV, 2007, 336.
24. Trofimova, T. Kurs fiziki [Physics course]. M., Publishing Center "Academy", 2006, 560.
25. Obiralov, A., Limonov, A. Gavrilova, N. Fotogrammetriya [Photogrammetry]. M., Nedra, 1969, 392.
26. Bottega, W. J. Engineering Vibrations. CRC Press, Taylor&Francis Group, 2006, 727p.
27. Baddour, N. Recent Advances in Vibration Analysis. In Tech., Rijeka, Croatia, 2011, 236, doi: 10.5772/861.
28. Kovaleva, N., Rutman, Yu., Davydova, G. Opre-deleniye optimal'nykh parametrov dempfirovaniya v sistemakh seysmoizolyatsii. *Construction Engineering Journal. Magazine of Civil Engineering*, 2013, 5, 107-115, doi 10.5862/MCE.40.12.
29. Vodopyanov, V., Belov, A. Issledovaniye dempfiruyushchikh svoystv materialov [Investigation of the damping properties of materials]. Volgograd, VolgGTU, 2001, 12.
30. Meirovitch, L. Fundamentals of Vibrations. Mc Graw. Hill, 2001, 806.
31. Kilychevsky, N. A. Teoriya soudareniy tverdykh tel [Theory of solid collision. Kiev. Naukova Dumka, 1969, 246.

References (transliterated)

1. Nikolin, V, Podkopaev, S., Agafonov, A., Maleev, N. Snizheniye travmatizma ot proyavleniy gornogo davleniya [Reduction of injury from the manifestations of rock pressure]. Donetsk, Nord-Press, 2005, 332.
2. Zhukov, V., Vistorop, V., Kolchin, A. and others Malootkhodnaya tekhnologiya dobychi uglya [Low waste coal mining technology]. K., Technics, 1984, 144.
3. Zborshchik, M., Podkopaev, S. Mekhanizm povysheniya ustoychivosti krovliv v lavakh pri primenenii zakladki vyrabotannogo. Coal of Ukraine, 1992, 5, 20-23.
4. Shakirzyanov, R., Shakirzyanov, F. Dinamika i ustoychivost' sooruzheniy [The mechanism of increasing the stability of the roof in the pits when using the laying of a goaf]. Kazan, Publishing House Kazans. state arch-pp. University, 2005. 120.
5. Liashok, Ya., Iordanov, I., Chepiga, D., Podkopaiev, S. Experimental studies of the seam openings competence in different methods of protection under pitch and steep coal seams development. *Mining of Mineral Deposits*, 2018, 12, 4, 9-19, doi: 10.1547/mining12.04.009.
6. Jacobi, O. Praktika upravleniya gornym davleniyem [Practice of controlling rock pressure]. M., Nedra, 1987, 566.
7. Viktorov, S., Iofis, M., Goncharov, S. Sdvizheniye i razrusheniye gornykh porod [Movement and destruction of rocks]. M., Science, 2005, 277.
8. Shashenko, A., Pustovoitenko, V., Sdvizhikova, E. Geomekhanika [Geomechanics]. K., New druk, 2016, 528.
9. Borisov, A. Mekhanika gornykh porod i massivov. M., Nedra, 1980, 360.

Сведения об авторах (About the Authors)

Иорданов Игорь Вячеславович – кандидат технических наук, соискатель кафедры «Охрана труда», Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина; e-mail: gendir@eme.kiev.ua.

Igor Iordanov – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Applicant, State Higher Education Establishment "Donetsk National Technical University", Pokrovsk, Ukraine; e-mail: gendir@eme.kiev.ua.

Симонова Юлія Ігорівна – аспірант кафедри «Разработка месторождений полезных ископаемых», Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина; e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

Yuliia Simonova – graduate student, State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: yuliia.simonova@donntu.edu.ua.

Петренко Андрей Витальевич – ассистент кафедры «Разработка месторождений полезных ископаемых», Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина; e-mail: andrii.petrenko@donntu.edu.ua.

Andriy Petrenko – assistant of the Department of Mining of Mineral Deposits, State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: andrii.petrenko@donntu.edu.ua.

Положий Антон Витальевич – аспірант кафедри «Разработка месторождений полезных ископаемых», Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина; e-mail: anpolozhii@gmail.ru.

Anton Polozhii – graduate student, State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: anpolozhii@gmail.ru.

Подкопаев Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Охрана труда», Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина; e-mail: spodkopaiev@aol.com.

Serhii Podkopaiev – Doctor of Technical Sciences, State Higher Education Establishment “Donetsk National Technical University”, Pokrovsk, Ukraine; e-mail: spodkopaiev@aol.com.

Довгаль Виталий Юрьевич – генеральный директор Государственное предприятие «Мирноградуголь» Мирноград, Украина, г. Киев; e-mail: vud007007@gmail.com.

Vitaliy Dovgal – General Director of the State Enterprise “Mirnogradugol”, Mirnograd, Ukraine; e-mail: vud007007@gmail.com.

Король Антон Вячеславович – инженер, ПСП «Шахтоуправление «Добропольское» ООО «ДТЭК Добропольеуголь», г. Доброполье, Украина; e-mail: akorolv2017@gmail.com.

Anton Korol – engineer, PSP “Dobropolskoe Mine Administration” LLC “DTEK Dobropolyeugol”, Dobropolye, Ukraine; e-mail: akorolv2017@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Иорданов, И. В. Исследование на моделях устойчивости пород кровли угольного пласта при действии динамических нагрузок / **И. В. Иорданов, Ю. И. Симонова, А. В. Петренко, А. В. Положий, С. В. Подкопаев, В. Ю. Довгаль, А. В. Король** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 17-26. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.03.

Please cite this article as:

Iordanov, I., Simonova, Y., Petrenko, A., Polozhii, A., Podkopaiev, S., Dovgal, V., Korol, A. Research on models of stability of rocks of the roof of coal strays during dynamic loads. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2019, 5 (1330), 17-26, doi:10.20998/2413-4295.2019.05.03.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Иорданов, И. В. Дослідження на моделях стійкості порід покрівлі вугільного пласта при дії динамічних навантажень / **И. В. Иорданов, Ю. И. Симонова, А. В. Петренко, А. В. Положий, С. В. Подкопаев, В. Ю. Довгаль, А. В. Король** // *Вісник НТУ «ХПИ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2019. – № 5 (1330). – С. 17-26. – doi:10.20998/2413-4295.2019.05.03.

АНОТАЦІЯ Метою роботи є вивчення стійкості порід покрівлі вугільного пласта при дії динамічних навантажень. Для досягнення поставленої мети були виконані лабораторні дослідження на моделях з еквівалентних матеріалів, коли покрівля вугільного пласта була представлена у вигляді балки з податливою опорою - пружиною постійної жорсткості. В результаті виконаних досліджень встановлено, що при дії динамічних навантажень, тобто при силовому впливі падаючого вантажу на балку, її прогин досягає максимальних значень не одночасно із закінченням дії зовнішньої сили, а одне після іншого, через деякий проміжок часу. При такій взаємодії балки з податливою опорою постійної жорсткості, кількість енергії, що витрачається на стиснення пружини, залежить від тривалості удару і проміжку часу, між закінченням дії зовнішньої сили і переміщенням балки, коли ця величина досягає максимальних значень. Геометричний параметр, що відображає переміщення балки при прояві динамічних навантажень, коли встановлений закон її руху і визначено моменти часу, при яких переміщення досягає максимальних значень, визначає напружено деформований стан модельованої системи. При наявності в модельованій системі, жорстких опорних зв'язків, сама система стає більш чутливою до прояву ударних навантажень. Наявність піддатливих зв'язків в системі, пом'якшує дію динамічних навантажень, за рахунок зменшення жорсткості системи, що моделюється. Зміна жорсткості модельованої системи залежить не тільки від зміни згинальної жорсткості балки, але і від величини податливості опор. При наявності в модельованій системі піддатливих опор, динамічна складова в загальному прогині балки, відображає миттєве стиснення опори, по відношенню до статичної дії навантаження. Для збереження цілісності порід покрівлі вугільного пласта при дії динамічних навантажень, доцільно застосування піддатливих опор або закладки виробленого простору, що дозволить зменшити величину ударної сили падаючої породи і звести до мінімуму ймовірність руйнування бічних порід.

Ключові слова: гірський тиск; обвалення; очисний вибій; динамічні навантаження; податлива опора; закладка виробленого простору.

Поступила (received) 14.02.2019